

# Un servicio digital para la estimación de la dirección de magnetización en anomalías escalares de intensidad total

Ana Carolina Pedraza De Marchi<sup>1,2,3</sup>, Julián L Gómez<sup>2,3,4</sup>

**Resumen** Presentamos un servicio digital desarrollado en Python cuyo objetivo es permitir a geocientistas especializados en métodos potenciales de prospección estimar la dirección de magnetización de cuerpos anómalos a partir de registros de campo. El servicio utiliza para el cálculo numérico dos métodos que emplean el filtro de reducción al polo de las anomalías escalares de intensidad total. Uno de estos métodos optimiza la correlación entre la magnitud del gradiente espacial y el gradiente vertical de la reducción al polo y el otro método consiste en maximizar los mínimos de la reducción al polo. Los usuarios interactúan de manera simplificada con el servicio enviando parámetros de referencia del área y una cuadrícula de anomalías magnéticas y reciben una respuesta automática con la recepción de un reporte que incluye los parámetros de interés. El reporte ofrece al usuario mapas de correlación y de mínimos de la reducción al polo que pueden ajustarse según las necesidades individuales a partir de parámetros propios como el rango de los ángulos considerados, el intervalo de muestreo para el ángulo de inclinación magnética y el intervalo de muestreo para el ángulo de declinación magnética. La guía del servicio se encuentra disponible en la página web de la cátedra de Métodos Potenciales de Prospección de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata. En este trabajo se presenta el servicio de cálculo y se describen los métodos de estimación utilizados, así como sus alcances y limitaciones e ideas de expansión y desarrollos posteriores.

**Palabras clave** Servicio digital, anomalías escalares de intensidad total, dirección de magnetización.

## INTRODUCCIÓN

Los métodos de prospección magnética juegan un papel crucial en diversas áreas de interés prospectivo como la exploración de petróleo, gas y la minería (Nabighian et al., 2005; Liu et al., 2022). Para interpretar adecuadamente las anomalías magnéticas escalares de intensidad total (TFA), es fundamental conocer la dirección de la magnetización total de los cuerpos. Esta dirección usualmente es supuesta como puramente inducida debido a que la descripción de las fuentes que generan la TFA es por lo general incompleta. La presencia de magnetización remanente puede afectar la dirección de la magnetización supuesta, lo que ha llevado a diversos autores (Roest & Pilkington, 1993; Lelièvre & Oldenburg, 2009; Haney & Li, 2002) a explorar métodos para la determinación de la magnetización total. En el servicio digital que ponemos a disposición se implementan dos métodos indirectos: MAX-MIN y COR. MAX-MIN se basa en valores extremos de la reducción al polo (RTP) (Baranov & Naudy, 1964; Keating & Zerbo, 1996), proponiendo una estimación teórica precisa de la dirección de magnetización correcta. COR, por otro lado, utiliza la correlación entre la magnitud del gradiente espacial y el gradiente vertical de la RTP.

Una desventaja de ambos métodos al utilizar la RTP es la inestabilidad numérica de la transformación en el dominio de la frecuencia a baja inclinación, lo que puede ser un desafío para extender el uso del servicio a todas las latitudes. Algunos autores (Ribeiro-Filho et al., 2020, p. ej.) sugieren soluciones a estas inestabilidades no exploradas aún en el servicio presentado en esta etapa de desarrollo. El servicio ofrece una rápida estimación de la dirección como solución de ambos métodos, debido al empleo de la transformada rápida de Fourier. Hemos experimentado en el desarrollo de códigos

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones Geológicas (CIG), La Plata, Argentina. Email: [cpedrazadm@cig.museo.unlp.edu.ar](mailto:cpedrazadm@cig.museo.unlp.edu.ar)

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), La Plata, Argentina.

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

<sup>4</sup>YPF-Tecnología S.A. (Y-TEC), Berisso, Argentina.

de métodos más complejos pero más exactos en los ensayos de casos reales (Gómez & Pedraza De Marchi, 2023). Su incorporación será evaluada en etapas posteriores del servicio o en otros módulos del mismo.

A continuación se resumen las ideas principales de los métodos implementados, se muestran imágenes del procesamiento del software del servicio y finalmente se presenta el servicio digital propuesto y cómo el usuario debe interactuar con el mismo.

