

## Evolución del campo de esfuerzos en Tierra del Fuego durante el Mesozoico-Cenozoico (extremo meridional de la Cordillera Andina)

### *Mesozoic-Cenozoic stress field evolution in Tierra del Fuego (southern end segment of the Andean Cordillera)*

A. Maestro<sup>1,2</sup>, P. Ruano<sup>3,4</sup>, P.J. Torres Carbonell<sup>5</sup>, F. Bohoyo<sup>1</sup>, J. Galindo-Zaldívar<sup>3,4</sup>, A. Pedrera<sup>1</sup>, A. Ruíz-Constán<sup>1</sup>, L. González-Castillo<sup>3</sup>, P. Ibarra<sup>1</sup> y J. López-Martínez<sup>2</sup>

1 Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid. [a.maestro@igme.es](mailto:a.maestro@igme.es), [f.bohoyo@igme.es](mailto:f.bohoyo@igme.es), [a.pedrera@igme.es](mailto:a.pedrera@igme.es), [a.ruiz@igme.es](mailto:a.ruiz@igme.es), [p.ibarra@igme.es](mailto:p.ibarra@igme.es)

2 Departamento de Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid. [jeronimo.lopez@uam.es](mailto:jeronimo.lopez@uam.es)

3 Departamento de Geodinámica. Universidad de Granada. 18071, Granada. [pruano@ugr.es](mailto:pruano@ugr.es), [jgalindo@ugr.es](mailto:jgalindo@ugr.es), [lcastillo@ugr.es](mailto:lcastillo@ugr.es)

4 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra. CSIC-UGR. Av. Las Palmeras s/n. 18071 Granada

5 Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC-CONICET), Bernardo A. Houssay 200, 9410 Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina. [torrescarbonell@cadic-conicet.gov.ar](mailto:torrescarbonell@cadic-conicet.gov.ar)

**Resumen:** Tierra del Fuego se localiza en la terminación meridional de la Cordillera de los Andes, también conocida como Andes Fueguinos, y se caracteriza por una compleja historia tectónica desde el Mesozoico. En este sector se han medido 1496 mesoestructuras frágiles en 86 estaciones localizadas en unidades del Jurásico superior al Cuaternario. Se han obtenido un total de 125 tensores de esfuerzos. El análisis de las fallas se ha realizado utilizando los métodos de Diedros Rectos, Diagrama y-R, Etchecopar y Redes de Búsqueda. Las orientaciones de las diaclasas, grietas de tensión y diques clásticos también han sido utilizadas para establecer las orientaciones de los ejes de esfuerzos. Los tensores de esfuerzos obtenidos presentan una dirección dominante de  $\sigma_1$  NE-SO y tres direcciones secundarias ENE-OSO a E-O, NO-SE y N-S. La orientación de los tensores  $\sigma_3$  muestra dos modas principales de direcciones ENE-OSO y NO-SE, y tres direcciones secundarias con orientaciones NE-SO, E-O y NNO-SSE. Los datos obtenidos son consistentes con un campo regional de esfuerzo compresivo de dirección NE-SO activo en la zona desde el Cretácico terminal. Durante el Cretácico terminal se produjo a escala regional un giro en sentido anti-horario de 30° que dio lugar al desarrollo del Oroclino Patagónico. La curvatura final de la cadena puede haber sido adquirida debido a la interacción de la cuña orogénica con el promontorio de Río Chico durante el Cretácico terminal-Mioceno inferior. La indentación del promontorio causó una variación en las direcciones de los ejes de esfuerzo de compresión, que muestran una dirección NE-SO en la parte occidental y N-S a NO-SE en el sector oriental. Por último, desde finales del Mioceno, el movimiento en dirección del sistema de fallas de Magallanes-Fagnano desvía las trayectorias de los esfuerzos de dirección NE-SO a E-O.

