



Maglber 2026

25 ANIVERSARIO

LIBRO DE RESÚMENES

MELIDE, A Coruña

9-11 de Julio de 2026



CIP. Biblioteca Universitaria

MAGIBER (15º. 2026. Melide, A Coruña)

MagIber 2026 [Recurso electrónico]: Out-of-Phase, 25 aniversario, Melide (A Coruña) 9-11 de julio / editores, Lidia Rodríguez Méndez, Néstor Vegas Tubía, Aitor Aranguren Iriarte. – Datos. – [Leioa]: Servicio Editorial de Euskal Herriko Unibertsitatea = Euskal Herriko Unibertsitateko Argitalpen Zerbitzua, [2026]. – 1 recurso en línea : PDF (102 p.)

Modo de acceso: World Wide Web.

En cub.: Libro de resúmenes.

ISBN. 978-84-1319-813-2

1. Paleomagnetismo – Congresos. 2. Geología – Península ibérica – Congresos.
I. Rodríguez Méndez, Lidia, coed. II. Vegas Tubía, Néstor, coed. III. Aranguren Iriarte, Aitor, coed.

(0.034)550.384(063)

© Euskal Herriko Unibertsitateko Argitalpen Zerbitzua
Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco

ISBN:978-84-1319-813-2

Maglber 2026

Out-of-Phase

25 ANIVERSARIO



Melide (A Coruña)

9-11 de Julio

Editores

Lidia Rodríguez Méndez

Néstor Vegas Tubía

Aitor Aranguren Iriarte

Comité Organizador

Aitor Aranguren Iriarte (Universidad del País Vasco)
Iván Asensio Cantero (Universidad del País Vasco)
Cláudia Cruz (Universidade do Porto)
Lidia Rodríguez-Méndez (Universidad del País Vasco)
Helena Sant'Ovaia (Universidade do Porto)
Néstor Vegas Tubía (Universidad del País Vasco)

Comité Científico

Aitor Aranguren Iriarte (Universidad del País Vasco)
Pablo Calvín Ballester (Universidad de Salamanca)
Cláudia Cruz (Universidade do Porto)
Esther Izquierdo Llavall (IGME-CSIC, Zaragoza)
Lidia Rodríguez Méndez (Universidad del País Vasco)
Elisa Sánchez Moreno (Universidad de Burgos)
Pablo Santolaria Otín (Universidad de Barcelona)
Ana Simón Muzas (Universidad de Salamanca)
Sara Torres López (Universidad Autónoma de Madrid)
Néstor Vegas Tubía (Universidad del País Vasco)
Eva Vernet Tarrago (Universidad de Burgos)

CONGRESOS MAGIBER REALIZADOS (2001 - 2026)

MAGIBER I

Burgos, 2001

MAGIBER II

Coimbra - Portugal, 2003

MAGIBER III

Zaragoza, VI Congreso Geológico de España, 2004

MAGIBER IV

Vigo, 2006

MAGIBER V

Las Palmas de Gran Canaria - VII Congreso Geológico de España, 2008

MAGIBER VI

Puigcerdá - Girona, 2010

MAGIBER VII

Oviedo - Asturias, VIII Congreso Geológico de España, 2012

MAGIBER VIII

Évora-Portugal, 2014

MAGIBER IX

Huelva, IX Congreso Geológico de España, 2016

MAGIBER X

Valle del Grío - Zaragoza, 2017

MAGIBER XI

Coimbra-Portugal, 2019

MAGIBER XII

Vitoria-Gasteiz, X Congreso Geológico de España, 2021

MAGIBER XIII

Porto - Portugal, 2023

MAGIBER XIV

Ávila, XI Congreso Geológico de España, 2024

MAGIBER XV

Miraflores de la Sierra - Madrid, 2025

MAGIBER XVI - Out of phase

Melide - A Coruña, 2026 - 25 aniversario

PRESENTACIÓN

MAGIBER —*Paleomagnetismo en la Península Ibérica*— nació en 2001 con la vocación de constituir un foro de discusión abierto e informal entre investigadores e investigadoras vinculados a cualquiera de las ramas del Paleomagnetismo y del Magnetismo de Rocas. Su origen respondió al creciente número de personas y centros de investigación dedicados, en España y Portugal, al estudio de las propiedades magnéticas de las rocas —remanencia, susceptibilidad magnética, anisotropía de la susceptibilidad magnética, magnetismo de rocas, sedimentos y suelos, entre otras— y a sus aplicaciones en problemas geológicos, geofísicos, arqueológicos y ambientales. Desde sus inicios, MAGIBER ha reunido contribuciones en ámbitos tan diversos como la Estratigrafía, la Geocronología, la Arqueología, la Geología Estructural, la Paleooceanografía o la Geología Ambiental.

En la presentación de la primera reunión MAGIBER, celebrada en Burgos en 2001, se recogía ya con claridad el espíritu que ha definido esta iniciativa desde entonces:

“Esperamos que la celebración de esta primera reunión fomente el conocimiento mutuo y el intercambio de ideas y proyectos entre los participantes —investigadores, estudiantes, etc.—, de manera que pueda convertirse en un punto de referencia para todos aquellos investigadores interesados en las aplicaciones de una técnica cuyo potencial está en pleno desarrollo.

Comparado con otras reuniones científicas, MAGIBER es un evento de reducidas dimensiones si lo evaluamos en relación con el número de asistentes. Creemos que ello puede ser una baza a favor de su continuidad en próximas ediciones. La organización del programa científico, sin la necesidad de sesiones paralelas, es extremadamente sencilla y permite una gran flexibilidad para la admisión y cancelación de contribuciones de última hora. Por otro lado, el alojamiento de los asistentes no requiere importantes infraestructuras, por lo que puede organizarse fácilmente, en poco tiempo y con pocas restricciones en cuanto al lugar de celebración. Pensamos que todo ello puede favorecer un ambiente de discusión distendida y espontánea, cada vez más difícil de conseguir en los grandes congresos.”

Veinticinco años después, este extracto conserva plena vigencia y refleja fielmente la filosofía de MAGIBER: una reunión científica cercana, dinámica y altamente participativa, concebida para favorecer el intercambio directo de ideas, la discusión crítica y la colaboración entre grupos de investigación. Desde aquella primera edición, MAGIBER ha contribuido a consolidar una comunidad científica en torno al Paleomagnetismo y el Magnetismo de Rocas y se han impulsado diversas iniciativas, entre ellas la creación de la Comisión de Paleomagnetismo de la Sociedad Geológica de España y la lista de distribución PALEOMAG, que han permitido reforzar la comunicación y la visibilidad de esta comunidad científica.

En este contexto, del 9 al 11 de julio de 2026 se celebra en Melide, A Coruña, el MAGIBER 2026 – 25 aniversario, una reunión conmemorativa dedicada a recorrer la trayectoria de estos veinticinco años de investigación en España y Portugal. El encuentro tiene como objetivo reconocer el recorrido colectivo de la comunidad MAGIBER, poner en valor la aportación de estas disciplinas al conocimiento geocientífico y fortalecer las relaciones científicas existentes, así como promover nuevas colaboraciones. Con el fin de representar al conjunto de la comunidad, se ha invitado a cada laboratorio o grupo de investigación a presentar al menos una comunicación oral que sintetice su evolución, sus principales aportaciones y el impacto de su investigación durante estos años, ya sea en relación con una región concreta, una problemática científica específica o una metodología determinada. El programa científico incluye una sesión de pósteres destinada a presentar avances recientes y líneas de trabajo emergentes y una salida de campo al plutón granítico de Guitiriz.

La acogida y valoración de este encuentro conmemorativo ha sido muy positiva por parte de los laboratorios y grupos participantes. MAGIBER 2026 ha reafirmado la vigencia de una fórmula basada en la proximidad, la discusión abierta y la colaboración, y ha puesto de manifiesto la solidez de una comunidad científica que, veinticinco años después de su primera reunión, continúa activa, cohesionada y con claras perspectivas de futuro.

PROGRAMA

JUEVES 9 DE JULIO	
HORA	ACTIVIDAD / SESIÓN
13:00	Recepción y entrega de acreditaciones
14:00 - 16:00	Comida
16:00 - 16:30	Lo que cuentan los granitos: 40 años de estudios de fábricas magnéticas del grupo de Bilbao en las rocas ígneas del W de la península Ibérica <i>A. Aranguren, N. Vegas, L. Rodríguez-Méndez, J.M. Tubía, J. Cuevas, T. Román-Berdiel y A. Casas-Sainz</i>
16:30 - 17:00	Remagnetización: obstáculo, enigma y oportunidad <i>J.J. Villalaín, A.M. Casas, P. Calvín, S. Torres, B. Moussaid, R. Soto, C. García-Lasanta, B. Oliva-Urcia, M.F. Bógalo, V.C. Ruiz-Martínez, T. Román-Berdiel, G. Fernández-González, A. Gil-Imaz, H. El Ouardi, L. Yenes y M. Calvo</i>
17:00 - 17:30	Computing and Measuring Geomagnetically Induced Currents – Application to the Portuguese Infrastructure <i>R. Santos, M. Alexandra Pais, J. Alves Ribeiro, J. Cardoso, F. J. G. Pinheiro y P. Ribeiro</i>
17:30 - 18:00	Divulgación científica del Magnetismo Terrestre en España y Portugal (Red Maglber, 2021-2026) <i>R. Soto</i>
18:00 - 18:30	Geofísica y Tectónica en la Universidad de Salamanca: más de 20 años de exploración magnética <i>I. de Felipe, M. Durán Oreja, P. Calvín, I. Pérez Cáceres, M. Yenes, R. Prieto, A. Simón Muzás, C. Cruz, H. Sant'Ovaia, J. Gomez Barreiro y P. Ayarza</i>
18:30 - 19:15	Asamblea MAGIBER <i>Coordinadores: J.C. Larrasoña y L. Rodríguez-Méndez</i>

VIERNES 10 DE JULIO

HORA	ACTIVIDAD / SESIÓN
9:00 - 9:30	25 años reconstruyendo el pasado del campo geomagnético en Europa: inicios y estado actual <i>F. J. Pavón-Carrasco, S. A. Campuzano, L.R. Gaya-Piqué, M. Gómez-Paccard, Ph. Lanos, A. Molina-Cardín, J. I. Núñez, M. L. Osete, M. Rivero-Montero y J. M. Torta</i>
9:30 - 10:00	Speleothem Magnetism: overview, limitations and perspectives <i>E. Font , R. Dinis, E. Sanchez-Moreno, C. Veiga-Pires, A.S.P.S. Reboleira, D. Fleitmann, S. Affolter, A.R. Brás y J. Ponte</i>
10:00 - 10:30	Contribución de los grupos de paleomagnetismo de Zaragoza (IGME-CSIC, UZ) y Barcelona (Geo3BCN-CSIC, UB) al conocimiento de la Zona de Transferencia de Pamplona (Pirineos) <i>J.C. Larrasoña, E.L. Pueyo, E. Izquierdo-Llavall, KINETRANS Team</i>
10:30 - 11:00	35 años de Fábricas Magnéticas en la Universidad de Zaragoza <i>A.M. Casas, B. Oliva-Urcia, E.L. Pueyo, A. Gil Imaz, Ó. Pueyo Anchuela, A. Pocoví, J.C. Larrasoña, R. Soto, T. Mochales, E. Izquierdo-Llavall, P. Santolaria, C. García-Lasanta, B. Moussaid, P. Calvín, M. Marcén, F. Gracia-Puzo, A. Simón-Muzas, U. Majarena, E. Vernet, P. Sierra, M.-H. Jebabli, R. Lázaro, W. Lachhab, A. Aranguren, J. Cuevas, J.M. Tubía, J.M. Parés, I. Gil-Peña, B. Antolín-Tomás, H. El Ouardi, J.C. Kullberg, J.J. Villalaín y T. Román-Berdiel</i>
11:00 - 11:30	Reseña histórica del Paleomagnetismo en la Universidad de Zaragoza y en la Unidad del IGME (CSIC) en Zaragoza <i>E. L. Pueyo, T. Román-Berdiel, A. Gil-Imaz, H. Millán, G. Benito, J. C. Larrasoña, J. Pérez-Rivarés, R. Soto, B. Oliva-Urcia, H.J. Mauritsch, R. Scholger, C.J. Lewis, A.J. Sussman, O. Pueyo-Anchuela, B. Antolín, A. Rodríguez-Pintó, T. Mochales, C. Oliván, M. J. Ramón, M. A. López, E. Izquierdo-Llavall, C. García-Lasanta, G. San Miguel, D. J. Anastasio, P. Santolaria, M. Valcárcel, L. Ezquerro, S. Torres, B. Moussaid, A. Palma-Ramírez, V. Borruel-Abadía, E. Mª Sánchez-Moreno, M. Calle, O. Suarez, H. Gil-Garbí, R. Silva-Casal, P. Mata (†), M. Porquet, P. Calvín, M. Bartolomé, E. Vernet, M. Marcén, M. Pérez-Pueyo, M. Merchán, U. Majarena, F. Gracia-Puzo, A. Simón-Muzas, P. Sierra-Campos, L. Otaño Jiménez, M. Hassen Jebabli, X. Li, R. Lázaro, W. Lachhab, A. Barnolas, J. J. Villalaín, A. Casas-Sainz, J. M. Parés y A. Pocoví</i>
11:30 - 12:00	Pausa Café
12:00 - 12:30	El laboratorio de Paleomagnetismo de Barcelona CCIUB-CSIC 37 años después: contribuciones a la datación magnetoestratigráfica <i>M.Garcés, E. Beamud, E. Maestre y L. Valero</i>
12:30 - 13:00	Magnetic Susceptibility as a multidisciplinary tool: from granite emplacement to environmental and forensic applications <i>H. Sant'Ovaia, C. Cruz, A. Gonçalves, A. Mota y F. Noronha</i>
13:00 - 13:30	Memorias magnéticas del Cáucaso: 20 años de paleomagnetismo en Georgia <i>M. Calvo Rathert, A. Goguichaichvili, G. Vashakidze, A. Caccavari, E.M. Sánchez Moreno, N. García Redondo, E. Vernet</i>
13:30 - 14:30	Mesa Redonda: Quo vadis magnetismus <i>M. Garcés, J.C. Larrasoña, E.L. Pueyo, J.J. Villalaín</i>
14:30 - 16:30	Comida

16:30 – 17:00	MusicArte <i>R. Soto, E.M. Sánchez-Moreno</i>
17:00	Sesión Póster
P1	Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética en la transversal de Azpeitia (Gipuzkoa, Cuenca Vasco-Cantábrica): resultados preliminares <i>I. Asensio; L. Rodríguez-Méndez; N. Vegas; A. Aranguren</i>
P2	Multi-proxy characterization of the Regoufe and Rio de Frades W–Sn mining areas through an integrated geochemical and magnetic approach <i>C. Cruz; A. Pereira; H. Sant’Ovaia</i>
P3	Insights into the Emplacement of the Vila Verde and São Mamede Granites through Anisotropy of Magnetic Susceptibility <i>D. Diógenes; H. Sant’Ovaia; F. Noronha; A. Gonçalves</i>
P4	NE-SW extension direction recorded by magnetic fabrics in the NE border of the Cameros basin <i>L. Igartua-Pisonero del Pozo, L. Rodríguez-Méndez, A. Casas, M. Garcés</i>
P5	Magnetic Fabrics Related to Extension, Salt Tectonics and Compression in the Cretaceous Series of the El Kef Region, Northwestern Tunisian Atlas <i>M.H. Jebabli; A. Casas; N. Karoui; R. Talbi; M.S. Arfaoui; B. Oliva-Urcia; T. Román-Berdiel</i>
P6	Aplicabilidad de técnicas de magnetismo de rocas al estudio de AMS: Ejemplo de la Cuenca de Calatayud (NE Península Ibérica) <i>R. Lázaro-González; A. Casas; T. Román-Berdiel; B. Oliva-Urcia; A. Simón-Muzás; W. Lachhab</i>
P7	El paleomagnetismo en una situación de aprendizaje basada en indagación guiada: implementación en un grupo de 4º ESO <i>E.M. Sánchez-Moreno, A. Martínez-González, A. Marcos-Reguero, S.E. Jorge-Villar</i>
P8	Anisotropy of magnetic susceptibility constraints on the emplacement of Variscan two-mica granites in Northeast Portugal <i>A. Mota; F. Noronha; H. Sant’Ovaia</i>
P9	Resultados paleomagnéticos preliminares en una estalagmita de la Cova de Arcoia (Geoparque Montañas do Courel, Lugo) <i>E.M. Sánchez-Moreno; C. Pérez-Mejías; H. Cheng; D. Ballesteros</i>
P10	Magnetobiocronología del sector oeste de la Cuenca de Jaca-Pamplona (Pirineo central): implicaciones tectosedimentarias y paleogeográficas <i>P. Sierra-Campos; J.C. Larrasoaña; P. Calvín; E.L. Pueyo; G. Bernaola; E. Izquierdo-Llavall; M. Montes; A. Luzón; E. Bellido; M.P. Mata; E. Beamud; R. Scholger; E. Font; A. Payros; M. Domínguez</i>
P11	Paleomagnetismo en las rocas volcánicas y volcanoclásticas de la cuenca de Erillcastell (Pirineos Centrales) <i>A. Simón-Muzás; R. Soto; J. Gisbert; C. García-Lasanta; B. Housen; A. Casas</i>

SÁBADO 11 DE JULIO	
HORA	ACTIVIDAD
9:30	Salida de campo <i>Visita al granito de Guitiriz a cargo de Aitor Aranguren</i>

Índice

A. Aranguren; N. Vegas; L. Rodríguez-Méndez; J.M. Tubía; J. Cuevas; T. Román-Berdiel; A. Casas <i>Lo que cuentan los granitos: 40 años de estudios de fábricas magnéticas del grupo de Bilbao en las rocas ígneas del W de la Península Ibérica</i>	15
I. Asensio; L. Rodríguez-Méndez; N. Vegas; A. Aranguren <i>Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética en la transversal de Azpeitia (Gipuzkoa, Cuenca Vasco-Cantábrica): resultados preliminares</i>	19
M. Calvo Rathert; A. Goguichaichvili; G. Vashakidze; A. Caccavari; E.M. Sánchez Moreno; N. García Redondo; E. Vernet <i>Memorias magnéticas del Cáucaso: 20 años de paleomagnetismo en Georgia</i>	21
A. Casas; B. Oliva-Urcia; E.L. Pueyo; A. Gil Imaz; Ó. Pueyo Anchuela; A. Pocoví; J.C. Larrasoaña; R. Soto; T. Mochales; E. Izquierdo-Llavall; P. Santolaria; C. García-Lasanta; B. Moussaid; P. Calvin; M. Marcén; F. Gracia-Puzo; A. Simón-Muzas; U. Majarena; E. Vernet; P. Sierra; M.-H. Jebabli; R. Lázaro; W. Lachhab; A. Aranguren; J. Cuevas; J.M. Tubía; J.M. Parés; I. Gil-Peña; B. Antolín-Tomás; H. El Ouardi; J.C. Kullberg; J.J. Villalain; T. Román-Berdiel <i>35 años de Fábricas Magnéticas en la Universidad de Zaragoza</i>	23
C. Cruz; A. Pereira; H. Sant'Ovaia <i>Multi-proxy characterization of the Regoufe and Rio de Frades W-Sn mining areas through an integrated geochemical and magnetic approach</i>	27
I. de Felipe; M. Durán Oreja; P. Calvin; I. Pérez Cáceres; M. Yenes; R. Prieto; A. Simón Muzás; C. Cruz; H. Sant'Ovaia; J. Gómez Barreiro; P. Ayarza <i>Geofísica y Tectónica en la Universidad de Salamanca: más de 20 años de exploración magnética</i>	31
D. Diógenes; H. Sant'Ovaia; F. Noronha; A. Gonçalves <i>Insights into the Emplacement of the Vila Verde and São Mamede Granites through Anisotropy of Magnetic Susceptibility</i>	35
E. Font; R. Dinis; E. Sanchez-Moreno; C. Veiga-Pires; A.S.F. Reboleira; D. Dominik Fleitmann; S. Affolter; A.R. Brás; J. Ponte <i>Speleothem Magnetism: overview, limitations and perspectives</i>	39
M. Garcés; E. Beamud; E. Maestre; L. Valero <i>El laboratorio de Paleomagnetismo de Barcelona CCI/TUB-CSIC 37 años después: contribuciones a la datación magnetoestratigráfica</i>	41
L. Igartua-Pisonero del Pozo; L. Rodríguez-Méndez; A. Casas; M. Garcés <i>NE-SW extensión direction recorded by magnetic fabrics in the NE border of the Cameros basin</i>	45
M.H. Jebabli; A. Casas; N. Karoui Yaakoub; R. Talbi; M. S. Arfaoui; B. Oliva-Urcia; T. Román-Berdiel <i>Magnetic Fabrics Related to Extension, Salt Tectonics and Compression in the Cretaceous Series of the El Kef Region, Northwestern Tunisian Atlas</i>	47
J.C. Larrasoaña; E.L. Pueyo; E. Izquierdo-Llavall; KINETRANS Team <i>Contribución de los grupos de paleomagnetismo de Zaragoza (IGME-CSIC, UZ) y Barcelona (Geo3BCN-CSIC, UB) al conocimiento de la Zona de Transferencia de Pamplona (Pirineos)</i>	51
R. Lázaro-González; A. Casas; T. Román-Berdiel; B. Oliva-Urcia; A. Simón-Muzás; W. Lachhab <i>Aplicabilidad de técnicas de magnetismo de rocas al estudio de AMS: Ejemplo de la Cuenca de Calatayud (NE Península Ibérica)</i>	53
A. Mota; F. Noronha; H. Sant'Ovaia <i>Anisotropy of magnetic susceptibility constraints on the emplacement of Variscan two-mica granites in Northeast Portugal</i>	57
F.J. Pavón-Carrasco; S.A. Campuzano; L.R. Gaya-Piqué; M. Gómez-Paccard; Ph. Lanos; A. Molina-Cardín; J.I. Núñez; M.L. Osete; M. Rivero-Montero; J.M. Torta <i>25 años reconstruyendo el pasado del campo geomagnético en Europa: inicios y estado actual</i>	61

E.L. Pueyo; T. Román-Berdiel; A. Gil-Imaz; H. Millán; G. Benito; J. Cruz Larrasoña; J. Pérez-Rivarés; R. Soto; B. Oliva-Urcia; H.J. Mauritsch; R. Scholger; C.J. Lewis†; A.J. Sussman; Ó. Pueyo-Anchuela; B. Antolín; A. Rodríguez-Pintó; T. Mochales; C. Oliván; M.J. Ramón; M.Á. López; E. Izquierdo-Llavall; C. García-Lasanta; G. San Miguel; D.J. Anastasio; P. Santolaria; M. Valcárcel; L. Ezquerro; S. Torres; B. Moussaid; A. Palma-Ramírez; V. Borruel-Abadía; E.M. Sánchez-Moreno; M. Calle; O. Suarez; H. Gil-Garbi; R. Silva-Casal; P. Mata†; M. Porquet; P. Calvín; M. Bartolomé; E. Vernet; M. Marcén; M. Pérez-Pueyo; M. Merchán; U. Majarena; F. Gracia-Puzo; A. Simón-Muzas; P. Sierra-Campos; L. Otaño Jiménez; M. Hassen Jebabli; X. Li; R. Lázaro; W. Lachhab; A. Barnolas; J.J. Villalain; A. Casas; J.M. Parés; A. Pocoví <i>Reseña histórica del Paleomagnetismo en la Universidad de Zaragoza y en la Unidad del IGME (CSIC) en Zaragoza</i>	65
E.M. Sánchez-Moreno; A. Martínez-González; A. Marcos Reguero; S.E. Jorge-Villar <i>El paleomagnetismo en una situación de aprendizaje basada en indagación guiada: implementación en un grupo de 4º ESO</i>	69
E.M. Sánchez-Moreno; C. Pérez-Mejías; H. Cheng; D. Ballesteros <i>Resultados paleomagnéticos preliminares en una estalagmita de la Cova de Arcoia (Geoparque Montañas do Courel, Lugo)</i>	73
R. Santos; M.A. Pais; J. Alves Ribeiro; J. Cardoso; F.J.G. Pinheiro; P. Ribeiro <i>Computing and Measuring Geomagnetically Induced Currents – Application to the Portuguese Infrastructure</i>	77
H. Sant’Ovaia; C. Cruz; A. Gonçalves; A. Mota; F. Noronha <i>Magnetic Susceptibility as a multidisciplinary tool: from granite emplacement to environmental and forensic applications</i>	81
P. Sierra-Campos; J.C. Larrasoña; P. Calvín; E.L. Pueyo; G. Bernaola; E. Izquierdo-Llavall; M. Montes; A. Luzón; E. Bellido; M.P. Mata; E. Beamud; R. Scholger; E. Font; A. Payros; M. Domínguez <i>Magnetobiocronología del sector oeste de la Cuenca de Jaca-Pamplona (Pirineo central): implicaciones tectosedimentarias y paleogeográficas</i>	85
A. Simón-Muzás; R. Soto; J. Gisbert; C. García-Lasanta; B. Housen; A. Casas <i>Paleomagnetismo en las rocas volcánicas y volcanoclásticas de la cuenca de Erillcastell (Pirineos Centrales)</i>	87
R. Soto <i>Divulgación científica del Magnetismo Terrestre en España y Portugal (Red Maglber, 2021-2026)</i>	91
J.J. Villalain; A. Casas; P. Calvín; S. Torres; B. Moussaid; R. Soto; C. García-Lasanta; B. Oliva-Urcia; M.F. Bógalo; V.C. Ruiz-Martínez; T. Román-Berdiel; G. Fernández-González; A. Gil-Imaz; H. El Ouardi; L. Yenes; M. Calvo <i>Remagnetización: obstáculo, enigma y oportunidad</i>	95
Listado de participantes	99

Lo que cuentan los granitos: 40 años de estudios de fábricas magnéticas del grupo de Bilbao en las rocas ígneas del W de la Península Ibérica.

A. Aranguren¹, N. Vegas¹, L. Rodríguez-Méndez¹, J. M. Tubía¹, J. Cuevas¹, T. Román-Berdiel², A. Casas²

¹ Departamento de Geología, Universidad del País Vasco (EHU)
Bº Sarriena s/n, Leioa, 48940, Bizkaia, aitor.aranguren@ehu.eus

² Dpto. Ciencias de la Tierra, Geotransfer-IUCA, U. de Zaragoza, 50009 Zaragoza.

El grupo de Geología Estructural de la Universidad del País Vasco (EHU) ha cumplido 40 años dedicado al estudio de las fábricas magnéticas. Sus primeros trabajos en esta línea se remontan a 1986, cuando se estableció una colaboración científica entre el profesor Jean-Luc Bouchez, de la Universidad de Toulouse, y el profesor José María Tubía, de la EHU. En el marco de dicha colaboración, el grupo de Bilbao inició la aplicación de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) al estudio de rocas ígneas graníticas de la Península Ibérica, adoptando una herramienta metodológica que en aquel momento era aún incipiente y que posteriormente se consolidaría como una técnica fundamental para el análisis estructural de plutones graníticos.

