

ANÁLISIS GEOMÉTRICO DE LA FRACTURACIÓN DEL FRENTE DE LEVANTAMIENTO DE LA SIERRA DE SAN LUIS

Daniel A. SALES¹ y Carlos H. COSTA¹

¹ Departamento de Geología, Universidad Nacional de San Luis, San Luis. Emails: sales@unsl.edu.ar, costa@unsl.edu.ar

RESUMEN

Con el propósito de conocer nuevos aspectos sobre la fracturación que caracteriza a los márgenes occidental y septentrional de la sierra de San Luis, donde se ha concentrado el levantamiento andino, se relevó a lo largo de los mismos una población de 975 fallas conteniendo estrías de fricción. Dichos datos fueron analizados mediante programas de computación que discriminan la participación proporcional de cada uno de los componentes del vector rechazo total, en función de la actitud espacial de las superficies de fallas y del ángulo de *rake* de las estrías. En el frente serrano septentrional, las fallas muestran un notorio predominio de la componente horizontal longitudinal (L) del vector rechazo total, pese a la diferente actitud espacial de las fracturas relevadas. Una situación muy semejante se observó en el frente occidental, aunque entre los sectores norte, centro y sur del mismo se reconocieron diferentes relaciones proporcionales entre el vector rechazo horizontal longitudinal (L) y las componentes del rechazo horizontal transversal (T) y vertical (V). Los resultados destacan una importante participación de la componente horizontal longitudinal en la deformación global del macizo, pero el rol de los movimientos transcurrentes en el levantamiento y deformación de este bloque pampeano, no ha podido ser aún cuantificado.

Palabras clave: *Sierras Pampeanas, análisis tectónico de fallas, fracturas.*

ABSTRACT: *Geometric analysis of the fractures of the uplift front of the Sierra de San Luis.* In order to address new issues regarding the fractures that characterize the western and northern margins of the Sierra de San Luis, where the Andean uplift has been concentrated, a population of 975 faults with preserved slickenlines was surveyed. Such data were analyzed through a software for calculating the proportional participation of each component of the total slip vector, through strike, dip and slickenline rake data. At the northern range front, fault data show a strong imposition of the longitudinal horizontal component (L), despite the variety of fault attitudes in space. A similar situation was observed at the western front, although a segmentation of its trace was established due to different proportional relationships among the horizontal longitudinal (L), horizontal transversal (T) and vertical (V) slip components. These results highlight the significant participation of the horizontal longitudinal component in the global deformation of the massif. However, the role of strike-slip movements in the uplift and deformation of this Pampean block are yet to be quantified.

Keywords: *Pampean ranges, fault slip analysis, fractures.*

INTRODUCCIÓN

La fracturación ha sido el mecanismo de deformación dominante en la sierra de San Luis desde el Paleozoico superior (Criado Roque *et al.* 1981). Sin embargo, las características del fallamiento son conocidas en sus aspectos más generales y solo han sido estudiadas en algunos sectores en función de sus rasgos geométricos, cinemáticos y dinámicos (Costa 1992). El análisis de las características cinemáticas y dinámicas del fallamiento en áreas de basamento cristalino, ha tropezado usualmente con la dificultad de obtener información confiable respecto a la cronología de los movimientos de las di-

ferentes poblaciones de fallas existentes. No obstante, existen otros datos igualmente valiosos sobre la fracturación de un macizo rocoso, que pueden obtenerse mediante el análisis de la actitud de estrías de fricción contenidas en las superficies de fallas. Aún cuando no se conocen datos sobre el sentido de movimiento y posibles edades, la disposición espacial del vector rechazo total de cada fractura y la participación proporcional en el mismo de cada una de sus componentes puede estimarse a partir de dicha información (Fig. 1a). Esto permite evaluar la importancia cuantitativa de las componentes vinculadas con acortamiento/ex-tensión, transcurrencia y rechazo vertical

en la deformación global del macizo, sustentado en una base de datos con representatividad estadística y geográfica. Para ello se han utilizado los criterios propuestos por Angelier (1979, 1984) y Costa *et al.* (1997, 2009), mediante los cuales se estiman las participaciones proporcionales de las tres componentes del vector rechazo total en función de la actitud espacial de las estrías en un plano de falla. En particular se graficaron los datos de 975 estrías distribuidas en 91 estaciones de muestreo en un diagrama de tres componentes (diagramas TriComp) (Costa *et al.* 1997, 2009), en los que se discrimina la participación proporcional de las componentes del rechazo de una falla según:

L: rechazo horizontal longitudinal, T: rechazo horizontal transversal, y V: rechazo vertical.

La contribución de cada uno de estos componentes al vector rechazo total (D), es función de los valores angulares de la inclinación del plano de falla (β) y del *rake* de la estría de fricción contenida en dicho plano (γ) (Fig. 1a). Asumiendo un valor unitario para el vector D, la representación proporcional de cada uno de los componentes L, T y V en dicho vector unitario está representado por las ecuaciones:

$$L = ||D|| \cdot \cos \gamma$$

$$T = ||D|| \cdot \sin \gamma \cdot \cos \beta$$

$$V = ||D|| \cdot \sin \gamma \cdot \sin \beta$$

Donde: $D^2 = L^2 + T^2 + V^2$

Más detalles sobre el desarrollo matemático de este concepto pueden encontrarse en Costa *et al.* (1997).

El dato derivado de la actitud espacial de cada estría está representado por un punto en el diagrama TriComp, cuya posición permite calcular la contribución proporcional de cada componente en la formación del vector rechazo total (D), aun cuando no sea posible cuantificar el mismo (Fig. 1b).

La presente contribución pretende aportar información al conocimiento de la geometría de la fracturación del sector relacionado al frente de levantamiento neotectónico de la sierra de San Luis, asociado al sistema de fallas homónimas (Flores 1969, Costa 1992, Costa *et al.* 1999a y 2000). El sistema de fallas de San Luis se expone con orientación submeridiana a lo largo de una distancia aproximada de 110 km, entre las localidades de Quines y San Luis y aparece distribuido en la compleja escarpa occidental de la sierra homónima (Fig. 2). Se evalúan también las características geométricas de la fracturación en el frente norte de la sierra de San Luis, con dirección predominante E-O (Fig. 2).

Mediante la mencionada metodología se pretende analizar la participación proporcional de cada componente en el mo-

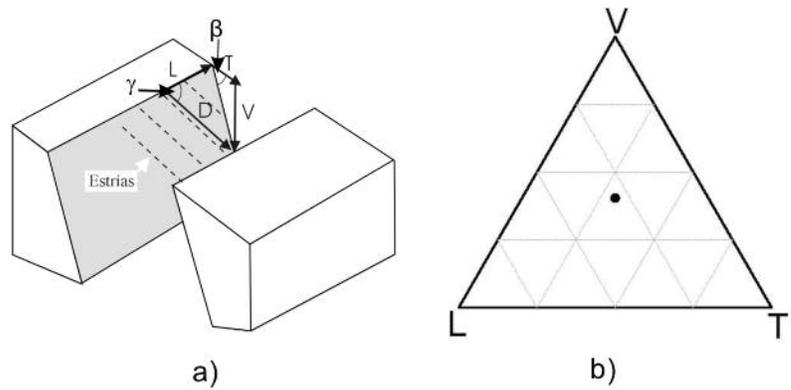


Figura 1: a) Representación de la participación proporcional las tres compontes del rechazo de una falla. β : ángulo de buzamiento, γ : ángulo de rake; b) diagrama TriComp donde se representa mediante un punto la participación proporcional de las componentes del vector rechazo total indicadas en 1a.