**Palabras clave:** Andes, mesoestructuras frágiles, paleoesfuerzos, Tierra del Fuego.

**Abstract:** *Tierra del Fuego comprises the southernmost part of the Andean Cordillera known as Fuegian Andes, and presents a complex tectonic history since the Mesozoic. To contribute to the knowledge of the tectonic evolution of the Fuegian Andes region, 1496 brittle mesostructures were measured at 86 sites located in Late Jurassic to Quaternary rocks. A total of 125 palaeostress tensors were obtained. Fault data were analyzed using the Right Dihedra, y-R diagram, Etchecopar's and Search Grid Inversion Palaeostress determination methods. The orientations of joints, gashes and clastic dikes have also been used to establish maximum and minimum horizontal stress trends. The  $\sigma_1$  orientation shows a dominant NE-SW direction and ENE-WSW to E-W, NW-SE and N-S secondary  $\sigma_1$  stress directions are observed. The  $\sigma_3$  orientation shows two main modes trending ENE-WSW and NW-SE, and three secondary  $\sigma_3$  stress directions (NE-SW, E-W and NNW-SSE). The obtained stress evolution is consistent with a regional NE-SW compressive stress field active in the area since the late Cretaceous. During the late Cretaceous, a regional counterclockwise rotation of 30° started, which gave rise to the Patagonia orocline. The final curvature of the chain may have been acquired due to the interaction of the orogenic wedge with the Rio Chico promontory during the late Cretaceous-early Miocene. The promontory indentation caused a variation in the trend of the compressive stress axis, showing NE-SW direction in the western part and N-S to NW-SE in the eastern sector. Finally, since the late Miocene, the strike-slip movement of the Magallanes-Fagnano Fault System deflects the NE-SW stress trajectories changing to an E-W direction.*

**Key words:** *Andes, brittle mesostructures, palaeostress, Tierra del Fuego.*

## INTRODUCCIÓN

Tierra del Fuego se localiza en el sector meridional de la Cordillera de los Andes (Fig. 1), también conocido como Andes Fueguinos, y se caracteriza por presentar una compleja historia tectónica desde el Mesozoico. El objetivo de este trabajo es caracterizar los campos de paleoesfuerzos que han actuado en Tierra del Fuego durante el Mesozoico y el Cenozoico. A partir de la determinación de los tensores de esfuerzos mediante el análisis poblacional de mesoestructuras frágiles es posible reconstruir el campo de esfuerzos que actúa en un área durante un intervalo de tiempo de su historia geológica. Teniendo

en cuenta un período de tiempo fijo dentro del cual el estado de esfuerzos puede suponerse que es constante, las variaciones direccionales y espaciales del campo de esfuerzos se pueden detectar si se cuenta con un número suficiente de datos. Estas variaciones pueden ser interpretadas tanto en términos de etapas tectónicas regionales, como de desviaciones de esfuerzo. Estas desviaciones espaciales de los campos de esfuerzos en zonas de intraplaca son por lo general debidas a la existencia de grandes fallas cuyo movimiento es coetáneo con el desarrollo de las mesoestructuras frágiles o por rotaciones de bloques compartimentados por fallas.