Hasta entonces, los estudios estructurales en rocas ígneas se basaban fundamentalmente en la medida directa, sobre el terreno, de las estructuras magmáticas visibles. Esta aproximación podía resultar especialmente compleja, en particular para la identificación de la lineación magmática, en función del grado de orientación mineral y del tipo de textura. A ello se sumaba la información proporcionada por otros marcadores estructurales, como la orientación de xenolitos, enclaves o *schlierens*, cuya presencia, continuidad y calidad de exposición son muy variables. Como consecuencia, los plutones graníticos aparecían con frecuencia en los mapas geológicos como simples manchas de color, prácticamente desprovistas de información estructural interna, lo que reflejaba el escaso conocimiento existente sobre aspectos fundamentales, como su estructura interna y geometría tridimensional, los mecanismos de ascenso y emplazamiento del magma, o la cinemática de la deformación asociada a dicho emplazamiento.

Este último aspecto es especialmente relevante, ya que el magmatismo granítico constituye uno de los principales mecanismos de transferencia de masa y calor hacia la corteza, y representa un componente esencial en la construcción y evolución de la corteza continental. Por ello, los plutones graníticos pueden considerarse marcadores corticales de la deformación e indicadores cinemáticos de los procesos tectónicos que actúan durante las distintas etapas de construcción de un orógeno.

Los trabajos pioneros de Philippe Guillet en el granito de Guérande, en el Macizo Armoricano (Guillet *et al.*, 1983), y de Marc Amice en el complejo granítico de Cabeza de Araya, en la Zona Centroibérica (Amice, 1990), fueron fundamentales para establecer la relación entre la orientación preferente mineral y la fábrica magnética determinada mediante la ASM en rocas ígneas graníticas. Esta aproximación abrió nuevas posibilidades para el estudio de la estructura interna de los plutones graníticos (Bouchez, 1997). Sin embargo, los primeros estudios de ASM en granitoides tuvieron que superar el escepticismo de parte de la comunidad científica, que cuestionaba tanto

la validez de la técnica como el alcance de las interpretaciones estructurales derivadas de su aplicación.

En este contexto, Aitor Aranguren, del grupo de Geología Estructural de la EHU, tuvo la oportunidad de trabajar con Marc Amice y Jean-Luc Bouchez en el granito de Cabeza de Araya, donde se familiarizó con las metodologías de campo y laboratorio aplicadas al análisis de fábricas magnéticas en granitos. En 1986 inició su tesis doctoral sobre los plutones graníticos variscos de Guitiriz, Hombreiro y Lugo, en el noroeste de la Península Ibérica. Este trabajo, defendido en la EHU, fue la primera tesis doctoral realizada en una universidad española que aplicó la ASM al estudio estructural de rocas graníticas (Aranguren, 1993). Su relevancia radicó no solo en la aplicación pionera de la técnica, sino también en la comparación sistemática entre las estructuras magmáticas observadas en campo y las fábricas magnéticas obtenidas mediante ASM. Los resultados permitieron confirmar la validez del método, consolidar una estrategia de trabajo propia en el grupo de la EHU e iniciar una línea de investigación pionera en el ámbito universitario ibérico.

La tesis de A. Aranguren permitió demostrar mediante la ASM el sincinematismo de los plutones de Guitiriz y Hombreiro con respecto al funcionamiento de grandes zonas de cizalla. La integración del análisis estructural con un estudio gravimétrico aportó una visión novedosa sobre la arquitectura tridimensional de los plutones estudiados, así como sobre la geometría y posición de sus raíces. Aunque ambos cuerpos se localizan muy próximos entre sí, los resultados evidenciaron modelos de emplazamiento claramente diferenciados.

El Plutón de Guitiriz se emplazó en el antiformal del Olo de Sapo en un contexto compresivo E-W, de manera que sus bordes oriental y occidental muestran una deformación en estado sólido, caracterizada por una foliación subvertical y una lineación de estiramiento subhorizontal. Las zonas internas del granito presentan estructuras magmáticas con la misma orientación que los bordes y la gravimetría revela dos raíces de orientación N100E que son coherentes con la extensión N-S local generada por una tectónica de escape. Por su parte, el plutón de Hombreiro se emplaza en el Domo de Lugo, presenta una estructura magnética subhorizontal y es deformado sincinemáticamente por la Falla de Vivero. La gravimetría muestra un plutón de geometría laminar y alargado en la dirección de la lineación magnética N120E.

Estos primeros resultados sobre fábricas magnéticas en granitos del NW de Iberia fueron presentados en diversas sesiones científicas en España y Francia y se publicaron a partir de 1991 (Amice et al., 1991; Aranguren et al., 1991; Aranguren et al., 1996a). Asimismo, el grupo contribuyó al conocimiento de las fábricas magnéticas compuestas en milonitas S-C (Aranguren et al., 1996b), describiendo cómo la foliación magnética ocupa una posición intermedia entre los planos C y S, rotando hacia el plano C a medida que aumenta la deformación. La lineación magnética es paralela a la lineación de estiramiento, pero presenta diferentes buzamientos por el efecto anterior.

Fruto de esta difusión de los primeros resultados de la ASM en Iberia, a mediados de los 90, la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S.A., estableció contacto con el grupo de la EHU y se llevó a cabo un proyecto que permitió estudiar la fábrica magnética de numerosos plutones del W de la Península, principalmente de la Zona Centroibérica. Así, en el NW, se estudiaron los plutones de la Tojiza (Aranguren et al., 2003, en colaboración con la Univ. Zaragoza), Veiga, San Ciprian, Trives (Román Berdiel et al., 1998), Pindo y Pando. En la rama sur de la Zona Centroibérica, se abordó el estudio del Batolito de Los Pedroches (Aranguren et al., 1997), y de los granitos de Campanario-La Haba (Alonso et al., 1999), Valdetorres-Gamita,

Fontanosas y Santa Elena. El Batolito de Los Pedroches, con sus 150 km de longitud, constituye un ejemplo especialmente significativo. En este caso, la fábrica magnética permitió cartografiar su estructura interna, destacando la gran homogeneidad en la orientación de la foliación y especialmente la lineación magnética. Esta cartografía magnética ha permitido individualizar varios plutones y visualizar la construcción del batolito mediante el emplazamiento simultáneo y coalescencia de varios pulsos magmáticos al mismo nivel en un contexto de desgarre.

En este marco, el grupo de la EHU puso en marcha otras cuatro Tesis Doctorales, aplicando la ASM en granitos de la Zona Centroibérica (Alonso, 2001; Vegas, 2004) y de los Pirineos (Santana, 2001; Hilario, 2004). Un ejemplo destacado es la tesis doctoral de Néstor Vegas en los granitos de Ribadelago y Sotillo (Vegas 2004), en la provincia de Zamora. En este caso, el análisis de ASM se acompañó de un estudio petrológico detallado, que incluyó geoquímica de roca total y geoquímica mineral (Vegas et al. 2001; Vegas, 2004). Los resultados permitieron establecer el carácter sincinemático de ambos plutones y proponer su emplazamiento en una zona de relevo extensional localizada entre dos zonas de cizalla dúctil. La tesis puso de relieve el caso de Ribadelago como ejemplo de plutón formado por ascenso y coalescencia de diques en un régimen tectónico compresivo. Este trabajo se completó con dataciones geocronológicas en los granitos de Ribadelago y Pradorramisquedo (Vegas et al, 2011a y 2011b).

En conjunto, la trayectoria del grupo de Geología Estructural de la EHU muestra cómo la aplicación sistemática de la ASM ha permitido abordar algunos de los debates fundamentales en el estudio de los granitoides: los procesos de segregación, transporte y emplazamiento del magma, la construcción plutónica mediante pulsos magmáticos sucesivos y el papel de la tectónica tanto en la generación de espacio como en la deformación del magma durante su emplazamiento. La integración de fábricas magnéticas con observaciones estructurales, datos gravimétricos, petrología, geoquímica y geocronología ha permitido avanzar desde una visión esencialmente cartográfica de los plutones hacia modelos tridimensionales capaces de relacionar su arquitectura interna con la evolución tectónica regional. Lejos de constituir una técnica auxiliar, la ASM se ha consolidado como una herramienta fundamental para descifrar los mecanismos de construcción de los cuerpos graníticos y evaluar su papel como marcadores corticales de la deformación. Cuarenta años después de los primeros trabajos del grupo de Bilbao, las fábricas magnéticas siguen ofreciendo nuevas perspectivas para abordar problemas clásicos y emergentes en el estudio del magmatismo granítico y de la evolución de los orógenos.

Referencias

Alonso, A., Carracedo, M., Aranguren, A. (1999). Petrology, magnetic fabric and emplacement in a strike-slip regime of a zoned peraluminous granite: the Campanario-La Haba pluton, Spain. *Geological Society, Special Publications*, nº 168 "Understanding granites: Integrating new and classical techniques". 168, 177-190.

Alonso, A. (2001). El Plutón de Campanario-la Haba: caracterización petrológica y fábrica magnética. Tesis, Univ. País Vasco.

Amice, M. (1990). Le complexe granitique de Cabeza de Araya (Extremadure, Espagne). Zonation, structures magmatiques et magnétiques. Geometyrie. Discussion du mode de mise en place. Tesis, Univ. Paul Sabatier de Toulouse, 225 pp.

Amice, M., Bouchez, J.L., Aranguren, A., Alvarez, F., Vigneresse, J.L. (1991). El batolito granítico de Cabeza de Araya (Extremadura): comparación de sus estructuras magmáticas y magnéticas. *Boletín Geológico y Minero*, 102, 455-471.

Aranguren, A., Garcia, C., Tubia, J.M. (1991). Estructura magnética de los macizos graníticos de Guitiriz y Hombreiro-Santa Eulalia de Pena (Lugo). *Geogaceta*, 10, 134-137.

Aranguren, A. (1993). Estructura y cinemática del emplazamiento de los granitoides del Domo de Lugo y del antiformal del Olla de Sapo. Tesis, Universidad del País Vasco UPV/EHU, 236 pp.

Aranguren, A., Tubia, J.M., Bouchez, J.L., Vigneresse, J.L. (1996a). The Guitiriz granite, Variscan belt of northern Spain: extension-controlled emplacement of magma during tectonic escape. *Earth and Planetary Science Letters*, 139, 165-176.

Aranguren, A., Cuevas, J., Tubia, J.M. (1996b). Composite magnetic fabrics from S-C mylonites. *Journal of Structural Geology*, 18, 863-869.

Aranguren, A. (1997). Magnetic fabric and 3D geometry of the Hombreiro-Sta. Eulalia pluton: implications of the Variscan structures of eastern Galicia (NW Spain). *Tectonophysics*, 273, 329-344.

Aranguren, A., Larrea, F.J., Carracedo, M., Cuevas, J., Tubia, J.M. (1997). The Los Pedroches Batholith (Southern Spain): Polyphase interplay between shear zones in transtension and setting of granite. Kluwer Academic Publishers "Granite: From segregation of melt to emplacement fabric". 8, 215-229.

Aranguren, A., Cuevas, J., Tubia, J.M., Román Berdiel, T., Casas, A., Casas-Ponsati, A. (2003). Granite laccolith emplacement in the Iberian Arc: AMS and gravity study of the La Tojiza pluton (NW Spain). *Journal of the Geological Society*, London. 160, 435-445.

Bouchez, J.L. (1997). Granite is never isotropic: An introduction to AMS studies of granitic rocks. In: Bouchez, J.L., Hutton, D.H.W. and Stephens, W.E. Eds., Granite: from Segregation of Melt to Emplacement Fabrics, Kluwer Academic, Dordrecht, 95-112.

Guillet, Ph., Bouchez, J.L., Wagner, J.J. (1983). Anisotropie de susceptibilité magnétique dans le granite de Guerande (Massif Armoricain): comparaison avec l'étude structurale. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 296, 115-119.

Hilario, A. (2004). Relación entre magmatismo y deformación en la transversal de Benasque a Luchon (zona axial de los Pirineos). Tesis, Univ. País Vasco, 300 pp.

Román-Berdiel, T., Aranguren, A., Cuevas, J., Tubia, J.M. (1998). Compressional granite-emplacement model: structural and magnetic study of the Trives Massif (NW Spain). *Lithos*, 44, 37-52.

Santana, V., (2001). El Plutón de Panticosa (Huesca, Pirineos) estructura y modelo de emplazamiento a partir del análisis de la anisotropía de la susceptibilidad magnética. Tesis, Univ. País Vasco, 146 pp.

Vegas, N., Aranguren, A., Tubía, J.M. (2001). Granites built by sheeting in a fault stepover (the Sanabria Massif, Variscan Orogen, NW Spain). *Terra Nova*, 13: 180-187.

Vegas, N. (2004). Los plutones de Ribadelago y Sotillo (Sanabria, Zona Centro-Ibérica): Evolución estructural de granitoides emplazados por ascenso de diques. Serie Nova Terra nº 25. Laboratorio Xeolóxico de Laxe. 225 pp.

Vegas, N., Rodríguez, J., Cuevas, J., Siebel, W., Esteban, J.J., Tubía, J.M., Basei, M. (2011a). The sphene-centered ocellar texture: An effect of grain-supported flow and melt migration in a hyperdense magma mush. *Journal of Geology*, 119: 143-157.

Vegas, N., Rodríguez, J., Tubía, J.M., Cuevas, J., Esteban, J.J., Basei, M. (2011b). Nuevas edades en granitoides de la región de Sanabria: relaciones tectónica-magmatismo. *Geogaceta*, 50-1: 67-70.

Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética en la transversal de Azpeitia (Gipuzkoa, Cuenca Vasco-Cantábrica): resultados preliminares

I. Asensio, L. Rodríguez-Méndez, N. Vegas, A. Aranguren

Departamento de Geología, Campus de Bizkaia, Universidad del País Vasco (EHU), Leioa
ivan.asensio@ehu.eus

La Cuenca Vasco-Cantábrica (CVC) registra una evolución tectónica compleja, caracterizada por fases extensivas post-variscas que culminan en la hiperextensión Albiense (Agirrezabala & López-Horgue, 2017), seguidas por la inversión tectónica asociada a la Orogenia Alpina. El área de estudio se localiza en el Arco Vasco, uno de los dominios más deformados de la CVC, donde aflora una sucesión sedimentaria comprendida entre el Triásico (facies Keuper) y el Cretácico superior (Cenomaniense) (Fig.1). La serie incluye depósitos marinos jurásicos, principalmente carbonatados, y una sucesión lutítica en la base del Cretácico inferior que pasa a techo y lateralmente a las calizas arrecifales del Complejo Urgoniano. Los depósitos más modernos corresponden a las lutitas y areniscas de la Fm. Deba (García Mondéjar, 1982), conocida también como Flysch Negro (Rat & Feuillé, 1967). En este sector, las estructuras presentan una dirección predominante NW-SE y vergencia hacia NE (Cuevas *et al.*, 1999). Entre ellas destaca el cabalgamiento de Azpeitia, que emplaza calizas urgonianas sobre lutitas de la Fm. Deba. Además, afloran dos pliegues de entidad regional que condicionan el carácter invertido de la estratificación (S_0) en el transecto estudiado: un sinclinal vergente N115° E, que deforma a la Fm. Deba en el bloque de muro del cabalgamiento, y un anticlinal en el bloque de techo. A escala de afloramiento destaca la presencia de foliación (S_1), con una orientación media N144° E, 50° SW y desarrollo preferente en los niveles menos competentes, llegando a obliterar la S_0 .

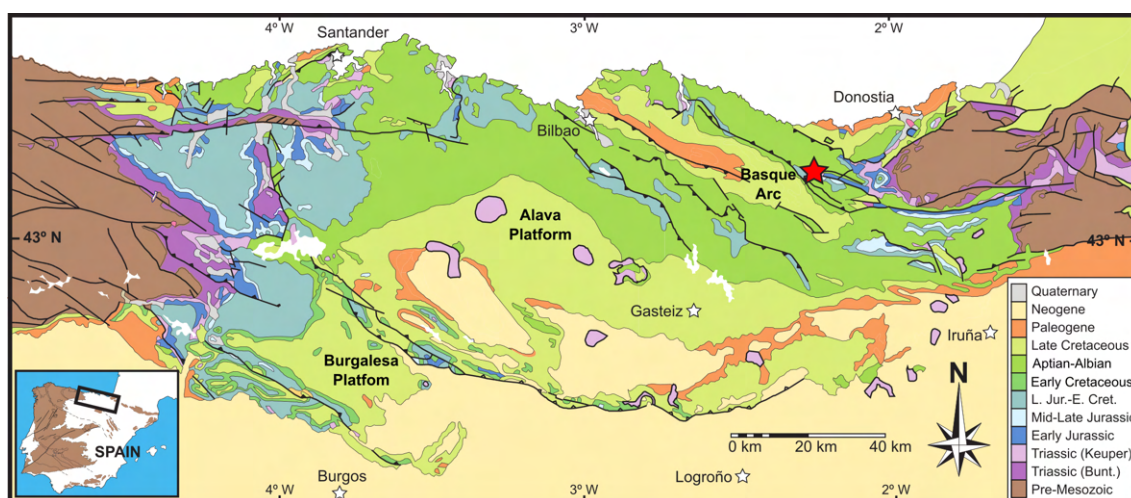


Figura 1. Mapa geológico de la Cuenca Vasco-Cantábrica (Ábalos, 2016) donde se ha localizado el área de estudio (estrella roja).

Con el objetivo de caracterizar la fábrica magnética de la zona, se han realizado 6 estaciones (IAS1 a IAS6) a lo largo de un transecto perpendicular a las estructuras principales. En total se han obtenido 86 especímenes, analizados mediante un susceptómetro AGICO MFK1 Kappabridge, con un valor medio de susceptibilidad magnética de 228×10^{-6} SI, y un rango de 56 a 399×10^{-6} SI. A pesar de que la litología controla la susceptibilidad y los parámetros escalares (P, T, F, L), los parámetros vectoriales de cada estación son coincidentes, están bien agrupados y en general se corresponden con elipsoides triaxiales. Este hecho queda especialmente patente en las estaciones realizadas en el bloque de muro del cabalgamiento (IAS1 a IAS3), donde se ha muestreado una alternancia de lutitas y areniscas (IAS2, Fig. 2).

Con respecto a la orientación de los ejes del elipsoide magnético se observa una diferencia entre las estaciones localizadas en el bloque de techo y las de muro del cabalgamiento. Por ejemplo, en el bloque de muro destaca la estación IAS2, en la que k_1 está bien agrupada y con una orientación media (23/167) subparalela al eje del sinclinal medido en su zona de charnela. En el bloque de techo destaca la estación IAS5, con k_1 también agrupada, pero con mayor buzamiento (57/213). En conjunto, la distribución de los ejes principales sugiere que la fábrica magnética registra una componente tectónica expresada de forma diferente a techo y muro del cabalgamiento.

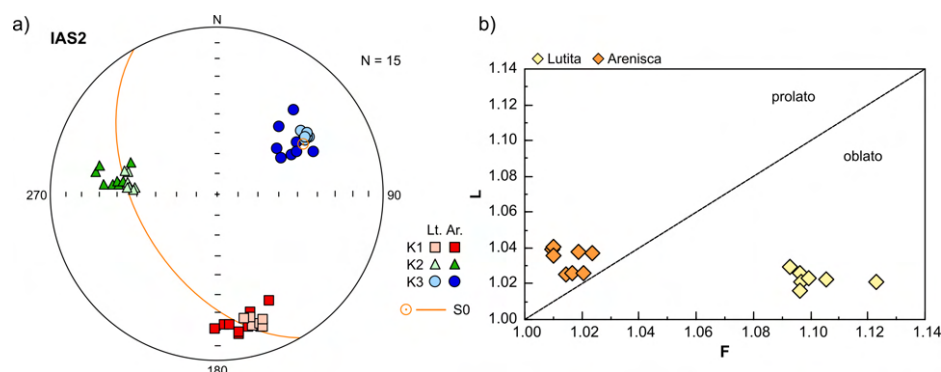


Figura 2. a) Proyección estereográfica de los ejes del elipsoide de la estación IAS2. k_1 , k_2 y k_3 representan los ejes máximo, intermedio y mínimo, respectivamente; lutitas (Lt.) y areniscas (Ar.). b) Diagrama de Flinn, donde se observa una distribución bimodal controlada por la litología.

Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto PID2022-136948NB-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE.

Referencias

- Ábalos, B. (2016).** Geologic map of the Basque-Cantabrian Basin and a new tectonic interpretation of the Basque Arc. *International Journal of Earth Sciences*, 105, 2327–2354. <https://doi.org/10.1007/s00531-016-1291-6>
- Agirrezabala, L. M., & López-Horgue, M. A. (2017).** Environmental and ammonoid faunal changes related to Albian Bay of Biscay opening: Insights from the northern margin of the Basque-Cantabrian Basin. *Journal of Sea Research*, 130, 36–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seares.2017.04.002>
- Cuevas, J., Aranguren, A., Badillo, J. M., & Tubia, J. (1999).** Estudio estructural del sector central del Arco Vasco. *Boletín Geológico y Minero*, 110, 3–18.
- García Mondéjar, J. (1982).** Aptiense y Albiense. Región Vasco-Cantábrica y Pirineo Navarro. *El Cretácico de España*, 63–84.
- Rat, P., & Feuillé, P. (1967).** Structures et paléogéographies Pyrénéo - Cantabriques. *Institut des Sciences de la Terre. Université e Dijon*, VI, 1–48.

Memorias magnéticas del Cáucaso: 20 años de paleomagnetismo en Georgia

M. Calvo Rathert ¹, A. Goguichaichvili ², G. Vashakidze ³, A. Caccavari ⁴, E.M. Sánchez Moreno ¹, N. García Redondo ¹, E. Vernet ¹

¹ Departamento de Física, EPS, Universidad de Burgos, Av. Cantabria, s/n, 09006 Burgos, España. mcalvo@ubu.es.

² Laboratorio Interinstitucional de Magnetismo Natural, Instituto de Geofísica Unidad Michoacán, UNAM, 58990 Morelia, México.

³ Alexandre Janelidze Institute of Geology – Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, 1/9 M. Alexidze str., 0171 Tbilisi, Georgia.

⁴ Servicio Magnético, Instituto de Geofísica, UNAM, Ciudad de México, México

El paleomagnetismo en el Cáucaso constituye un ámbito de investigación de notable interés científico, dado que esta región combina extensos registros volcánicos, complejas estructuras tectónicas y un valioso patrimonio arqueológico.

Las potentes secuencias de coladas basálticas —especialmente abundantes en el Cáucaso Menor— permiten reconstruir con buena resolución las variaciones del campo magnético terrestre, proporcionando también información de interés para el estudio de procesos como las inversiones y excursiones geomagnéticas.

Desde la perspectiva tectónica, el Cáucaso representa un sector clave del cinturón alpino-himalayo, donde convergen las cordilleras del Gran y el Pequeño Cáucaso. La interacción entre las placas Arábica y Euroasiática ha generado una evolución geodinámica particularmente compleja. En este contexto, los estudios paleomagnéticos de unidades volcánicas y sedimentarias ofrecen herramientas esenciales para reconstruir la historia de la deformación asociada a la colisión continental.

El interés arqueomagnético de la región es igualmente destacado. Georgia se halla situada en un cruce de rutas y culturas desde la Antigüedad y conserva numerosos materiales arqueológicos capaces de registrar la dirección e intensidad del campo geomagnético en el momento de su última coacción. Estos datos permiten no solo caracterizar la variabilidad geomagnética reciente, sino también mejorar la precisión de las cronologías arqueológicas.

No obstante, hace apenas tres décadas los datos paleomagnéticos fiables del Cáucaso eran escasos. Muchos de los estudios previos a la década de 1990 no cumplían los estándares metodológicos actualmente exigidos, lo que limitaba la robustez de sus conclusiones. En los últimos veinte años, el grupo de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos ha desarrollado diversas campañas en la República de Georgia y, aplicando metodologías actualizadas, ha generado un conjunto de resultados paleomagnéticos y de paleointensidad sustancialmente más sólidos. Estos trabajos han abordado múltiples líneas de investigación, incluyendo, principalmente, reconstrucciones de la dirección e intensidad del campo geomagnético antiguo y análisis arqueomagnéticos.

La presente revisión tiene como objetivo sintetizar y contextualizar los resultados obtenidos por este grupo durante las dos últimas décadas, ofreciendo una visión integrada del registro paleomagnético y de paleointensidad disponible para la República de Georgia.

35 años de Fábricas Magnéticas en la Universidad de Zaragoza

A.M. Casas ¹, B. Oliva-Urcia ¹, E.L. Pueyo ², A. Gil Imaz ¹, Ó. Pueyo Anchuela ¹, A. Pocoví ¹, Larrasoña, J.C. ², R. Soto ², T. Mochales ², E. Izquierdo-Llavall ², P. Santolaria ³, C. García-Lasanta ⁴, B. Moussaid ⁵, P. Calvin ⁶, M. Marcén ¹, F. Gracia-Puzo ¹, A. Simón-Muzas ⁶, U. Majarena ¹, E. Vernet ⁷, P. Sierra ², M.-H. Jebabli ¹, R. Lázaro ¹, W. Lachhab ⁵, A. Aranguren ⁸, J. Cuevas ⁸, J.M. Tubía ⁸, J.M. Parés ⁹, I. Gil-Peña ¹⁰, B. Antolín-Tomás ¹¹, H. El Ouardi ¹², J.C. Kullberg ¹³, J.J. Villalaín ⁷, T. Román-Berdiel ¹

¹ Dpto. Ciencias de la Tierra, Geotransfer-IUCA, U. de Zaragoza, 50009 Zaragoza.

acasas@unizar.es, mtjrb@unizar.es, boliva@unizar.es

² Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Unidad de Zaragoza, CSIC, 50059 Zaragoza.

³ Departament de Ciències de la Terra i de l'Oceà, Institut de Recerca Geomodels, U. de Barcelona, 08028 Barcelona.

⁴ Western Washington University, Bellingham, Washington.

⁵ Laboratoire Bio Géosciences et Ingénieries des Matériaux, École Normale Supérieure, U. Hassan II de Casablanca, 50069 Casablanca, Morocco.

⁶ Dpto. de Geología, U. de Salamanca, 37008 Salamanca.

⁷ Dpto. Física, Escuela Politécnica Superior, U. de Burgos, 09006 Burgos.

⁸ Dpto. de Geología, U. del País Vasco, 48080 Bilbao.

⁹ Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana, CENIEH, 09002 Burgos.

¹⁰ Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, 28003 Madrid.

¹¹ Secondary Education Spanish System, Zaragoza.

¹² Department of Geology, Faculty of Sciences, Moulay Ismail University of Meknès, 11201 Meknès, Morocco.

¹³ Dpto. Ciências da Terra, CICEGe, U. Nova de Lisboa, Qta. Torre, 2829-516 Caparica, Portugal.