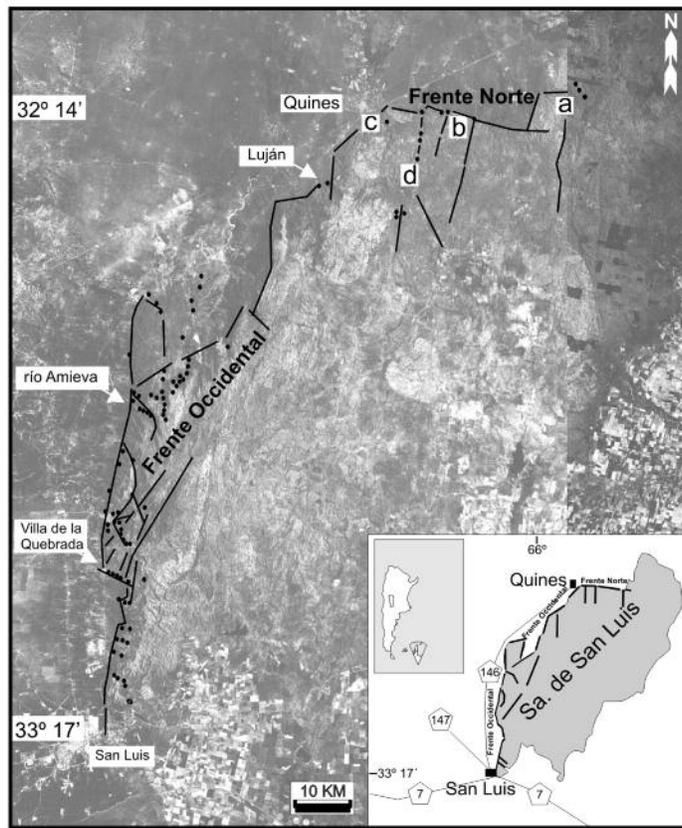


Figura 2: Croquis de ubicación e imagen de la sierra de San Luis donde se distinguen con puntos las estaciones de relevamiento de datos.

vimiento de las fallas y su rol en la fracturación global del macizo, pese a no disponer de información sobre la cronología de estas deformaciones. Para este fin, se realizó un relevamiento sistemático de los datos estructurales (rumbo, inclinación y *rake* de estrías de fricción) de fallas distribuidas a lo largo del frente de levantamiento neotectónico y sectores aledaños, con o sin evidencias de indicadores

cinemáticos.

Partiendo de la información que puede obtenerse a partir de las características espaciales del vector de desplazamiento, se ha considerado que un relevamiento estadístico de fallas a lo largo del frente de levantamiento serrano puede aportar información sobre las siguientes cuestiones:

- ¿El frente de levantamiento de la sierra

de San Luis, presenta uniformidad en cuanto a las características geométricas del desplazamiento de las fallas o por el contrario existen cambios en la naturaleza del desplazamiento de las mismas?

- ¿Cuál es la importancia de la componente transcurrente (rechazo horizontal longitudinal -L-) en la deformación frágil del macizo?

- ¿Existen diferencias en la composición del vector rechazo total debidas a diferencias en la actitud espacial de las fracturas (rumbo, inclinación) y/o a su posición espacial en diferentes fallas del sistema?

- ¿Existen diferencias geométricas entre el movimiento de fallas próximas al frente de fallamiento principal y aquellas que ocupan una posición más interna en el macizo?

El análisis de estas cuestiones puede ayudar a comprender mejor la deformación frágil global de un macizo que presenta una evolución geológica prolongada y compleja. Se parte del supuesto que gran parte de sus fracturas son discontinuidades heredadas de episodios previos de deformación, posiblemente con la impronta de diferentes tipos de regímenes de esfuerzos, cuya reactivación ha condicionado el comportamiento mecánico del macizo serrano durante el acortamiento andino.

MARCO TECTÓNICO

la sierra de San Luis, pertenece a las denominadas Sierras Pampeanas sudorientales y ha sido caracterizada por distintos autores como una morfoestructura ascendida y basculada hacia el este, principalmente durante de la orogenia andina, por fallas marginales inversas con vergencia occidental (González Bonorino 1950, Flores y Criado Roque 1972, Criado Roque *et al.* 1981, Costa 1992, Costa *et al.* 1999a y 2000, Sales y Costa 2009). Dicho estilo estructural determinó el desarrollo de un perfil topográfico transversal asimétrico, con laderas occidentales cortas y abruptas, y pendientes con menor inclinación en la ladera oriental, la que pre-

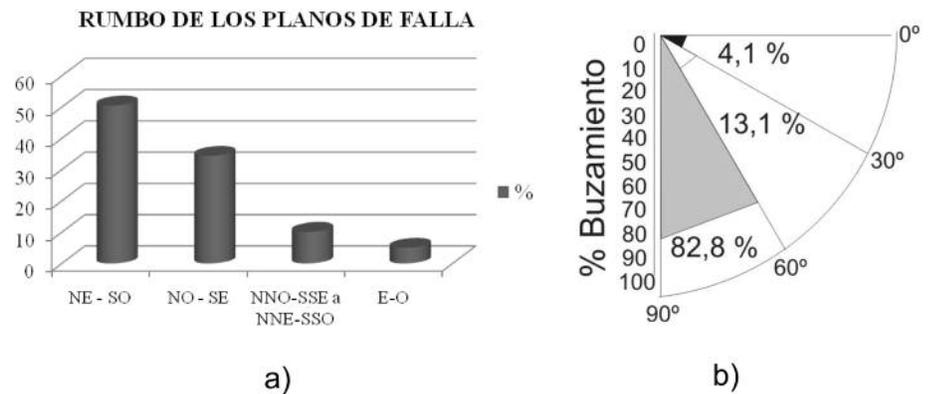


Figura 3: a) Porcentaje de los rumbos de los planos de fallas del frente septentrional; b) representación gráfica porcentual de los buzamientos predominantes en los planos de fallas del frente septentrional.

senta mayor desarrollo (Fig. 2). En esta última ladera se encuentran comúnmente preservados remanentes de paleosuperficies de erosión de extensión regional.

Existe acuerdo general en considerar que la fracturación ha sido el estilo tectónico dominante en el bloque de la sierra de San Luis a partir del Carbonífero, con un notorio control de las estructuras internas del basamento cristalino en las principales familias de fracturas (Criado Roque *et al.* 1981, Costa 1992).

La litología afectada por la fracturación en el área de estudio corresponde principalmente rocas pertenecientes al Complejo Nogolí (Sims *et al.* 1997), en el que se agrupan a rocas metamórficas formadas por paragneises, ortogneises, anfibolitas, migmatitas y esquistos. Dichas litologías han sido afectadas por varias fases de metamorfismo y deformación que han alcanzado condiciones de alto grado metamórfico en un importante sector de esta litozona (Costa *et al.* 1999a).

En el sector sur del frente de levantamiento se expone el margen occidental del plutón granítico La Escalerilla, de disposición elongada en dirección meridiana y con una doble inflexión a la latitud de Villa de la Quebrada, conocida como monoclinas de la Escalerilla (Pastore y Ruiz Huidobro 1952, González Bonorino 1961, Ortiz Suárez *et al.* 1992, Costa *et al.* 2000) (Fig. 2).

ANÁLISIS GEOMÉTRICO DE LAS POBLACIONES DE FALLAS

Frente norte

El frente septentrional de la sierra de San Luis se caracteriza por presentar una orientación general E-O, destacada por una clara rectilinearidad, en apariencia controlada por estructuras de fracturación (Fig. 2). No obstante, las fracturas con este tipo de orientación tienen escasa representación estadística en los relevamientos de las poblaciones de fallas medidas en el terreno (N= 99). Según se muestra en la figura 3a, predominan los planos de falla con rumbo NE (51 %) con buzamiento de alto ángulo al NO sobre los que inclinan hacia el SE, seguidos de planos con rumbo NO (34%) con buzamiento al NE y SO. En menor proporción se relevaron planos con dirección NNO a NNE (10%) donde predominan orientaciones NNO y buzamiento hacia el NE. Por último, se mensuraron superficies de fallas con dirección E-O (5%) (Fig. 3a). El 82,8% de las fallas presentan inclinación de alto ángulo (61°-90°), principalmente entre 70° y 90°, seguidos por planos con buzamiento entre los 31° y 60° (13,10%) y en menor proporción con el 4,10% buzamiento de bajo ángulo (0° - 30°) (Fig. 3b).