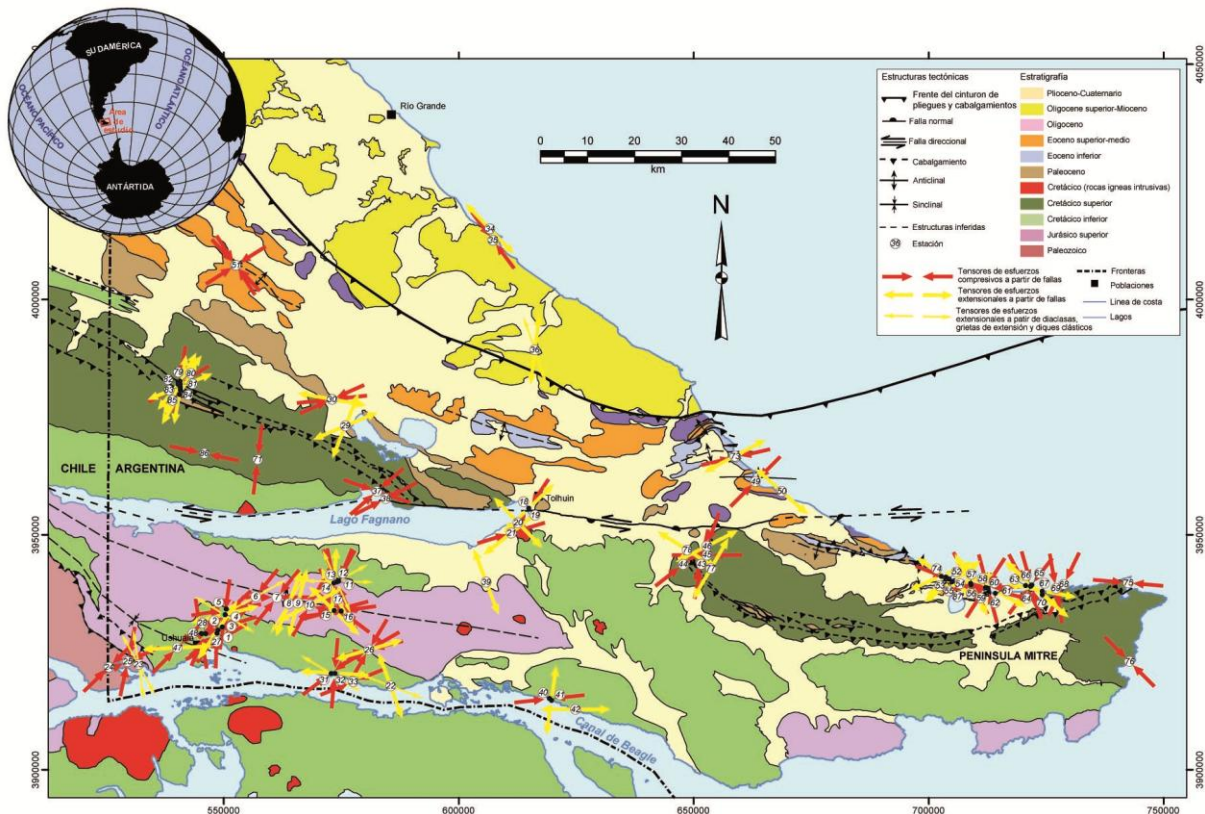


FIGURA 1. Mapa geológico simplificado de Tierra del Fuego y localización de las estaciones de medidas de estructuras frágiles con indicación de los tensores compresivos y tensionales obtenidos tras su análisis. Modificado de Torres Carbonell y Dimieri (2013).

## CONTEXTO GEOLÓGICO

La evolución geológica de Tierra del Fuego puede ser dividida en tres grandes etapas tectónicas (Fig. 2): 1) Etapa de *rifting* en el Jurásico terminal y desarrollo de una cuenca marina profunda de retro-arco en el Cretácico inferior, denominada Cuenca de Rocas Verdes; 2) Cierre de la cuenca de retro-arco y desarrollo de un orógeno en el Cretácico terminal, con progresión de la deformación compresiva que perdura hasta el Mioceno inferior, configurando el Cinturón de Pliegues y Cabalgamientos Fueguino (CPCF); y 3) Desarrollo desde el Neógeno (~10 Ma) de un régimen tectónico de desgarramiento asociado con el inicio del límite transformante entre las placas Sudamericana y de Scotia.

