



QUANTIFYING TECTONIC ROTATIONS FROM PALEOMAGNETIC DATA: A BOOTSTRAP APPROACH

L.C. Gallo^{1,2*}, M. Svarc^{1,3}, J.M. Calvagno^{1,2}, R.N. Tomezzoli^{1,2}, E.O. Cristallini³, C. Puigdomenech^{1,2}

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

² Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGEBA), Laboratorio de Paleomagnetismo D.A. Valencio, Departamento de Geología, FCEyN, Universidad de Buenos Aires, CABA, Argentina.

³ Universidad de San Andres, Buenos Aires, Argentina.

⁴ Laboratorio de Termocronología (La. Te Andes), CONICET, Salta, Argentina.

*e-mail: len.gallo@gmail.com

ABSTRACT

Usually, tectonic rotations around vertical axis are calculated with the method proposed by Demarest (1983) under the assumption that the directions follow a Fisher distribution (Fisher, 1953). However, as was already noted, the distribution of paleomagnetic directions are elongated in N-S direction (*e.g.* Deenen *et al.*, 2011; Tauxe, Kent, 2004). It is therefore inappropriate to use Fisher statistics in directional datasets. From this assumption, we have developed a bootstrap approach for the determination of tectonic rotations in a fully data driven way, where the uncertainties are calculated empirically. A preliminary version of the program implementing the method described here is available from L. Gallo on request.

Keywords: Paleomagnetic statistics, Vertical axis rotations, Tectonics, Paleomagnetism.

RESUMEN

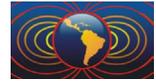
Usualmente, las rotaciones tectónicas sobre ejes verticales son calculadas a través del método propuesto por Demarest (1983) a partir de asumir que las direcciones dentro de un sitio paleomagnético presentan simetría rotacional (Fisher, 1953). Sin embargo, como ya fue señalado por diversos autores, la distribución de las direcciones paleomagnéticas es elongada en dirección N-S (*e.g.* Deenen *et. al.*, 2011; Tauxe y Kent, 2004). Por lo tanto, es inapropiado usar estadísticas de Fisher en conjuntos de datos direccionales. A partir de esta suposición, hemos desarrollado un enfoque de tipo bootstrap para la determinación de rotaciones tectónicas de una manera basada en datos, sin supuestos paramétricos, donde las incertidumbres se calculan empíricamente. Una versión preliminar del programa descrito se encuentra disponible a pedido.

Palabras Clave: Estadística Paleomagnética, Rotaciones sobre ejes verticales, Tectónica, Paleomagnetismo

1. Introducción y desarrollo teórico

Usualmente, las rotaciones tectónicas según ejes verticales se calculan a partir del método propuesto por Demarest (1983). Sin embargo, este método asume simetría rotacional alrededor de la distribución de las medias, y esta aproximación sería insuficiente (*e.g.* Deenen *et al.*, 2011; Tauxe, Kent, 2004). A partir de este supuesto, se desarrolla un método no paramétrico (los códigos VB.net se encuentran disponibles a pedido) para el cálculo de la rotación (ΔR) donde las incertidumbres pueden evaluarse empíricamente mediante un esquema de tipo *bootstrap*:

1. Sea $X = (Dir_1, \dots, Dir_n)$ el conjunto de n observaciones direccionales donde $Dir_i = (Dec_i, Inc_i)$.
2. Sea $X_{ref} = (Dec_{ref}, Inc_{ref})$ la dirección de referencia.
3. Se calcula $\Delta R_i = Dec_i - Dec_{ref}$ y $\Delta I_i = Inc_i - Inc_{ref}$ para cada una de las n direcciones. Se calcula ΔR_{media} y ΔI_{media} como las medias aritméticas. Se obtiene una nueva dirección de referencia que sigue una distribución de Fisher con media en la dirección de referencia y parámetro de concentración $kappa$,



introduciendo de esta manera el error en la dirección de referencia (este procedimiento se denomina *bootstrap paramétrico*). Se calcula ΔR^*_{media} y ΔI^*_{media} .

4. Se repite (3) Nb veces, donde Nb \gg n.
5. ΔR y ΔI se obtienen a partir del Cuantil 50% de todas las ΔDec^*_{media} y ΔInc^*_{media} . Sus límites de confianza representan el Cuantil 2.5% y el Cuantil 97.5% entre los cuales yace el 95% de los datos remuestreados.

2. Aplicación del método en datos paleomagnéticos del sur de Bolivia.

El Terciario Subandino fue estudiado por Gallo (2019) con el objetivo de cuantificar rotaciones según ejes verticales miocenos. Se muestrearon 7 sitios (43 testigos paleomagnéticos, Figura 1) correspondientes a 240 m de espesor estratigráfico. La parte inferior de la columna pertenece a la Formación Tranquitas cuya base fue datada por Uba *et al.* (2009) en 12 ± 0.5 Ma.