Las fracturas con rumbo ENE presentan una dirección subparalela a la disposición

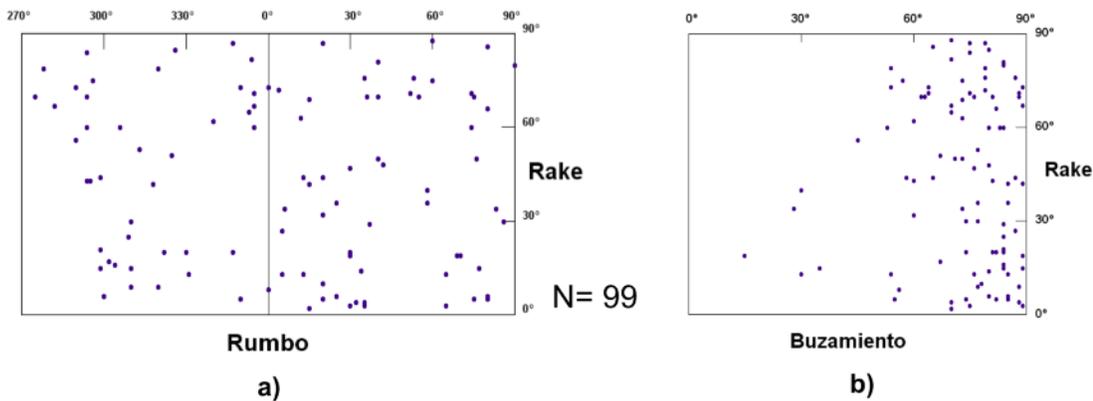


Figura 4: a) Diagrama donde se relaciona el rake de las estrías de fricción y el rumbo de los planos, b) relación angular entre los ángulos de *rake* y el buzamiento de las fallas.

en planta del frente norte de la sierra, pero sus planos muestran escasa imposición estadística como para resultar en un rasgo macroscópico tan notorio (Fig. 2). Tampoco se han reconocido zonas de cizalla importantes ni frentes de corrimiento asociados a fallas con orientación E-O. Aún considerando que el relevamiento realizado es de tipo selectivo, la importante impronta de las fracturas E-O en imágenes aéreas guarda escasa correlación con su participación numérica en los datos de campo.

La figura 4 muestra la relación existente entre el ángulo del *rake* respecto al rumbo y buzamiento de los planos de falla. En el diagrama de la figura 4a, se reconoce una importante dispersión de los datos que representan los valores angulares del *rake* de las estrías de fricción respecto al rumbo en la población total de fallas analizadas para el frente de levantamiento norte. Se destaca el predominio de ángulos de *rake* alto (60°-90°) y de bajo ángulo (0°-30°), en las diferentes direcciones de los planos de fractura.

La figura 4b, muestra la relación entre el ángulo de *rake* y la inclinación de las superficie de fractura, donde se evidencia la preponderancia de ángulos de buzamiento altos, tal como lo indicado en la figura 3b. Dentro de los planos que tienen buzamientos de bajo ángulo (0°-30°) los valores angulares de *rake* de las estrías de fricción presentan una importante dispersión que varía de bajo (0°-30°) a alto ángulo (60°-90°).

Para diferenciar la relación existente en-

tre la actitud espacial de los planos de falla y el ángulo de *rake* de las estrías de fricción, se dividió el frente norte en tres secciones (Fig. 5), representado geográficamente por los sectores: este (Fig. 2a), centro (Fig. 2b) y oeste (Fig. 2c). De esta manera se pudo observar que el *rake* de las estrías de fricción varía desde el extremo este al oeste. En el extremo este y centro, se analizaron 48 planos de fallas donde predominan aquellos con rumbo NE, buzamiento de alto ángulo (70°-90°) y que contienen estrías de fricción con ángulos de *rake* bajos (0°-30°). En menor proporción se determinaron planos de fallas con rumbo NO con similar buzamiento (70°-90°), pero los ángulos de *rake* de las estrías de fricción difieren de los planos anteriores por ser de alto ángulo (75°-90°) (Fig. 5a). Los planos con orientación ENE tienen buzamientos de alto ángulo y los ángulos de *rake* de las estrías de fricción son mayoritariamente de bajo ángulo (0°-30°) seguidos por estrías con *rake* de medio a alto ángulo (30°-70°). En el extremo oeste, aunque la cantidad de datos es escasa (N=8), predominan planos de fracturas con rumbo NE y buzamiento de alto ángulo (70°-90°), con elevados valores angulares de *rake* (60°-90°) (Fig. 5b).

El último sector analizado, es hacia el interior del frente serrano (Fig. 2d), donde sobre un total de 43 planos de falla se observa que las direcciones más importantes tienen rumbo NO y NNO sobre las NE. La población de fallas analizada presenta alto ángulo de buzamiento que va-

ría entre los 55° a 90°. En los planos más importantes (NO) los valores angulares de *rake* se dispersan en rangos (0°-25° y 40°-60°), mientras que los planos con orientación NNO preservan estrías de alto ángulo (60°-75°). Los planos con rumbo NE tienen ángulos de *rake* elevado (70°-80°) (Fig. 5c).

Para el análisis geométrico tridimensional del vector de desplazamiento, se procesaron los datos de rumbo y buzamiento de los planos de fallas conjuntamente con el *rake* de las estrías de fricción a partir del diagrama TriComp (Costa *et al.* 1997, 2009). En el gráfico que representa a todas las poblaciones de fallas analizadas para este frente (Fig. 6), se reconoce un predominio de la componente L respecto de V, mientras que la componente T tiene escasa participación. Esto indica una reducida importancia del acortamiento/extensión asociado al desplazamiento total de las mismas. La nube de datos que se encuentra sobre el vértice L (Fig. 6, en círculo), presenta la siguiente participación proporcional de sus componentes: L (70-98%), V (5-25%) y T (0-15%) respecto al vector rechazo total D.

A medida que aumenta el valor angular del *rake* de las estrías de fricción, se observa que la componente L disminuye su participación proporcional (entre 5 y 35% de D) y en consecuencia aumenta la importancia de V (45-80%) y T (0-30%) aproximadamente (Fig. 6). Estas superficies corresponden en su mayoría a fallas oblicuas asociadas principalmente a poblaciones situadas en cercanías de los ex-