La técnica de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética (ASM) comienza a aplicarse en la Universidad de Zaragoza al principio de los 90, de la mano de Andrés Pocoví y Josep María Parés en el marco de las tesis de Andrés Gil y Emilio Pueyo, aplicándola a rocas sedimentarias (foliadas o no) de la Cuenca de Cameros y Prepirineo y, paralelamente, a rocas graníticas del varisco de Galicia en la tesis de Teresa Román (Université de Rennes). Desde estos inicios y a lo largo de casi 35 años se han desarrollado investigaciones aplicando esta técnica en diferentes contextos geológicos, tales como intrusiones graníticas del macizo varisco ibérico (Galicia y Pirineos), rocas sedimentarias, metasedimentarias y volcánicas del Pirineo (Zona Norpirenaica, margen sur de la Zona Axial, Sierras Interiores, Cuenca de Jaca, Sierras Exteriores, Sierras Marginales, Cuenca de antepaís del Ebro), cuencas extensionales mesozoicas invertidas de la placa Ibérica (Cameros, Cabuérniga, Polientes, Maestrazgo, Cuencas Permotriásicas de la Cordillera Ibérica, Mauléon, Organyà) y del Atlas, diapiros salinos, rocas de falla (cabalgamientos en Cameros, fallas de Río Grío, Jarque y Monroyo, cabalgamiento de Gavarnie, falla del Vallés, y fallas sismogénicas de Alhama de Murcia y de Baza), rocas volcánicas (de las cuencas Stephano-Pérmicas pirenaicas y de la Cordillera Ibérica, y lavas cuaternarias del SE peninsular). En los últimos proyectos

desarrollados hemos aplicado esta técnica a secuencias del tránsito sinrift-postrift mesozoico de la placa Ibérica (Formación Utrillas y equivalentes), en unas unidades críticas en relación con el giro de la placa ibérica, y a las cuencas neógenas continentales del interior de Iberia con vistas a una cartografía de la deformación reciente.

Todas estas investigaciones se han llevado a cabo en el seno de proyectos de investigación del plan nacional (CICYT GEO91-0924 y PB93-1218, DGES PB97-0997, BTE2002-04168-C03-01, CGL2006-05817, CGL2009-08969, CGL2013-42670-P, CGL2016-77560-C2-2-P, PID2019-108753GB-C22, PID2023-148256NB-I00) y del plan autonómico (Grupo de investigación Geotransfer E27, E32_17R_20R_23R), en colaboración con equipos de otros grupos de investigación y universidades (IGME, Universidades de Burgos, País Vasco, Barcelona, Michigan, Leoben, Roma Uno, Roma Tre, Paul Sabatier de Toulouse y UPPA de Pau) y se han plasmado en 14 tesis doctorales defendidas: Teresa Román (1994), Andrés Gil (1999), Ruth Soto (2003), Tania Mochales (2011), Óscar Pueyo (2012), Esther Izquierdo (2014), Pablo Santolaria (2015), Cristina García Lasanta (2016), Pablo Calvín (2018), Bennacer Moussaid (2019), Marcos Marcén (2020), Úrbez Majarena (2023), Francho Gracia (2024) y Ana Simón (2025) y 4 en realización (Pablo Sierra, Hassen Jebabli, Raúl Lázaro, Wissam Lachhab).

La aplicación de la ASM en rocas ígneas poco o no deformadas permite caracterizar el flujo magmático primario y la localización de las zonas de ascenso del magma. Además, las fábricas magnéticas son útiles para analizar la deformación sincrónica al emplazamiento. En numerosos granitos considerados clásicamente post-tectónicos, la ASM ha permitido caracterizar su estructura interna y han sido reinterpretados como sintectónicos (e. g. Román-Berdiel *et al.*, 1995; Porquet *et al.*, 2017). En rocas volcánicas antiguas, la fábrica magnética permite determinar la dirección de flujo, y por tanto la localización de los focos volcánicos, así como diferenciar el tipo de aparato volcánico responsable de la emisión (Izquierdo-Llavall *et al.*, 2013; Simón-Muzas *et al.*, 2022).

En el Pirineo Centro-occidental, la aplicación de la ASM y de subfábricas magnéticas (Oliva-Urcia *et al.*, 2009) ha ayudado a entender la evolución del orógeno y sus cuencas de antepaís. Las fábricas magnéticas indican (i) una foliación magnética dominante controlada por la estratificación, muy sensible a procesos de *layer parallel shortening*, especialmente en las cuencas de antepaís, (ii) lineación magnética paralela a los ejes de los pliegues o la dirección de los cabalgamientos fuera del frente de esquistosidad, (iii) disminución de la definición de las fábricas magnéticas asociada con una esquistosidad incipiente en las zonas internas del orógeno, y (iv) una relación clara con el plegamiento varisco en la Zona Axial, con lineaciones paralelas o perpendiculares a los ejes de los pliegues (Larrasoña *et al.*, 2004; Pocoví-Juan *et al.*, 2014). En la cuenca de antepaís del Ebro, la fábrica magnética muestra la foliación magnética paralela a la estratificación y la lineación magnética paralela a la dirección estructural pirenaica. Desde el cabalgamiento frontal hacia la cuenca de antepaís la fábrica magnética está progresivamente peor definida (Pueyo Anchuela *et al.*, 2010).

En diapiros salinos y en las rocas encajantes de los mismos, la lineación magnética registra el flujo diapírico, aunque también puede ser reorientado por la compresión posterior, responsable en algunos casos del *squeezing* de los cuerpos salinos (Santolaria *et al.*, 2015; Calvín *et al.*, 2023).

En cuencas extensionales invertidas, cuando la inversión no conlleva el desarrollo de foliación tectónica, la lineación magnética se mantiene paralela a la dirección de estiramiento correspondiente al estadio extensional. La transición entre unidades sin desarrollo y con desarrollo de foliación relacionada con la etapa de inversión tectónica viene marcada por el cambio de lineaciones magnéticas paralelas a la extensión a

lineaciones magnéticas paralelas a la lineación de intersección entre la estratificación y la foliación tectónica (Soto *et al.*, 2008; García-Lasanta *et al.*, 2018).

La ASM se ha mostrado también particularmente útil en zonas de falla formadas a poca profundidad y con escaso desarrollo de marcadores cinemáticos (especialmente lineaciones). Se ha aplicado a harinas de falla y zonas de cizalla asociadas a cabalgamientos, fallas direccionales y fallas normales. En zonas de falla extensionales, la lineación magnética es paralela a la dirección de extensión o perpendicular a la dirección de la falla (sin embargo, no en todos los casos), por lo que resulta útil para definir desviaciones locales de los ejes de deformación producidas por cambios en la dirección de extensión local en zonas de relevo (Marcén *et al.*, 2019). En zonas de cizalla complejas y con una historia larga, que incluyen movimientos direccionales (inicialmente) y normales (tardíos) la ASM también ha resultado un marcador claro de las etapas de deformación, permitiendo una zonación de los distintos segmentos de las harinas de falla (Casas-Sainz *et al.*, 2018).

Para el análisis de fábricas de origen tectónico se escogen normalmente lutitas, que son las rocas que a priori mejor registran la deformación. El Alto Atlas Marroquí es un caso especial, ya que las fábricas magnéticas quedan registradas por la magnetita contenida en las calizas jurásicas remagnetizadas, coincidiendo con las lutitas rojas con magnetización primaria. Estas fábricas pueden relacionarse con la evolución cinemática de la cuenca: (i) extensionales: k_{min} perpendicular a la estratificación y k_{max} subhorizontal en dirección NW-SE; (ii) asociadas a LPS: k_{min} perpendicular a la estratificación y k_{max} subhorizontal en dirección NE-SW; (iii) compresivas con foliación: k_{int} perpendicular a la estratificación, k_{max} subhorizontal en dirección NE-SW y k_{min} en dirección NW-SE; (iv) diapíricas y asociadas a cabalgamientos: k_{max} perpendicular a la estratificación (Moussaid *et al.*, 2013, Román-Berdiel *et al.*, 2023).

Finalmente, las secuencias *post-rift* (por ejemplo, Albiense-Cenomaniense de las cuencas Ibéricas) presentan una impronta menor (a veces nula) de la historia extensional, aunque reflejan el campo de deformación lejano, lo cual las hace útiles como marcadores de la cinemática de grandes áreas dentro de la placa. También hay que tener en cuenta que en estas condiciones es más fácil que se registre la compresión posterior en este tipo de materiales.

Todos estos trabajos, realizados en diferentes ámbitos geográficos y contextos tectónicos muestran las posibilidades de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética como técnica para determinar la deformación y ayudar en la interpretación tectónica local y regional. Tanto en rocas con alto grado de deformación como en rocas poco deformadas o con deformación incipiente, la caracterización de las direcciones principales de los elipsoides de susceptibilidad magnética proporciona datos con una distribución cartográfica mucho más homogénea que la que pueden ofrecer otras técnicas. Esto es especialmente cierto en rocas lutíticas con escaso grado de deformación, donde los marcadores clásicos suelen ser escasos. En cualquier caso, existen limitaciones al método y la ambigüedad de algunos resultados debe resolverse mediante la comparación con técnicas clásicas de análisis estructural. Esto también permite añadir una dimensión cuantitativa, que normalmente solo puede aplicarse cuando se ha controlado de forma fiable la mineralogía de las rocas analizadas, tanto los componentes ferro como los paramagnéticos.

Agradecimientos: Financiado por el proyecto de investigación PID2023-148256NB-100 del MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER, UE.

Referencias

- Calvin, P., Oliva-Urcia, B., Kullberg, J.C., Torres-López, S., et al. (2023).** Applying magnetic techniques to determine the evolution of reactive diapirs; a case study of the Lusitanian basin. *Tectonophysics*, 868: 230088.
- Casas-Sainz, A.M., Gil-Imaz, A., J.L. Simón, Izquierdo-Llavall, E., et al. (2018).** Strain indicators and magnetic fabric in intraplate fault zones: Case study of Daroca thrust, Iberian Chain, Spain. *Tectonophysics*, 730:29-47.
- García-Lasanta, C., Izquierdo-Llavall, E., Román-Berdiel, T., Izquierdo-Llavall, E., Soto, R., Villalaín, J.J. (2018).** Inversion tectonics and magnetic fabrics in Mesozoic basins of the Western Tethys: A review. *Tectonophysics*, 745: 1-23.
- Izquierdo-Llavall, E., Casas-Sainz, A., Oliva-Urcia, B., Scholger, R. (2013).** Paleomagnetism and magnetic fabrics of the Late Palaeozoic volcanism in the Castejón-Laspaúles basin (Central Pyrenees). Implications for palaeoflow directions and basin configuration. *Geological Magazine*, 151, 5: 777-797.
- Larrasoña, J.C., Pueyo, E.L., Parés, J.M. (2004).** An integrated AMS, structural, palaeo- and rock-magnetic study of the Eocene marine marls from the Jaca-Pamplona basin (Pyrenees, N Spain); new insights into the timing of magnetic fabric acquisition in weakly deformed mudrocks. *Geological Society of London Special Publication*, 238: 127 – 144
- Marcén, M., Román-Berdiel, T., Casas-Sainz, A. M., Soto, R., Oliva-Urcia, B., Castro, J. (2019).** Strain variations in a seis-mogenic normal fault (Baza Sub-basin, Betic Chain): Insights from magnetic fabrics (AMS). *Tectonophysics*, 765: 64-82.
- Moussaid, B., El Ouardi, H., Casas-Sainz, A., Villalaín, J.J., Román-Berdiel, T., Oliva-Urcia, B., Soto, R., Torres-López, A. (2013).** Magnetic fabrics in the Jurassic-Cretaceous continental basins of the northern part of the Central High Atlas (Morocco). Geodynamic implications. *Journal of African Earth Sciences*, 87: 13-32.
- Oliva-Urcia, B., Larrasoña, J. C., Pueyo, E. L., Gil, A., Mata, P., Parés, J. M., ... & Pueyo, O. (2009).** Disentangling magnetic subfabrics and their link to deformation processes in cleaved sedimentary rocks from the Internal Sierras (west central Pyrenees, Spain). *Journal of Structural Geology*, 31(2): 163-176.
- Pocoví Juan, A., Pueyo Anchuela, Ó., Pueyo, E.L., Casas-Sainz, A.M., Román Berdiel, M.T., Gil Imaz, A., Ramajo Cordero, J., Mochales, T., García Lasanta, C., Izquierdo-Llavall, E., Parés, J.M., Sánchez, E., Soto Marín, R., Oliván, C., Rodríguez Pintó, A., Oliva-Urcia, B., Villalaín, J.J. (2014).** Magnetic fabrics in the Western Central-Pyrenees: an overview. *Tectonophysics*, 629: 303-318.
- Porquet M.; Pueyo E.L. Román-Berdiel M.T., Olivier P., Longares L.A. Cuevas J.; Ramajo J.and the Geokin3DPyr working group (2017).** Anisotropy of magnetic susceptibility of the Pyrenean granites, *Journal of Maps*, 13:2, 438-448,
- Pueyo-Anchuela, Ó., Gil Imaz, A., Pocoví Juan, A. (2010).** Tectonic imprint in magnetic fabrics in foreland basins: a case study from the Ebro Basin, N Spain. *Tectonophysics*, 492(1-4): 150-163.
- Román-Berdiel, T., Oliva-Urcia, B., Casas-Sainz, A.M., Calvin, P., Moussaid, B., et al. (2023).** Geodynamic Evolution During the Mesozoic and Cenozoic in the Central High Atlas of Morocco from Anisotropy of Magnetic Susceptibility. In: P. Calvin, A.M. Casas-Sainz, T. Román-Berdiel & J.J. Villalaín (Eds.) *Tectonic Evolution of the Moroccan High Atlas: A Paleomagnetic Perspective*. Springer Nature, 347-486.
- Román-Berdiel, T.; Pueyo-Morer, E.L.; Casas-Sainz, A.M. (1995).** Granite emplacement during contemporary shortening and normal faulting: structural and magnetic study of the Veiga Massif (NW Spain). *Journal of Structural Geology*, 17 (12): 1689 -1706.
- Santolaria, P., Casas, A. M., Soto, R. (2015).** Anisotropy of magnetic susceptibility as a proxy to assess internal deformation in diapirs: case study of the Naval salt wall (Southern Pyrenees). *Geophysical Journal International*, 202(2): 1207-1222.
- Simón-Muzás, A., Casas-Sainz, A.M., Soto, R., Gisbert, J., Román-Berdiel, T., Oliva-Urcia, B., Pueyo E.L., Beamud, E. (2022).** Axial longitudinal flow in volcanoclastic materials of the Late-Carboniferous-Permian Cadí basin (Southern Pyrenees) determined from Anisotropy of Magnetic Susceptibility. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 421: 107443. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107443>
- Soto, R., Casas-Sainz, A.M., Villalaín, J.J., Gil-Imaz, A., et al. (2008).** Characterizing the Mesozoic extension direction in the northern Iberian plate margin by anisotropy of magnetic susceptibility (AMS). *Journal of the Geological Society*, 165: 1007-1018.

Multi-proxy characterization of the Regoufe and Rio de Frades W–Sn mining areas through an integrated geochemical and magnetic approach

C. Cruz, A. Pereira, H. Sant'Ovaia

Instituto de Ciências da Terra, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Rua do Campo alegre, s/n 4169-007, Porto, claudiacruz@fc.up.pt

Mining activities are globally recognized as significant sources of environmental contamination, particularly due to the release of iron oxides and potentially toxic elements (PTEs), namely As, Mn, Zn, Cu, Cr, Ni, Pb, Cd, and Co. Particular attention has given to As concentration, since in abandoned W-Sn mining areas, the weathering of arsenopyrite-rich wastes may significantly affect soil, water, and air quality. Although several studies have investigated arsenopyrite-rich wastes from gold mining districts (e.g., Salzsauler et al., 2005), comparatively little attention has been given to W-Sn mining environments (e.g., Murciego et al., 2011). This study evaluates the environmental impact of waste from abandoned W-Sn mines through the integration of magnetic susceptibility (K) measurements and soil geochemistry. Magnetic susceptibility was used as a proxy for the identification of newly formed magnetic particles associated with iron oxide formation during weathering processes. In parallel, mine wastes were investigated to characterize the composition to assess their potential environmental implications.

The study focused on two former W-Sn mining areas located in the Arouca region (Aveiro district), in northern Portugal: Regoufe and Rio de Frades. The study area is situated in the Central-Iberian Zone and two main geological units are recognized: the Regoufe granitic pluton, dated at 280 ± 9 Ma by the Rb-Sr whole-rock method (Pinto, 1979), and the Neoproterozoic–Cambrian metasedimentary sequence of the Beiras Group (Sluijk, 1963). Although the Regoufe pluton has a relatively small outcrop area (ca. 6 km²), it is surrounded by an asymmetrical thermal metamorphic aureole extending over approximately 26 km². Hydrothermal activity following granite emplacement promoted the deposition of ore minerals within quartz veins crosscutting both granitic and metasedimentary rocks. The Regoufe mine is located along the southeastern margin of the pluton and is characterized by quartz veins hosted within granite. In contrast, the Rio de Frades mine occurs southwest of the study area and is hosted in metasedimentary sequence of the Beiras Group within the metamorphic aureole, where the causative granite does not outcrop (Sluijk, 1963; Viend et al., 1985).

Representative samples were collected from waste piles, including mineralized quartz veins and soils. The samples were collected along the old washing plant and near the entrances to the galleries. A total of 18 soil samples from Regoufe and 17 from Rio de Frades were analyzed through combined magnetic susceptibility and geochemical approaches. Magnetic susceptibility (K) was measured *in situ* using a portable Terraplug KT-10, and complementary studies were conducted to obtain a detailed study of magnetic mineralogy. For this, the magnetic fraction of some samples with highest values of K (sample R5 from Regoufe, and RF8 from Rio de Frades) was obtained by

separation with a Nd magnet and placed on adhesive carbon tape. On this magnetic fraction, scanning electron microscopy with energy dispersive spectroscopy (SEM/EDS) observations were performed. For geochemical analysis, the samples were milled to 125 μm in an agate mortar for further multielemental chemical analyses by ICP-MS analysis. The analyzes were carried out at Activation Laboratories (Ontario, Canada).

The K values range between 27 and 6024 μSI (mean value of 767 μSI), and between 291 and 5251 μSI (mean value of 1713 μSI) for soils in the Regoufe and Rio de Frades mining areas, respectively (Fig. 1). Previous studies have shown that the Regoufe pluton exhibits significantly lower magnetic susceptibility mean values (ca. 40 μSI) than the metasedimentary rocks of the Beiras Group (ca. 175 μSI ; Cruz et al., 2025), which may explain the differences recorded between the two mining areas. Furthermore, these results indicate that soils exhibit higher magnetic susceptibility than their respective outcropping rocks.

The SEM observations were performed, and in both study areas, newly formed anthropogenic magnetic particles were detected. The magnetic spherules are concentrated in specific zones, particularly near or immediately downstream of the former washing plant (R5, and RF8 in Regoufe and Rio de Frades areas, respectively). Furthermore, magnetic spherical particles display a wide range of sizes, varying from less than 1 μm to more than 600 μm in diameter. In some cases, larger spheres (ca. 40-150 μm) exhibit smaller spherical particles (ca. 1-8 μm) attached to their surfaces, suggesting complex formation and aggregation processes (Fig. 1). These particles are small, spherical in shape, and can be classified as technogenic magnetite in Regoufe (Magiera et al., 2021; Sant'Ovaia et al., 2023).

To evaluate the degree of soil contamination and elemental enrichment in the abandoned mining areas, concentrations of several potentially toxic elements (PTEs), were determined, with particular emphasis placed on arsenic due to its high toxicity and strong association with arsenopyrite-rich mine wastes. For the assessment, various contamination indices were used, however, this study focuses particularly on the contamination factor (CF) and the potential ecological risk index (PERI), as these provide realistic estimates of the degree of contamination affecting the soils in the valleys of the Regoufe and Rio de Frades mines.

Arsenic concentrations reveal a marked contamination in both study areas, although substantially higher values were recorded in Rio de Frades. Previous studies conducted in the Regoufe mining area (Sant'Ovaia et al., 2023) reported a mean As concentration of 3343 mg/kg, with the maximum value identified in sample R16, collected near the mine effluent discharge zone. According to the PERI index and based on CF values, most samples showed concentrations of the selected PTEs exceeding average background soil levels. Very high contamination levels were identified for As and Cd, high levels for Pb and Zn, and moderate levels for Mn and Cu.

In contrast, Rio de Frades exhibits a mean As concentration of 24247 mg/kg. The highest concentrations are mainly associated with areas surrounding the former washing plant (RF5, RF7, and RF15), as well as sites located downslope of waste dumps and affected by mine drainage effluents (RF12 and RF14). The PERI index indicates that all samples present As values far above the established threshold, representing a very high ecological risk. Ranking the PTEs according to their PERI values, from highest to lowest, yields the following order: As > Cd > Pb > Cu > Ni > Co > Cr > Mn > Zn. According to CF values, a very high contamination factor is detected for As and Pb.

Overall, the results reveal similarities between the two areas, although Rio de Frades exhibits higher arsenic levels, increased magnetic susceptibility, and abundant magnetic particles, indicating more intense weathering processes and a stronger environmental impact than the Regoufe mining area. Additionally, isothermal remanent magnetization (IRM) studies indicate that the magnetic particles detected in Regoufe are most likely related to heat generated during ore-processing or mining activities rather than with environmental pollution, classified as technogenic particles. Future work will include IRM analyses of samples from Rio de Frades to confirm the origin of the spherical particles observed in this area.

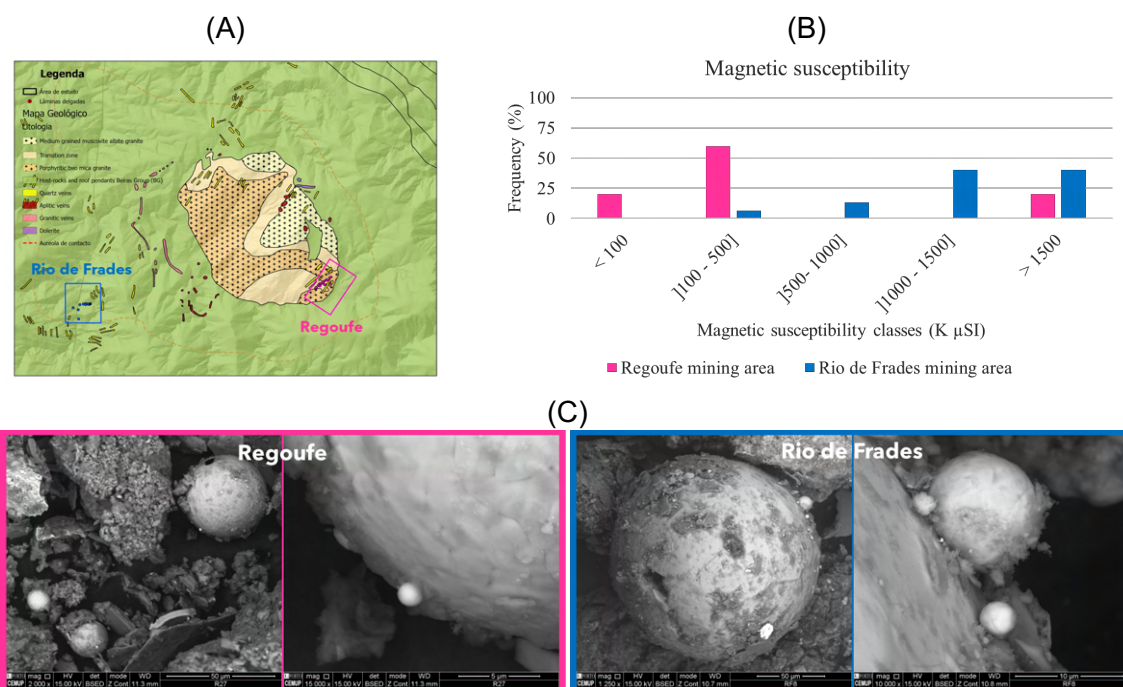


Figure 1. (A) Simplified geological map showing the locations of the Regoufe (pink square) and Rio de Frades (blue square) mines; (B) Histogram of magnetic susceptibility values obtained in the field using portable equipment; (C) Magnetic spheres observed under a scanning electron microscope.

Acknowledgments

The project, reference no. RESTAURA – NORTE 2030 – FEDER-02704900, is funded by the 2021–2027 Northern Regional Program (Norte 2030) and falls under the scope of the Institute of Earth Sciences (ICT) project – UID/04683/2025. The authors acknowledge the financial support provided to the ICT through the multi-annual funding contract with the Foundation for Science and Technology (FCT), under project UID/04683/2025 with the DOI <https://doi.org/10.54499/UID/04683/2025>. C. Cruz, was financially supported by <https://doi.org/10.54499/2023.07410.CEECIND/CP2833/CT0002> (FCT – Portugal). We would like to thank Sara Torres Lopez for her valuable comments, which helped improve the abstract.

References

Cruz, C., Carvalho, A., Costa, M., Martins, V., Sant'Ovaia, H. (2025) Geophysical imaging and constraints on the deep geometry of Regoufe pluton. Jornadas do ICT, Évora. *Livro de Resumos*: 34, 28-29 novembro 2025, Évora, Portugal. ISBN edição eletrónica 978-972-778-502-5.

Magiera, T., Górka-Kostrubiec, B., Szumiata, T., Małgorzata, W. (2021) Technogenic magnetic particles from steel metallurgy and iron mining in topsoil: Indicative characteristic by magnetic parameters and Mossbauer spectra. *Sci. Total Environ.*, 775, 145605.

Murciego, A., Álvarez-Ayuso, E., Pellitero, E., Rodríguez, M.A., García-Sánchez, A., Tamayo, A., Rubio, J., Rubio, F., Rubin, J. (2011) Study of arsenopyrite weathering products in mine wastes from abandoned tungsten and tin exploitations. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 186, Issue 1, 590-601,

Pinto, M.S. (1979) Geochemistry and geochronology of granitic rocks from the Aveiro and Viseu district (Northern Portugal). *Unpublished Ph. D. thesis*, University of Leeds.

Salzsauler, K.A., Sidenko, N.V., Sherriff, B.L. (2005) Arsenic mobility in alteration products of sulfide-rich, arsenopyrite-bearing mine wastes, Snow Lake, Manitoba, Canada, *Appl. Geochem.* 20, 2303–2314

Sant’Ovaia, H., Cruz, C., Guedes, A., Ribeiro, H., Santos, P., Pereira, S., Espinha Marques, J., Ribeiro, M.d.A., Mansilha, C., Martins, H.C.B., Valentim, B., Torres, J., Abreu, I., Noronha, F., Flores, D. (2023) Contamination Fingerprints in an Inactive W (Sn) Mine: The Regoufe Mine Study Case (Northern Portugal). *Minerals*, 13, 497.

Sluijk, D. (1963) Geology and Tin-Tungsten Deposits of the Regoufe Area, Northern Portugal. *Ph.D. Thesis*, Universiteit van Amsterdam, Amsterdam, The Netherlands.

Vriend, S.P., Oosterom, M.G., Bussink, R.W., Jansen, J.B.H. (1985) Trace element behaviour in the W-Sn granite of Regoufe, Portugal. *Journal of Geochemical Exploration*, 23, 13–25.