Desde el punto de vista estructural, Tierra del Fuego se caracteriza por estar constituido por un cinturón orogénico de pliegues y cabalgamientos con orientaciones NO-SE a E-O, donde el basamento y relleno sedimentario de la cuenca de retro-arco de Rocas Verdes (Jurásico superior-Cretácico inferior) y la cuenca de antepaís Austral (Magallanes) (Cretácico superior-Neógeno) se vieron sometidas a una tectónica de acortamiento de "piel fina", con un núcleo metamórfico exhumado en el antepaís (Klepeis et al., 2010; Torres Carbonell y Dimieri, 2013) (Fig. 1 y 2). Estudios de paleomagnetismo a partir de muestras de rocas del Jurásico superior a Cretácico superior de los Andes Fueguinos sugieren que las estructuras iniciales de la cuña orogénica pueden haber rotado alrededor de

~30° en sentido antihorario (Rapalini et al, 2015); por otro lado, los datos paleomagnéticos de sedimentos más jóvenes del CPCF sugieren que la rotación no fue significativa después del periodo entre 60 y 50 Ma (Poblete et al., 2014) (Fig. 2). El CPCF es cortado y desplazado debido a una importante zona de falla de desgarre sinistrorsa de dirección E-O, denominada Sistema de Fallas de Magallanes-Fagnano (Torres Carbonell et al., 2008) (Fig. 1 y 2). Este sistema de fallas conecta al este con la Dorsal Norte de Scotia, que se extiende más allá de las islas Georgias del Sur, y constituye el límite transformante entre las placas Sudamericana y de Scotia.

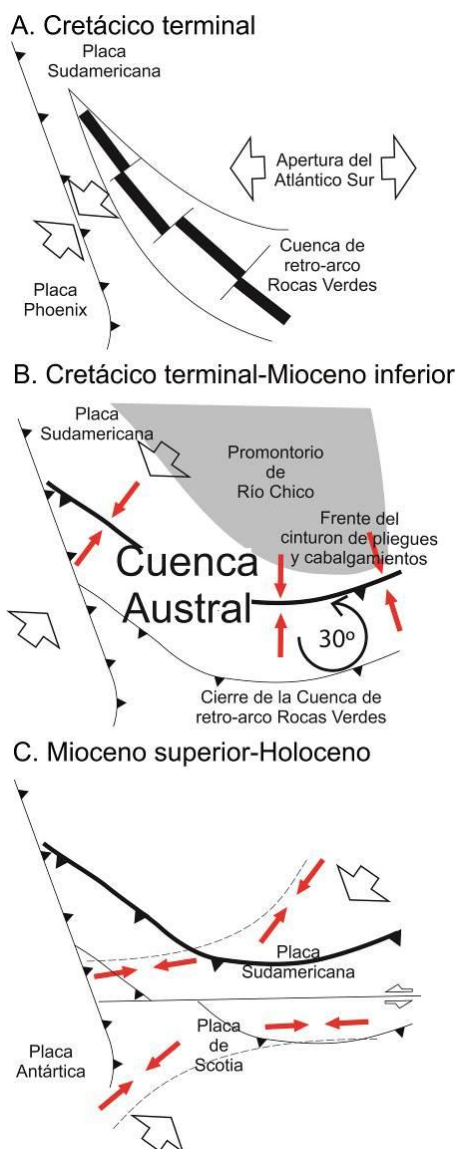


FIGURA 2. Esquemas de la evolución tectónica de Tierra de Fuego con indicación de las direcciones de esfuerzos compresivos obtenidas (flechas de color rojo).

## METODOLOGÍA

El análisis de las fallas de cada estación se han realizado utilizando los métodos de los Diedros Rectos (Angelier y Mechler, 1977), el Diagrama y-R (Simón,

1986), de Etchecopar (Etchecopar et al., 1981) y de Redes de Búsqueda (Galindo-Zaldívar y González-Lodeiro, 1988) para una mayor fiabilidad de los resultados obtenidos. Las orientaciones de las diaclasas, grietas de tensión y diques clásticos también han sido utilizadas para establecer las orientaciones de los ejes de esfuerzos máximos y mínimos.