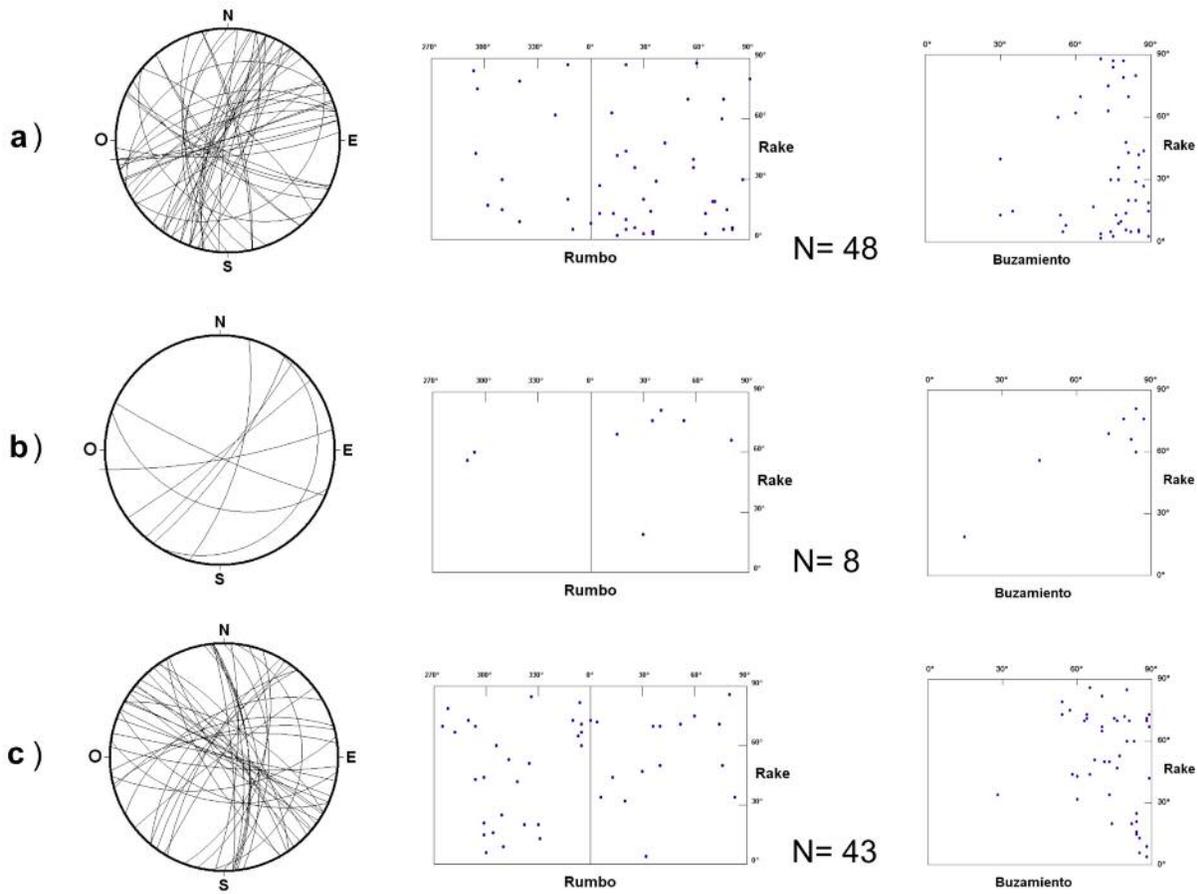


Figura 5: Proyección ciclográfica y diagramas *rake vs. rumbo* – *rake vs. buzamiento* de los distintos sectores del frente norte: a) sector este; b) sector centro; c) sector oeste.

tremos oriental y occidental de este frente, y en el sector interno del macizo (Fig. 2).

La figura 7, discrimina la participación de L, V y T en la determinación de D según los sectores anteriormente analizados. La figura 7a, grafica los valores de las poblaciones de fallas que corresponden al extremo oriental y central del frente norte, donde se observan la concentración de datos en dos nubes diferentes, similar al diagrama general del sector (Fig. 6). En la concentración más importante predominan bajos ángulos de *rake*, indicando ello el predominio de la componente L sobre V y la escasa participación de T en el vector rechazo total de las fallas (Fig. 7a, círculo en trazo continuo). Pertenecen a familias de fallas con rumbo NE y buzamiento de alto ángulo (70°-90°). En este sector la participación proporcional de cada componente del vector rechazo to-

tal varía dentro de los siguientes segmentos: L (75-98%) y en menor cantidad hasta 50%, V (5-25%) y T (0-20%). En el tramo central del frente norte, predominan bajos ángulos de *rake* (0°-40°) en planos de fallas con dirección NE y alto ángulo de buzamiento (70°-90°), lo que indica la importancia de la componente L respecto de V.

La segunda concentración de datos (Fig. 7a, círculo en trazo discontinuo) tiene que ver con el incremento de la componente V respecto de L, cuyo porcentaje de participación esta dado por V (60-80%), L (5-25%) y T (10-25%) y pertenecen a planos de falla con rumbo NO y NE, con buzamientos de alto ángulo (70°-85°).

La figura 7b, representa los escasos datos relevados en el extremo occidental del frente (N=8). Allí prevalece la componente V respecto a L, principalmente en

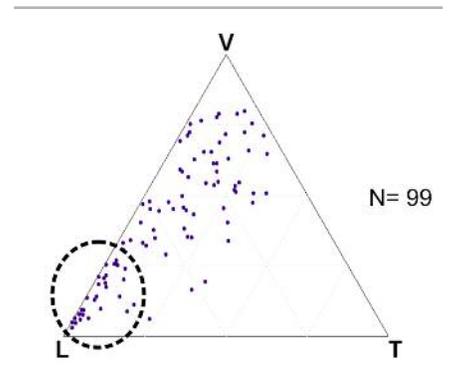


Figura 6: Diagrama TriComp de la totalidad de los datos analizados para el frente norte (N=99).

los planos con rumbo NE y buzamientos entre 75° y 85°, debido al predominio de altos valores de ángulos de *rake* (60°-90°). La participación proporcional de las tres componentes del vector de desplazamiento varía de la siguiente manera: V (55-80%), L (35-85%) y T (10-20%) (des-

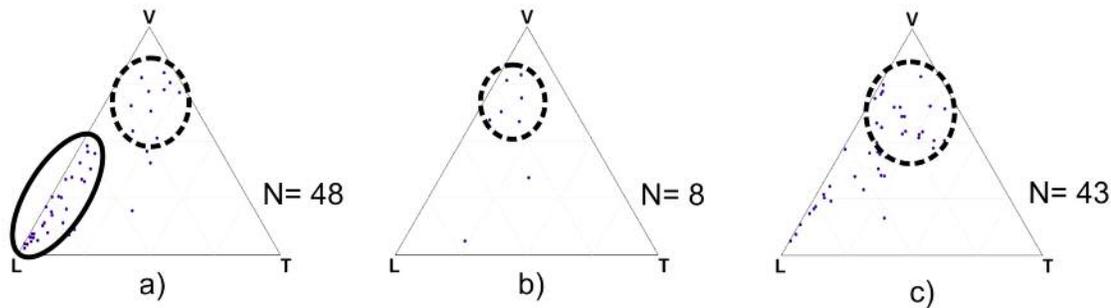


Figura 7: Diagrama TriComp con representación de las poblaciones de falla del frente norte: a) sector oriental y central (N=48); b) sector occidental (N=8); c) sector interno del macizo serrano (N=43). Ver detalles en el texto.

tacado con un círculo en la figura 7b). Los datos analizados en el interior serrano (Fig. 2d) presentan similares características geométricas que el sector oriental, pero con ligero predominio de la componente V (25-50 %) sobre L (20-45 %) respecto a D y menor participación de la componente T (0-40%) (Fig. 7c). De las poblaciones de fallas del diagrama de la figura 7c, se puede deducir que los planos de fallas con *rake* de bajo ángulo concentrados entre los 5° y 25°, están contenidos en planos principalmente con rumbo NO y buzamientos entre los 80° y 90°. Mientras que las familias de fallas donde la componente V prevalece, corresponden a planos con actitud NO, NNO y NE y buzamientos entre 55° y 90°. Las estrías de fricción presentan aquí ángulos de *rake* comprendidos predominantemente entre 65° y 80° (en círculo).

Frente occidental

Este frente está asociado a una compleja escarpa de falla, con diversos trazos de dirección predominante N-S, pertenecientes al sistema de fallas de San Luis (Fig. 2).

La figura 8a presenta los rumbos predominantes de las 876 fallas analizadas, observándose un marcado predominio de los planos con rumbo NE-SO (45%). Aquí prevalecen buzamientos de alto ángulo al NO sobre los que lo hacen al SE, seguidos de planos de falla con dirección NO-SE (31 %) con predominio de buzamiento hacia el NE. Los planos NNO a NNE representan el 14% del total y en menor proporción los planos con dirección ENE a ONO (10%). La figura 8b, muestra los ángulos de buzamiento en las poblaciones de fallas medidas, donde se

observa el predominio de ángulos altos (61°-90°), que representan el 73,70% del total, seguido de planos con buzamiento medio variable entre 31° y 60° (21,6%), y por último con el 4,7 % planos con buzamientos bajos (0°-30°).

La figura 9 representa la relación entre el ángulo de *rake* de las estrías de fricción respecto al rumbo y buzamiento de los planos de falla, con una importante dispersión de los valores angulares del *rake* respecto a las diferentes direcciones de los planos analizados (Fig. 9a), distinguiéndose una concentración poblacional importante, con rumbo 0°-30° (en círculo) y un predominio de *rakes* de alto ángulo (60°-90°). En el diagrama *rake vs. buzamiento* (Fig. 9b), puede reconocerse un predominio de planos de falla con buzamiento de alto ángulo (60°-90°), con notoria dispersión de los valores de *rake* de las estrías de fricción.

Para caracterizar el comportamiento geométrico de las poblaciones de falla del frente de levantamiento occidental, y poder determinar la existencia de variaciones en el análisis geométrico se dividió al frente en tres sectores.