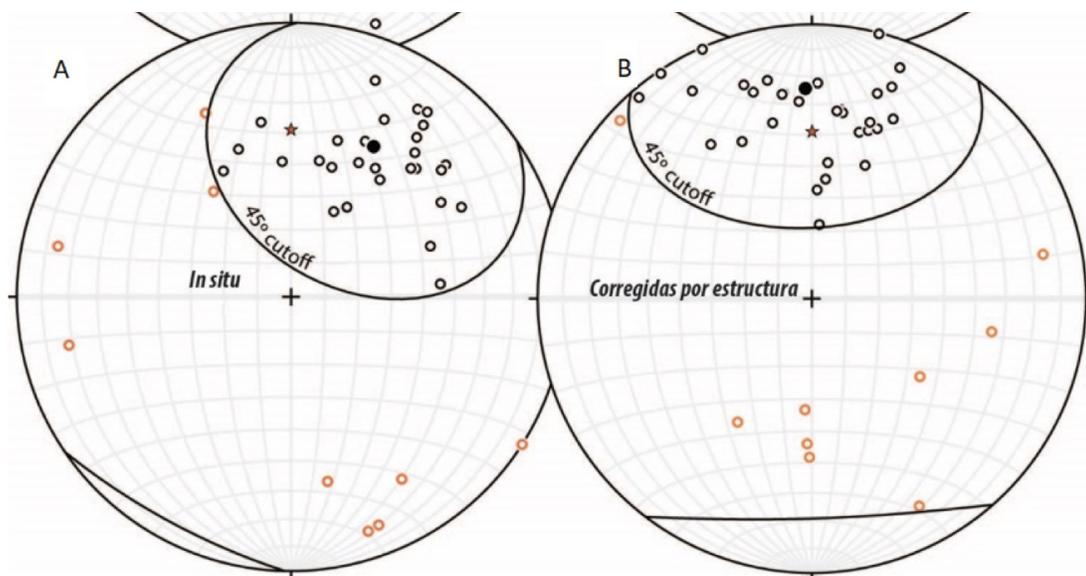


Figura 1. Proyección de igual área de las direcciones obtenidas con círculos rellenos (vacíos) indicando su proyección en el hemisferio inferior (superior). (a) Direcciones in situ y (b) direcciones corregidas por estructura. Las direcciones fueron traspuestas al Hemisferio superior con un semi-ángulo de 45° utilizado como criterio para aceptar o no direcciones (direcciones rechazadas en rojo). La estrella roja indica la dirección del campo actual.

El polo promedio (Latitud 85.70° S, Longitud 308.46° E, $A95 = 7.5$, $K = 10.9$) cuenta con 32 direcciones. Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos y poder cuantificar posibles rotaciones, se tomó como referencia el polo de 10 Ma de la curva de deriva polar aparente global de Torsvik *et al.* (2012), ubicado en Latitud 86.6° S, Longitud 350° E ($A95 = 1.8^\circ$, $n = 29$). Dicho polo fue rotado a coordenadas del cratón de Paraná siguiendo los parámetros de rotación de Torsvik *et al.* (2012) (Lat. 61.8° S, Long. -40.3° , Ángulo = -3.3°).

Para la evaluación de rotaciones se procedió con el método descrito previamente de la siguiente manera:

1. Se calcula la dirección de referencia ($Dir_{referencia}$) a partir del polo de 10Ma (Lat. 86.6° S, Long. 350° E, $A95=1.8^\circ$) rotado a coordenadas de Paraná (Lat 85.6° S, Long. 5.28° E, $A95 = 1.8^\circ$) según el polo de Euler (Lat. 61.8° S, Long -40.3° , Áng. -3.3°). La dirección de referencia en la localidad de estudio es: $Dec_{referencia} = 4.4^\circ$, $Inc_{referencia} = -35.5^\circ$, $A95 = 1.8^\circ$



2. Sea $X = (\text{Dir}_1, \dots, \text{Dir}_n)$ el conjunto de n observaciones direccionales donde $\text{Dir}_i = (\text{Dec}_i, \text{Inc}_i)$. Se calcula $\Delta R_i = \text{Dec}_i - \text{Dec}_{\text{referencia}}$ y $\Delta I_i = \text{Inc}_i - \text{Inc}_{\text{referencia}}$ para cada una de las n direcciones. Se calcula ΔR_{media} y ΔI_{media} como las medias aritméticas.
3. Se obtiene una pseudo-muestra X^* a partir del remuestreo (con reemplazo) de la población original. Se obtiene una nueva dirección de referencia que sigue una distribución de Fisher con media en la dirección de referencia y parámetro de concentración $kappa$ (tomado de Torsvik *et al.*, 2012), introduciendo de esta manera el error en la dirección de referencia (*bootstrap paramétrico*). Se calcula $\Delta R^*_{\text{media}}$ y $\Delta I^*_{\text{media}}$.
4. Se repite (3) Nb veces, donde $Nb \gg n$.
5. ΔR y ΔI se obtienen a partir del Cuantil 50% de todas las $\Delta \text{Dec}^*_{\text{media}}$ y $\Delta \text{Inc}^*_{\text{media}}$. Sus límites de confianza representan el Cuantil 2.5% y el Cuantil 97.5% entre los cuales yace el 95% de los datos remuestreados.