Geofísica y Tectónica en la Universidad de Salamanca: más de 20 años de exploración magnética

I. de Felipe ¹, M. Durán Oreja ¹, P. Calvín ¹, I. Pérez Cáceres ^{1,2}, M. Yenes ¹, R. Prieto ¹,
A. Simón Muzás ¹, C. Cruz ³, H. Sant'Ovaia ³, J. Gómez Barreiro ¹, P. Ayarza ¹

¹ Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, Plaza de la Merced, s/n, 37008 Salamanca, idefelipe@usal.es

² Cámara Oficial Mineira de Galicia, Rúa Juana Capdevielle, 2, A Coruña

³ Fac. de Ciências, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre s/n, Porto

Resumen

El Grupo de Investigación Reconocido de la Universidad de Salamanca, 'Geofísica y Tectónica' y la Unidad de Investigación Consolidada 194 de la Junta de Castilla y León, comenzó su trayectoria en el campo del magnetismo hace más de dos décadas. Durante este tiempo, el equipo se ha centrado en estudiar: i) la geología del subsuelo a través de anomalías magnéticas y gravimétricas; ii) las propiedades magnéticas de las rocas; iii) el paleomagnetismo; y iv) las fábricas magnéticas. Estas técnicas se han aplicado a diferentes zonas del Macizo Ibérico y actualmente también en la cadena Pirenaico-Cantábrica, con el fin de resolver la estructura de la corteza y su evolución tectónica. El trabajo realizado comprende sobre todo estudios multidisciplinarios que integran magnetismo con gravimetría y geología estructural.

Introducción y contexto de estudio

Desde sus inicios, el Grupo de Investigación Reconocido (GIR) 'Geofísica y Tectónica' del área de Geodinámica Interna de la Universidad de Salamanca (USAL) se ha centrado en el estudio de anomalías magnéticas integradas con anomalías gravimétricas en el Macizo Ibérico (zonas Centro Ibérica y Asturoccidental-Leonesa). En la actualidad, la zona de estudio se ha extendido a la Cordillera Pirenaico-Cantábrica.

El estudio de estas regiones surgió de la necesidad de explicar la presencia de anomalías magnéticas de gran longitud de onda y alta amplitud, reveladas en el mapa de anomalías aeromagnéticas de la Península Ibérica (Figura 1, Socías y Mezcuá, 2002). Las anomalías magnéticas representan una variación local del campo magnético terrestre con respecto a un valor de referencia y cuando presentan gran longitud de onda y amplitud denotan un origen profundo y una fuente muy magnética. En estos casos, el origen de las anomalías puede tener relación con la tectónica a gran escala y contribuye a desentrañar la evolución geológica a nivel regional. Con el fin de entender la existencia de grandes anomalías magnéticas en el noroeste del Macizo Ibérico y de las grandes cuencas Mesozoicas Pirenaico-Cantábricas, nuestro GIR se ha centrado en el estudio de 6 zonas principales (Figura 1).

La zona 1 corresponde a la Anomalía Magnética de Galicia Oriental (EGMA, Aller *et al.*, 1994), una anomalía de orientación N-S ligeramente cóncava hacia el este en respuesta a la geometría del Arco Ibero Armónico situada en el límite entre las zonas Asturoccidental-Leonesa y Centro Ibérica (Aller *et al.*, 1994; Ayarza y Martínez Catalán, 2007; Martínez Catalán *et al.*, 2018; Ayarza *et al.*, 2021). Las zonas 2 y 3 corresponden a anomalías de menor intensidad, asociadas a zonas con grandes estructuras

extensionales Variscas tardías (Diez Balda *et al.*, 1995), y al Sistema Central, una cordillera alpina de intraplaca que exhuma el basamento Neorpoterozoico-Paleozoico (DeFelipe *et al.*, 2022; De Vicente *et al.*, 2018). Dentro de estas zonas, la anomalía 2 incluye la Anomalía Magnética de Salamanca (SAMA) y la anomalía 3 incluye la Anomalía Magnética del Sistema Central (CSMA). La zona 4 corresponde al oeste de la Anomalía Magnética de Porto-Viséu-Guarda (PVGMA), anomalía de gran extensión situada en el norte de Portugal y cuya continuidad lateral se extiende aparentemente hasta la anomalía magnética del Sistema Central. La zona 5 corresponde a la mayor anomalía magnética de España, la Anomalía del País Vasco (Aller y Zeyen, 1996), tradicionalmente asociada a la presencia de una corteza inferior intruida por gabros durante la extensión cretácica y emplazada tectónicamente durante la orogenia Alpina (Pedreira *et al.*, 2007). Por último, la zona 6, en el flanco sur del Arco Centro Ibérico, muy cerca de su charnela, corresponde a un área donde las anomalías aeromagnéticas son de menor amplitud e intensidad.

Generalmente, cada una de estas zonas ha sido estudiada de manera sistemática mediante la adquisición de datos terrestres para el cálculo de la anomalía magnética y, con frecuencia, gravimétrica de alta resolución. Además, se han obtenido muestras orientadas de rocas para la caracterización de sus propiedades magnéticas y paleomagnéticas.

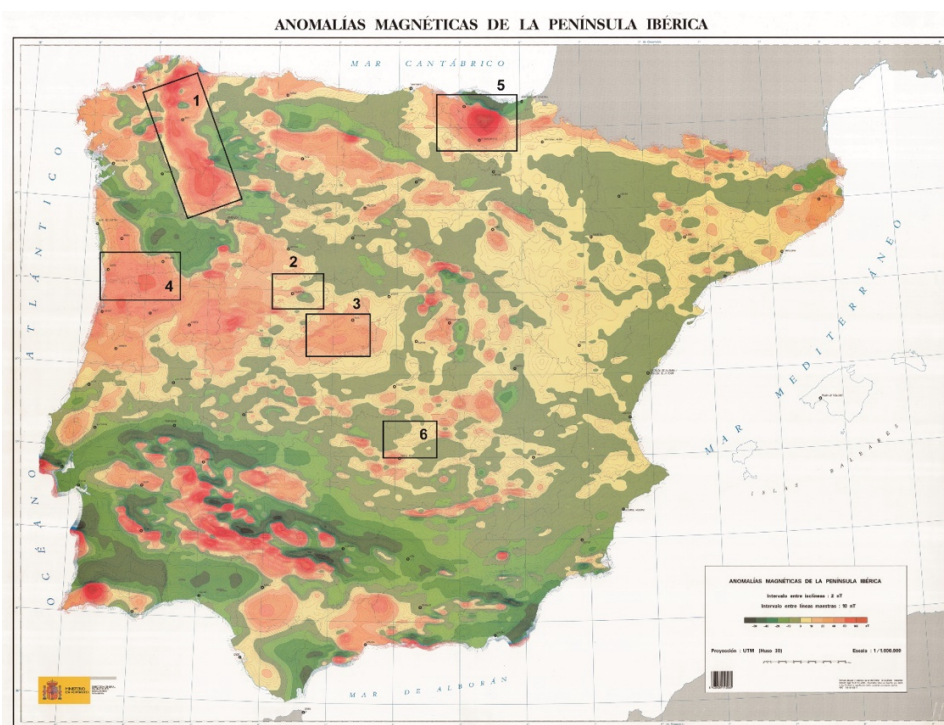


Figura 1: Mapa aeromagnético de la Península Ibérica (IGN, 2001) con la localización de las anomalías magnéticas estudiadas por el GIR 'Tectónica y Geofísica' de la USAL (UIC 194 de la Junta de Castilla y León) de: (1) Galicia Oriental (Eastern Galicia Magnetic Anomaly, EGMA), (2) Salamanca (SAMA), (3) Sistema Central (CSMA), (4) anomalía magnética de Porto, parte de la PVGMA, (5) País Vasco, y (6) flanco sur del Arco Centro Ibérico.

Resultados

Los principales hallazgos relacionados con la EGMA (zona 1) muestran que la magnetización de las rocas está asociada a la tectónica extensional Varisca tardía y no a una litología concreta. Esta tectónica extensional generó grandes despegues (domo térmico de Lugo-Sanabria) y la circulación de fluidos por su base favoreció la formación de magnetita y hematites. La magnetita generada presenta un gran tamaño de grano, en el rango del multidominio, y susceptibilidad magnética alta, aunque apenas presenta

remanencia. El hematites porta remanencia magnética y direcciones horizontales hacia el sur y compatibles con el supercron pérmico de polaridad inversa Kiaman (Martínez Catalán *et al.*, 2018; Ayarza *et al.*, 2021). En la zona 2, la SAMA muestra en el mapa aeromagnético de la Península Ibérica un dipolo inverso. Para desentrañar su fuente, realizamos un estudio magnético y gravimétrico de alta resolución hasta el sur de la provincia de Salamanca. Modelos previos (Yenes *et al.*, 2021) proponen para la SAMA una fuente magnética relacionada con las pizarras Ordovícicas que afloran en el oeste de Salamanca. Estas pizarras presentan pirrotina que portan una remanencia inversa pérmica. Este modelo está apoyado por la coincidencia del máximo magnético con un máximo de la anomalía de Bouguer. La prolongación de la SAMA hacia el sur se está utilizando para estudiar la relación entre las anomalías de campos potenciales con las mineralizaciones existentes en la zona del domo térmico de Martinamor (Ayarza *et al.*, 2026), aunque estas mineralizaciones son dispersas y se encuentran desplazadas por fallas Variscas. Hacia el este de la SAMA, el contacto tectónico entre el Neoproterozoico-Paleozoico y el Cenozoico de la cuenca del Duero está marcado con una fuerte anomalía de orientación NNE-SSO, presumiblemente asociada al sistema de fallas de Alba-Villoria y Guijuelo, estructuras alpinas probablemente heredadas de la orogenia Varisca. En la zona 3, la CSMA no parece estar relacionada con las propiedades magnéticas de las rocas ígneas félsicas (granitoides) que afloran abundantemente en el Sistema Central. Por ello, se ha realizado un muestreo de las escasas rocas ígneas básicas (gabros fundamentalmente) que afloran en el Sistema Central y otras áreas de la Zona Centro Ibérica, con el objetivo de establecer una fuente para las anomalías y desentrañar la evolución tectónica del Arco Centro Ibérico durante la orogenia Varisca. En la zona 4, la PVGMA representa una anomalía magnética de gran longitud de onda cuya fuente es aún desconocida. Para interpretar dicha anomalía, se ha realizado un mapa magnético de la zona de Porto y se han estudiado las propiedades magnéticas de algunos granitos (p.e. granito de Lavadores) y rocas metamórficas de alto grado (Pérez Cáceres *et al.*, 2023). Así mismo, se han medido propiedades magnéticas de rocas básicas en el complejo ígneo de Braga con resultados relevantes. En la zona 5, los estudios de propiedades magnéticas en rocas ígneas básicas y ultrabásicas que afloran en la cuenca Vasco-Cantábrica y Zona Norpirenaica (DeFelipe *et al.*, 2017; Lagabrielle *et al.*, 2010), parecen indicar que esas litologías pueden constituir la fuente principal de las anomalías magnéticas del País Vasco y de Mauléon. La hiperextensión cretácica resultado de la apertura del Golfo de Vizcaya habrían generado estructuras extensionales que favorecieron la exhumación del manto a la base de las cuencas sedimentarias. La inversión alpina de estas grandes fallas dio lugar al emplazamiento disperso de rocas ultramáficas por procesos tectónicos y/o halocinéticos. Por último, en la zona 6, se identificó una remagnetización estable portada por pirrotina, con polaridad normal e inclinación negativa, adquirida durante el Carbonífero tardío antes del supercron Kiaman. Los resultados revelan una rotación de eje vertical de 42° en sentido horario, vinculada directamente al desarrollo del Arco Centro Ibérico entre los 325 y 318 Ma (Durán Oreja *et al.*, 2023).

Conclusiones

En el Macizo Ibérico y Cordillera Pirenaico-Cantábrica, la combinación de datos geofísicos de alta resolución y análisis de propiedades magnéticas de rocas ha permitido identificar las fuentes de diversas anomalías y vincularlas a procesos geodinámicos clave como: (i) la extensión Varisca tardía que originó grandes domos térmicos que generaron una importante señal magnética y el magmatismo en el Sistema Central, aunque el origen de los minerales magnéticos no sea el mismo en ambos contextos; (ii) la rotación de eje vertical en el Arco Centro Ibérico; (iii) la relación entre anomalías de campos potenciales y mineralización de elementos críticos en la Zona Centro Ibérica; (iv) la hiperextensión cretácica con la exhumación del manto y su herencia estructural durante la orogenia Alpina en la Cordillera Pirenaico-Cantábrica.

Agradecimientos: Este trabajo, así como varios de los que se citan, ha sido financiados por el proyecto de la Junta de Castilla y León SA066P24.

Referencias

- Aller, J., Zeyen, H. J. (1996).** A 2.5-D interpretation of the Basque country magnetic anomaly (northern Spain): geodynamical implications. *In Geol Rundsch*, 85.
- Aller J., Zeyen H.J., Pérez-Estaún A., Pulgar J.A., Parés J.M. (1994).** A 2.5D interpretation of the eastern Galicia magnetic anomaly (northwestern Spain): geodynamical implications, *Tectonophysics*, 23 (3-4) [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90255-0](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90255-0)
- Ayarza, P., Martínez Catalán, J. R. M. (2007).** Potential field constraints on the deep structure of the Lugo gneiss dome (NW Spain). *Tectonophysics*, 439 (1-4): 67-87.
- Ayarza, P., Durán, M., Calvín, P., DeFelipe, I., et al. (2026).** Potential field and structural control of a Sn-W rich area, W Iberia (Central Iberian Zone). *EGU General Assembly 2026*, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu26-6661>, 2026.
- Ayarza, P., Villalaín, J. J., Martínez Catalán, J. R., Álvarez Lobato, F., et al. (2021).** Characterizing the source of the Eastern Galicia Magnetic Anomaly (NW Spain): The role of extension in the origin of magnetization at the Central Iberian Arc. *Tectonics*, 40, e2020TC006120. <https://doi.org/10.1029/2020TC006120>
- DeFelipe, I., Ayarza, P., Palomeras, I., Ruiz, M., et al. (2022).** Crustal imbrication in an Alpine intraplate mountain range: A wide-angle cross-section across the Spanish-Portuguese Central System. *Tectonics*, 41. <https://doi.org/10.1029/2021TC007143>
- DeFelipe, I., Pedreira, D., Pulgar, J. A., Iriarte, E., Mendia, M. (2017).** Mantle exhumation and metamorphism in the Basque-Cantabrian Basin (N Spain): Stable and clumped isotope analysis in carbonates and comparison with ophicalcites in the North-Pyrenean Zone (Urdach and Lherz). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18 (2). <https://doi.org/10.1002/2016GC006690>
- De Vicente, G., Cunha, P. P., Muñoz-Martín, A., Cloetingh, S. A. P. L., et al. (2018).** The Spanish-Portuguese Central System: An example of intense intraplate deformation and strain partitioning. *Tectonics*, 37 (12): 4444-4469.
- Díez Balda M.A., Martínez Catalan J.R., Ayarza Arribas P. (1995).** Syn-collisional extensional collapse parallel to the orogenic trend in a domain of steep tectonics: the Salamanca Detachment Zone (Central Iberian Zone, Spain), *Journal of Structural Geology*, 17 (2). [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(94\)E0042-W](https://doi.org/10.1016/0191-8141(94)E0042-W).
- Durán Oreja M., Calvín P., Villalaín J. J., Ayarza P., Martínez Catalán J.R. (2023).** Paleomagnetism in the Cambrian Urda-Los Navalucillos Limestone (Montes de Toledo, Spain): Implications for late-Variscan kinematics and oroclinal bending in the Central Iberian Zone. *Tectonophysics*, 852. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229781>.
- Instituto Geográfico Nacional, IGN (2001).** Mapa de Anomalías Magnéticas, MPGEO 1927-2021 CC-BY 4.0, <http://www.ign.es/web/gmt-cartografia-geomagnetica>.
- Martínez Catalán, J. R., Ayarza, P., Álvarez Lobato, F., Villalaín, et al. (2018).** Magnetic anomalies in extensional detachments: The Xistral Tectonic Window of the Lugo Dome (NW Spain). *Tectonics*, 37: 4261–4284. <https://doi.org/10.1029/2017TC004887>
- Lagabriele, Y., Labaume, P., De Saint Blanquat, M. (2010).** Mantle exhumation, crustal denudation, and gravity tectonics during Cretaceous rifting in the Pyrenean realm (SW Europe): Insights from the geological setting of the Lherzolite bodies. *Tectonics*, 29 (4).
- Pedreira, D., Pulgar, J. A., Gallart, J., Torné, M. (2007).** Three-dimensional gravity and magnetic modeling of crustal indentation and wedging in the western Pyrenees-Cantabrian Mountains. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112 (12).
- Pérez Cáceres, I., DeFelipe, I., Ayarza, P., Gómez Barreiro, J., Sant’Ovaia, H., Cruz, C., Ribeiro, M. D. A., Villalaín, J. J., Durán Oreja, M., and Martínez Catalán, J. R. (2023).** Variscan tectonic evolution, magnetic anomalies and metallogenetic potential in the western Central Iberian Zone (Iberian Massif), *EGU General Assembly 2023*, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-9797>, 2023.
- Socias, I., Mezcuca, J. (2002).** Mapa de Anomalías Magnéticas de la Península Ibérica. IGN.
- Yenes L., Ayarza P., Calvín P., Santamaría Barragán A. (2021).** Origen de la Anomalía Magnética de Salamanca. Contribución de la formación Aldeatejada (Proterozoico Superior) y de las pizarras Ordovícicas. *TIERRA Y TECNOLOGÍA*, 57.

Insights into the Emplacement of the Vila Verde and São Mamede Granites through Anisotropy of Magnetic Susceptibility

D. Diógenes, H. Sant'Ovaia, F. Noronha, A. Gonçalves

Institute of Earth Sciences (Porto Pole), Department of Geosciences, Environment and Spatial Planning, Faculty of Sciences, University of Porto, Rua do Campo Alegre, s/n, 4169-007, Porto, Portugal, ana.goncalves@fc.up.pt

Abstract

The São Mamede and Vila Verde granites, located in the Godinhaços area (northern Portugal) in Galícia Trás-os-Montes Zone, were studied using anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) to characterize their internal fabric and emplacement mechanisms. A total of 213 oriented cores from 26 sampling sites were analysed, allowing the determination of mean magnetic susceptibility (K_m), anisotropy degree ($P\%$), and the orientation of magnetic lineations (K_1) and foliations (normal to K_3). The results show a progressive increase in K_m toward the northeast, away from the contact between the two granites and the Malpica Lamego Shear Zone (MLSZ). The São Mamede granite exhibits higher $P\%$ values, suggesting a stronger deformation imprint in comparison to Vila Verde granite. Magnetic lineations converge toward the contact zone, indicating a low-pressure extensional domain. Magnetic foliation is consistently subparallel to the regional trend of the MLSZ ($\sim N143^\circ E$), with variations in dip. Overall, the data suggests that the MLSZ exerted a first-order control on the development of magnetic fabrics and on magma emplacement, reflecting the interaction between regional tectonics and local extensional stresses.

Introduction

Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) has become a widely used tool in structural geology for investigating the internal fabric of granitic bodies and constraining their emplacement mechanisms. By quantifying the preferred orientation of magnetic minerals, AMS provides insight into magma flow patterns, deformation processes, and the relationships between magmatism and tectonics. Its sensitivity and non-destructive nature have led to extensive application in granitoid studies, particularly within orogenic belts where pluton emplacement is closely linked to regional deformation (e.g., Bouchez *et al.*, 1990; Nédélec & Bouchez, 2015; Gonçalves *et al.*, 2024; Sant'Ovaia *et al.*, 2024). Based on these principles, the granites of the Godinhaços area were investigated, with particular emphasis on the São Mamede and Vila Verde granites, to understand the magma flow dynamics responsible for their crystallization and their possible relationship with regional tectonic structures, especially the Malpica-Lamego Shear Zone (MLSZ).

Geological Setting

The Godinhaços area is situated along the boundary between the municipalities of Vila Verde (Braga District) and Ponte da Barca (Viana do Castelo District), in northern Portugal (Minho Province). Geotectonically, it belongs to the Galícia Trás-os-Montes

Zone (GTMZ; Fig. 1a) and is predominantly composed of synorogenic Variscan granitic rocks distributed across four main granite facies: São Mamede, Vila Verde, Braga, and Ponte da Barca (Fig. 1b). The São Mamede and Vila Verde massifs are composed of equigranular biotite–muscovite granites, although the relative abundances of biotite and muscovite vary between the two facies. The São Mamede Granite is characterized by a fine-grained texture, whereas the Vila Verde Granite is medium-grained. At the outcrop scale, the Vila Verde massif is considerably more extensive and displays a marked NW–SE elongation, while the São Mamede massif is smaller and characterized by a predominantly N–S-oriented major axis. The study area is also characterized by the occurrence of NE–SW-trending quartz veins (~ 3 to 4 km long) previously exploited for gold, since Roman times. Basic dolerite veins are also present.

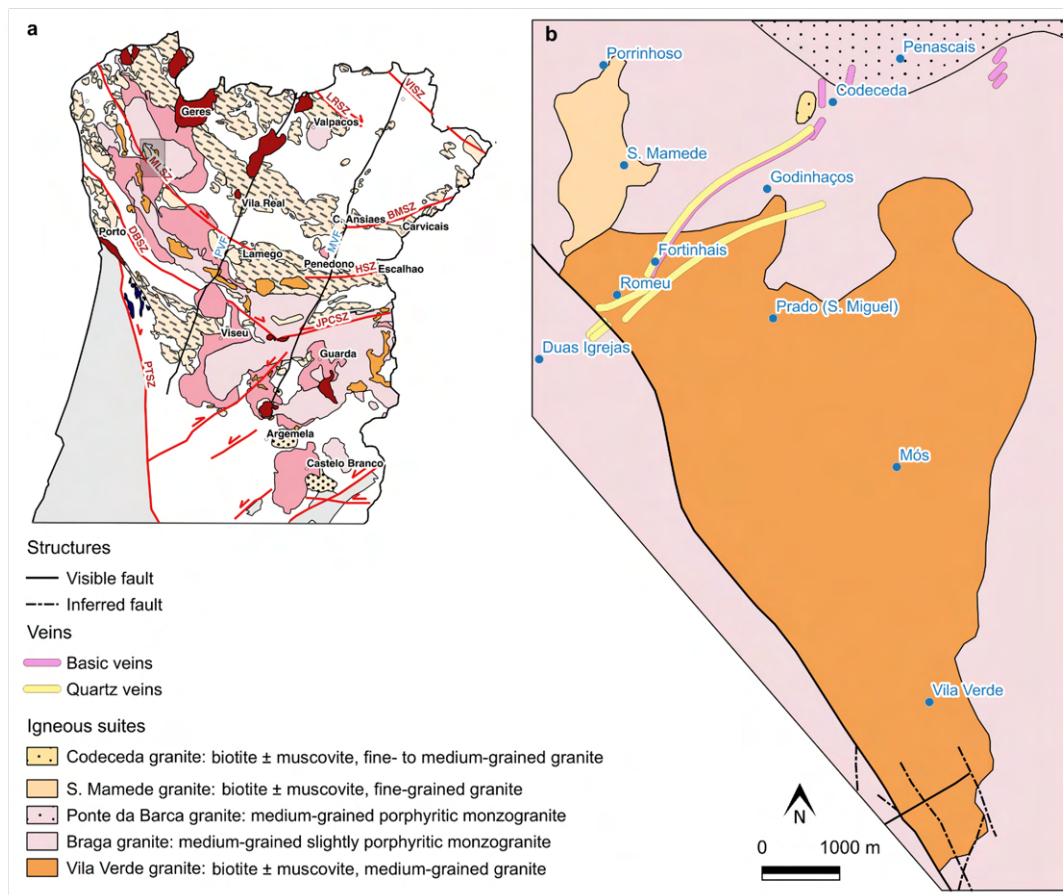


Fig. 1. (a) Spatial distribution of the Variscan granites and the major structures in central and northern Portugal (Ferreira *et al.*, 1987). (b) Simplified geological map of the Godinhaços area (adapted from Cândido de Medeiros *et al.*, 1975). Key: VISZ, Vivero-Ilfanes shear zone; LRSZ, Laza-Rebordelo shear zone; MLSZ, Mapica-Lamego shear zone; DBSZ, Dúrico-Beirão shear zone; PTSZ, Porto-Tomar shear zone; JPCSZ, Juzbado-Penalva do Castelo shear zone; MPSZ, Bemposta-Moncorvo shear zone; HSZ, Huebra shear zone; PVF, Penacova-Verín faults; MVF, Manteigas-Vilaríça fault. Shadow grey rectangle in (a) represents the location of Godinhaços area.

Sampling and Methods

Magnetic susceptibility (K) is defined according to the mathematical expression $K = M/H$, where M represents the induced magnetization and H the magnetic field applied to the studied body. In the International System of Units (SI), induced magnetization (M) and the applied magnetic field (H) have the same unit; therefore, K resulting from the ratio between these two parameters, is dimensionless (Tarling and Hrouda, 1993). In polymineralic rocks, magnetic susceptibility corresponds to the sum of the contributions

of all constituent minerals, including minerals with diamagnetic, paramagnetic and ferromagnetic (*sensu lato*) behaviours.

The anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) was measured using an AGICO Kappabridge KLY-4S equipment installed at the Institute of Earth Sciences laboratory of the University of Porto.. This equipment is coupled to a computer equipped with automatic data-processing software (Sufar), which calculates the mean values for each sampling site of the following parameters: mean magnetic susceptibility (K_m), intensities and orientations of axes K_1 , K_2 and K_3 ($K_1 \geq K_2 \geq K_3$), magnetic lineation (parallel to K_1 vector), and, magnetic foliation (the plane normal to vector K_3).

This study is based on the analysis of 213 oriented cores collected in 26 sampling sites from both São Mamede and Vila Verde granites. The obtained data were processed and interpreted using the Anisoft 6 and Stereonet software packages and were subsequently integrated into a GIS environment for spatial analysis.

Results

The results reveal a well-defined spatial relationship in the distribution of K_m values. These values are lower near the contact zone between the São Mamede and Vila Verde granites and progressively increase towards the northeast, with increasing distance from both the contact surface and the MLSZ (Fig. 2a). The total P% values exhibit a spatial pattern like that observed for K_m . However, the São Mamede granite is characterized by the highest anisotropy values, indicating a greater degree of deformation compared to the Vila Verde granite (Fig. 2b). In terms of average values, the São Mamede granite displays a K_m of $110.6 \pm 59.5 \mu\text{SI}$ ($18 - 212.5 \mu\text{SI}$) and a mean degree of P% of $3.7 \pm 1.59\%$ ($0.9 - 5.2\%$). In contrast, the Vila Verde granite exhibits a K_m value of $106.8 \pm 70.7 \mu\text{SI}$ ($20.86 - 249.7 \mu\text{SI}$) and a mean P% value of $3.1 \pm 1.4\%$ ($1.7 - 7.8\%$).

Magnetic lineation data display a convergent pattern toward the contact between the two granites. In the Vila Verde granite, magnetic lineations organize predominantly with a northwest trend, while in the São Mamede granite they show a preferential southeast trend (Fig. 2a). Magnetic foliation shows a consistent preferential orientation, parallel to the regional trend of the MLSZ, with an average strike of approximately N143°. In addition, in the Vila Verde granite, in most of the analysed points, the magnetic foliation is characterized by a gentle to steep dip toward the southwest, whereas in the São Mamede granite it exhibits a steep dip in the same direction (Fig. 2b).