Sección norte: Corresponden a esta sección 298 datos de fallas ubicadas entre la localidad de Luján y el río Amieva (Fig. 2). Predominan superficies con rumbo meridional a submeridional asociados al rumbo del frente de levantamiento y controlados por la fábrica interna del basamento cristalino, la cual está caracterizada por altos ángulos de buzamiento (60°-90°). En menor proporción y con igual rumbo, se reconocieron superficies de falla con buzamiento entre 20° y 60°. Esto se puede observar en la figura 10 (a, b), donde se

muestra la relación existente entre el ángulo de *rake* respecto al rumbo y buzamiento de los planos de falla.

El diagrama de la figura 10a, presenta una dispersión de los datos correspondientes a los valores angulares del *rake* de la estrías de fricción, respecto al rumbo de los planos de fallas medidos. En esta figura se destaca el predominio de altos ángulos de *rake* (60°-90°), concentrados en los planos con rumbo comprendido entre 0° y 40° (en círculo), tal como lo descrito en el diagrama de la figura 9a. La figura 10b, destaca la imposición de fallas con buzamientos de alto ángulo (70°-90°), observándose la concentración en dos sectores de los valores angulares de *rake* de las estrías de fricción. Uno con alto ángulo de *rake* (60°-80°) (Fig. 10b, círculo con trazo discontinuo) y otro con *rakes* bajos (10°-40°) (Fig. 10b, círculo con trazo continuo). Del análisis del diagrama *rake vs. buzamiento* (Fig. 10b), se puede apreciar que para planos de buzamientos menores (20°-60°) los valores angulares de *rake* varían de medio a alto (50°-85°), mientras que los ángulos de *rake* bajos (0°-20°) se encuentran concentrados en planos de bajo a alto ángulo de buzamiento.

En la sección norte del frente de levantamiento occidental predominan las componentes L y V en la determinación de D, con una mínima participación de T (Fig. 11a). Se observa el predominio de datos sobre el segmento L-V, mediante la concentración de dos nubes de puntos indicados por dos círculos. El círculo con trazo continuo nuclea a estrías de fricción con ángulos de *rake* bajos, la mayoría con rumbo NO y en menor cantidad planos NE, reflejando el predominio de la com-

ponente L (70-90%) en el movimiento de las poblaciones de falla, respecto a V (< 25%) y en menor medida la presencia de T (< 25%). La segunda concentración de datos de fallas (Fig. 11a, círculo con trazo discontinuo), se encuentra en el sector central del diagrama, donde prevalecen estrías de fricción en planos de fallas predominantemente NE sobre las NO, donde la participación de V es importante (40-80%), respecto de L (15-40%) y T (<30%).

Sección centro: Desde el río Amieva hasta Villa de la Quebrada (Fig. 2), se relevaron 273 fallas. La familia primaria presenta rumbo NE-SO, seguidos de poblaciones de planos de fallas NO, N y E-O, con una importante concentración de datos con buzamientos altos (60°-90°).

El diagrama de la figura 10c muestra los planos de fallas con predominio NE sobre las restantes direcciones. Estos planos (NE) presentan una dispersión de los datos angulares del *rake* de la estrías de fricción. De esta figura se destaca el predominio de ángulos bajos de *rake* (0°-30°) concentrados en los planos con rumbo entre 5° y 60° (en círculo con trazo continuo), seguidos de los planos de fallas con rumbo entre 270° y 360°. La segunda concentración de datos presentan valores de *rake* de alto ángulo en una nube de datos con rumbo 10° a 40° (Fig. 10c, en círculo de trazo discontinuo).

La figura 10d relaciona los valores angulares de *rake* en función del buzamiento de las fallas. Allí se reconoce el predominio de planos con buzamientos de alto ángulo (60°-90°) seguidos de aquellos con

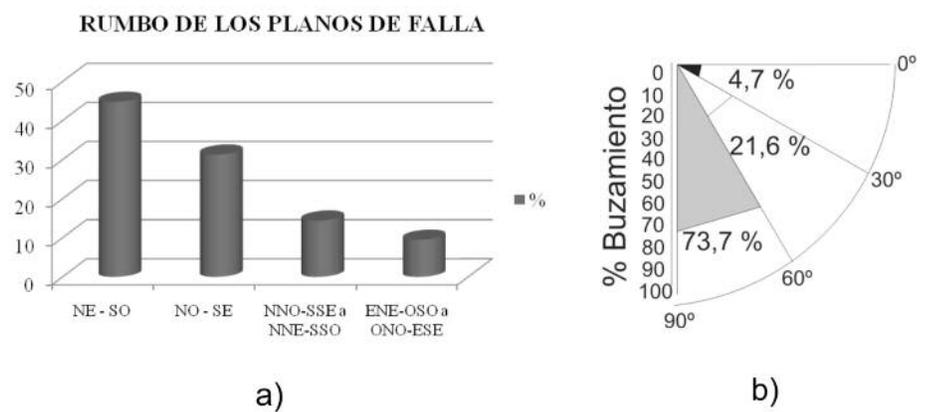


Figura 8: a) Porcentaje de los rumbos de los planos de fallas del frente occidental; b) representación gráfica correspondiente a los ángulos de buzamientos de los planos de fallas para el mismo sector.

ángulos entre 45° y 60°. Se observa la concentración de valores angulares de *rake* con ángulos altos (60°-80°) (Fig. 10d, en círculo de trazo discontinuo) y otra nube con valores menores (0°-30°) (Fig. 10d, en círculo de trazo continuo). Ambos casos corresponden a superficies de alto ángulo de buzamiento (70°-90°).

El ploteo de los datos mediante diagramas TriComp en la sección centro (N=273) (Fig. 11b), también muestra el predominio de la componente L respecto de V y T. Se destaca un arreglo de los datos con diseño cuneiforme, que tiene como vértice la componente L, donde se observa una mayor densidad de puntos. Esto indica que a medida que disminuye la contribución proporcional de la componente L respecto al vector rechazo total (D), aumenta la importancia cuantitativa de T y V, aunque siempre con mayor peso estadístico de esta última. Se visualiza el predominio de datos sobre el segmento L-V,

mediante la concentración de puntos encerrados por el círculo de trazo continuo (Fig. 11b). El mismo contiene estrías de fricción con ángulos de *rake* bajos (< 30°), la mayoría en planos con rumbo NE-SO y en menor cantidad planos NO, reflejando el predominio de la componente L (70-100%) respecto a V (0-40%) y la escasa participación de la componente T (0-20%). La segunda concentración de datos de fallas presenta menor densidad de puntos y mayor dispersión (Fig. 11b, en círculo de trazo discontinuo). Se encuentra en el sector central del diagrama TriComp y destaca el predominio de la componente V sobre L, producto de superficies con estrías de alto ángulo, en planos de fallas predominantemente NE-SO. La variación de la participación proporcional de las tres componentes del vector rechazo total D es: V (40-80%), L (10-50%) y T (0-50%).

Los ángulos de *rake* de las estrías de fric-

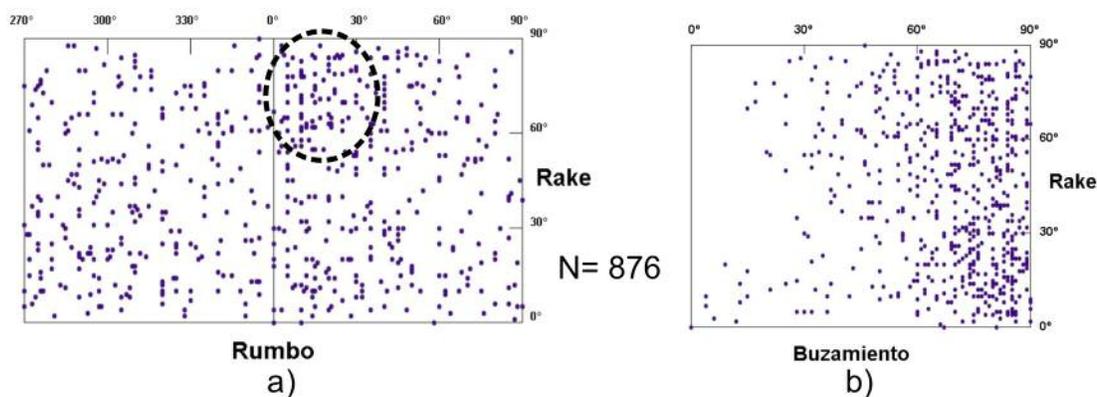


Figura 9: Representación del total de datos de las poblaciones de fallas del frente de levantamiento occidental (N=876); a) *rake* vs. rumbo; b) *rake* vs. buzamiento.