Para el establecimiento de la edad de los tensores de esfuerzos se han seguido tres criterios: 1) la edad del depósito/intrusión donde se ha realizado la medida de estructuras frágiles, que asigna una edad máxima para el tensor de esfuerzo obtenido de su análisis; 2) la uniformidad en la distribución de algunas orientaciones de los tensores de esfuerzos en unidades rocosas de diferente edad, lo que permite establecer un intervalo temporal para el campo de esfuerzos que representan esos tensores; y, sobre todo, 3) la relación de las mesoestructuras medidas con las principales estructuras geológicas, como pueden ser la ocurrencia de fallas menores en una zona cataclástica, o la relación entre la orientación de los ejes de esfuerzos con fallas y pliegues que controlen las direcciones macroestructurales de la zona donde las estructuras frágiles han sido medidas, o las relaciones de corte entre diques y otras estructuras geológicas.

## CARACTERIZACIÓN DEL CAMPO DE ESFUERZOS MESOZOICO-CENOZOICO

Para la determinación de los campos de esfuerzos que han actuado en Tierra del Fuego durante el Mesozoico-Cenozoico se han medido 1496 mesoestructuras frágiles (1236 fallas, 129 diaclasas, 67 grietas de tensión y 64 diques clásticos) en 87 estaciones distribuidas en una superficie de más de 20.500 km<sup>2</sup>. Estas medidas se han realizado en rocas metamórficas e ígneas de edad Jurásico-Cretácico terminal y sedimentarias del Paleógeno al Cuaternario, y de las que se han obtenido un total de 124 tensores de paleoesfuerzos.

A partir del análisis de las orientaciones de los ejes de esfuerzos, se puede observar que hay una dirección de compresión dominante NE-SO a ENE-OSO, que muestra un predominio de tensores de esfuerzos con una relación  $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$  dentro del régimen de compresión uniaxial ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ). Este máximo se encuentra en continuidad con un máximo relativo de dirección de compresión E-O, y con una relación  $R$  también cercana a la compresión uniaxial. También hay un máximo relativo de dirección de  $\sigma_1$  entre N120°E y N170°E, con valores de  $R$  dentro del régimen de compresión uniaxial. Las orientaciones determinadas de  $\sigma_3$  (con  $\sigma_1$  vertical) muestran dos modas principales con tendencias ENE-OSO y NO-SE. Además se pueden observar tres direcciones secundarias de  $\sigma_3$  con orientaciones NE-SO, E-O y NNO-SSE. Los valores de  $R$  se localizan fundamentalmente dentro del campo de régimen tensional próximo a la extensión radial.

A partir de la edad de las unidades donde se han medido las estructuras frágiles, se ha podido establecer que la orientación de  $\sigma_1$  NE-SO está presente hasta el Cuaternario, la dirección de compresión N-S no aparece a partir del Cretácico terminal, la dirección de compresión E-O se registra hasta el Eoceno y, finalmente, la dirección de  $\sigma_1$  NO-SE no se observa después del Mioceno. La orientación de  $\sigma_3$  NE-SO y NO-SE actúa hasta el Cuaternario, la dirección de extensión E-O no se detecta después del Eoceno y la dirección de  $\sigma_3$  N-S no se registra después del Mioceno.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los datos obtenidos son consistentes con un campo regional de esfuerzo compresivo de dirección NE-SO, activo en la zona desde el Cretácico terminal. La aceleración de la expansión del fondo oceánico en la Dorsal Atlántica durante el Cretácico medio empuja a la Placa Sudamericana hacia el oeste, dando comienzo al cierre de la cuenca de retro-arco de Rocas Verdes en el margen sudoccidental de Sudamérica (desarrollada como cuenca de *rift* en el Jurásico medio-Cretácico inferior en relación con la fragmentación de Gondwana) (Fig. 2A), lo que provocó un episodio de acortamiento cortical que generó estructuras de dirección N-S y NO-SE (Klepeis et al., 2010). El cierre total de la cuenca pudo haber producido un giro en sentido anti-horario de 30° a escala regional que dio lugar al desarrollo del Oroclino Patagónico, haciendo que las estructuras de dirección NO-SE pasaran a disponerse en dirección E-O (Rapalini et al., 2015) (Fig. 2B). La curvatura final de la cadena puede haber sido adquirida debido a la interacción de la cuña orogénica, en cuyo desplazamiento hacia el noreste colisiona con el promontorio de Río Chico durante el Cretácico terminal-Mioceno inferior (Torres Carbonell et al., 2013) (Fig. 2B). La indentación del promontorio causó una variación en las direcciones de los ejes de esfuerzo de compresión, que muestran una orientación NE-SO en la parte occidental y N-S a NO-SE en el sector oriental. Por último, desde finales del Mioceno, el movimiento de desgarre sinistrorso del sistema de fallas de Magallanes-Fagnano desvía las trayectorias de los esfuerzos de dirección NE-SO a E-O (Fig. 2C). Por último, las direcciones de máxima extensión determinadas se localizan fundamentalmente paralelas y perpendiculares a las direcciones de los pliegues y cabalgamientos, por lo que su génesis puede relacionarse directamente con los procesos cinemáticos relacionados con el desarrollo de éstos.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al personal del Centro Austral de Investigaciones Científicas (Ushuaia, Argentina), en especial a los Drs. Olivero y Martinioni, el asesoramiento geológico y el apoyo logístico para la

