

Laboratorio de Magnetismo de Materiales y Magnetismo Ambiental (L-MAGMA)



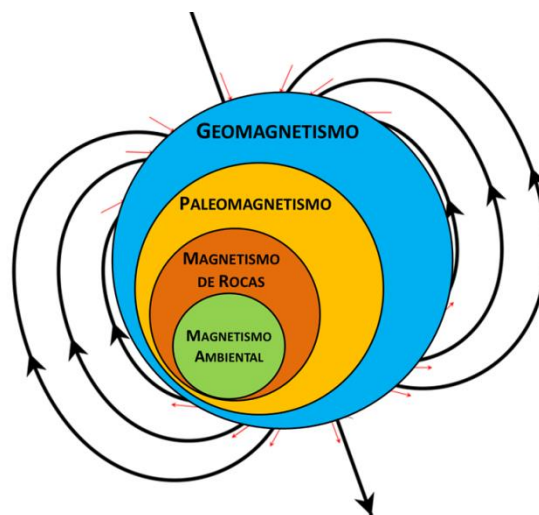
¿Qué es el magnetismo ambiental?

1. Definición	2
2. Caracterización magnética de materiales: parámetros principales	5
3. Proyectos de Investigación en marcha	7
4. Bibliografía	9

1. Definición

Geomagnetismo → Paleomagnetismo → Magnetismo de Rocas → **Magnetismo Ambiental**

El **Magnetismo Ambiental** (*Environmental Magnetism*) es la aplicación del **Magnetismo de Rocas** (*Rock Magnetism*) al estudio de procesos o problemas medioambientales (sedimentos recientes), así como paleoambientales y paleoclimáticos (sedimentos más antiguos). El Magnetismo de Rocas, desarrollado como subdisciplina dentro del **Paleomagnetismo** (rama del **Geomagnetismo** dedicada al estudio del campo magnético terrestre en el pasado y su aplicación al estudio de procesos y problemas geológicos y tectónicos), consiste en el análisis y caracterización magnética de materiales geológicos y su aplicación como herramienta de caracterización e identificación mineralógica.



Debido a que todo material contiene cargas eléctricas en movimiento y con momentos magnéticos intrínsecos (de espín), estrictamente hablando cualquier material reacciona ante la presencia de un campo magnético externo, por lo que cualquier material puede ser investigado en base a su caracterización magnética. No obstante, son especialmente relevantes los materiales con un comportamiento ferromagnético (*sensu lato*), que en laboratorio desarrollan respuestas muy intensas y características frente a campos magnéticos. Este comportamiento magnético puede

ser usado para identificar la naturaleza mineralógica del material o mineral considerado (composición química y estructura cristalina), así como para obtener información acerca de otros aspectos, como la forma o el tamaño de los granos o cristales. En la naturaleza, los minerales más importantes estudiados por el Magnetismo Ambiental son los distintos compuestos de hierro, fundamentalmente los distintos óxidos (p. ej. magnetita, hematites, maghemita), oxi-hidróxidos (p.ej. goethita, lepidocrocita, ferrihidrita) y sulfuros de hierro (p. ej. greigita, pirrotina), así como términos intermedios de las series de solución sólida de las titanomagnetitas, titanohematites, magnesioferritas, espinelas, etc. Otros materiales menos abundantes pero potencialmente presentes en determinados casos pueden ser compuestos de cromo (cromitas), níquel (trevorita) o incluso hierro metálico.