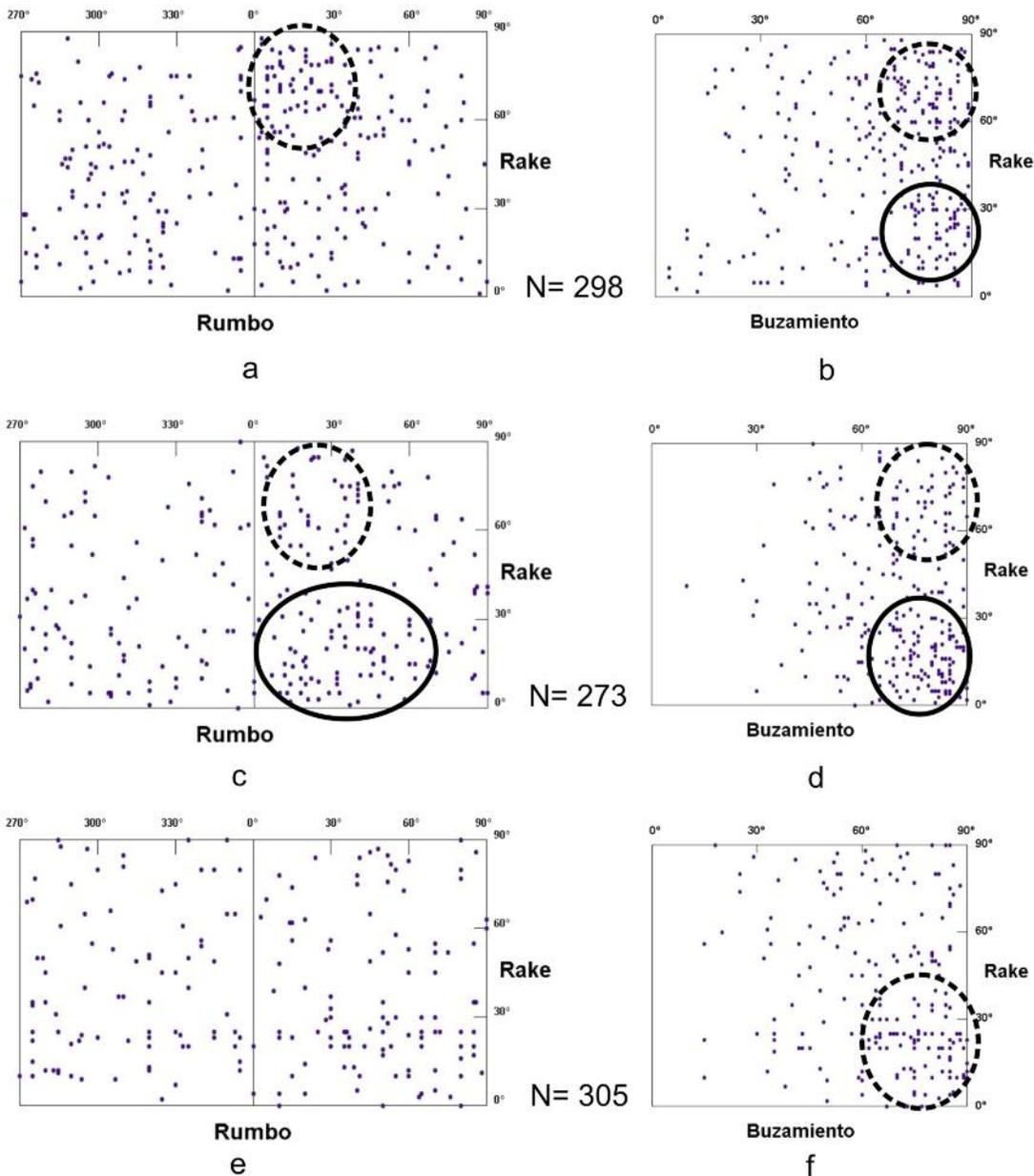


Figura 10: a y b) Relación angular de *rake* vs. rumbo y *rake* vs. buzamiento del sector norte; c y d) *rake* vs. rumbo y *rake* vs. buzamiento del sector central; e y f) gráficos *rake* vs. rumbo y *rake* vs. buzamiento del sector sur.

ción sugieren para esta sección una mayor participación proporcional de la componente L sobre la componente V, con respecto a la sección norte.

Sección sur: Esta división corresponde a las poblaciones de fallas relevadas en el frente de levantamiento occidental, al sur de la localidad de Villa de la Quebrada (Fig. 2). Los datos de fallas analizados (N= 305) se caracterizan por presentar una importante dispersión en direcciones de sus planos, aunque se observa una leve dominancia de planos con orientación

NE sobre aquellos con rumbos NO. El buzamiento de los planos de falla se dispersa dentro del rango de algo ángulo (60°-90°) y en menor cantidad con valores de buzamiento medio (30°-60°).

En el diagrama de la figura 10e, se observa la dispersión de los ángulos de *rake* de las estrías de fricción respecto del rumbo de los planos de fallas, aunque es notorio el predominio de bajos ángulos de *rake* (10°-30°) en las diferentes direcciones.

En la relación entre los valores angulares de *rake* vs. buzamiento de las poblaciones de falla (Fig. 10f), prevalece una impor-

tante concentración de datos con *rake* de bajo ángulo en planos con buzamiento entre 60° y 90° (representados con un círculo). El resto de los datos se distribuye entre ángulos de *rake* medios a altos, con buzamientos variables entre 50° y 85°.

El diagrama TriComp (N= 305) sugiere que las características de esta sección no varían respecto a la sección norte de este frente occidental (Fig. 11c). El diagrama muestra una cuña de datos que tiene también su vértice en L, y que se dispersa hacia el segmento V-T. El círculo que allí se indica destaca una nube representativa de

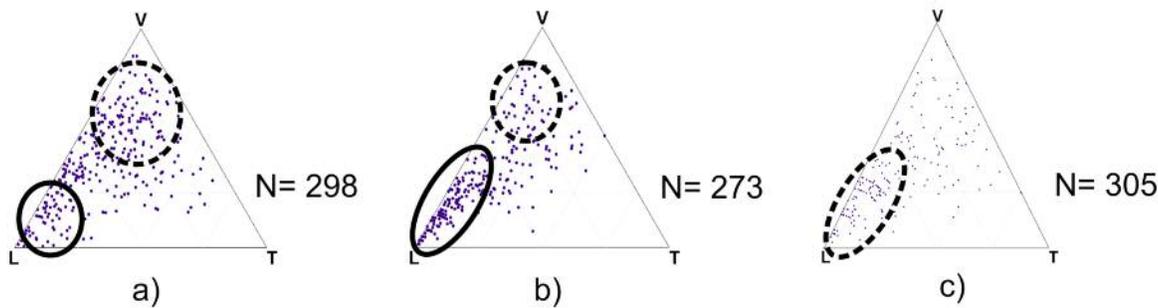


Figura 11: Diagramas TriComp correspondientes al frente de levantamiento occidental de la sierra de San Luis: a) sección norte; b) sección centro; c) sección sur. Ver detalles en el texto.

esta población, donde las participaciones proporcionales de las componentes del rechazo de las fallas varían de la siguiente manera: L (62-95%), V (5-30 %) y T (0-10%). A medida que disminuye L (0-45 %) aumenta la importancia de la componente V (25-75 %) y T (5-40 %) en la construcción de D.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los datos de desplazamiento de fallas obtenidos en el margen septentrional de la sierra de San Luis (N=99), sugieren que a pesar de las importantes diferencias de orientación y actitud espacial de las mismas, la participación porcentual de las diferentes componentes del rechazo total es semejante en las diferentes familias de fracturas relevadas. Las relaciones geométricas entre las diferentes componentes del rechazo, también guardan similitud con las fracturas que caracterizan al frente occidental, de orientación submeridiana a meridiana.