## MÉTODOS INDIRECTOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIÓN DE LA MAGNETIZACIÓN

### MAX-MIN

Una de las operaciones que pueden aplicarse a los datos magnéticos es la RTP, la cual transforma las anomalías de campo total medidas a la que generaría una magnetización que tiene la misma magnitud pero está orientada en la dirección vertical. La transformación RTP sólo puede realizarse correctamente cuando se conoce la dirección de la magnetización total. La operación RTP puede continuar aplicándose numéricamente si se utiliza una dirección incorrecta, pero el campo resultante, en general, será más asimétrico que el obtenido por la RTP con la dirección de magnetización correcta. El problema de encontrar la dirección adecuada consiste en determinar el campo RTP resultante menos asimétrico (Dannemiller & Li, 2006). Cuando la anomalía ha sido reducida utilizando la dirección de magnetización correcta, la RTP obtenida muestra anomalías positivas en el centro de la fuente y negativas hacia sus bordes (Liu et al., 2022). Este método señala que el máximo de los mínimos obtenidos en la RTP para distintos valores de inclinación ( $I$ ) y declinación ( $D$ ) indica un valor aproximado a la dirección de magnetización del cuerpo anómalo, lo que puede expresarse como:

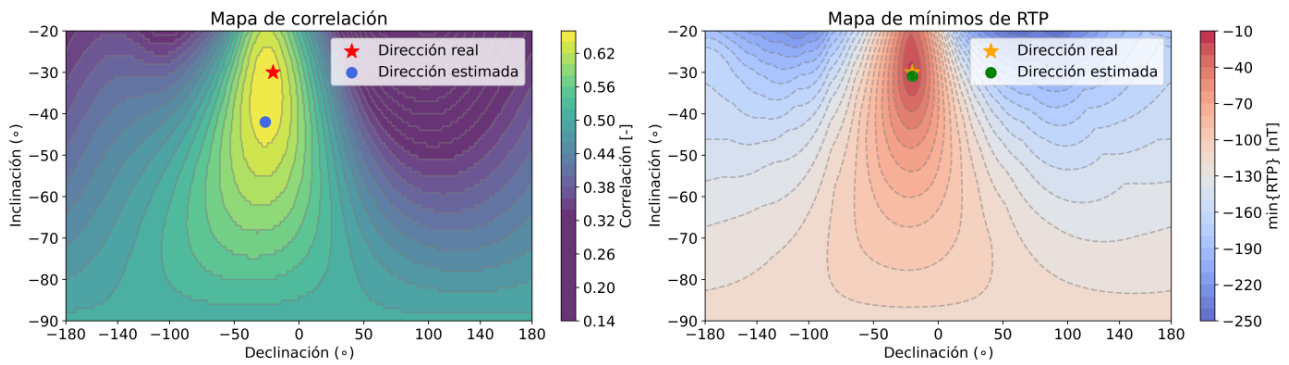
$$\{I^*, D^*\} = \operatorname{argmax}_{I,D} \{ \operatorname{argmin} [RTP(I, D)] \}, \quad (1)$$

siendo  $I^*$  y  $D^*$  los estimadores de los ángulos de inclinación y de declinación.

MAX-MIN sólo requiere el cálculo de un atributo, la RTP, y utiliza la técnica de la búsqueda exhaustiva para estimar la dirección de magnetización. Sin embargo, Liu et al. (2018, 2020) muestran que las estimaciones obtenidas por este método difieren considerablemente de las obtenidas por métodos de correlación, causando errores importantes para las aplicaciones reales (Dannemiller & Li, 2006; Gerovska et al., 2009; Liu et al., 2015; Zhang et al., 2018; Ribeiro-Filho et al., 2020). El método MAX-MIN es sensible a la relación señal/ruido de la TFA, situación que puede considerar el usuario aplicando estrategias de reducción de ruido, como la aplicación de filtro Wiener (Hansen & Pawlowski, 1989), antes de suministrar los datos al servicio.

### COR

El método de correlación COR emplea dos magnitudes comúnmente utilizadas en la interpretación de datos magnéticos: el gradiente vertical (GV) y el gradiente total del campo magnético en la reducción al polo. El gradiente total (GRAD) representa la envolvente del GV del campo magnético en todas las posibles direcciones de inducción y magnetización (Haney et al., 2003), lo que lo hace menos asimétrico entre los diferentes gradientes magnéticos. Para problemas 2D, la envolvente del GRAD se puede calcular fácilmente (Nabighian, 1972) y se utiliza como referencia para calibrar el grado de simetría del GV de la RTP estimada. Sin embargo, para problemas 3D, esta envolvente no se puede calcular sin conocer la verdadera dirección de la magnetización (Haney & Li, 2002), lo que resulta en una falta de referencia fija para la comparación en 3D. Por otro lado, tanto el GRAD como el GV de la RTP estimados alcanzan la máxima simetría cuando se utiliza la dirección de magnetización correcta, lo que maximiza su correlación. La correlación entre estos dos gradientes para un RTP arbitrario