El Magnetismo Ambiental se centra por tanto en el uso de las propiedades magnéticas de los sedimentos marinos, lacustres, fluviales y eólicos, así como de los suelos, el polvo atmosférico depositado en diversas superficies y distintos tipos de residuos mineros e industriales, para su caracterización mineralógica y textural, incluyendo su evolución temporal y cartografía espacial, y la utilización de este conocimiento para la investigación y resolución de problemas medioambientales (condiciones actuales) o paleoambientales (condiciones ambientales y paleoclimáticas en el pasado). Como se ha dicho, la medida de las propiedades magnéticas de este tipo de materiales es especialmente sensible a la presencia y características de la fracción mineral ferromagnética (*sensu lato*) presente en el material (goethita, greigita, pirrotina, magnetita, maghemita, hematites, etc.; ver Dunlop y Özdemir, 2001). En materiales naturales, esta fracción suele constituir un porcentaje muy pequeño de la mineralogía total, pero su mineralogía concreta y sus características (tamaño de grano, forma, estado magnético, concentración) es muy sensible a las variaciones de diversos parámetros ambientales y climáticos (tasas de erosión, medio de transporte y sedimentación; aporte de materia orgánica a los sedimentos y condiciones redox; tasas de precipitación y procesos de edafogénesis; patrones de circulación atmosférica y oceánica; Maher y Thompson, 1999; Evans y Heller, 2003; Liu et al., 2012; Jordanova, 2016), por lo que puede ser usada como trazador (*proxy*) de los cambios, tanto temporales como espaciales, en dichos parámetros ambientales. Además, un gran número de fuentes de contaminación antrópica producen cantidades importantes de materiales ferromagnéticos que son redistribuidos por la circulación atmosférica, fluvial y oceánica, así como depósitos masivos de minas, fundiciones, etc., con presencia de material ferromagnético en altos porcentajes (Thompson y Oldfield, 1986; Heller et al., 1998; Maher y Thompson, 1999; Evans y Heller, 2003; Jordanova et al., 2004; Zhang et al., 2011; Liu et al., 2012; Scoullios et al., 2014; Snowball et al., 2014;

Wang et al., 2017). Cabe destacar aquí la presencia generalizada en sedimentos muy recientes (posteriores a la Revolución Industrial) de microesférulas magnéticas, ricas en magnetita y hematites, procedentes del *fly ash* industrial que se genera por la quema de combustibles fósiles, especialmente carbón, y que se distribuye mediante la circulación atmosférica. Otras muchas actividades humanas, aún sin generar nuevos materiales ferromagnéticos, son capaces de alterar los procesos naturales que determinan la presencia y distribución de la fracción ferromagnética no antropogénica (ver un resumen en Snowball et al., 2014).

La aplicación del magnetismo ambiental al estudio de las condiciones paleoambientales y paleoclimáticas en el pasado reviste también gran importancia para la resolución de los problemas ambientales y climáticos actuales, pues conocer la evolución de esas condiciones constituye un requisito indispensable para la comprensión del funcionamiento de los sistemas climáticos y biológicos terrestres en diferentes regímenes y para el pronóstico de la evolución futura de dichos sistemas bajo el forzamiento antrópico. Esto es especialmente importante en el caso de estudios concentrados en el pasado terrestre reciente (Holoceno, Pleistoceno, Plioceno y Mioceno), aunque el conocimiento de eventos climáticos de calentamiento abrupto o de perturbaciones biológicas masivas más antiguos es también relevante (por ejemplo el límite Cretácico-Paleógeno y el PETM o máximo térmico del Paleoceno-Eoceno; Villasante-Marcos et al., 2007, 2009, 2010, 2015; Hollis et al., 2015; De la Parra et al., 2022).

En España, durante las últimas décadas, se han desarrollado diversos trabajos en el ámbito del magnetismo ambiental aplicado tanto a condiciones presentes como pasadas (ver por ejemplo: Rey et al., 2000, 2005; Larrasoña et al., 2003; Gómez-Paccard et al., 2003; McIntosh et al., 2004, 2007; Dávila et al., 2006; Mohamed et al., 2011; Rubio et al., 2011; Larrasoña et al., 2013; Jiménez-Moreno et al., 2013; Rodríguez-Germade et al., 2014; Gómez-García et al., 2015; Constanzo-Álvarez et al., 2017; Irabien et al., 2018; Gardoki et al., 2021). Es evidente el gran interés, no sólo científico sino sobre todo social, que tiene esta línea de trabajo y todas aquellas que están destinadas a la resolución e investigación de problemas medioambientales, ya que estos problemas se encuentran entre los más graves que afectan a nuestra sociedad en el presente y con toda seguridad aumentarán su importancia en el futuro.