Considerando la disposición rectilínea del margen norte de la sierra, se ha interpretado preliminarmente que dicho frente está controlado por fracturas con dirección E-O, que funcionaron como rampas laterales o de relevo durante el levantamiento serrano (Costa *et al.* 1998, 1999a). Sin embargo, no se han reconocido zonas de cizalla importantes, ni frentes de corrimiento asociados a fallas con orientación E-O.

Pese a que el relevamiento realizado es de tipo selectivo, la importante impronta de las fracturas E-O en imágenes aéreas guarda escasa correlación con su participación numérica en los datos de campo. No

se cuenta por el momento con una explicación sustentada por datos de campo respecto a esta situación. Podría interpretarse que el margen septentrional serrano esté controlado por fracturas y/o zonas de cizalla con orientación E-O, actualmente cubiertas por depósitos pedemontanos, pero con influencia aún importante en la evolución morfotectónica del frente serrano.

Las fracturas del frente de levantamiento occidental de la sierra de San Luis (N=876), también muestran escasas diferencias en cuanto a la participación proporcional de las diferentes componentes del vector rechazo total. El sector Río Amieva-Villa de la Quebrada, donde la participación de la componente L tiene mayor predominio (entre 70 y 100%), coincide con el desarrollo de bloques menores en la ladera occidental de la sierra y con una mayor complejidad geométrica del trazo de la falla de San Luis (Costa 1992).

Aproximadamente el 70% de las fallas relevadas a lo largo de la ladera occidental serrana, el rechazo horizontal longitudinal (L), es igual o mayor a la suma de las otras dos componentes del vector rechazo total. Esta información indica la participación relativa de cada uno de los componentes del vector rechazo total, pero no se han reconocido hasta el presente elementos que permitan cuantificar la componente transcurrente en la deformación global del macizo serrano. Otro resultado significativo destaca que la casi totalidad de las fallas relevadas han acomodado escasa extensión y/o acortamiento ($T < 20\%$, para el 80% de las fallas relevadas). Dado que todas las estaciones relevadas se encuentran dentro del ambiente de basamento cristalino, no ha podido acotar-

se la cronología de las mismas, por lo que es muy probable que en la información analizada se encuentren registrados diferentes episodios diacrónicos de deformación frágil. Se admite que la fracturación fue el proceso de deformación dominante en el macizo serrano desde el Paleozoico superior (Criado Roque *et al.* 1981) y que en la vecina sierra de Comechingones ocurrieron importantes episodios de deformación frágil durante el Pérmico-Triásico (240-260 Ma) (Loebens *et al.* en prensa). La orientación espacial del tensor máximo de esfuerzos para estas deformaciones se desconoce, pero podrían vincularse con la instalación de un antiguo régimen de subducción subhorizontal andino y consecuente acortamiento (Ramos y Folguera 2009).

Las evidencias de extensión cortical mesozoica e inversión tectónica subsecuente han sido bien documentadas en la región (Schmidt *et al.* 1995, Gardini *et al.* 1996, 2002, Costa *et al.* 1999). La disposición submeridional de las fallas marginales a los depocentros resultantes es muy semejante a la familia principal de fracturas aquí relevadas, coincidentes con la fábrica interna del basamento ígneo metamórfico. Las reconstrucciones paleogeográficas efectuadas para estas etapas del *rifting* cretácico (Uliana *et al.* 1989), sugieren una posición casi ortogonal del eje de extensión regional probable respecto a estas fallas marginales. Por ello, no sería necesaria una componente transcurrente significativa para acomodar la deformación resultante.

Algunos trabajos han sugerido que la tectónica transcurrente e incluso extensional, han jugado un rol importante en otros sectores de las Sierras Pampeanas

durante el acortamiento asociado a la orogenia Andina, (Rossello *et al.* 1996, Gutiérrez 1999, Gutiérrez y Mon 2008). Sin embargo, en el análisis neotectónico de la sierra de San Luis, no se han reconocido evidencias morfológicas o macroestructurales que sugieran la asociación del mismo a un sistema de fallas transcurrentes (Costa 1987 y 1992).

Las características e importancia de la partición de la deformación resultante de la componente de subducción paralela a la fosa, no es conocida en el antepaís andino. No obstante, desde los estudios regionales de González Bonorino (1950), hasta los trabajos más recientes (Ramos *et al.* 2002, Alvarado y Ramos 2011), se han postulado a las deformaciones contraccionales como el mecanismo esencial o al menos dominante en el levantamiento Andino de las Sierras Pampeanas. Por otra parte, la disposición espacial de las fracturas marginales submeridionales de la sierra, han mantenido una disposición bastante perpendicular a la dirección de subducción dominante durante los episodios de deformación neógenos (Pardo Casas y Molnar 1987, Somoza 1998, Yañez *et al.* 2001, Ramos *et al.* 2002). En consecuencia, este enfoque no parecería sustentar la notable imposición observada de la componente L en la fracturación regional del macizo.

En la presente contribución se ensaya una interpretación preliminar del problema mencionado, asumiendo que la gran mayoría de las fallas mensuradas corresponden a discontinuidades preexistentes del macizo, que registraron los últimos episodios de cizalla frágil mediante las estrías de fricción. Incluso, en varias de estas superficies ha sido posible registrar incluso más de una dirección y eventos de desplazamiento.

El alto ángulo de la mayoría de las fracturas relevadas, las convierte en superficies inadecuadas para resolver el acortamiento en el macizo bajo condiciones de deformación frágil, excepto con importante participación de movimientos verticales. La extensa preservación de las superficies de erosión preandinas (González

Díaz 1981, Jordan *et al.* 1989, Carignano *et al.* 1999, Costa *et al.* 1999b), sugiere que este tipo de movimientos no es arealmente representativo de la deformación frágil del macizo, al menos con posterioridad a la generación de las superficies de erosión (Paleozoico superior-Paleógeno). Por el contrario, la componente vertical del posible desmembramiento tectónico de dichas superficies en el interior serrano, se encuentra localizado en muy pocas estructuras (Criado Roque *et al.* 1981, Costa 1987 y 1992).

Costa (1992) ha destacado que la partición de las tres componentes del vector rechazo total, es bastante semejante en la zona de cizalla donde el basamento cristalino monta a depósitos sedimentarios con ángulos por lo general menores de 45° (30-45% de V y 25 – 50% de T) o en cercanías de la misma. Es posible que el desarrollo de un efecto de borde libre topográfico resultante del incremento del relieve estructural, haya favorecido la concentración de V y T en estos sectores, con importancia cuantitativa significativa, tal como lo atestigua el levantamiento serrano y acortamientos estimados entre 4% y 6% (Costa 1992).

Las fracturas del interior del macizo, con mayor ángulo de inclinación, acomodan preferentemente la componente L del rechazo total, resultante de la posible discrepancia entre la actitud espacial del plano de falla preexistente y la posición del eje de acortamiento principal actuante (σ_1) (u orientación *no coulombian*).

Podría suponerse entonces que la interfase tectónica principal correspondiente al contacto basamento cristalino-rocas sedimentarias, acomoda en mayor porcentaje V y T del vector rechazo total, mientras que las fracturas secundarias distribuyen principalmente la componente L. Se asume que los diferentes episodios de deformación frágil han generado estrías con representación en todo el macizo y en diversas familias de fracturas. Pero las fracturas responsables de la morfogénesis de la sierra de San Luis, están concentradas en la zona de contacto tectónico principal del frente de levantamiento.