Discussion and Final Remarks

The results suggest that the MLSZ played a significant role in the development of the magnetic fabric of the studied granites, particularly by controlling the orientation of magnetic foliation. Furthermore, the observed patterns indicate the existence of an extensional regime within the contact zone between the two granitic bodies, generating a local low-pressure domain toward which the magnetic lineations converge. This zone also coincides with the lowest magnetic susceptibility values recorded. This interpretation is further supported by the spatial association of the inferred extensional zone with late-stage structures, including elongated quartz veins and basic rock dikes. The emplacement of these structures likely exploited zones of crustal weakness generated by tectonic deformation, reflecting the combined influence of regional tectonics and the late magmatic evolution.

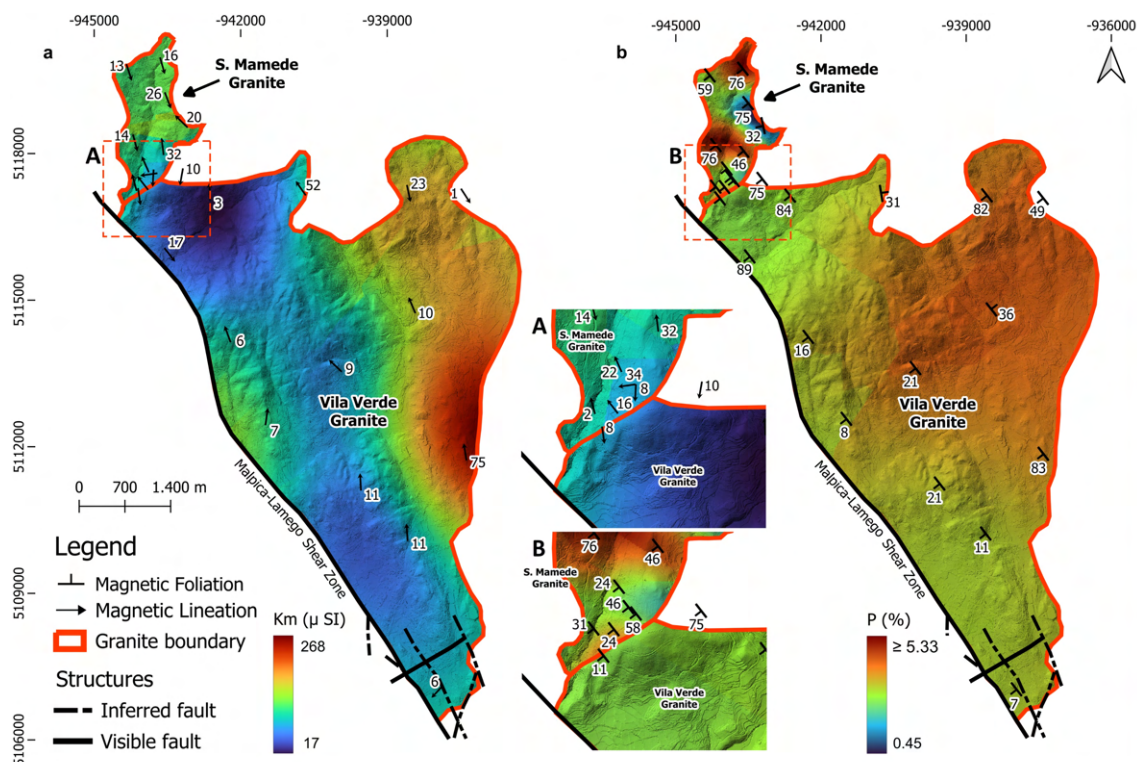


Fig. 2. Magnetic fabric of the São Mamede and Vila Verde granites. Magnetic lineation (a) and Foliation (b) measurements are plotted over interpolated maps of mean magnetic susceptibility (K_m) and degree of anisotropy (P), respectively. Insets A and B highlight the contact zone between the two granites.

Acknowledgements: the authors acknowledge the financial support provided to the Institute of Earth Sciences (ICT) through the multi-annual funding contract with the Foundation for Science and Technology (FCT), under project UID/04683/2025 with the DOI: <https://doi.org/10.54499/UID/04683/2025>

References

- Bouchez, J. L., Gleizes, G., Djouadi, M. T., Rochette, P. (1990)** Microstructure and magnetic susceptibility applied to emplacement kinematics of granites: The example of the Foix pluton (French Pyrenees). *Tectonophysics*, 184(2): 157–171. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90051-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90051-9)
- Cândido de Medeiros, A., Teixeira, C., Teixeira Lopes, J., Palácios Perez, T. (1975)** Notícia Explicativa da Folha 5B (Ponte da Barca) da Cartografia Geológica de Portugal na escala 1/50.000. *Serviços Geológicos de Portugal*, 61pp.
- Ferreira, N., Iglesias, M., Noronha, F., Pereira, et al. (1987)** Granitóides da Zona Centro Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. In: Bea, F., Carnicero, A., Gonzalo, J., Lopez Plaza, M., Rodriguez Alonso, M. (Eds.), *Geologia de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hesperico*, Libro de Homenaje a García De Figuerola L.C., Editorial Rueda, Madrid, pp 37-51
- Gonçalves, A., Sant'Ovaia, H., Noronha, F. (2024)** Anisotropy of magnetic susceptibility as the key to understand the ascending and emplacement mechanisms of granitic plutons: a review. *J. of Iberian Geology*, 51: 153-178. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41513-024-00272-8>
- Nédélec, A., Bouchez, J. L. (2015)** Granites: Petrology, structure, geological setting, and metallogeny. Oxford University Press. ISBN: 978-0-19-870561-1.
- Sant'Ovaia, H., Cruz, C., Gonçalves, A., Nogueira, P., Noronha, F. (2024)** Deciphering Iberian Variscan Orogen magmatism using the anisotropy of magnetic susceptibility from granites. *Minerals*, 14(3): 309. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14030309>
- Tarling, D.H., Hrouda, F. (1993)** *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman and Hall, London. DOI: <https://doi.org/10.1002/gj.3350300111>

Speleothem Magnetism: overview, limitations and perspectives

E. Font ¹, R. Dinis¹, E. Sanchez-Moreno ², C. Veiga-Pires ³, A.S.F. Reboleira ⁴, D. Dominik Fleitmann ⁵, S. Affolter ⁵, A.R. Brás ⁶, J. Ponte ⁷

¹ University of Coimbra, Dom Luiz Institute, Department of Earth Sciences, Coimbra, Portugal, efont@uc.pt

² Universidad de Burgos, Departamento de Física, Burgos, España.

³ CIMA – Centre for Marine and Environmental Research, ARNET - Aquatic Research Network Associate Laboratory, FCT, Universidade Do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal

⁴ Centre for Ecology, Evolution and Environmental Changes (CE3C) & CHANGE – Global Change and Sustainability Institute, Departamento de Biologia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal

⁵ University of Basel, Department of Environmental Sciences, Basel, 4056, CHE, Switzerland

⁶ ALMINA - MINAS DO ALENTEJO, S.A., Algaes, 7600-015 Aljustrel, Portugal

⁷ Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Rua C do Aeroporto, 1749-077 Lisboa, Portugal

Speleothems are secondary mineral deposits formed in caves and are excellent recorders of climate variations. In 1979, Alfred Latham and colleagues proposed the use of stalagmites and flowstones as alternative continuous records of paleosecular variation (PSV) of the Earth's magnetic field (Latham, 1979). Pedogenic magnetic particles derived from overlying soils are transported through the karst system and later incorporated into speleothems, where their alignment with the ambient Earth's magnetic field (EMF) leads to the acquisition of a detrital remanent magnetization. In contrast to marine and lacustrine sediments, speleothems are largely unaffected by diagenesis or other post-depositional processes, and the time lag between the deposition of magnetic particles and the locking-in of magnetization is relatively short. Their age can be determined precisely using radiocarbon ¹⁴C or U-Th disequilibrium series dating, providing high-resolution geochronological time series. For these reasons, magnetic studies of speleothems yield two important types of data: (i) continuous, high-resolution records of short-term variations in the Earth's magnetic field (EMF), and (ii) high-resolution records of climate variability, obtained by linking rock magnetic properties to environmental and climatic forcing parameters acting on soils.

However, the application of speleothems as paleomagnetic and paleoclimate archives still requires further investigation, particularly with regard to the mechanisms of remanence acquisition, the effects of calcite fabrics on recorded magnetic directions, and the significance of the relationship between magnetic properties and stable isotopes. This work presents a review of recent advances in speleothem magnetism, as well as current technical and scientific limitations and possible future perspectives in the field.

Referencias

Latham, A. G., Schwarcz, H. P., Ford, D. C., & Pearce, G. W. (1979). Palaeomagnetism of stalagmite deposits. *Nature*, 280(5721), 383–385. <https://doi.org/10.1038/280383a0>

El laboratorio de Paleomagnetismo de Barcelona CCiTUB-CSIC 37 años después: contribuciones a la datación magnetoestratigráfica

M.Garcés ^{1,2}, E. Beamud ^{1,2,3}, E. Maestre ³, L. Valero ^{1,2}

¹ Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Universitat de Barcelona, Facultat de Ciències de la Terra, Martí i Franquès s/n, 08028-Barcelona.

² Institut de Recerca Geomodels, Universitat de Barcelona, Barcelona.

³ Laboratorio de Paleomagnetismo CCiTUB-Geo3BCN CSIC, Barcelona.

El laboratorio de Paleomagnetismo de Barcelona fue creado en 1989 como resultado de un acuerdo entre el CSIC y el Servei Geològic de Catalunya (Generalitat de Catalunya). Fue instalado en el sótano del Instituto de Ciencias de la Tierra “Jaume Almera”, con el entonces investigador del CSIC Josep Maria Parès, como su primer director. A partir de 1998, el laboratorio pasó a depender de forma conjunta de los Centros Científicos y Tecnológicos de la Universitat de Barcelona (CCiTUB) y el Instituto Jaume Almera, hoy Geociencias Barcelona (GEO3BCN), del CSIC. Desde entonces funciona como un servicio científico-tecnológico, abierto a múltiples grupos de investigación. En sus casi 40 años de historia el laboratorio de Barcelona ha mantenido una infraestructura científica de alto nivel, donde destacan entre otros equipos 3 generaciones de magnetómetros superconductores. La última adquisición en el 2025 de un sistema para la medida de u-channels permite ampliar las capacidades del laboratorio al análisis no destructivo de sondeos y liberarlo de la dependencia del Helio líquido.



Figura 1. El grupo del Laboratorio de Paleomagnetismo CCiTUB-CSIC y algunos que pasaban por allí un día del año 2015. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Ana Gómez, Ylenia Almar, Juan-Cruz Larrasoña, Miguel Garcés, Santi Giralt, Luis Valero, Bet Beamud, Miriam Gómez.

El laboratorio de Barcelona se ha distinguido por colaborar y dar apoyo a diferentes grupos de investigación de la Universidad de Barcelona y el CSIC, pero también de otras instituciones nacionales e internacionales. Las múltiples colaboraciones a lo largo de los

años han llevado a multiplicar las líneas de investigación, incluyendo estudios aplicados a la Cronoestratigrafía, la Geología Estructural, la Vulcanología, la Arqueología, etc.

Una línea de investigación central desde la fundación del laboratorio es la Magnetoestratigrafía, aplicada sobre todo a sucesiones continentales, siempre de la mano de la bioestratigrafía de mamíferos. Destacan las investigaciones y tesis doctorales realizadas en las cuencas cenozoicas de la Península Ibérica, además de colaboraciones en proyectos de datación magnetoestratigráfica en los Zagros y Kopet-Dag en Irán, en el Kurdistan iraquí, Antártida, África, etc.

La experiencia acumulada ha llevado a perfilar un método de análisis magnetoestratigráfico que se centra en abordar las dataciones dentro de un análisis integral de las cuencas. El objetivo es obtener registros estratigráficos completos y extensos, y el medio para conseguirlo es la consideración de toda la diversidad de datos que proporciona el relleno sedimentario de una cuenca. Nuestro método se fundamenta en (i) el propio carácter no periódico de las inversiones de polaridad, que da lugar a un patrón de inversiones característico cuando el lapso de edad involucrado es suficientemente largo y en (ii) buscar las soluciones de correlación que proporcionan las tasas de sedimentación más coherentes con el contexto y la evolución de la cuenca. Así, la propuesta de correlación magnetoestratigráfica no la determina un dato -o un tipo de datos- concreto, y es posible que no exista una solución que satisfaga todos los condicionantes. Es una aproximación que se impone al razonamiento circular que impregna algunas dataciones magnetoestratigráficas que se fundamentan en la utilización acrítica de puntos de anclaje externos.

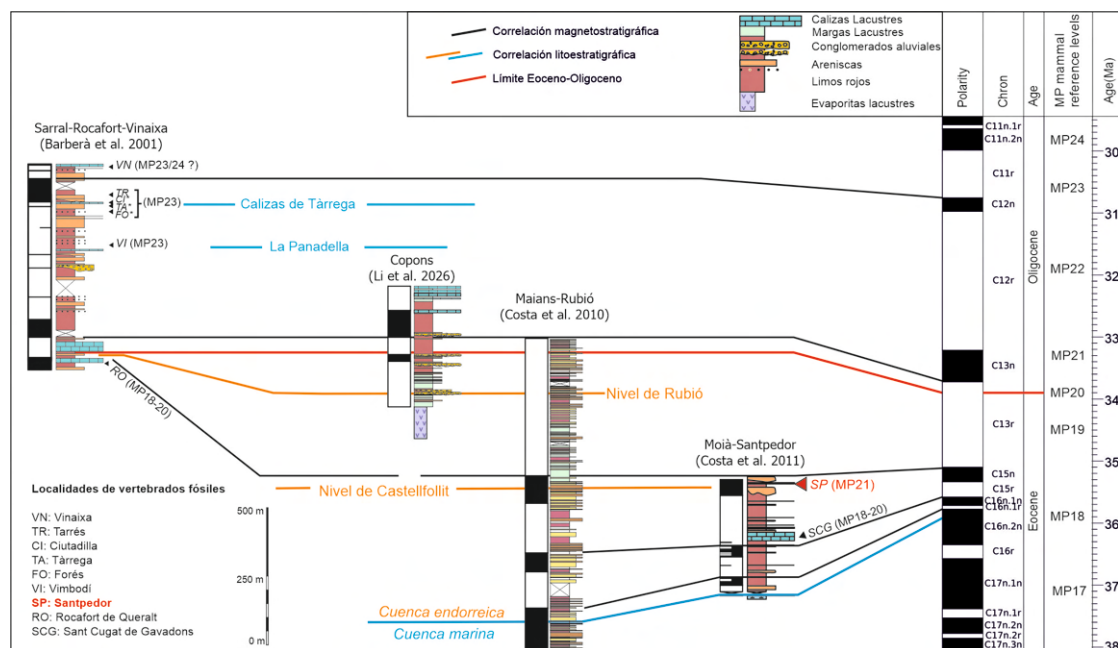


Figura 2. Correlación magnetoestratigráfica de las sucesiones del Eoceno Superior Oligoceno en el margen oriental de la Cuenca del Ebro. Las líneas naranjas y azules marcan capas guía que sirven como de niveles de correlación litoestratigráfica. En rojo, el límite Eoceno/Oligoceno en base a la correlación magnetoestratigráfica propuesta. Destaca la edad eocena de la localidad de Santpedor (SP), tradicionalmente atribuida al Oligoceno Inferior en base a la presencia de roedores de origen asiático que se supone colonizaron Europa durante la Grande Coupure (evento de renovación faunística y extinción que marca el límite Eoceno-Oligoceno). Comparar la edad de las localidades (zonas MP) con la escala de referencia de la derecha (Speijer et al. 2020).

Un caso ilustrativo lo representa el estudio de la transición Eoceno/Oligoceno en el margen oriental de la Cuenca del Ebro, donde se ha reconocido una sucesión de vertebrados fósiles que incluye el registro de la *Grande Coupure* (Vianey-Liaud *et al.*, 2019), una fase de reorganización profunda de las faunas continentales vinculada al cambio climático global del inicio del Oligoceno (Hooker *et al.* 2004). Dentro de esta sucesión, la localidad de Santpedor es clave por representar el primer registro de faunas *post-Grande Coupure*. Un estudio previo centrado en la sección de Moia-Santpedor concluyó con una correlación que se ajustaba muy convenientemente a las atribuciones bioestratigráficas (Costa *et al.*, 2011). Trabajos posteriores, sin embargo, han contribuido a la integración de múltiples sucesiones estratigráficas, extendiendo la longitud del registro y proponiendo una correlación independiente de los datos bioestratigráficos previos (Fig. 2). La nueva correlación no solo refina, sino que pone en compromiso la calibración existente de las zonas de vertebrados continentales en torno al límite Eoceno-Oligoceno, a la vez que ayuda a resolver algunos enigmas asociados a la localidad de Santpedor (Köhler and Moyà-Solà 1999).

Referencias

- Barberà, X., Cabrera, L., Marzo, M., Parés, J.M. and Agustí, J. (2001)** A complete terrestrial Oligocene magnetobiostratigraphy from the Ebro Basin, Spain. *Earth and Planetary Science Letters*, 187(1–2), 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00270-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00270-9)
- Costa, E., Garcés, M., López-Blanco, M., Beamud, E., Gómez-Paccard, M. and Larrasoña, J.C. (2010)** Closing and continentalization of the South Pyrenean foreland basin (NE Spain): magnetochronological constraints. *Basin Research*, 22, 904–917. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2009.00452.x>
- Costa, E., Garcés, M., Sáez, A., Cabrera, L., and López-Blanco, M. (2011)** The age of the “Grande Coupure” mammal turnover: New constraints from the Eocene–Oligocene record of the Eastern Ebro Basin (NE Spain): *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 301, 97–107, doi:10.1016/j.palaeo.2011.01.005.
- Hooker, J.J., Collinson, M.E., and Sille, N.P. (2004)** Eocene-Oligocene mammalian faunal turnover in the Hampshire Basin, UK: Calibration to the global time scale and the major cooling event: *Journal of the Geological Society*, v. 161, 161–172, doi:10.1144/0016-764903-091.
- Köhler, M., and Moyà-Solà, S. (1999)** A finding of oligocene primates on the European continent.: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 96, p. 14664–14667, doi:10.1073/pnas.96.25.14664.
- Li, J., Valero, L., Beamud, E., López-Blanco, Sáez, A., Cabrera, L. (2026)** The elusive subchron C13r.1n: a tie point for the Eocene-Oligocene Transition. *Earth and Planetary Science Letters (en revision)*.
- Speijer, R.P., Pälike, H., Hollis, C.J., Hooker, J.J. and Ogg, J.G. (2020)** The Paleogene Period. In: Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D. and Ogg, G.M. (Eds.), *Geologic Time Scale 2020*. Elsevier, Amsterdam, 1087–1140. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824360-2.00028-0>
- Vianey-Liaud, M., Minwer-Barakat, R., and Marivaux, L. (2019)** The rodents from Santpedor-2 (Ebro Basin, NE Spain) confirm the Oligocene age of the latest primates from the Paleogene of Europe: *Geobios*, v. 55, p. 77–88, doi:10.1016/j.geobios.2019.06.002.

NE-SW extension direction recorded by magnetic fabrics in the NE border of the Cameros basin

L. Igartua-Pisonero del Pozo¹, L. Rodríguez-Méndez², A. Casas³, M. Garcés^{4 5}

¹ Investigadora independiente, Bilbao. luigrtuni@gmail.com

² Departamento de Geología, Campus de Bizkaia, Universidad del País Vasco (EHU), Leioa

³ Dpto. Ciencias de la Tierra, Geotransfer-IUCA, U. de Zaragoza, 50009 Zaragoza.

⁴ Dept. Earth and Ocean Dynamics, University of Barcelona, Facultat de Ciències de la Terra, Campus de Pedralbes, 08028-Barcelona, Spain

⁵ Laboratorio de Paleomagnetismo CCiTUB-Geo3BCN CSIC, Barcelona.

The Cameros Basin (Iberian Range) was an active Mesozoic rift system whose evolutionary models remain debated. This study characterizes the architecture and tectonic dynamics of its NE margin (Arnedillo sector), where pre- and syn-rift sequences overthrust the Cenozoic deposits of the Ebro Basin along the NW-SE trending Cameros Thrust.

To reconstruct this structural evolution, detailed outcrop-scale structural mapping is combined with Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) and thermomagnetic curves. Rock magnetism data allowed the identification of the paramagnetic and ferromagnetic contributions that control the magnetic properties. Structurally, the area features NW-SE thrusts and shortcut geometries that accommodate the shortening. The AMS data reveal that the magnetic lineation K_1 is predominantly perpendicular to these main fault strikes, supporting an orthogonal extensional regime during basin opening rather than a transtensional one. However, the non-linear relationship between K_1 and bedding strike indicates episodic extension operating through discrete pulses, with early block-tilting prior to magnetic fabric acquisition. Finally, thin Triassic Keuper facies along the fault planes confirm their role as a low-friction regional detachment that governed initial rift geometries and localized subsequent Cenozoic Alpine compression. These findings underscore how mechanical stratigraphy pre-determined basin closure, validating AMS as a strong proxy for mapping deep-seated structures.

Magnetic Fabrics Related to Extension, Salt Tectonics and Compression in the Cretaceous Series of the El Kef Region, Northwestern Tunisian Atlas

M. H. Jebabli¹, A. Casas-Sainz¹, N. Karoui Yaakoub², R. Talbi³, M. Sabri Arfaoui⁴,
B. Oliva-Urcia¹, T. Román-Berdiel¹

¹ Geotransfer-IUCA, Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain, 892851@unizar.es

² University of Carthage, Faculty of Sciences of Bizerte, Department of Geology, Bizerte, Tunisia; LR01ES06: Laboratory of Mineral Resources and Environment

³ Georesources Laboratory, Center for Water Research and Technologies, University of Carthage, Soliman, Tunisia

⁴ Laboratoire de Géodynamique, Géonumérique et Géomatériaux, Département de Géologie, FST, Université de Tunis El Manar, Tunis, Tunisia

The El Kef-Nebeur region, in the northwestern Tunisian Atlas, is a key sector for understanding the interaction between Cretaceous extension, Triassic salt tectonics and later Atlasic compression (Rigane and Gourmelen, 2011). This communication presents new magnetic fabric data from two Cretaceous marly units (Fig.1): the Albian-Cenomanian Fahdene Formation and the Coniacian-Santonian El Kef Formation. The aim is to reconstruct the spatial and temporal variations of deformation in a salt-influenced intra-plate basin where classical structural markers are locally scarce or discontinuous.

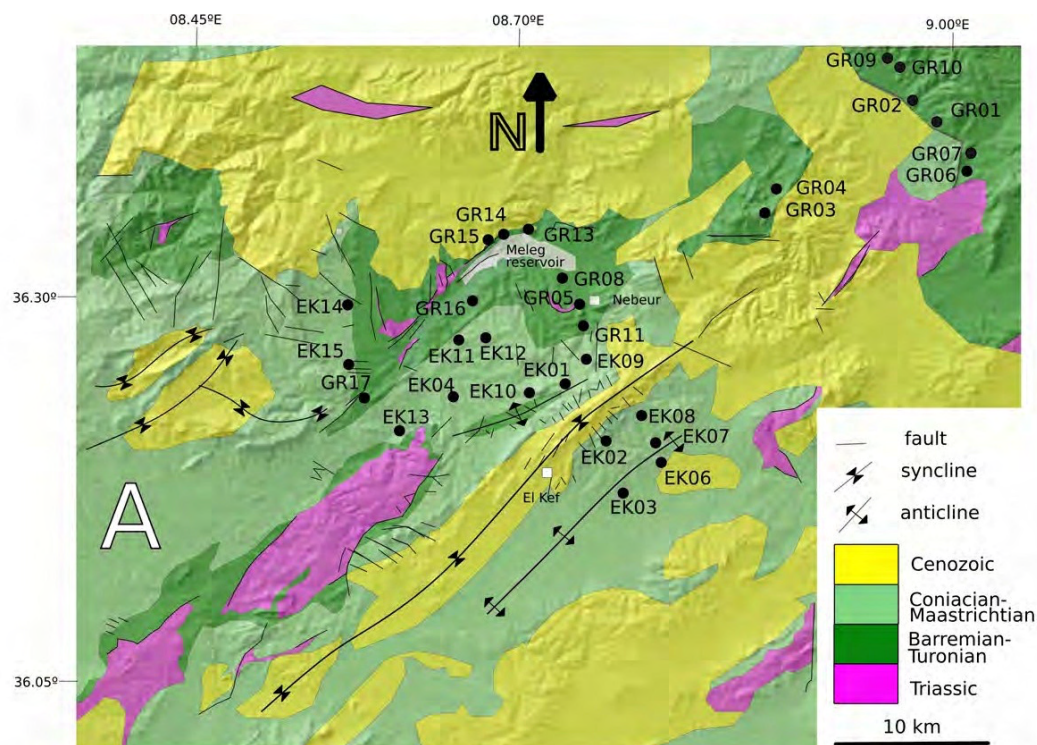


Figure 1. Geological map of the El Kef-Nebeur area and location of the AMS sampling sites.

Room-temperature Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) was measured on more than 250 oriented samples collected from nearly 30 sites distributed across the study area. The sampled lithologies are mainly marls and organic-rich shales, which provide a homogeneous dataset for comparing scalar and directional magnetic parameters. Thermomagnetic curves and magnetization-temperature measurements were also used to constrain the magnetic mineralogy and to evaluate the contribution of low-coercivity ferromagnetic phases.

The AMS results reveal three main types of magnetic fabrics. Type 1 fabrics, characterized by vertical minimum susceptibility axes after bedding correction, are interpreted as primary to early tectono-sedimentary fabrics related to Cretaceous extension. They are dominant in the dataset but differ between the two studied units. In the Fahdene Formation, several magnetic lineation maxima coexist, indicating a complex extensional pattern probably affected by inherited faults and active salt movement. In the El Kef Formation, the magnetic lineation is more organized, with a dominant NE-SW trend.