2. Caracterización magnética de materiales: parámetros principales

La utilidad del magnetismo ambiental se basa en varios factores:

- i) La ubicuidad de los minerales ferromagnéticos, tanto naturales como artificiales en el caso de sedimentos muy recientes. Estos minerales pueden tener diferentes orígenes, por ejemplo mediante meteorización, erosión, transporte y sedimentación de rocas ígneas, meteamórficas o sedimentarias que los contengan, mediante neoformación en el propio suelo o sedimento por procesos de edafogénesis o durante la diagénesis temprana del sedimento, muy sensible a las condiciones redox del mismo, o mediante procesos antropogénicos de generación de nuevas fases magnéticas como productos de contaminación. En cualquier ambiente sedimentario, tanto del pasado como reciente o actual, siempre hay una fracción de material ferromagnético involucrada y que queda archivada en el registro sedimentario. Esta fracción, sensible a todos los procesos ambientales y sedimentarios que afectan al sedimento y determinan su composición y textura, puede ser usada como *proxy* (trazador indirecto) de dichos procesos y su evolución con el tiempo.
- ii) La gran sensibilidad de las técnicas de análisis magnético, capaces de detectar cantidades muy pequeñas de material ferromagnético inmersas en una matriz de material paramagnético o diamagnético. Además, estas técnicas son sensibles no sólo a la composición y a la mineralogía del mineral en cuestión, sino también a otros aspectos como el tamaño, la forma y la orientación de los granos minerales dentro de la matriz.
- iii) El carácter no destructivo de la mayoría de los análisis magnéticos. La mayoría de estos análisis implican la aplicación de campos magnéticos de diferente intensidad en condiciones controladas de laboratorio y la medida de la respuesta magnética del material, sin modificar ningún otro aspecto de la muestra. Sólo algunas medidas, como la obtención de ciclos termomagnéticos y temperaturas de Curie, implican calentamiento de la muestra a altas temperaturas (y por tanto su transformación irreversible). El resto de medidas permiten trabajar con cantidades pequeñas de material y, al no ser destructivas, permiten reutilizar el mismo material para otros análisis (geoquímica, microfósiles, microscopía, etc.).

- iv) La gran rapidez con la que se pueden llevar a cabo los análisis de magnetismo ambiental, al menos de algunos parámetros básicos como la susceptibilidad magnética y su dependencia con la frecuencia (χ y χ_{fd}).

La caracterización magnética completa de un material implica la realización de distintos tipos de medidas y experimentos, que proporcionan los valores de diferentes parámetros magnéticos. Algunos de los más importantes y su significado son los siguientes:

- A) Susceptibilidad magnética volumétrica (κ) o normalizada por la masa (χ). Es el menos diagnóstico de los parámetros magnéticos, ya que todos los minerales y materiales presentes en una muestra contribuyen a ella, ya sean ferromagnéticos (*sensu lato*; por ejemplo magnetita, hematites o goethita) con susceptibilidad positiva y muy grande, paramagnéticos (p. ej. arcillas) con susceptibilidad positiva y pequeña o diamagnéticos (p. ej. calcita, sílice, materia orgánica o agua) con susceptibilidad negativa y muy pequeña. Las variaciones de susceptibilidad se interpretarán como variaciones en la abundancia o proporción de estos posibles componentes que contribuyen a la señal total.
- B) Dependencia de la susceptibilidad con la frecuencia de medida (κ_{fd} o χ_{fd}). Proporciona un indicio y una estimación semicuantitativa o relativa de la presencia de granos ferromagnéticos de tamaño muy fino (en estado superparamagnético).
- C) Dependencia de la susceptibilidad con la temperatura (ciclos termomagnéticos). Permite la identificación unívoca de minerales y materiales mediante sus temperaturas de Curie (medidas a alta temperatura hasta $\sim 800^\circ\text{C}$), u otras temperaturas críticas de transición magnética como las de Morin o de Verwey (medidas a baja temperatura), que son diagnósticas de los distintos minerales. Permite también la investigación de las transformaciones mineralógicas producidas durante el calentamiento de la muestra, con lo que se puede obtener información sobre su composición original. Además, las medidas a baja temperatura permiten detectar la presencia de material superparamagnético de grano muy fino.
- D) Parámetros de histéresis magnética, obtenidos mediante la medida de ciclos de histéresis (imanación inducida) y remanencia (imanación remanente). Los más importantes son la imanación de saturación (M_s), imanación remanente de saturación (M_{rs}), coercitividad (B_c), coercitividad de la remanencia (B_{cr}), imanación remanente a alto campo (HIRM), diferentes s-ratios ($S_{100\text{mT}}$, $S_{300\text{mT}}$), etc. Además de ayudar en la identificación mineralógica, estos parámetros

proporcionan información crucial sobre la proporción y abundancia de distintas fases magnéticas (fases de baja coercitividad como la magnetita *versus* fases de alta coercitividad como la hematites), así como su estado magnético, que está relacionado con el tamaño y la forma de los granos.