AGRADECIMIENTOS

La valiosa revisión efectuada por los árbitros Dres. R. Mon. y A. Massabie contribuyó a mejorar la versión original del manuscrito. Se agradece también al Sr. H. Garro por la generación de los gráficos. El presente trabajo ha sido subsidiado por la Universidad Nacional de San Luis mediante el proyecto “Principales Estructuras Neotectónicas Argentinas”.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Alvarado, P. y Ramos, VA. 2011. Earthquake deformation in the northwestern Sierras Pampeanas of Argentina based on seismic waveform modelling. *Journal of Geodynamics* 51(4): 205-218.
- Angelier, J. 1979. Néotectonique de l'arc égéen. *Société Géologique du Nord, Special Publication* 3, 418 p., París.
- Angelier, J. 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research* 89 (B7): 5835-5848.
- Carignano, C., Cioccale, M. y Rabassa, J. 1999. Landscape antiquity of the Central-Eastern Sierras Pampeanas (Argentina): Geomorphological Evolution since Gondwanic Times. *Zeitschrift für Geomorphologie* 118: 245-268.
- Costa, C. 1987. Neotectónica de la sierra de San Luis: Resultados preliminares. 10° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 255-258, San Miguel de Tucumán.
- Costa, C. 1992. Neotectónica del sur de la sierra de San Luis. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de San Luis (inédita), 390 p., San Luis.
- Costa, C., Cesco, J. y Morán, R. 1997. A simple graphical method for estimating the components of the fault-slip vector. *Journal of Structural Geology* 19: 1245-1247.
- Costa, C., Ortiz Suárez, A., Gardini, C., Chiesa, J., Ojeda, G., Strasser, E., Escayola, M., Kraemer, P., Ulacco, H., Morla, P., Almandoz, G. y Coniglio, J. 1998. Hoja Geológica 3366-II, Santa Rosa, provincias de San Luis y Córdoba, Escala 1:250.000. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 373, en CD.
- Costa, C., Gardini, C., Ortiz Suárez, A., Chiesa, J., Ojeda, G., Rivarola, D., Strasser, E., Morla, P.,

- Ulacco, J., Tognelli, G., Carugno Durán, A., Vinciguerra, H. y Sales, D. 1999a. Hoja Geológica 3366-I San Francisco del Monte de Oro, provincias de San Luis, Mendoza y San Juan. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la Rep. Argentina 1:250.000. Servicio Geológico-Minero Argentino, Boletín 278 en CD.
- Costa, C., Giaccardi, A. y González Díaz, E. 1999 b. Palaeo-landsurfaces and neotectonic analysis in the Southern Sierras Pampeanas, Argentina. En Smith, B., Whalley, B. y Warke, P. (eds). Uplift, Erosion and Stability: Perspectives on Long-term Landscape development. Geological Society of London, Special Publications 162: 229-238.
- Costa, C., Gardini, C., Chiesa, J., Ortiz Suárez, A., Ojeda, G., Rivarola, D., Tognelli, G., Strasser, E., Carugno Durán, A., Guerstein, P., Sales, D. y Vinciguerra, H. 2000. Hoja Geológica 3366-III San Luis, provincias de San Luis y Mendoza. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la Rep. Argentina 1:250.000. Servicio Geológico-Minero Argentino, Boletín 293, 104 p., en CD.
- Costa, C., Garro, H. y Sales D. 2009. Diagramas "TriComp", para la estimación de las componentes del vector de desplazamiento de fallas. 14° Reunión de Tectónica Resúmenes: 18, Río Cuarto.
- Criado Roque, P., Mombrú, C. y Ramos, V. 1981. Estructura e interpretación tectónica. En Yrigoyen, M. (ed.) Geología y recursos naturales de la Provincia de San Luis, 8° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 155-192, San Luis.
- Flores, M. 1969. El bolsón de Las Salinas de la provincia de San Luis. 4° Jornadas Geológicas Argentinas, Actas 1: 311-327, Mendoza.
- Flores, M. y Criado Roque, P. 1972. Cuenca de San Luis. En Leanza, A. (ed.) 1° Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias, p. 567-580, Córdoba.
- Gardini, C., Costa, C. y Schmidt, C. 1996. Las estructuras de inversión tectónica en el sector Sa. de El Gigante-Alto Pencoso, Pcia. de San Luis. 13° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 267-282, Buenos Aires.
- Gardini, C., Schmidt, C., Costa, C., Ricci, W., Rivarola, D. y Arcucci, A. 2002. Estructura e Inversión Tectónica en el Area del Cerro Guayaguas, Provincias de San Luis y San Juan. 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 277-281, Buenos Aires.
- González Bonorino, F. 1950. Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas. Revista de la Asociación Geológica Argentina 5: 81-110.
- González Bonorino, F. 1961. Petrología de algunos cuerpos básicos de San Luis y las granulitas asociadas. Revista de la Asociación Geológica Argentina 19: 135-150.
- González Díaz, E. 1981. Geomorfología. En Yrigoyen, M. (ed.) Geología y Recursos Naturales de la Provincia de San Luis, 8° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 193-236, San Luis.
- Gutiérrez, A. 1999. Tectonic geomorphology of the Ambato block (Northwestern Pampeanas Mountain Ranges, Argentina). Proceedings 4° International Symposium on Andean Geodynamics: 307-310, Göttingen.
- Gutiérrez, A. y Mon, R. 2008. Macroindicadores cinemáticos en el bloque Ambato, Provincias de Tucumán y Catamarca. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63(1): 24-28.
- Ortiz Suárez, A., Prozzi, C. y Llambías, E. 1992. Geología de la parte Sur de la sierra de San Luis, Argentina. Revista de Estudios Geológicos 48: 269-277.
- Jordan, T., Zeitler, P., Ramos, V. y Gleadow, A. 1989. Thermochronometric data on the development of the basement peneplain in the Sierras Pampeanas. Journal of South American Earth Sciences 2(3): 207-222
- Loebens, S., Bense, F., Wemmer, K., Dunkl, I., Costa, C., Layer, P. y Siegesmund, S. (en prensa). Is the exhumation of the Sierras Pampeanas just related to the Andean flat-slab subduction? Preliminary implications of K-Ar fault gouge dating and low thermal geochronology in the Sierra de Comechingones (Argentina). International Journal of Earth Sciences.
- Pardo Casas, M. y Molnar, P. 1987. Relative motion of the Nazca (Farallón) and South American Plates since Late Cretaceous time. Tectonics 6(3): 233-248.
- Pastore, F. y Ruiz Huidobro, O. 1952. Descripción geológica de la Hoja 24 g, Saladillo (San Luis). Dirección Nacional de Minería y Geología, Boletín 78, 61p., Buenos Aires.
- Ramos, V., Cristallini, y Pérez, D. 2002. The Pampean flat-slab of the central Andes. Journal of South American Earth Sciences 15: 59-78.
- Ramos, V. y Folguera, A. 2009. Andean flat-slab subduction through time. The Geological Society Special Publication 327: 31-54, London.
- Rossello, E., Mozetic, M., Cobbold, P., de Urreiztieta, M. y Gapais, D. 1996. El espolón Uman-go-Maz y la combinación sintaxial de los lineamientos Tucumán y Valle Fértil (la Rioja, Argentina). 13° Congreso Geológico Argentino Actas 2: 187-194, Buenos Aires.
- Sales, D. y Costa, C. 2009. Análisis geométrico de la fracturación del frente de levantamiento de la sierra de San Luis, Argentina. 14° Reunión de Tectónica, Resúmenes: 26, Río Cuarto.
- Schmidt, C., Astini, R., Costa, C., Gardini, C. y Kraemer, P. 1995. Cretaceous *rifting*, alluvial fan sedimentation and neogene inversion, southern Sierras Pampeanas, Argentina. En Tankard, A.J., Suárez, R. y Welsink, H.J. (eds.) Petroleum Basins of South América, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 62: 341-358, Tulsa.
- Sims, J., Stuart-Smith, P., Lyons, P. y Skirrow, R. 1997. 1:250.000 Scale Geological and metallogenic maps Sierras de San Luis and Comechingones, Provinces of San Luis and Córdoba. Geoscientific Mapping of the Sierras Pampeanas Argentine-Australian Cooperative Project, (inédito), 122 p., Buenos Aires.
- Somoza, R. 1998. Updated Nazca (Farallon) -South America relative motions during the last 40 My: Implications for mountain building in the Central Andean region. Journal of South American Earth Sciences 11: 211-215.
- Uliana, M., Biddle, K. y Cerdan, J. 1989. Mesozoic extension and the formation of Argentine sedimentary basins. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 46: 599-614, Tulsa.
- Yañez, G., Ranero, G., von Huene, R. y Díaz, J. 2001. Magnetic anomaly interpretation across a segment of the Southern Central Andes (32°-34°S): implications on the role of the Juan Fernández Ridge in the tectonic evolution of the margin during upper Tertiary. Journal of Geophysical Research 106: 6325-6345.

Recibido: 9 de marzo, 2010

Aceptado: 18 de noviembre, 2010