**Figura 1.** Servicio desarrollado para la carga de datos y el cálculo de mapas de correlación y la estimación resultante de los ángulos de inclinación y declinación magnética. En este ejemplo se muestra una verificación numérica que utiliza datos sintéticos, donde la dirección de magnetización es conocida. Izquierda: método COR. Derecha: método MAX-MIN.

diferente al calculado con los parámetros correctos es más débil. Por lo tanto, la correlación cruzada de estas dos cantidades sigue siendo efectiva para determinar el grado de simetría del GV en 3D (Dannemiller & Li, 2006). En resumen, el máximo en el mapa de correlación  $r(I, D)$  entre la magnitud del GRAD espacial y del GV de la RTP indica un valor aproximado de la dirección de magnetización  $(I^*, D^*)$  del cuerpo anómalo:

$$\{I^*, D^*\} = \operatorname{argmax}_{I, D} [r(I, D)]. \quad (2)$$

Aunque no existe una prueba analítica que demuestre que estas dos cantidades deben tener una correlación máxima para la verdadera dirección de magnetización, su utilidad práctica se confirma mediante observaciones empíricas.

Dado que COR requiere calcular la reducción RTP y la magnitud del GRAD en distintos pares  $(I, D)$ . Al utilizar dos atributos, resulta más costoso en comparación con el método MAX-MIN. El método COR emplea la búsqueda exhaustiva para estimar la dirección de magnetización, aunque tiene una menor sensibilidad a la relación señal/ruido que el método MAX-MIN.

## SERVICIO DIGITAL

El servicio digital propuesto se encuentra en sus primeras etapas. Para ilustrarlo, presentamos las figuras de salida que se generan al procesar los datos proporcionados por el usuario en la Figura 1. Esta figura muestra los mapas resultantes de un ensayo en el que utilizamos un modelo programado para calcular la TFA de un prisma recto de base rectangular semi-infinito en dirección vertical y con magnetización uniforme (Bhattacharyya, 1964). Posteriormente enviamos un correo electrónico al servicio, en el que solo es necesario adjuntar los parámetros de referencia del área y una cuadrícula de datos de la TFA, siguiendo las simples especificaciones de la guía del usuario. Finalmente, después de realizar el procesamiento, el servicio envía automáticamente un informe con la estimación de los parámetros de interés.

## CONCLUSIONES Y PRÓXIMAS ETAPAS DEL SERVICIO

El servicio de cálculo ofrece una solución accesible para la estimación rápida de la dirección de magnetización de cuerpos anómalos mediante el procesamiento de la TFA. Su implementación en el lenguaje Python garantiza flexibilidad, facilidad de mantenimiento y adaptabilidad a las necesidades cambiantes de los usuarios. La utilización de la infraestructura de alto rendimiento de los servidores

de la nube asegura una ejecución eficiente y confiable del servicio.

Los métodos de cómputo utilizados, basados en el filtro de RTP de la TFA, han demostrado ser eficaces para calcular la dirección de magnetización, ofreciendo resultados de estimación confiables al señalar la presencia de componente de magnetización remanente. La posibilidad de ajustar parámetros específicos de los métodos permite una mayor personalización y control por parte de los usuarios.

Algunas áreas de desarrollo de las próximas etapas del servicio incluyen la migración del servidor a uno propio de la institución educativa y/o gubernamental correspondiente, para mejorar el control y la disponibilidad temporal; la incorporación de nuevos módulos con métodos que requieran mayor tiempo de cálculo, con el objetivo de mejorar la precisión y eficacia del servicio. Por ejemplo, se contempla la inclusión del método de inversión no lineal con condición de no negatividad (Reis et al., 2020), que proporcionaría una validación más robusta de los resultados. Además, se continuará con la investigación y desarrollo para mantener el servicio optimizado y actualizado con los últimos avances en la interpretación de datos magnéticos.

El servicio digital de estimación de la dirección de magnetización presentado puede constituir una herramienta de interés para la comunidad científica y profesional en el campo de los métodos potenciales de prospección (<http://carina.fcaglp.unlp.edu.ar/mpp>).