- E) Dependencia de la imanación de saturación (M_s) con la temperatura, que al igual que en el caso de la dependencia de la susceptibilidad con la temperatura permite la identificación unívoca de minerales.
- F) Anisotropía de la susceptibilidad magnética (AMS). Permite investigar la orientación estadística de los granos ferromagnéticos dentro de la matriz sedimentaria, y con ello obtener información sobre procesos que afectaron a la formación del sedimento, tales como la presencia de paleocorrientes fluviales u oceánicas, presencia de compactación, circulación de fluidos diagenéticos, etc.

Sin pretender ser exhaustiva, la lista anterior permite hacerse una idea de la variedad de medidas magnéticas involucradas en un estudio de magnetismo ambiental, así como de la variedad y complejidad de la información que se puede extraer acerca tanto de las muestras analizadas como de los procesos ambientales y sedimentarios que han sido responsables de su formación y sus características.

3. Proyectos de Investigación en marcha

En la actualidad, L-MAGMA participa en los siguientes Proyectos de Investigación financiados con fondos públicos, dentro de los cuales se encarga de llevar a cabo íntegramente todas las medidas de magnetismo ambiental:

Nombre del proyecto: Desoxigenación, contaminación por metales y alteraciones de la productividad primaria en el Mediterráneo: evidencias geoquímicas de escenarios de cambio climático pasado (DEPROMED-G)

Entidad de realización: Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra

Nombres investigadores principales (IP): Francisca Martínez Ruiz

Entidad/es financiadora/s: Ministerio de Ciencia e Innovación

Fecha de inicio-fin: 2022 - 2024

Nombre del proyecto: Respuesta de los sistemas de cuevas y lagos al cambio climático regional y las actividades humanas en España: Impactos y estrategias de adaptación (CALACLIMP)

Entidad de realización: Universidad Complutense de Madrid

Nombres investigadores principales (IP): Javier Martín Chivelet y Mario Morellón Marteles

Entidad/es financiadora/s: Ministerio de Ciencia e Innovación

Fecha de inicio-fin: 2022 - 2025

Nombre del proyecto: Evolución de la productividad biológica marina en el Mediterráneo: nuevas perspectivas sobre el impacto del cambio climático, la desoxigenación y el aporte eólico (PROMEDED)

Entidad de realización: Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra

Nombres investigadores principales (IP): Francisca Martínez Ruiz

Entidad/es financiadora/s: Ministerio de Ciencia e Innovación

Fecha de inicio-fin: 01/06/2020 - 01/06/2023

Nombre del proyecto: Registro sedimentario antropoceno en la zona costera del norte de Iberia atlántica (ANTROPICOSTA-2)

Entidad de realización: Universidad del País Vasco UPV/EHU

Nombres investigadores principales (IP): Alejandro Cearreta Bilbao y María Jesús Irabien Gulias

Entidad/es financiadora/s: Ministerio de Ciencia e Innovación.

Fecha de inicio-fin: 01/01/2019 - 31/12/2023

4. Bibliografía

(En negrita los textos de referencia básicos sobre Magnetismo Ambiental)

- Constanzo-Álvarez, V., Devesa-Rey, R., Aldana, M., Barral, M.T., López-Rodríguez, D., Andrade, B., 2017. Magnetic properties of surface sediments as proxies of recent anthropogenic pollution in the Anllons riverbed (NW Spain). *Environmental Earth Sciences* 76:454.

- Davila, A.F, Rey, D., Mohamed, K.J., Rubio, B., Guerra, A.P., 2006. Mapping the sources of urban dust in a coastal environment by measuring magnetic parameters of *Platanus hispanica* leaves. *Environ Sci Technol* 40:3922–3928.