realización de este estudio. Este trabajo está subvencionado a través de los proyectos del Plan Nacional de Investigación CTM2011-30241-C02/01ANT y CTM2014-60451-C2-02/01 del Ministerio de Economía y Competitividad.

## REFERENCIAS

- Angelier, J. y Mechler, P. (1977): Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des diédres droits. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7, 19: 1309-1318.
- Etchecopar, A., Vasseur, G. y Daignieres, M. (1981): An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault population analysis. *Journal of Structural Geology*, 3: 51-65.
- Galindo-Zaldívar, J. y González-Lodeiro, F. (1988): Faulting phase differentiation by means of computer search on a grid pattern. *Annales Tectonicae*, 2: 90-97.
- Klepeis, K.A., Betka, P., Clarke, G., Fanning, M., Hervé, F., Rojas, L., Mpodozis, C. y Thomson, S. (2010): Continental underthrusting and obduction during the Cretaceous closure of the Rocas Verdes rift basin, Cordillera Darwin, Patagonian Andes. *Tectonics*, 29, TC3014.
- Poblete, F., Roperch, P., Hervé, F., Diraison, M., Espinoza, M. y Arriagada, C. (2014): The curved Magallanes fold and thrust belt: Tectonic insights from a paleomagnetic and anisotropy of magnetic susceptibility study. *Tectonics*, 33 (12): 2526-2551.
- Rapalini, A.E., Peroni, J., Luppó, T., Tassone, A., Cerredo, M.E., Esteban, F., Lippai, H. y F. Vilas, J. (2015): Palaeomagnetism of Mesozoic magmatic bodies of the Fuegian Cordillera: implications for the formation of the Patagonian Orocline. *Geological Society of London, Special Publication*, 425. doi: 10.1144/sp425.3.
- Simón, J.L. (1986): Analysis of gradual change in stress regime (example from the eastern Iberian Chain, Spain). *Tectonophysics*, 124: 37-53.
- Torres Carbonell, P.J., Olivero, E.B. y Dimieri, L.V. (2008): Structure and evolution of the Fuegian Andes foreland thrust-fold belt, Tierra del Fuego, Argentina: paleogeographic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 25(4): 417-439.
- Torres Carbonell, P.J. y Dimieri, L.V. (2013): Cenozoic contractional tectonics in the Fuegian Andes, southernmost South America: a model for the transference of orogenic shortening to the foreland. *Geologica Acta*, 11: 359-370.
- Torres Carbonell, P.J., Dimieri, L.V. y Olivero, E.B. (2013): Evaluation of strain and structural style variations along the strike of the Fuegian thrust-fold belt front, Argentina. *Andean Geology*, 40: 438-457.