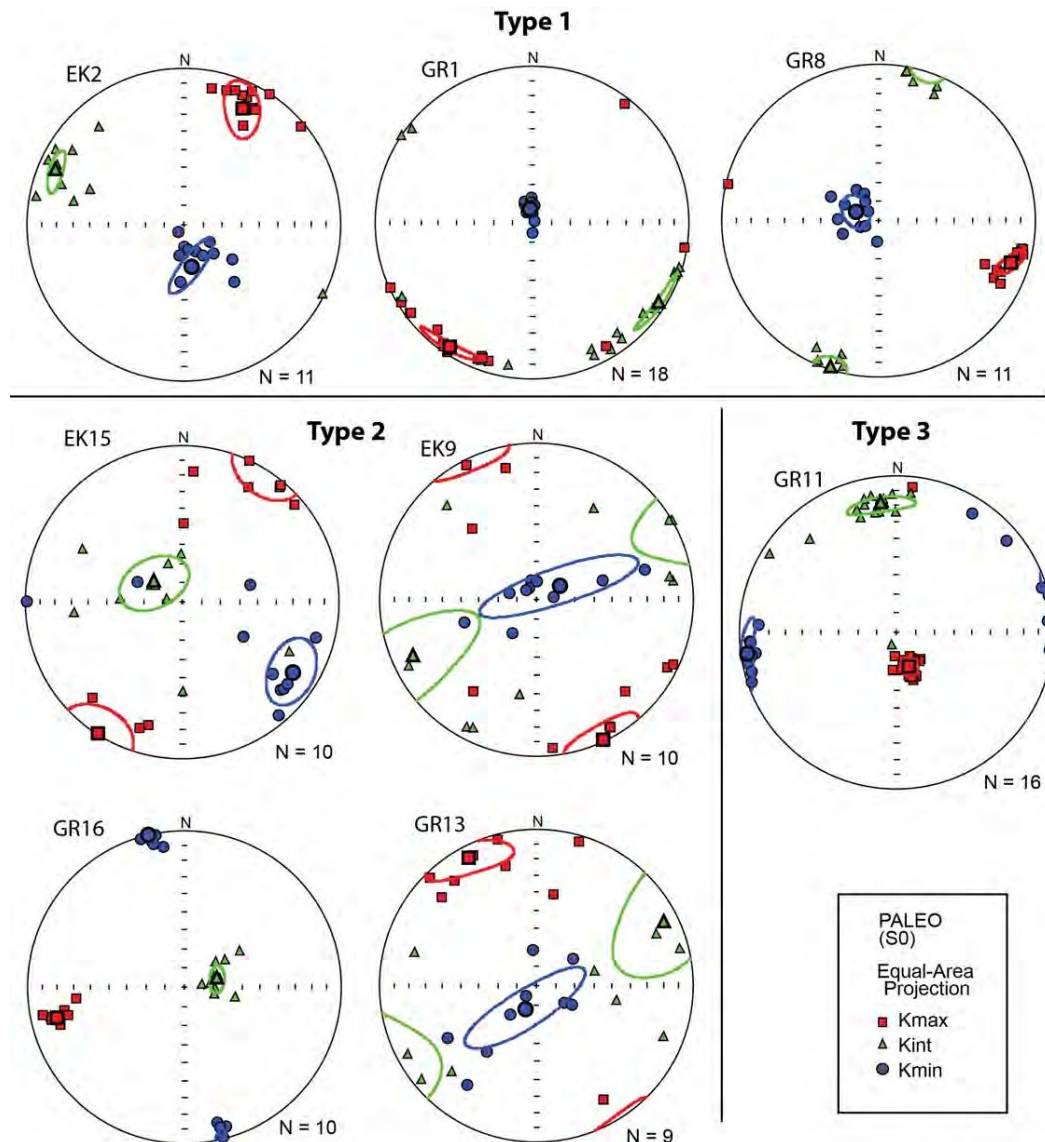


Figure 2. Representative AMS fabric types identified in the Fahdene and El Kef formations.

Type 2 fabrics show horizontal maximum and minimum axes and are interpreted as a tectonic overprint linked to NW-SE Atlasic compression. These fabrics are consistent with the orientation of regional folds and local cleavage. Type 3 fabrics, restricted to the Fahdene Formation, show a vertical magnetic lineation and are interpreted as possibly related to the upward movement of Triassic evaporites and salt-related deformation, following comparable AMS interpretations in salt-influenced settings (Santolaria *et al.*, 2015).

The comparison between magnetic fabrics, brittle mesostructures and regional structural trends indicates a polyphase tectonic evolution. The earliest record corresponds to a Cretaceous extensional stage, locally associated with diapirism. This was followed by a more organized extensional configuration during deposition of the El Kef Formation, and later by NW-SE Atlasic compression that locally reworked the previous fabrics. These results together with previous works (Román-Berdiel *et al.*, 2023) confirm that AMS is an efficient tool for detecting weak deformation and for reconstructing the evolution of fine-grained, salt-influenced sedimentary basins.

Keywords: magnetic fabrics; AMS; Cretaceous; El Kef; Tunisian Atlas; extension; salt tectonics; compression.

References

Rigane, A., Gourmelen, C. (2011). Inverted intracontinental basin and vertical tectonics: The Saharan Atlas in Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 61(2), 109-128.

Román-Berdiel, T., Oliva-Urcia, B., Casas-Sainz, A. M., Calvín, P., Moussaid, B., Soto, R., Marcén, M., El-Ouardi, H., Pocoví, A., Gil-Imaz, A. (2023). Geodynamic evolution during the Mesozoic and Cenozoic in the Central High Atlas of Morocco from anisotropy of magnetic susceptibility. In: Calvín, P., Casas-Sainz, A. M., Román-Berdiel, T., Villalaín, J. J. *Tectonic Evolution of the Moroccan High Atlas: A Paleomagnetic Perspective*, Springer International Publishing, 347-486.

Santolaria, P., Casas, A. M., Soto, R. (2015). Anisotropy of magnetic susceptibility as a proxy to assess internal deformation in diapirs: case study of the Naval salt wall (Southern Pyrenees). *Geophysical Journal International*, 202(2), 1207-1222.

Contribución de los grupos de paleomagnetismo de Zaragoza (IGME-CSIC, UZ) y Barcelona (Geo3BCN-CSIC, UB) al conocimiento de la Zona de Transferencia de Pamplona (Pirineos)

J.C. Larrasoña ^{1,2}, E.L. Pueyo ², E. Izquierdo-Llavall ², KINETRANS Team ³

¹ UPNA, 31006, Pamplona, Spain. jc.larra@igme.es

² CN IGME, CSIC, 50059, Zaragoza, Spain.

³ M. Montes, P. Sierra, M. Domínguez (CN IGME-CSIC); A. Luzón (Unizar); G. Bernaola, J.I. Baceta, A. Payros (UPV/EHU), P. Calvín (Usal); E. Beamud (Geo3BCN-CSIC, UB); J.A. Muñoz, P. Santolaria (UB); C. Bravo (CT Exploration); D. Muñiz (Geocali).

La Falla de Pamplona es una estructura de orientación transversa que se ha considerado clásicamente el límite entre los sectores central y occidental del orógeno pirenaico. Una de las paradojas más notables en relación a esta falla es que tiene una expresión cartográfica limitada, marcada por una alineación de diapiros y cambios en los espesores de sedimentos cretácicos y cenozoicos, a pesar de estar asociada a varias anomalías geofísicas de extensión cortical y a una sismicidad significativa. Fruto de estas aparentes paradojas, el papel que se le ha otorgado a la Falla de Pamplona en el desarrollo del Pirineo ha variado notablemente a medida que se han ido aplicando nuevas técnicas geológicas y geofísicas al estudio de la cadena. Así, esta estructura se ha considerado hasta los años 90 del pasado siglo como una estructura direccional, de escala cortical, que habría marcado el límite entre dos sectores de la cadena con direcciones opuestas de subducción. Ya en este siglo, la falla ha ido perdiendo entidad paulatinamente hasta el punto de que, hoy en día, se considera una estructura que actuó como falla extensional durante el rift del Cretácico inferior pero que se ha mantenido inactiva, comportándose como una estructura de acomodación, a lo largo de Cretácico superior y de la inversión cenozoica. Con el fin de aunar las diferentes evidencias geológicas y geofísicas sobre su evolución, las últimas interpretaciones proponen considerar la falla como una zona de transferencia difusa y transversa, que engloba y es mucho más ancha que la estructura discreta identificada inicialmente. Dicha zona de transferencia habría separado zonas del orógeno caracterizadas por distintas magnitudes y estilos de extensión durante el rift del Cretácico inferior, y habría condicionado la geometría, localización y extensión lateral de las unidades cabalgantes de basamento y de cobertera durante la compresión cenozoica.

En esta comunicación se hará un repaso histórico de las aportaciones que los grupos de paleomagnetismo de Zaragoza y Barcelona, tanto de las universidades homónimas como del CSIC (IGME y el Geo3BCN), han hecho al conocimiento de la Zona de Transferencia de Pamplona (ZTP) a lo largo de las últimas tres décadas. En este sentido, se hará especial referencia al proyecto KINETRANS (PID2024-157800NB-C21), que representa el nuevo esfuerzo colaborativo que estos grupos, junto con la aportación de otras instituciones y empresas, están haciendo por mejorar el conocimiento sobre la ZTP con el fin de proponerla como modelo de evolución tectónica y sedimentaria de zonas de transferencia de rift invertidas.

Aplicabilidad de técnicas de magnetismo de rocas al estudio de AMS: Ejemplo de la Cuenca de Calatayud (NE Península Ibérica)

R.Lázaro-González ¹, A. M. Casas Sainz ², T. Román-Berdiel ², B. Oliva Urcia ²,
A. Simón Muzás ³, W. Lachhab ⁴

¹ Dpto. Ciencias de la Tierra, Geotransfer-IUCA, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, Spain. raul.lazaro@unizar.es

² Dpto. Ciencias de la Tierra, Geotransfer-IUCA, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, Spain. acasas@unizar.es, mtdjrb@unizar.es, boliva@unizar.es

³ Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca, Spain. asimu@usal.es

⁴ LISFA, École Normale Supérieure Casablanca (ENS), Université Hassan II de Casablanca, Morocco. wissamlachhab2000@gmail.com

Resumen

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos mediante el análisis de magnetismo de rocas realizado en el relleno Cenozoico de la Cuenca de Calatayud, para determinar cuáles son los portadores de la anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM).

En concreto se han realizado: i) curvas de Susceptibilidad magnética – Temperatura y Magnetización inducida - Temperatura y ii) ciclos de histéresis.

La cuenca de Calatayud es una cuenca cenozoica de orientación NW-SE con una longitud de 80 km y anchura variable entre 5 y 20 km, situada en la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica. Esta cuenca se compone de materiales que datan del Oligoceno superior al Plioceno inferior (Alfambriense inferior). Se diferencian tres unidades estratigráficas:

- La unidad inferior (Oligoceno superior? – Aragoniense inferior) se compone de más de 500 metros de evaporitas, con predominio de depósitos de halita hacia la base y de sulfatos cálcicos como el yeso y la anhidrita hacia techo. Esta unidad aflora en la parte central de la cuenca.
- La unidad intermedia (Aragoniense medio – Vallesiense) tiene un espesor variable y muestra una evolución tanto horizontal como vertical pasando de materiales evaporíticos – carbonatados a predominar los carbonatados (dolomita, margas dolomíticas y calizas), con cierta proporción de materiales terrígenos (Sanz-Rubio et al., 2002).
- La unidad superior (Vallesiense superior – Alfambriense inferior) se localiza principalmente en la parte norte de la cuenca y en los márgenes. Se compone de facies terrígenas aluviales en la base y facies fluvio-lacustres carbonatadas a techo (Sanz-Rubio et al., 2002).

En cuanto a la metodología utilizada, las muestras de las diferentes unidades han sido molidas mediante un mortero de ágata. Para obtener las curvas de susceptibilidad magnética – temperatura se ha utilizado un horno CS-3 acoplado a un Kappabridge KLY-3S (Agico, República Checa), localizado en el Laboratorio de Fábricas Magnéticas de la Universidad de Zaragoza. Para el procesado de los datos se ha utilizado el software Cureval 8.0 (Chadima y Hroudá, 2012). Por otro lado, para la realización de las curvas de Magnetización inducida – Temperatura y ciclos de histéresis se ha utilizado un PPMS (Physical Properties Measurement System, Quantum Design) del Laboratorio de Medidas Físicas de la Universidad de Zaragoza. Para la creación de la secuencia y realización de estos experimentos de magnetismo de rocas se ha utilizado el software PPMS MultiVu.

Gracias al análisis de 18 curvas de susceptibilidad – temperatura, podemos determinar la presencia de minerales ferromagnéticos como magnetita o hematites, y de minerales paramagnéticos para las unidades inferior e intermedia. Además, se detecta la presencia de sulfuros en el caso de la unidad inferior. Esto no ocurre en las curvas pertenecientes a la unidad superior, donde nos encontramos con unas curvas parcialmente reversibles, con presencia de magnetita y sin prácticamente minerales paramagnéticos.

Abstract

This study presents the results obtained from the analysis of rock magnetism experiments carried out on rocks comprising the Cenozoic fill of the Calatayud Basin, with the aim of determining which of the components is carrying the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS).

Specifically, the following experiments were carried out: i) Magnetic susceptibility – temperature and Induced magnetisation – temperature curves, and ii) hysteresis loops.

The Calatayud Basin is a Cenozoic basin, 80 km long with a NW-SE orientation and variable width (5-20 km), located in the Aragonese Branch of the Iberian Chain. This basin consists of materials dating from the upper Oligocene to the lower Pliocene (lower Alfambrian). Three units have been distinguished:

- The lower unit (upper Oligocene? – lower Aragonian) consists of more than 500 metres of evaporites, where, from bottom to top of the sequence, the deposits change from predominantly halite to calcium sulphate salts such as gypsum and anhydrite. This unit crops out in the central part of the basin.
- The intermediate unit (middle Aragonian – Vallesian) has variable thickness and shows both horizontal and vertical changes, shifting from evaporitic–carbonate materials to a predominance of carbonates (dolomite, dolomitic marls and limestones) with a certain proportion of terrigenous materials (Sanz-Rubio et al., 2002).
- The upper unit (upper Vallesian – lower Alfambrian) is mainly located in the northern part of the basin and along its margins. It consists of alluvial terrigenous facies at the base and carbonate fluvio-lacustrine facies at the top (Sanz-Rubio et al., 2002).

Regarding the methodology used, samples (about 5 g) from the different units were reduced to powder using an agate mortar. To obtain the magnetic susceptibility–temperature curves, a CS-3 oven coupled with a KLY-3S Kappabridge (Agico Inc., Czech

Republic) was used, in the Magnetic Fabrics Laboratory at the University of Zaragoza. Cureval 8.0 software (Chadima and Hrouda, 2012) was used for data processing. Furthermore, a PPMS (Physical Properties Measurement System, Quantum Design) from the Physical Measurements Laboratory at the University of Zaragoza was used to generate the Induced Magnetisation–Temperature curves and hysteresis cycles. PPMS MultiVu software was used to create the sequence and carry out these rock magnetism experiments.

Thanks to the analysis of 18 magnetic susceptibility–temperature curves, we can determine the presence of ferromagnetic minerals such as magnetite or hematite, and of paramagnetic minerals in the lower and intermediate units. In addition, sulphides are present in the lower unit. This is not the case for the curves belonging to the upper unit, where we find partially reversible curves with the presence of magnetite and no paramagnetic materials.

Agradecimientos

Estos resultados forman parte del proyecto de I+D+i PID2023-148256NB-I00, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER,UE. Grupo Geotransfer (E32_23R: Geotransfer). Además, se agradece la labor y ayuda de los técnicos del SAI (Servicio General de Apoyo a la Investigación).

Referencias

Chadima, M. y Hrouda, F. (2012). Cureval 8.0: Thermomagnetic curve browser for Windows. Agico, Inc.

Sanz-Rubio, E., Pozo, M., Rodríguez-Aranda, J.P. y Calvo, J.P. (2002). Petrología y geoquímica isotópica de los depósitos de magnesita de la Cuenca de Calatayud (provincia de Zaragoza). Interpretación paleoambiental. *Rev. Soc. Geol. España*, 15: 113-127. hdl.handle.net/20.500.14352/59432

Anisotropy of magnetic susceptibility constraints on the emplacement of Variscan two-mica granites in Northeast Portugal

A. Mota, F. Noronha, H. Sant'Ovaia

Institute of Earth Sciences, Department of Geosciences, Environment and Spatial Planning, Faculty of Sciences, University of Porto, Portugal Rua do Campo Alegre s/n, 4169-007 Porto, Portugal. (*) up201100453@fc.up.pt

This study investigates whether the integration of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) fabrics with U-Pb zircon geochronology can help resolve temporal constraints on the tectonic regimes during Variscan two-mica granites emplacement, taking, for example, the NE of Portugal, as a case study.

While the Variscan tectonostratigraphy framework of the Central Iberian Zone (CIZ) is well established, the specific emplacement kinematics of its two-mica granites and how AMS records transitions between compressional and extensional phases during the orogeny remain poorly constrained. The study focuses on two-mica granites that outcrop in the SE of Trás-os-Montes, northern Portugal, between Mogadouro and Freixo-de-Espada-à-Cinta cities, near the border with Spain (Figure 1).

The area belongs to the north CIZ. During the Variscan orogeny, three compressional phases occurred: C1 (370-335 Ma), C2 (335-320 Ma), and C3 (315-305 Ma), and two extensional phases, E1 (330-315 Ma) and E2 (<305 Ma) (Martínez-Catalán et al., 2014; Hildenbrand et al., 2021). The area under study was affected by the C1 and C3 phases and by low-grade regional metamorphism M2 (335-310 Ma) (Ribeiro, 1974; Ferreira et al., 1987; Silva, 2013; Hildenbrand et al., 2021). The area is characterized by the occurrence of Lower to Middle Ordovician schists and quartzites, and by metasediments from the "Douro group" which belongs to the "Schist-Greywacke Complex", considered as Lower-Cambrian in age, on the northern flank of the Carviçais anticline (Figure 1) (Conde et al., 1971; Schermerhorn, 1981; Sousa, 1982; Pereira et al., 2014). The granites under study are peraluminous two-mica granites named: Fonte Santa granite, Bruçó granite (which belongs to the Bruçó - Aldeávila de la Ribera massif), Fornos and Carviçais granites (Conde et al., 1971; Pereira et al., 2014).

The magnetic susceptibility (K_m) is a property that helps in the classification of granite rocks as it provides information on the presence of minerals with magnetic properties (Ishihara, 1977). The induced magnetization and the magnetic field are directly related through K_m , which is translated from the mathematical formula: $K=M/H$, where M is the induced magnetization and H the magnetic field to which the sample is exposed. Considering that M and H are expressed in amperes per meter (A/m), K_m per volume is dimensionless (in the International System, SI) (Hrouda, 1982; Tarling & Hrouda, 1993). Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) is a fundamental tool for to study petrofabric and deciphering the internal structure resulting from emplacement dynamics of granitic plutons, providing insights into regional tectonic regimes (Sant'Ovaia et al., 2024). The AMS results allow us to infer the tectonic settings of the granite emplacement. Using the AMS ellipsoid axes ($K_1=K_{max}$; $K_2=K_{int}$; $K_3=K_{min}$) we define magnetic fabrics following the approach of (Burton-Johnson et al., 2019, 2022; Sant'Ovaia et al., 2024), assuming that K_1 is parallel to the minimum principal stress axis (σ_3), K_3 to the maximum stress axis

(σ_1) ($K_1//\sigma_3$, $K_2//\sigma_2$, and $K_3//\sigma_1$), with all axes mutually perpendicular. Assuming coaxiality between the magnetic fabric and the finite strain ellipsoid, a common approximation in weakly deformed granites (Burton-Johnson et al., 2019).

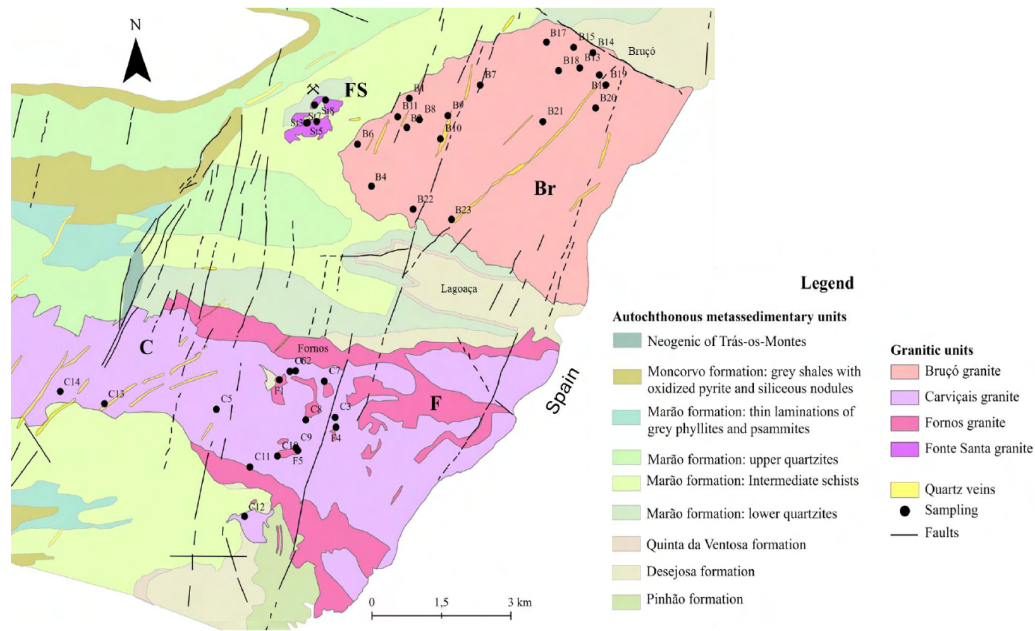


Figure 1. Geological map for the studied area, adapted from the geological map at scale 1/50.000 from sheet 11-D-Carviçais (Pereira et al., 2009). In this map, the four granites under study are identified: Fonte Santa (FS), Bruçó (Br), Fornos (F), and Carviçais (C). The black dots represent the sites of sampling carried out for the AMS studies, being represented the ones from Fonte Santa as St, from Fornos as F, from Carviçais as C, and from Bruçó as B.

To constrain the emplacement fabrics and tectonic settings of the granites from the studied area, a detailed AMS study was carried out. The AMS measurements were carried out using a KLY-4S Kappabridge susceptibility balance from Agico (Czech Republic), operating at low field (300 A/m). The data were subsequently processed using Anisoft 6.0 and Stereonet software. For this study, a total of 40 stations corresponding to a total of 278 oriented cores were analysed distributed by the 4 granites: for Fonte Santa granite 36 samples were collected on 5 stations; for Fornos granite 16 samples was conducted on 3 stations due to the lack of outcrops for this granite; for Carviçais granite the 68 samples were collected on 12 stations; and for Bruçó granite the 168 samples were carried out on 20 stations (Figure 1).

In this study (Table 1), bulk susceptibility (K_m) values are lower than 300×10^{-6} SI, confirming a paramagnetic behaviour dominated by Fe-bearing phyllosilicates, without significant ferromagnetic contribution, also confirmed with petrography studies. In the case of these granites, it reveals a magnetic mineralogy gradient controlled by the relative abundance of paramagnetic phyllosilicates (biotite and muscovite) with no significant ferromagnetic contribution (e.g., presence of magnetite). Values range from low 40×10^{-6} SI in the muscovite-rich Fonte Santa granite, intermediate values of 56×10^{-6} SI in Fornos, and 69×10^{-6} SI in Carviçais, to higher 112×10^{-6} SI in the biotite-rich Bruçó granite, correlating positively with biotite content.

Anisotropy degree (P%) is heterogeneous (Table 1), with Fonte Santa granite with values ranging between 2 and 7% (average 3.9%), Bruçó granite between 2 and 11% (average 4.3%), with the highest values occurring near quartz veins or faults, Carviçais granite

between 4 and 11% (average 6.2%) and Fornos between 5 and 14% (average 8%) being the granite with the highest anisotropy degree. The elevated P% in the Fornos granite reflects strong syn-magmatic deformation associated with a strike-slip shear zone. The shape parameter (T) shows oblate fabrics ($T > 0$) for Fonte Santa, Fornos, and Bruçó, and prolate fabrics ($T < 0$) for the Carviçais pluton, the only granite with a negative average regarding the parameter T.

Table 1. AMS average results for each granite. Where E12, E23, E31 represent the confidence angles (in degrees) of the principal axes, and n = number of samples.

Granite	Km 10 ⁻⁶ SI	P%	T	K1 _d	K1 _i	Lineation	K3 _d	K3 _i	Foliation
Fonte Santa (n=36)	40.21	3.9	0.085	284	5	5° → N284°	175	76	N85°; 14°NW
Fornos (n=16)	55.71	8.0	0.186	291	19	19° → N291°	32	29	N122°; 61° SW
Carviçais (n=68)	68.53	6.2	-0.086	289	11	11° → N289°	102	79	N12°; 11°NW
Bruçó (n=168)	116.6	4.3	0.245	294	52	52° → N294°	193	8	N103°; 82°NE

By integrating the U–Pb zircon geochronological data (Mota et al., 2026) with the AMS results and following the methodological framework proposed by Burton-Johnson et al. (2022 and therein) and Sant’Ovaia et al. (2024), two distinct magmatic pulses can be identified. The first, at ca. 340 Ma, coincides with the transition from the C1 to the C2 tectonic phase, whereas the second, at ca. 320 Ma, corresponds to the transition from the E1 extensional phase to the C3 compressional phase. The Fonte Santa granite, dated at 340.4 ± 1.8 Ma, presents a mean magnetic foliation of N85°; 14°NW indicating a subvertical K3 axis (σ_1 subvertical), and a mean magnetic lineation of 5° → N284°, corresponding to sub-horizontal K1 (σ_3 sub-horizontal). The Fornos granite, dated at age of 338.1 ± 2.7 Ma, displays a mean magnetic foliation of N122°; 61° SW, indicating sub-horizontal K3 (σ_1 sub-horizontal), and a mean magnetic lineation 19° → N291°, showing sub-horizontal K1 (σ_3 sub-horizontal). The AMS fabrics of both granites are consistent with regional extensional tectonic conditions and/or a strike-slip system, respectively, likely associated with the transition from C1 to C2 tectonic phase. The Carviçais granite yielded an age of 320.4 ± 4.2 Ma, presents a mean magnetic foliation of N12°; 11°NW, indicating K3 subvertical (σ_1 subvertical), and a mean magnetic lineation of 11° → N289° indicating sub-horizontal K1 (σ_3 sub-horizontal). The Bruçó granite, dated at 318.6 ± 2.3 Ma, displays a mean magnetic foliation of N103°; 82°NE, indicating subvertical K3 (σ_1 sub-horizontal), and a mean magnetic lineation of 52° → N294° indicating subvertical K1 (σ_3 subvertical). Collectively, the AMS fabrics of the Carviçais and Bruçó granites record a transition from extensional to compressional tectonic conditions, most likely associated with the shift from the E1 extensional phase to the C3 compressional phase.

Comparison of these results with the established tectonic framework of the Variscan Orogeny indicates that the first magmatic pulse (ca. 340 Ma), corresponding to the transition from the C1 to the C2 deformation phases, includes the Fonte Santa granite, whose AMS fabric records emplacement under regional extensional tectonic conditions, and the Fornos granite, whose fabric is consistent with emplacement within a strike-slip tectonic regime. The second magmatic pulse (ca. 320 Ma), associated with the transition from the E1 extensional phase to the C3 compressional phase, comprises the Carviçais granite, emplaced under regional extensional conditions, and the Bruçó granite, whose AMS fabric reflects emplacement during NNE–SSW-directed compression related to the C3 deformation phase.

These results demonstrate that AMS fabrics, when integrated with precise U–Pb zircon geochronology, can successfully distinguish successive tectonic regimes during granite

emplacement, even in low-susceptibility paramagnetic granites. The study highlights the ability of AMS to resolve temporal transitions between extensional, strike-slip, and compressional deformation within a single orogenic cycle, providing a robust framework for high-resolution emplacement studies in ancient orogenic belts.

Acknowledgements: The authors acknowledge financial support for the Institute of Earth Sciences (ICT) through the Foundation for Science and Technology (FCT), under project UID/04683/2025. A. Mota acknowledges support from FCT, I.P., through the doctoral fellowship SFRH/BD/13757/2022.