- De la Parra, F., Jaramillo, C., Kaskes, P., Goderis, S., Claeys, P., Villasante Marcos, V., Bayona, G., Hatsukawa, Y., Caballero-Rodríguez, D., 2022. Unraveling the record of a tropical continental Cretaceous-Paleogene boundary in northern Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences* 114 - 10, pp. 103717.

- **Dunlop, D.J., Özdemir, Ö., 2001. *Rock Magnetism*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 573 pp.**

- **Evans, M.E., Heller, F., 2003. *Environmental magnetism*. Academic Press, 299 pp.**

- Gardoki, J., Cearreta, A., García-Artola, A., Irabien, M.J., Gómez-Arozamena, J.E., Villasante-Marcos, V., Quijada, I.E., 2021. 19th-century environmental transformation of an industrialized estuary: the Avilés sedimentary record (Asturias, N Spain). *Comunicações Geológicas*. 108, pp. 85 - 90.

- Gómez-García, C., Martín-Hernandez, F., López-García, J.A., Martínez-Pagán, P., Manteca, J.I., Carmona, C., 2015. Rock magnetic characterization of the mine tailings in Portman Bay (Murcia, Spain) and its contribution to the understanding of the bay infilling process. *Journal of Applied Geophysics* 120, 48–59.

- Gómez-Paccard, M., McIntosh, G., Villasante, V., Osete, M.L., Rodríguez-Fernández, J., Gómez-Sal, J.C., 2003. Low-temperature and high magnetic field measurements of atmospheric particulate matter. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol 272-276, 2420-2421.

- Heller, F., Strzyszczyk, Z., Magiera, T., 1998. Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland. *Journal of Geophysical Research* 103, 17767-17774.

- Hollis, C.J., Hines, B.R., Littler, K., Villasante-Marcos, V., Kulhanek, D.K., Strong, C.P., Zachos, J.C., Eggins, S.M., Northcote, L., Phillips, A., 2015. The Paleocene–Eocene Thermal Maximum at DSDP Site 277, Campbell Plateau, southern Pacific Ocean. *Climate of the Past* 11, 1009-1025.

- Irabien, M.J., Cearreta, A., Serrano, H., Villasante-Marcos, V., 2018. Environmental regeneration processes in the Anthropocene: The Bilbao estuary case (northern Spain). *Marine Pollution* 135, 977-987.

- Jiménez-Moreno, G., Pérez-Asensio, J.N., Larrasoaña, J.C., Aguirre, J., Civis, J., Rivas-Carballo, M.R., Valle-Hernández, M.F., González-Delgado, J.A. (2013). Vegetation, sea-level, and climate changes during the Messinian salinity crisis. *Geological Society of America Bulletin* 125, 432-444.

- **Jordanova, N., 2016. Soil magnetism. Academic Press, 466 pp.**

- Jordanova, D., Hoffmann, V., Fehr, K.T., 2004. Mineral magnetic characterization of anthropogenic magnetic phases in the Danube river sediments (Bulgarian part). *Earth and Planetary Science Letters* 221 (2004) 71-89.

- Larrasoaña, J.C., Roberts, A.P., Rohling, E.J. (2013). Dynamics of green Sahara periods and their role in hominin evolution. *PLoS One* 8, E76514.

- Larrasoaña, J.C., Roberts, A.P., Rohling, E.J., Winklhofer, M., Wehausen, R. (2003). Three million years of monsoon variability over the northern Sahara. *Climate Dynamics*, 21, 689-698.

- Liu, Q., Roberts, A.P., Larrasoaña, J.C., Banerjee, S.K., Guyodo, Y., Tauxe, L., Oldfield, F., 2012. **Environmental magnetism: principles and applications. *Reviews of Geophysics* 50, RG4002/2012.**

- Maher, B.A., Thompson, R. (eds), 1999. **Quaternary climates, environments and magnetism. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 402 pp.**

- McIntosh, G., Gomez-Paccard, M., Osete, M.L., Villasante-Marcos, V., 2004. Magnetic characterisation and mapping of urban dust in Madrid, Spain. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, vol. 85, no. 47, Suppl., Abstract GP31B-0837.