## REFERENCIAS

- Baranov, V. & Naudy, H.** (1964). Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics*, 29(1), 67–79. <https://doi.org/10.1190/1.1439334>
- Bhattacharyya, B. K.** (1964). Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization. *Geophysics*, 29(4), 517. <https://doi.org/10.1190/1.1439386>
- Dannemiller, N. & Li, Y.** (2006). A new method for determination of magnetization direction. *Geophysics*, 71(6), L69–L73. <https://doi.org/10.1190/1.2356116>
- Gerovska, D., Araúzo-Bravo, M. J., & Stavrev, P.** (2009). Estimating the magnetization direction of sources from southeast bulgaria through correlation between reduced-to-the-pole and total magnitude anomalies. *Geophysical Prospecting*, 57, 491–505. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2008.00761.x>
- Gómez, J. & Pedraza De Marchi, A. C.** (2023). Estimación de la dirección de magnetización por métodos indirectos. *Actas de trabajos completos del E-ICES 17 (17 Encuentro internacional de ciencias de la tierra)*, 259–267.
- Haney, M., Johnston, C., Li, Y., & Nabighian, M.** (2003). Envelopes of 2D and 3D magnetic data and their relationship to the analytic signal: Preliminary results. *73rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 596–599.
- Haney, M. & Li, Y.** (2002). Total, magnetization direction and dip from multiscale edges. *72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 735–738.
- Hansen, R. O. & Pawlowski, R. O.** (1989). Reduction to the pole at low latitudes by Wiener filtering. *Geophysics*, 54, 1607–1613. <https://doi.org/10.1190/1.1442628>
- Keating, P. & Zerbo, L.** (1996). An improved technique for reduction to the pole at low latitudes. *Geophysics*, 61(1), 131–137. <https://doi.org/10.1190/1.1443933>
- Lelièvre, P. G. & Oldenburg, D. W.** (2009). A 3d total magnetization inversion applicable when significant, complicated remanence is present. *Geophysics*, 74(3), L21–L30. <https://doi.org/10.1190/1.3103249>
- Liu, S., Fedi, M., Hu, X., Baniamerian, J., Wei, B., Zhang, D., & Zhu, R.** (2018). Extracting induced and remanent magnetizations from magnetic data modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 9290–9309. <https://doi.org/10.1029/2017JB015364>
- Liu, S., Hu, X., Xi, Y., Liu, T., & Xu, S.** (2015). 2d sequential inversion of total magnitude and total magnetic anomaly data affected by remanent magnetization. *Geophysics*, 80(3), K1–K12. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0019.1>
- Liu, S., Hu, X., Zhang, D., Wei, B., Geng, M., Zuo, B., Zhang, H., & Vatankhah, S.** (2020). The idq curve: A tool for evaluating the direction of remanent magnetization from magnetic anomalies. *Geophysics*, 85, J85–J98. <https://doi.org/10.1190/geo2019-0545.1>
- Liu, Y. X., Li, W. Y., & Ma, G. Q.** (2022). Oil and gas basin analysis based on airborne gravity and magnetic data. *Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s11770-022-0970-2>

- Nabighian, M.** (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37, 507–517.
- Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Peirce, J. W., Phillips, J. D., & Ruder, M. E.** (2005). The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70, 33ND–61ND. <https://doi.org/10.1190/1.2133784>
- Reis, A. L. A., Oliveira, V. C., & Barbosa, V. C. F.** (2020). Generalized positivity constraint on magnetic equivalent layers. *Geophysics*, 85, J99–J110. <https://doi.org/10.1190/geo2019-0706.1>
- Ribeiro-Filho, N., Bijani, R., & Ponte-Neto, C.** (2020). Improving the cross-correlation method to estimate the total magnetization direction vector of isolated sources: A space-domain approach for unstable inclination values. *Geophysics*, 85(4), J59–J70. <https://doi.org/10.1190/geo2019-0008.1>
- Roest, W. & Pilkington, M.** (1993). Identifying remanent magnetization effects in magnetic data. *Geophysics*, 58, 653–659. <https://doi.org/10.1190/1.1443449>
- Zhang, H., Ravat, D., Marangoni, Y. R., Chen, G., & Hu, X.** (2018). Improved total magnetization direction determination by correlation of the normalized source strength derivative and the reduced-to-pole fields. *Geophysics*, 83(6), J75–J85. <https://doi.org/10.1190/geo2017-0178.1>