References

- Burton-Johnson, A., Riley, T. R., Harrison, R. J., Mac Niocaill, C., et al. (2022).** Does tectonic deformation control episodic continental arc magmatism? Evidence from granitic magnetic fabrics (AMS). *Gondwana Research*, 112, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.09.006>
- Conde, L. N., Pereira, V., Ribeiro, A., & Thadeu, D. (1971).** *Livro - Guia de Excursão n.º 7: Jazigos Hipogénicos de Estanho e Volfrâmio*. El Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica.
- Ferreira, N., Iglesias, M., Noronha, F., Pereira, et al. (1987).** Granitoides da Zona Centro-Ibérica e o seu enquadramento geodinâmico. In F. B. Barredo, A. C. Gómez-Rodulfo, J. C. G. Corral, et al. (Eds.), *libro Homenaje a L. C. Garcia de Figuerola. Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hesperico*. (Rueda, pp. 37–52).
- Hildenbrand, A., Marques, F. O., Quidelleur, X., & Noronha, F. (2021).** Exhumation history of the Variscan orogen in western Iberia as inferred from new K-Ar and 40Ar/39Ar data on granites from Portugal. *Tectonophysics*, 812, 228863. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228863>
- Hrouda, F. (1982).** Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophysical Surveys*, 5(1), 37–82. <https://doi.org/10.1007/BF01450244>
- Ishihara, S. (1977). The Magnetite-series and Ilmenite-series Granitic Rocks. *Mining Geology*, 27(145), 293–305. <https://doi.org/10.11456/shigenchishitsu1951.27.293>
- Martínez Catalán, J. R., Rubio Pascual, F. J., Montes, A. D., Fernández, et al. (2014).** The late Variscan HT/LP metamorphic event in NW and Central Iberia: relationships to crustal thickening, extension, orocline development and crustal evolution. *Geological Society, London, Special Publications*, 405(1), 225–247. <https://doi.org/10.1144/SP405.1>
- Mota, A., Ferreira, J. A., Noronha, F., & Sant’Ovaia, H. (2026).** Diachronous Emplacement (~340 vs. ~320 Ma) of Variscan Two-Mica Granites in the Trás-os-Montes Region: Insights from U–Pb Zircon Geochronology and Whole-Rock Geochemistry. *Geosciences*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/geosciences16040147>
- Pereira, E., Ferreira da Silva, A., Rebelo, J., Ribeiro, A., & Dias, R. (2009).** *Carta Geológica de Portugal à Escala 1:50.000, Folha 11-D (Carviçais)*.
- Pereira, E., Rodrigues, J., Ribeiro, A., Dias, R., et al. (2014).** *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal à Escala 1:50.000, Folha 11-D (Carviçais)*. Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- Ribeiro, A. (1974).** Contribution à l’étude tectonique de Tras-os-Montes Oriental.
- Sant’Ovaia, H., Cruz, C., Gonçalves, A., Nogueira, P., & Noronha, F. (2024).** Deciphering Iberian Variscan Orogen Magmatism Using the Anisotropy of Magnetic Susceptibility from Granites. *Minerals*, 14(3), 309. <https://doi.org/10.3390/min14030309>
- Schermmerhorn, L. J. G. (1981).** Framework and evolution of Hercynian mineralization in the Iberian Meseta. *Leidse Geologische Mededelingen*, 52(1), 23–56.
- Silva, Í. (2013).** Geología de las Zonas Centro Ibérica y Galicia – Trás-os-Montes en la parte oriental del Complejo de Morais, Portugal/España, Portugal/Spain [Universidad de Salamanca]. <https://doi.org/10.14201/gredos.121357>.
- Sousa, M. B. (1982).** *Litoestratigrafia e estrutura do “Complexo Xisto-Grauváquico ante-Ordovícico”: Grupo do Douro (Nordeste de Portugal)*. [PhD]. Universidade de Coimbra.
- Tarling, D., & Hrouda, F. (1993).** *The magnetic anisotropy of rocks* (D. Tarling & F. Hrouda, Eds.). Springer Dordrecht.

25 años reconstruyendo el pasado del campo geomagnético en Europa: inicios y estado actual.

F.J. Pavón-Carrasco^{1,2}, **Saioa A. Campuzano**^{1,2}, **L.R. Gaya-Piqué**³, **Miriam Gómez-Paccard**², **Ph. Lanos**^{4,5}, **A. Molina-Cardín**⁶, **J.I. Núñez**⁷, **M. Luisa Osete**^{1,2}, **M. Rivero-Montero**⁸, **J. Miquel Torta**⁹

¹ Grupo de Paleomagnetismo. Dpto. Física de la Tierra y Astrofísica, Universidad Complutense de Madrid (España), fjpavon@ucm.es.

² Dpto. Dinámica Terrestre y Observación de la Tierra. Instituto de Geociencias (IGEO, CSIC – UCM). Madrid (España).

³ Equipment and Implementation Section, CTBTO Preparatory Commission, Vienna (Austria).

⁴ Archéosciences Bordeaux. CNRS & Université Bordeaux-Montaigne. Bordeaux (Francia).

⁵ Géosciences-Rennes, Université Rennes 1. Rennes (Francia).

⁶ Dpto. Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Física Aplicada. Universidad Politécnica de Madrid (España).

⁷ Investigador independiente, Madrid.

⁸ Dpto. de Didácticas de las Matemáticas y de las Ciencias Experimentales, Universidad de Salamanca (España).

⁹ Observatori de l'Ebre, (OE), University Ramon Llull - CSIC, Roquetes (España).

El campo magnético de la Tierra, o campo geomagnético, es generado principalmente por movimientos del fluido que compone el núcleo externo terrestre. Este campo magnético atraviesa el manto y corteza terrestre y envuelve a nuestro planeta, protegiéndonos del viento solar. Por esta razón, el campo geomagnético desempeña un papel fundamental para el desarrollo de la vida. Una red mundial de observatorios y, durante las últimas décadas, también satélites, ha proporcionado una imagen precisa del mismo, permitiendo conocer sus variaciones espaciales y temporales de los últimos siglos. Por otro lado, gracias a la capacidad de ciertas rocas para registrar y preservar el campo geomagnético, es posible reconstruir su evolución pasada a escalas de tiempo geológicas a través de los denominados datos paleomagnéticos. Para los últimos miles de años, esta información indirecta del campo geomagnético procede de material arqueológico calentado (arqueomagnetismo) y coladas de lava, que, por tener material ferromagnético, retienen de modo “instantáneo” el campo magnético del pasado durante su último enfriamiento, permitiendo su reconstrucción a escala tanto regional como global (para más detalles, ver Tauxe *et al.*, 2018).

Europa es el continente que presenta la mayor densidad de datos arqueomagnéticos para los últimos cuatro milenios (Brown *et al.*, 2021). Aprovechando esta ventaja, la modelización regional, que hace uso exclusivo de estos datos, parece ser la técnica más indicada si queremos conocer con precisión el pasado del campo geomagnético en la región europea. En este estudio mostramos la cronología de dicho desafío, iniciado en el año 2000 y culminado 25 años después con un modelo de alta resolución que permite conocer el pasado del campo geomagnético en Europa para los últimos cuatro milenios.

El primer análisis regional del campo geomagnético basado en datos arqueomagnéticos fue llevado a cabo por Torta *et al.* (2000). Los autores emplearon la técnica de Análisis Armónico de Casquete Esférico (SCHA, Haines, 1985) para la modelización regional del

campo en Europa en el intervalo temporal entre el 0 y el 500 de nuestra era (n. e.). Para ello, utilizaron exclusivamente datos direccionales, es decir, la declinación y la inclinación geomagnéticas procedentes de estudios arqueomagnéticos publicados hasta el año 2000. El modelo SCHA resultante supuso una mejora en Europa respecto al modelo global existente en aquella época (Hongre *et al.*, 1998), pero aún estaba lejos de ofrecer una representación precisa del campo geomagnético en la superficie terrestre. En la Figura 1 se muestra los mapas de la dirección geomagnética para el año 500 n. e. dados por dicho modelo inicial (Torta *et al.*, 2000). Para mejorar la calidad de los resultados, se identificó la necesidad de abordar varias tareas clave: a) realizar una revisión exhaustiva de los datos arqueomagnéticos disponibles para los últimos milenios, y b) adaptar adecuadamente el método SCHA para modelar el campo a partir de sus elementos no cartesianos (declinación, inclinación e intensidad).

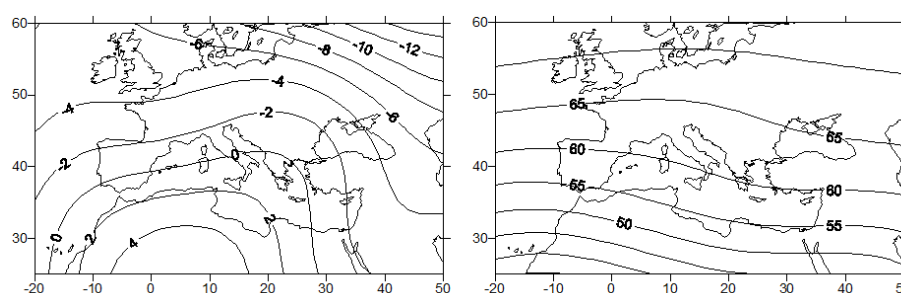


Figura 1. Campo geomagnético en Europa para el año 500 n. e. (izquierda, mapa de la declinación -en grados-; derecha, mapa de la inclinación -en grados-), de acuerdo con el modelo regional desarrollado por Torta *et al.* (2000).

Tras unos años en suspenso, las tareas clave descritas previamente se retomaron en el periodo 2005–2008. En cuanto al uso de datos arqueomagnéticos, se optó por usar las curvas de variación paleosecular (CVP) disponibles en ese momento. Las CVP proporcionan información continua en el tiempo de las componentes geomagnéticas y se construyen mediante ajustes temporales de los datos arqueomagnéticos en una región pequeña (por ejemplo, una región circular de no más de 1000 km de radio). Paralelamente, se adaptó la técnica SCHA para trabajar únicamente con datos direccionales, obviando, de momento, la intensidad geomagnética. El resultado fue la generación de un modelo regional geomagnético de las componentes direccionales en toda Europa para los últimos 2000 años (el modelo SCHA.DIF.00, Pavón-Carrasco *et al.*, 2008a). Posteriormente, una vez compilada toda la base de datos de intensidad arqueomagnética para la región europea, se actualizó el modelo incluyendo la intensidad *in situ* (en este caso no se usaron CVP de la intensidad), lo que dio lugar al primer modelo del vector completo para Europa para los últimos 2000 años, el modelo SCHA.DIF.00-F (Pavón-Carrasco *et al.*, 2008b). Este modelo permitió analizar las características del campo geomagnético en superficie durante los últimos dos milenios de nuestra era. No obstante, la variable temporal no se incluyó de modo explícito, sino que el modelo se estimó mediante ventanas móviles, tanto para las CVP direccionales como para la intensidad, por lo que el resultado consistió realmente en una serie de mapas temporales independientes. En la Figura 2 se muestra los mapas direccionales y de intensidad del modelo obtenido para el año 500 n. e.

A pesar de los avances, el uso de CVP para la generación de modelos regionales conllevaba una clara desventaja metodológica. Estas curvas se generan trasladando los datos arqueomagnéticos desde su localización a un único punto de referencia central mediante consideraciones de un campo dipolar, lo que introduce el denominado "error de relocalización". Por tanto, el siguiente objetivo científico, desarrollado en 2008,

consistió en prescindir de las CVP como datos de entrada (inputs) y modelar directamente todos los datos arqueomagnéticos *in situ*.

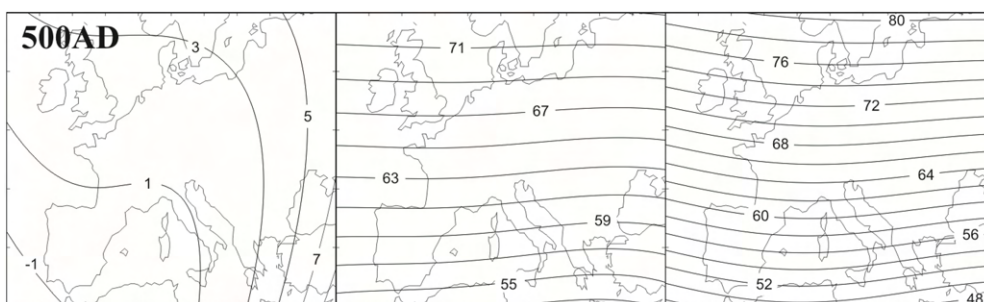


Figura 2. Campo geomagnético en Europa en el año 500 n. e. (izquierda: declinación -en grados-; centro: inclinación -en grados-; derecha: intensidad -en μT -), según el modelo SCHA.DIF.00-F (Pavón-Carrasco *et al.*, 2008a, b).

En este contexto, y tras una revisión exhaustiva de la base de datos arqueomagnética europea para los últimos 3000 años, se desarrolló una nueva paleorreconstrucción regional. Este nuevo enfoque aportó notables ventajas respecto al anterior: a) los datos direccionales y de intensidad se modelaron *in situ* (sin el uso de CVP); b) todos los datos se modelaron de forma conjunta adaptando nuevamente la técnica SCHA a dichos datos direccionales y de intensidad; c) aunque el método seguía basándose en ventanas móviles solapadas, se añadió en el proceso de inversión un método de regularización temporal para que la variación entre ventanas fuera suave; d) se expandió el marco cronológico en 1000 años, cubriendo los últimos 3000 años; y e) se añadieron los datos instrumentales disponibles en Europa, logrando que el modelo convergiera en los últimos siglos con los modelos instrumentales desarrollados con datos a partir del año 1900 n. e. El resultado de este esfuerzo fue el modelo SCHA.DIF.3k (Pavón-Carrasco *et al.*, 2009), cuyos mapas para el año 500 n. e. se muestran en la Figura 3.

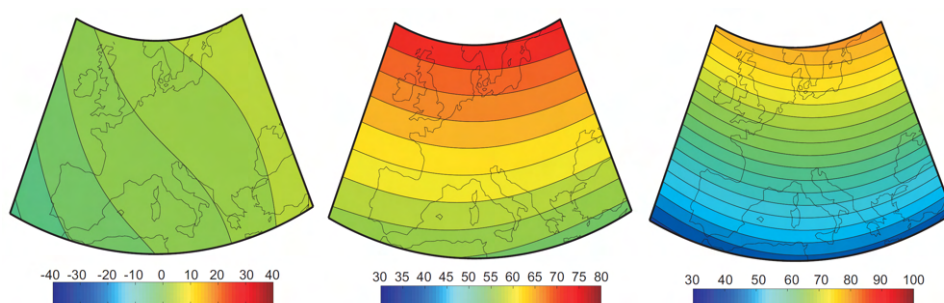


Figura 3. Campo geomagnético en Europa en el año 500 n. e. (izquierda: declinación -en grados-; centro: inclinación -en grados-; derecha: intensidad -en μT -), según el modelo SCHA.DIF.3k (Pavón-Carrasco *et al.*, 2009).

Finalmente, tras doce años de vigencia, el modelo regional europeo fue revisado por completo. El motivo principal fue el extraordinario crecimiento de la base de datos arqueomagnética en Europa durante ese periodo 2009 – 2021, que aumentó un 90% en nuevos datos direccionales y un 180% en datos de arqueointensidad. Además, el método SCHA se había actualizado a una versión más robusta para su aplicación a datos distribuidos a una misma altitud sobre la superficie terrestre, el método R-SCHA2D (Thébault, 2008), un escenario idóneo para los registros arqueomagnéticos.

Bajo estas circunstancias se desarrolló el último modelo regional europeo, el cual introdujo mejoras críticas respecto al anterior: a) se preseleccionaron y revisaron todos los datos arqueomagnéticos europeos, incluyendo únicamente registros de calidad en el desarrollo del modelo; b) la ventana temporal se amplió hasta los últimos 4000 años;

c) se incorporó el tiempo de forma continua como un parámetro de modelado gracias a la inclusión de funciones b-splines temporales; y d) se utilizó la nueva técnica de modelado R-SCHA2D, adaptada para integrar de forma conjunta los datos direccionales y de intensidad. El modelo resultante, denominado SCHA.DIF.4k, constituye actualmente el modelo de referencia para el estudio del campo geomagnético en Europa durante los últimos 4000 años (Pavón-Carrasco *et al.*, 2021).

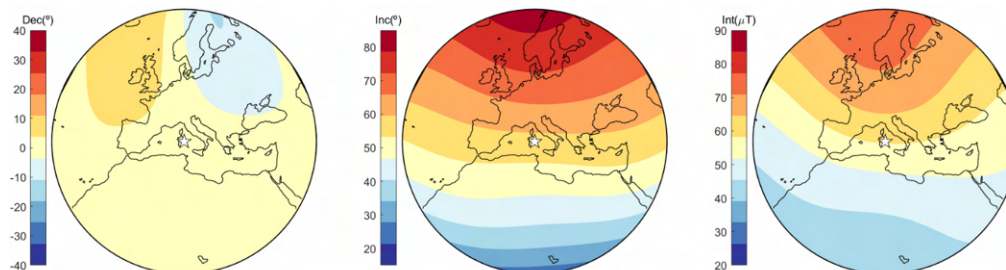


Figura 4. Campo geomagnético en Europa en el año 500 n. e. (izquierda: declinación -en grados-; centro: inclinación -en grados-; derecha: intensidad -en μT -), según el modelo SCHA.DIF.4k (Pavón-Carrasco *et al.*, 2021).

En este trabajo, se presentará de forma cronológica la evolución de la modelización del pasado (últimos milenios) del campo geomagnético en Europa a lo largo de los últimos 25 años, detallando los objetivos y los hitos científicos alcanzados en cada etapa, tal y como se ha resumido previamente. Asimismo, se discutirá el potencial de la modelización regional del campo geomagnético como una herramienta para la datación arqueomagnética (Serrano *et al.*, 2024).

Referencias

- Brown, M. C., Hervé, G., Korte, M., & Genevey, A. (2021).** Global archaeomagnetic data: The state of the art and future challenges. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 318, 106766.
- Haines, G.V. (1985).** Spherical Cap Harmonic Analysis. *J. Geophys. Res.*, 90, 2583-2591.
- Hongre, L., G. Hulot and A. Khokhlov (1998).** An analysis of the geomagnetic field over the past 2000 years. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 106, 311-335.
- Pavón-Carrasco, F.J., M.L. Osete, J.M. Torta, L.R. Gaya-Piqué, and Ph. Lanos, (2008a),** Initial SCHA.DI.00 regional Archaeomagnetic model for Europe for the last 2000 years. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33(6-7), 596 - 608.
- Pavón-Carrasco, F.J., M.L. Osete, J.M. Torta and L.R. Gaya-Piqué (2008b),** A regional archaeomagnetic model for the palaeointensity in Europe for the last 2000 years and its implications for Climatic Change. *Pure and Applied Geophysics*, 165(6), 1209-1225.
- Pavón-Carrasco, F.J., M.L. Osete, J.M. Torta and L.R. Gaya-Piqué (2009),** A regional archaeomagnetic model for Europe for the last 3000 years, SCHA.DIF.3K: applications to archaeomagnetic dating. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10, Q03013, doi: 10.1029/2008GC002244.
- Pavón-Carrasco, F.J., S.A. Campuzano, M. Rivero-Montero, A. Molina-Cardín, et al. (2021),** SCHA. DIF. 4k: 4000 years of paleomagnetic reconstruction for Europe and its application for dating. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, e2020JB021237.
- Serrano, M., Pavón-Carrasco, F. J., Campuzano, S. A., & Osete, M. L. (2024).** ArchaeoPyDating: A new user-friendly release for archaeomagnetic dating. *Archaeometry*, 66(6), 1424-1437.
- Tauxe, L., Banerjee, S. K., Butler, R. F., & van der Voo, R. (2018).** Essentials of paleomagnetism: Fifth web edition. La Jolla, USA: Scripps Institution of Oceanography.
- Thébault, E. (2008).** A proposal for regional modelling at the Earth's surface, R-SCHA2D. *Geophysical Journal International*, 174(1), 118-134.
- Torta, J.M., L.R. Gaya-Piqué, J.I. Núñez, M.L. Osete, (2000).** An approach to the regional modelling of the geomagnetic field for Europe from directional archaeomagnetic data. *Proceeding 2ª Asamblea Luso Espanhola de Geodesia e Geofísica*, Lago.

Reseña histórica del Paleomagnetismo en la Universidad de Zaragoza y en la Unidad del IGME (CSIC) en Zaragoza

E.L. Pueyo ¹, T. Román-Berdiel ², A. Gil-Imaz ², H. Millán ², G. Benito ³, J. Cruz Larrasoña ¹, J. Pérez-Rivarés ², R. Soto ¹, B. Oliva-Urcia ², H.J. Mauritsch ⁴, R. Scholger ⁴, C.J. Lewis ^{5†}, A.J. Sussman ⁶, Ó. Pueyo-Anchuela ², B. Antolín ⁷, A. Rodríguez-Pintó ⁷, T. Mochales ¹, C. Oliván ⁷, M^a.J. Ramón ⁷, M^a.Á. López ⁷, E. Izquierdo-Llavall ¹, C. García-Lasanta ⁸, G. San Miguel ⁷, D.J. Anastasio ⁹, P. Santolaria ¹⁰, M. Valcárcel ⁷, L. Ezquerro ¹¹, S. Torres ¹², B. Moussaid ¹³, A. Palma-Ramírez ¹⁴, V. Borrueal-Abadía ¹¹, E.M^a. Sánchez-Moreno ¹⁵, M. Calle ¹¹, O. Suarez ¹⁶, H. Gil-Garbi ², R. Silva-Casal ⁷, P. Mata ^{1†}, M. Porquet ⁷, P. Calvin¹⁸, M. Bartolomé ³, E. Vernet ¹⁶, M. Marcén ², M. Pérez-Pueyo ¹⁷, M. Merchán ², U. Majarena ², F. Gracia-Puzo ², A. Simón-Muzas ¹⁸, P. Sierra-Campos ¹, L. Otaño Jiménez ⁷, M. Hassen Jebabli ², X. Li ¹⁹, R. Lázaro ², W. Lachhab ¹³, A. Barnolas ⁷, J.J. Villalaín ¹⁵, A. Casas-Sainz ², J.M^a. Parés ²⁰, A. Pocoví ²

¹ Instituto Geológico y Minero de España (IGME/CSIC), Unidad de Zaragoza, CSIC, 50059 Zaragoza.

unaim@igme.es

² Dpto. Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza

³ Dpto. Geología. MNCN (CSIC), Madrid

⁴ Geophysics. Montanuniversität Leoben. Austria

⁵ Los Alamos National Laboratory, Santa Fe, New Mexico, USA

⁶ Sandia National Laboratory, Albuquerque, New Mexico, USA

⁷ Profesionales con afiliación diversa

⁸ Western Washington University, Bellingham, WA, USA

⁹ Earth and Environmental Sciences, Lehigh University, PA, USA

¹⁰ Institut de Recerca Geomodels, Universitat de Barcelona

¹¹ Universidad Complutense de Madrid

¹² Dpt. Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma de Madrid

¹³ Université Hassan II de Casablanca, Marruecos

¹⁴ Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mexico

¹⁵ Lab. Paleomagnetismo. Dpto de Física, Universidad de Burgos

¹⁶ Dpto. de Geología, Universidad del País Vasco (EHU), Leioa

¹⁷ Dpto. de Geología, Universidad de Salamanca

¹⁸ School of Earth Space Sciences, Peking University. China

¹⁹ Geochronology & Geology, CENIEH, Burgos

Las primeras colaboraciones de personal del Departamento de Ciencias de la Tierra de la UNIZAR en proyectos de paleomagnetismo se remontan a los trabajos de construcción de la escala de polaridad geomagnética (GPTS) del Jurásico iniciados por Maureen B. Steiner (1944–2023) de la Universidad de Wyoming en los años 80 junto a Guillermo Meléndez del Área de Paleontología (Steiner *et al.*, 1985) en la Cordillera Ibérica con continuidad en los años noventa en la tesis doctoral de M^a Teresa Juárez (UCM y Universidad de Utrecht; Juárez *et al.*, 1994). También durante la década de 1990 se realizaron algunas de las primeras secciones magnetoestratigráficas que pudieron ser medidas en el ICTJA del CSIC. En particular, los del estratotipo y paraestrotipo del piso Ilerdiense en las series pirenaicas de Tresp y Campo contaron con la colaboración de Eustoquio Molina e Iñaki Canudo junto a Oriol Pascual y Josep M^a Parés del ICTJA (Molina *et al.*, 1992) fueron medidas en el primer magnetómetro criogénico de tres SQUIDS del país (GM-400 de Cryogenic Consultants Ltd). Mediados los años 90, Gerardo Benito en colaboración con Josep M^a Parés caracterizaron la polaridad magnética de terrazas cuaternarias del río Gállego en el entorno de Zaragoza (Benito *et al.*, 1998), línea que tendría continuidad con los trabajos de Claudia J. Lewis LANL y Carlos Sancho en el río Cinca en 2003, los de

Mikel Calle, algo más tarde en el río Alcanadre (2012) o la tesis doctoral de Héctor Gil Garbí (2017).

Sin embargo, los orígenes del actual grupo de paleomagnetismo del Área de Geodinámica Interna se sitúan en 1991, Andrés Pocoví y Josep M^a Parés iniciaron los estudios “magnetotectónicos” para cuantificar la rotación del cabalgamiento basal Surpirenaico en las Sierras Exteriores (tesis doctorales de Héctor Millán, 1996, y Emilio Pueyo, 2000). En 1992 también se inician los trabajos de caracterización de ASM en la Cuenca de Cameros, tesis de Andrés Gil Imaz (1999). En ese mismo periodo, Teresa Román Berdiel desarrollaba su tesis doctoral en la Universidad de Rennes sobre modelos de emplazamiento de cuerpos graníticos con ejemplos del hercínico bretón y galaico (Román-Berdiel *et al.*, 1995). De hecho, fue la campaña de muestreo del granito de Veiga (Orense) el verano de 1993 la que puso a punto el equipo de perforación de 12 kg (con el apoyo de los SAI de la UNIZAR de Preparación de Rocas y el de Mecánica de Precisión, y en particular de Manuel Tricas y Rafael Lana, que se utilizaría durante más de 10 años.

Los trabajos magnetotectónicos se extendieron al Oeste al entorno de la falla de Pamplona (tesis doctoral de Juan Cruz Larrasoaña, 2000). En este primer periodo, el laboratorio de referencia para el grupo de la UNIZAR es el de Barcelona (ICTJA/CSIC) si bien se inician colaboraciones muy sólidas y duraderas con la Montanuniversität de Leoben MUL (Austria) de la mano de Hermann Mauritsch y Robert Scholger (desde 1995 hasta la actualidad) y otras más efímeras (Ludwig-Maximilian, New Mexico, Alaska, Minnesota) destacando el contacto de la universidad de Michigan en Ann Arbor. Más avanzados los 90 inicia la tesis Francisco Javier Pérez Rivarés (1998-2016) sobre magnetoestratigrafía de la Cuenca del Ebro. En paralelo la tesis de Ruth Soto (1999-2003) geología estructural, ASM y modelización analógica de estructuras oblicuas en la Cuenca de Aínsa y la tesis de Belén Oliva Urcia, paleomagnetismo de las Sierras Interiores (2004) fueron la expansión natural de las tesis de la cuenca de Jaca-Pamplona.