- McIntosh, G., Gómez-Paccard, M., Osete, M.L., 2007. The magnetic properties of particles deposited on *Platanus 9 hispanica* leaves in Madrid, Spain, and their temporal and spatial variations. *Science of the Total Environment* 382:135–146.

- Rey, D., López-Rodríguez, N., Rubio, B., Vilas, F., Mohamed, K.J., Pazos, O., Bógalo, M.F., 2000. Magnetic properties of estuarine-like sediments. The study case of the Galician Rías. *J Iberian Geol* 26:151–170.

- Rey, D., Mohamed, K.J., Bernabeu, A., Rubio, B., Vilas, F., 2005. Early diagenesis of magnetic minerals in marine transitional environments: geochemical signatures of hydrodynamic forcing. *Mar Geol* 215:215–236.

- Rodríguez-Germade, I., Mohamed, K.J., Rey, D., Rubio, B., García, A., 2014. The influence of weather and climate on the reliability of magnetic properties of tree leaves as proxies for air pollution monitoring. *Sci Total Environ* 468–469:892–902. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.09.009.

- Rubio, B., Álvarez-Iglesias, P., Bernabeu, A.M., León, I., Mohamed, K.J., Rey, D., Vilas, F., 2011. Factors controlling the incorporation of trace metals to coastal marine sediments: cases of study in the Galician Rías Baixas (NW Spain). En Agboola, J. (ed) *Relevant perspectives in global environmental change*. In Tech, Rijeka, pp 65–88.

- Scoullou, M., Botsou, F., Zeri, C., 2014. Linking environmental magnetism to geochemical studies and management of trace metals. Examples from fluvial, estuarine and marine systems. *Minerals* 2014, 4, 716-745.

- Snowball, I., Hounslow, M.W., Nilsson, A., 2014. Geomagnetic and mineral magnetic characterization of the Anthropocene. En Waters, C.N., Zalasiewicz, J.A., Williams, M., Ellis, M.A., Snelling, A.M. (eds) *A stratigraphical basis for the Anthropocene*, Geological Society of London Special Publication 395, 119-141.

- **Thompson, R., Oldfield, F., 1986. Environmental magnetism. Allen&Unwin, London, UK, 227 pp.**

- Villasante-Marcos, V., Martínez-Ruiz, F., Osete, M.L., Urrutia-Fucugauchi, J., 2007. Magnetic characterization of Cretaceous-Tertiary boundary sediments. *Meteoritics & Planetary Science* 42, n. 9, 1505-1528.

- Villasante-Marcos, V., Hollis, C.J., Dickens, G.R., Nicolo, M., 2009. Rock magnetic properties across the Paleocene-Eocene Thermal Maximum in Marlborough, New Zealand. *Geologica Acta*, vol. 7, nos. 1-2, 229-242.

- Villasante-Marcos, V., Martínez-Ruiz, F., Osete, M.L., Lamolda, M.A., 2010. The Cretaceous-Tertiary boundary in the Iberian Peninsula marine record: meteoritic impact phases, diagenesis and paleoenvironmental effects deduced from rock magnetism. *Revista de Física de la Tierra* 22, 81-124.

- **Walden, J., Oldfield, F., Smith, J. (eds), 1999. Environmental magnetism: a practical guide. Technical Guide No. 6, Quaternary Research Association, London, 243 pp.**

- Wang, G., Liu, Y., Chen, J., Ren, F., Chen, Y., Ye, F., Zhang, W., 2017. Magnetic evidence for heavy metal pollution of topsoil in Shanghai, China. *Frontiers in Earth Sciences*, DOI:10.1007/s11707-017-0624-5.

- Zhang, C., Qiao, Q., Piper, J.D.A., Huang, B., 2011. Assessment of heavy metal pollution from a Fe-smearing plant in urban river sediments using environmental magnetic and geochemical methods. *Environmental Pollution* 159, 3057-3070.

- Zhou, W., Van der Voo, R., Peacor, D.R., Zhang, Y., 2000. Variable Ti-content and grain size of titanomagnetite as a function of cooling rate in very Young MORB. *Earth and Planetary Science Letters* 179, 9-20.