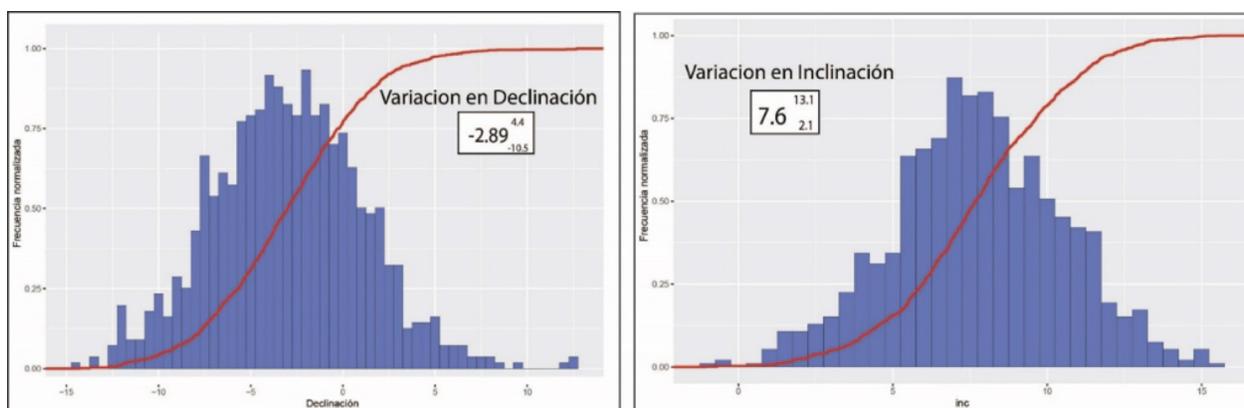
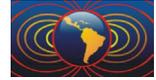


Figura 2. Resultados del cálculo de rotación mediante el método *bootstrap* descrito en el texto. Los histogramas muestran la frecuencia de los ΔR y ΔI *bootstrapeados*. La variabilidad de los parámetros se utilizó para estimar los límites de confianza del 95% que se encuentran entre los valores de 2.5% y 97.5% de las funciones de distribución acumulada empírica (línea roja).

Los resultados indican que la declinación tiene una diferencia angular media de -2.9° (antihorario) con límites de confianza al 95% en 4.4° y -10.5° . El método de Demarest (1983) arrojó un resultado de -5.4° ($\pm 8.61^\circ$), por lo tanto, el intervalo de confianza es mayor que el calculado a partir de la metodología aquí propuesta. Limitar los intervalos de confianza con este enfoque permitirá una interpretación más precisa de los datos paleomagnéticos.

Referencias:

- Deenen, M. H., Langereis, C. G., van Hinsbergen, D. J., & Biggin, A. J., 2011. Geomagnetic secular variation and the statistics of palaeomagnetic directions. *Geophysical Journal International*, 186 (2), 509-520.
- Demarest, H.H., 1983. Error analysis for the determination of tectonic rotation from paleomagnetic data. *Journal of Geophysical Research Solid Earth* 88, 4321–4328. <https://doi.org/10.1029/JB088iB05p04321>
- Fisher, R., 1953. Dispersion on a Sphere. *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 217, 295–305. <https://doi.org/10.1098/rspa.1953.0064>
- Gallo, L.C., 2019. Evolución y formación de Pangea: su control en la sedimentación de la Cuenca de Tarija a partir de datos paleomagnéticos del sur de Bolivia. Tesis de doctorado, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 206 pp.



- Tauxe, L., Kent, D., 2004. A simplified statistical model for the geomagnetic field and the detection of shallow bias in paleomagnetic inclinations: Was the ancient magnetic field dipolar. *Timescales Paleomagn. Field*, 145, 101–115. <https://doi.org/10.1029/145GM08>
- Torsvik, T.H., Van der Voo, R., Preeden, U., Mac Niocaill, C., Steinberger, B., Doubrovine, P. V., van Hinsbergen, D.J.J., Domeier, M., Gaina, C., Tohver, E., Meert, J.G., McCausland, P.J.A., Cocks, L.R.M., 2012. Phanerozoic Polar Wander, Palaeogeography and Dynamics. *Earth-Science Reviews*. 114, 325–368. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.007>
- Uba, C.E., Kley, J., Strecker, M.R., Schmitt, A.K., 2009. Unsteady evolution of the Bolivian Subandean thrust belt: The role of enhanced erosion and clastic wedge progradation. *Earth and Planetary Science Letters* 281, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.02.010>