El año 2003 está marcado por dos hitos relevantes en la historia del grupo: por un lado, el Área de Geodinámica Interna; el inicio del Laboratorio de Fábricas Magnéticas de la UNIZAR; por otro lado, la colaboración con el SAI de Medidas Físicas de la UNIZAR (magnetómetro criogénico MPMS de Quantum). Inicialmente se utilizó para la caracterización de portadores magnéticos (histéresis y algunos análisis de baja temperatura, etc...) en muestras de granitos variscos; Veiga, Bielsa, Millares, etc., pero su uso se extendió a muchos otros proyectos.

El nuevo laboratorio da pie al desarrollo de nuevas tesis; Óscar Pueyo (2004-2012), ASM y *rockmag* en el Pirineo Centro-occidental, rocas volcánicas de las cuencas Stephano-Pérmicas pirenaicas (tesis de Esther Izquierdo [2010-2014] y Ana Simón [2020-2025]), ii) diapiros salinos en Pirineos, la cuenca Lusitánica y Atlas (tesis de Pablo Santolaria [2011-2015] y Pablo Calvín [2014-2018]), cuencas extensionales mesozoicas invertidas de la placa Ibérica (tesis de Cristina García Lasanta 2010-2016) y del Alto Atlas marroquí (tesis de Bennacer Moussaid [2010-2019] y tesis de Sara Torres [2010-2020]), grandes zonas de fallas (tesis de Marcos Marcén [2017-2020]), magmatismo cisuraliense de la Cordillera Ibérica (TFM y tesis de Urbez Majarena [2016 y 2020-2023] y cabalgamientos de la cuenca de Jaca (tesis de Francho Gracia Puzo [2020-2024]).

La colaboración con el laboratorio de Barcelona, con un nuevo magnetómetro 2G a finales de 2001 (755-1.65) y la incorporación de Elisabeth Beamud se consolida, así como la colaboración con el nuevo laboratorio de la UBU en mayo de 2004.

A partir de 2005 arranca la actividad investigadora en paleomagnetismo en la Unidad de Zaragoza del IGME con la incorporación varias personas. Este contexto permitió iniciar numerosas actividades de investigación propias centrados, sobre todo, en el área Pirenaica

y Cuenca del Ebro. La estrecha colaboración con Antonio Barnolas (IGME), y los especialistas en bioestratigrafía Josep M^a Samsó y Josep Serra Kiel (UB) amplió los objetivos de investigación a la datación de series pirenaicas, línea de investigación en la que se ubicaron las tesis doctorales de Tania Mochales (2007-2011) y Adriana Rodríguez Pintó (2006-2013) con aportaciones relevantes a la cronoestratigrafía pirenaica basada en numerosas series magnetoestratigráficas (>5,5 km). En este primer periodo también culmina la tesis en el IGME M^a José Ramón (2008-2013) con la propuesta de un método de restitución 3D basado en datos paleomagnéticos con ejemplos pirenaicos.

Además de las ya mencionadas anteriormente (Santolaria, 2015; Simón-Muzás, 2025), otras tesis dirigidas desde el IGME incluyen trabajos en geología estructural y tectónica con aproximaciones multidisciplinarias como las de Manoel Valcárcel en la Cuenca de Loranca (2010-2015) u otras con un marcado enfoque geocronológico como las de Héctor Gil-Garbi (2012-2017), Oier Suárez-Hernando (2012-2017) o las de Pablo Sierra-Campos (2021-2026) y Luis Otaño Jiménez (2022-). Otras tesis de la UNIZAR con aportación significativa de la magnetoestratigrafía son las de Roi Silva Casal (2012- 2017) en el Luteciense de Sierras Exteriores y la de Lope Ezquerro Ruiz (2010-2017) en la falla de Concud, o la de Manuel Pérez-Pueyo (2017-2023), en el Maastrichtiense del Pirineo, tuvieron el apoyo del IGME durante su desarrollo. En el momento de escribir esta nota, entre los dos grupos, hay 5 tesis doctorales en curso con medidas de paleomagnetismo, fábricas o magnetismo de rocas; M. Hassen Jebabli, Raúl Lázaro, Wissam Lachhab, Pablo Sierra Campos y Luis Otaño Jiménez.

Finalmente, varios paleomagnetistas de universidades y centros de investigación extranjeros han realizado estancias de investigación de larga duración en Zaragoza; tanto en la UNIZAR, Hermann J Mauritsch de la Montanuniversität Leoben, Austria (2001), Aviva J. Sussman de la University of Arizona (2003-2004), Claudia J. Lewis, de Los Alamos National Laboratory, New Mexico (2003-2004), como en el IGME, David J Anastasio de la Lehigh University, Pensilvania (2009-10), Arturo Palma Rodríguez, de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México (2011) y Xiang Li de la Universidad de Peking (2024).

En estos 35 años, la mayor parte de los trabajos realizados por los dos grupos de Zaragoza y materializados en 27 tesis doctorales, 11 trabajos fin de master y 5 tesis en curso y centenares de artículos de investigación, han mostrado gran fidelidad a la motivación inicial del grupo; la tectónica. Se ha realizado una ingente caracterización de magnitudes de rotación (y polos de placa) en Iberia y África, fundamentalmente, así como de elipsoides magnéticos diversos, todo ello enfocado en la compresión 4D de los procesos de deformación en múltiples escalas y ambientes tectónicos. Además de las aplicaciones en geología estructural, también se han ampliado enfoques al análisis de cuencas y prismas orogénicos con la realización de varias decenas de kilómetros de secciones magnetoestratigráficas, así como otras aplicaciones muy diversas que incluyen el magnetismo ambiental, biomagnetismo, magnetismo planetario, petrofísica, etc. Además de los retos científicos, en el futuro próximo hay que dotar de un valor adicional a los miles de datos generados estos 35 años materializando las bases de datos de paleomagnetismo y susceptibilidad y fomentando la corresponsabilidad en el cumplimiento de los principios FAIR y de Ciencia Abierta.

Agradecimientos

Investigación financiada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través del proyecto KINETRANS (PID2024-157800NB-C21), financiado por la Agencia Estatal de Investigación.

Referencias

Benito, G., Pérez-González, A., Gutiérrez, F., & Machado, M. J. (1998). River response to Quaternary subsidence due to evaporite solution (Gállego River, Ebro Basin, Spain). *Geomorphology*, 22(3-4), 243-263.

Juárez, M. T., Osete, M. L., Meléndez, G., Langereis, C. G., & Zijdeveld, J. D. A. (1994). Oxfordian magnetostratigraphy of the Aguilón and Tosos sections (Iberian Range, Spain) and evidence of a pre-Oligocene overprint. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 85(1-2), 195-211.

Millán, H., Parés, J.M., Pocoví, A., (1992). Modelización sencilla de la estructura del sector occidental de las sierras marginales aragonesas (Prepirineo, provincias de Huesca y Zaragoza). 111 Congreso Geol. España. Simposios, 2, 140-149.

Molina, E., Canudo, J.I., Guernet, C., McDougall, K., Ortiz, N., Pascual, J.O., Parés, J.M., Samsó, J.M, Serra-Kiel, J. & Tosquella, J. (1992). The stratotypic ilderian revisited: integrated stratigraphy across the Paleocene/Eocene boundary. *Revue de Micropaléontologie* 35, 143-156

Román-Berdiel, T., Pueyo-Morer, E. L., & Casas-Sainz, A. M. (1995). Granite emplacement during contemporary shortening and normal faulting: structural and magnetic study of the Veiga Massif (NW Spain). *Journal of Structural Geology*, 17(12), 1689-1706.

Steiner, M. B., Ogg, J. G., Melendez, G., & Sequeiros, L. (1985). Jurassic magnetostratigraphy, 2. Middle-Late Oxfordian of Aguilón, Iberian Cordillera, northern Spain. *Earth and Planetary Science Letters*, 76(1-2), 151-166.

Acceso al resto de los trabajos académicos realizados sobre [paleomagnetismo en Zaragoza](#) que aparecen citados en el texto.

El paleomagnetismo en una situación de aprendizaje basada en indagación guiada: implementación en un grupo de 4º ESO

E.M. Sánchez-Moreno ¹, A. Martínez-González ², A. Marcos Reguero ³, S.E. Jorge-Villar ²

¹ Departamento de Física, Universidad de Burgos, Av. Cantabria s/n, 09006 Burgos.

emsanchez@ubu.es

² Departamento de Didácticas Específicas, Universidad de Burgos, C. de Villadiego 1, 09001 Burgos.

³ IES Comuneros de Castilla, C. Batalla de Villalar 1, 09006 Burgos.

Resumen

Las metodologías de enseñanza activas, como la indagación, se centran en problemas reales a los que el alumnado se enfrenta mediante la integración de diferentes disciplinas y el diseño de la solución. Por otro lado, la metodología de indagación es idónea para implementar el modelo de enseñanza STEAM (e. g. Domènech-Casal, 2018; Martín-Páez et al., 2019; Perales-Palacios y Aguilera 2020), la cual usa un enfoque pedagógico que integra las disciplinas de ciencias, tecnología, ingeniería, artes y matemáticas en el proceso de aprendizaje. Además, los trabajos de investigación llevados a cabo en el aula contribuyen a la alfabetización científica necesaria para que la ciudadanía sea capaz de adaptarse a los nuevos avances en ciencia y tecnología (Menoyo-Díaz, 2022).

En este trabajo se presenta el uso de la técnica del paleomagnetismo en una situación de aprendizaje implementada en un grupo de 4º de ESO. Concretamente un grupo de 23 alumnas y alumnos de entre 15 y 16 años en la asignatura de “Laboratorio de Ciencias”. La situación de aprendizaje sigue un modelo de estrategia didáctica (Fig. 1.) que permite al alumnado resolver un problema relacionado con una investigación científica real en colaboración con centros de investigación locales (Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH) y Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos (UBU)). De esta forma se crea el contexto ideal para la enseñanza STEAM y para generar una motivación añadida en el alumnado (Sánchez-Moreno et al., 2023). Dada la falta de situaciones de aprendizaje en la literatura (Martínez-González y Santamaría-Herrera, 2023), esta propuesta, junto a los resultados de su implementación, aportan una nueva referencia.



Figura 1: Modelo de estrategia didáctica en el que se basa la actividad implementada.

El eje central de la actividad es “la datación del último estrato en el que vivieron los dinosaurios en un yacimiento paleontológico”. El estudio final es la datación de varias secuencias estratigráficas mediante paleomagnetismo. Las alumnas y alumnos trabajaron en equipos jugando el rol de científicas y científicos de diferentes grupos de investigación de universidades y centros concretos (UBU, CENIEH, Universidad de Zaragoza, Universidad de Lisboa y Universidad de Montpellier). De esta forma se pretende dar a conocer y poner en valor el trabajo que se hace en las universidades y centros de investigación, lo que contribuye a otro aspecto de la alfabetización científica. La primera sesión se realizó en el CENIEH, donde los estudiantes conocieron diferentes técnicas de datación con el fin de seleccionar la técnica más adecuada (sesiones 2 y 3). Durante las sesiones 4 y 5 aprendieron las bases de la técnica seleccionada, el paleomagnetismo, mediante diferentes experiencias prácticas y un sistema de hipótesis-comprobación-discusión. En la sesión 6 aprendieron a obtener los datos paleomagnéticos en el laboratorio de paleomagnetismo de la UBU. En las sesiones 7 y 8 recibieron los datos paleomagnéticos de cuatro secciones estratigráficas basadas en un estudio real de un yacimiento paleontológico cercano al límite Cretácico/Paleógeno en Serraduy (Huesca) (Puértolas-Pascual et al., 2018) para su interpretación y discusión. Por último, en las sesiones 9 y 10 elaboraron y presentaron un póster científico con la interpretación de datos de cada “grupo de investigación”.

Para evaluar la actividad se utilizaron diferentes instrumentos: i) Cuestionario de contenidos inicial, final y al grupo de control, ii) Encuesta de opinión anónima, iii) Rúbrica de evaluación del alumnado individual, iv) Rúbrica de evaluación del trabajo final: póster científico, v) Entrevista inicial y final al profesorado y vi) Rúbrica de autoevaluación de la actividad. Los resultados muestran que la metodología permite alcanzar las competencias, contenidos y motivación del alumnado propuestos en los objetivos. Sin embargo, también reflejan que algunos conceptos específicos de la investigación

concreta no fueron asimilados. Se destaca el éxito del trabajo en equipo (discusión y negociación de hipótesis, realización de los experimentos, actividades e interpretación de los datos finales). El alumnado obtiene las peores puntuaciones en participación en clase (intervención en los debates y preguntas propuestas). Por otro lado, solo hemos detectado una desventaja, relacionada con la logística: el tiempo de preparación e implementación que conlleva la actividad puede no encajar en otro tipo de asignaturas.

Referencias

- Domènech-Casal, J. (2018).** Aprendizaje Basado en Proyectos en el marco STEM. Componentes didácticas para la Competencia Científica. *Ápice. Revista de Educación Científica*, 2(2), 29-42. <https://doi.org/10.17979/arec.2018.2.2.4524>
- Martínez-González, A. y Santamaría-Herrera, A. (2023).** Formación permanente nacional y autonómica del profesorado de matemáticas de educación primaria en España. *Revista interuniversitaria de formación del profesorado*, 37 (98), pp. 95-126. <https://doi.org/10.47553/rifop.v98i37.2.99227>
- Martín-Páez T., Aguilera D., Perales-Palacios F.J., Vílchez-González J.M. (2019).** What are we talking about when we talk about STEM education? A review of literature. *Science Education*, 103, 799–822. <https://doi.org/10.1002/sce.21522>
- Menoyo-Díaz, M.P. (2022).** Los trabajos de investigación en Secundaria, un marco de actuación para la alfabetización STE(A)M en el marco de la LOMLOE. *UNIÓN - Revista Iberoamericana de Educación Matemática*, 18(66). <https://union.fespm.es/index.php/UNION/article/view/1442>
- Perales-Palacios, F.J. y Aguilera, D. (2020).** Ciencia-Tecnología-Sociedad vs. STEM: ¿evolución, revolución o disyunción? *Ápice. Revista de Educación Científica*, 4(1), 1-15. <https://doi.org/10.17979/arec.2020.4.1.5826>
- Puértolas-Pascual, E., Arenillas, I., Arz, J.A., Calvín, P., Ezquerro, L., García-Vicente, C., Pérez-Pueyo, M., Sánchez-Moreno, E.M., Villalaín, J.J., Canudo, J.I. (2018).** Chronostratigraphy and new vertebrate sites from the upper Maastrichtian of Huesca (Spain), and their relation with the K/Pg boundary, *Cretaceous Research*, 89, 36-59 pp. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2018.02.016>
- Sánchez-Moreno, E. M., Jorge-Villar, S.E., Martínez-González, A., Marcos-Reguero, A. (2023).** Recursos científicos burgaleses en la enseñanza STEAM: Situación de aprendizaje para secundaria basada en la datación de un yacimiento paleontológico. En Diez-Ojeda & M. Queiruga-Dios, M.A. (Eds.), *Thinking outside the box in education* (pp. 113-117). Universidad de Burgos. <https://doi.org/10.36443/9788418465949>

Resultados paleomagnéticos preliminares en una estalagmita de la Cova de Arcoia (Geoparque Montañas do Courel, Lugo)

E. M. Sánchez-Moreno ¹, C. Pérez-Mejías ², H. Cheng ², D. Ballesteros ³

¹ Departamento de Física, Universidad de Burgos, emsanchez@ubu.es

² Institute of Global Environmental Change, Xi'an Jiaotong University

³ Departamento de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Universidad de Cantabria, y Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel.

Resumen

Este estudio analiza el registro paleomagnético en una estalagmita de la Cova de Arcoia (Lugo, NO de la península ibérica). Los resultados muestran que la magnetización remanente, dominada posiblemente por magnetita y en menor medida hematites, conserva direcciones coherentes con el campo geomagnético. Las variaciones de inclinación y declinación sugieren un registro continuo de variación secular. La buena coherencia de los datos respalda su fiabilidad. En conjunto, la estalagmita presenta alto potencial como archivo geomagnético de alta resolución.

Abstract

This study analyzes the paleomagnetic record in a stalagmite from Cova de Arcoia (Lugo, NW of the Iberian Peninsula). The results show that the remanent magnetization, likely dominated by magnetite and to a lesser extent hematite, preserves directions consistent with the geomagnetic field. Variations in inclination and declination suggest a continuous record of secular variation. The strong internal consistency of the data supports its reliability. Overall, the stalagmite shows high potential as a high-resolution geomagnetic archive.

Introducción

El estudio del registro del campo magnético terrestre en espeleotemas ha experimentado un creciente interés en las últimas décadas debido a su capacidad para registrar variaciones geomagnéticas con alta resolución temporal. Los minerales magnéticos presentes en este tipo de depósitos provienen de los suelos del entorno de las cuevas y son incorporados a los espeleotemas por el agua de goteo. La magnetización natural se origina fundamentalmente por la alineación de los minerales magnéticos con el campo geomagnético presente durante su deposición en la superficie de las estalagmitas, constituyendo una magnetización remanente de tipo detrítica (DRM). Dada la rápida encapsulación de los minerales magnéticos en la matriz de calcita, el lapso de tiempo entre la deposición de las partículas magnéticas y el bloqueo de la remanencia es mucho más corto que en la mayoría de los sedimentos. Además, los espeleotemas precipitan de forma continua a lo largo de miles de años y son relativamente poco propensos a las alteraciones postdeposicionales como la bioturbación y la compactación. Este tipo de registros, apoyados en dataciones

radiométricas, proporcionan datos paleomagnéticos de alta resolución de las fluctuaciones del campo magnético en escalas de tiempo de centenares a miles de años (Lascu & Feinberg, 2011).

En este contexto, se presenta el estudio paleomagnético preliminar de una estalagmita (AR1) procedente de la Cova de Arcoia, en el Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel (Lugo). La cueva está desarrollada en mármoles del Cámbrico, incluidos en una serie metamórfica con abundantes mineralizaciones de hematites y goethita asociadas a la discordancia de la base del Silúrico. La cueva cuenta con un sólido marco cronológico derivado de trabajos previos sobre espeleotemas de la cueva (Railsback *et al.*, 2011, 2017), que indican que muchas estalagmitas se formaron durante el Holoceno, con edades comprendidas entre ~9,3 ka y la actualidad, así como secuencias más largas que abarcan múltiples interglaciares durante los últimos ~550 ka. Estos antecedentes destacan el potencial de la zona para estudios paleomagnéticos de alta resolución y largo alcance temporal.

Resultados y discusión

La estalagmita analizada se cortó en una sección longitudinal central de 2.2 cm de espesor, donde se puede observar una laminación concéntrica bien definida (Fig. 1). Sobre esta sección se ha realizado un muestreo sistemático a lo largo del eje de crecimiento, el cual se desplaza en diferentes tramos de la sección, obteniéndose 52 muestras de 6 mm de espesor y 2 muestras de 12 mm. Se obtuvieron direcciones paleomagnéticas mediante desmagnetización por campos alternos en 48 de las 54 muestras. Los experimentos de desmagnetización se realizaron con un magnetómetro spinner JR6 (AGICO) en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos y con un magnetómetro criogénico superconductor U-Channel (2G) en el Laboratorio de Paleomagnetismo de GEO3BCN (CSIC-Universidad de Barcelona).

Las intensidades de la magnetización remanente natural varían de 1.52×10^{-5} a 3.46×10^{-2} A/m, con un promedio de 1.77×10^{-3} A/m. Se observa una magnetización remanente viscosa (VRM) en la mayoría de las muestras, la cual se elimina mediante campos de desmagnetización de 8-12 mT. Los vectores de magnetización remanente característica (ChRM) apuntan hacia el origen del diagrama ortogonal y se aíslan entre 12 y 60 mT en la mayoría de las muestras. Aunque también hay algunas que llegan hasta 100 mT y otras de baja coercitividad hasta 30-40 mT. Las direcciones paleomagnéticas calculadas tienen un ángulo de desviación máxima (MAD) promediado de 5°. Solo 4 direcciones presentan un MAD entre 11° y 13°. El ~90% de las muestras son totalmente desmagnetizadas a 100 mT, lo que sugiere que un mineral magnético de baja coercitividad (magnetita) es el portador de la remanencia. Sin embargo, hay varias muestras que mantienen alrededor del 20% de la magnetización, señalando hacia un mineral de alta coercitividad (hematites).

Las direcciones magnéticas obtenidas están bien agrupadas y muestran inclinaciones magnéticas positivas de ~40°–65° (excepto 3 muestras con 29°, 70° y 78°), con declinaciones que varían de 32°W a 32°E (excepto dos muestras con 43° y 46°) (Fig. 1). Las variaciones en declinación son inferiores a 45°, compatibles con un régimen estable de campo geomagnético. La variación de la inclinación es más reducida y con valores altos, coherentes con la latitud de la región. Estos resultados son consistentes con un registro de variación secular que refleja el comportamiento del campo durante el crecimiento de la estalagmita AR1.

La coherencia interna de los datos, junto con la continuidad de las direcciones obtenidas, respalda la fiabilidad del registro paleomagnético. No obstante, la dispersión observada en algunos tramos podría estar relacionada con cambios en las condiciones hidrológicas de la cavidad, que afectan tanto al flujo de agua como al transporte y deposición de material detrítico. Por ello, es necesario realizar un estudio detallado del magnetismo de rocas para descartar un origen de las variabilidades en las direcciones paleomagnéticas relacionado con la concentración de partículas magnéticas.

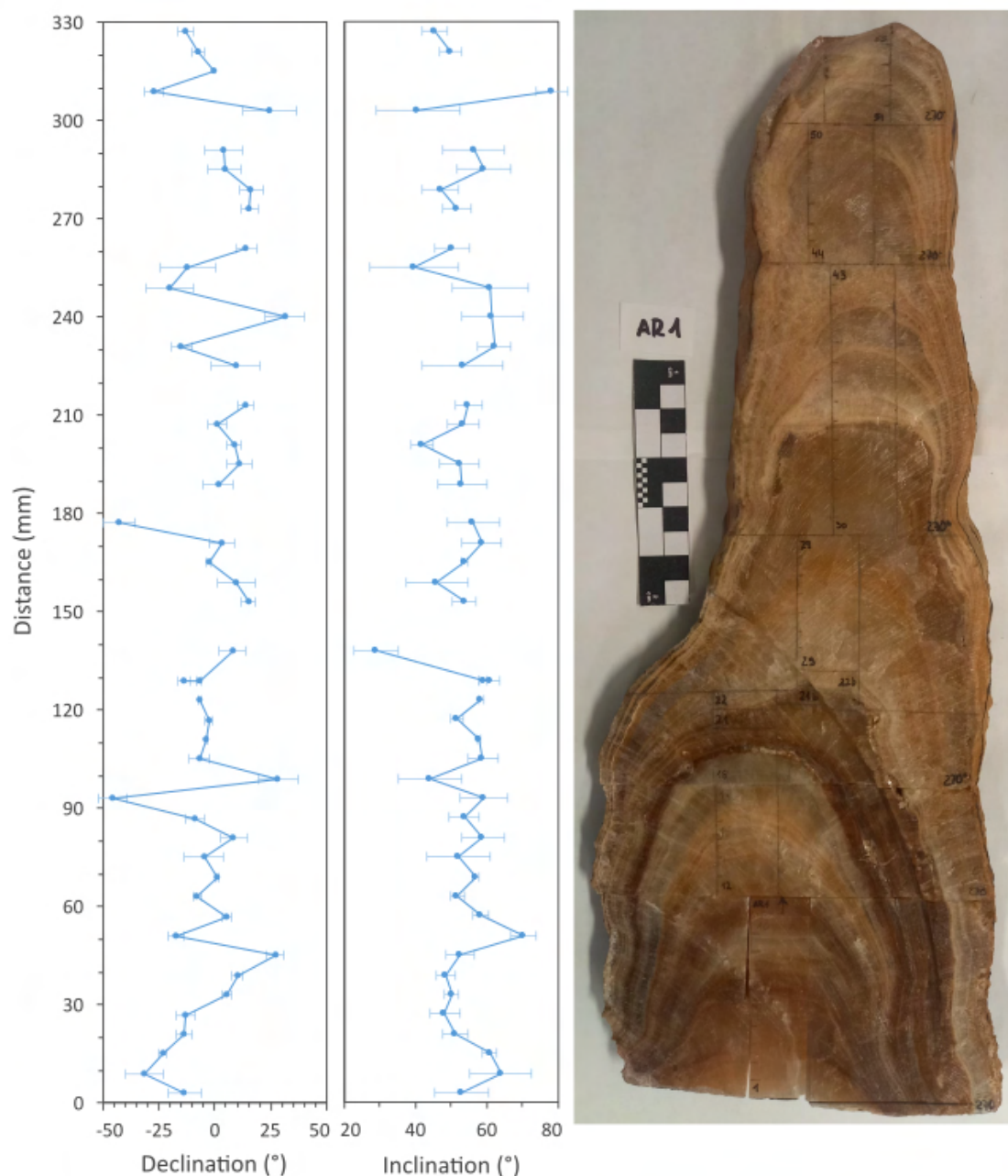


Fig. 1. Imagen de la sección transversal de la estalagmita AR1 (Cova de Arcoia, Geoparque Montañas do Courel, Lugo) donde aparecen marcadas las columnas centrales muestreadas para la obtención de los especímenes sometidos al estudio paleomagnético. Se muestran los resultados de declinación e inclinación magnética obtenidos en función de la longitud de la estalagmita.

Conclusiones

En conjunto, los resultados preliminares sugieren que la estalagmita AR1 conserva un registro continuo y de alta resolución de la variación direccional del campo magnético terrestre durante su crecimiento. La combinación de este registro con un modelo cronológico robusto mediante dataciones radiométricas permitirá, en futuras fases del estudio, correlacionar la curva de variación secular obtenida con curvas de referencia regionales y globales, así como identificar posibles eventos geomagnéticos de interés. Estos resultados refuerzan el potencial de los espeleotemas de las Montañas do Courel como archivos clave para la reconstrucción del comportamiento reciente y cuaternario del campo geomagnético.

Referencias

Lascu, I., & Feinberg, J. M. (2011). Speleothem magnetism. *Quaternary Science Reviews*, 30(23–24), 3306–3320. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.08.004>

Railsback, L. B., Liang, F., Vidal Romaní, J. R., Grandal-d'Anglade, A., Vaqueiro Rodríguez, M., Santos Fidalgo, L., et al. (2011). Petrographic and isotopic evidence for Holocene long-term climate change and shorter-term environmental shifts from a stalagmite from the Serra do Courel of northwestern Spain, and implications for climatic history across Europe and the Mediterranean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 305(1–4), 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.02.030>

Railsback, L. B., Liang, F., Vidal-Romaní, J. R., Garrett, K. B., Sellers, R. C., Vaqueiro-Rodríguez, M., et al. (2017). Radiometric, isotopic, and petrographic evidence of changing interglacials over the past 550,000 years from six stalagmites from the Serra do Courel in the Cordillera Cantábrica of northwestern Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 466, 137–152. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.11.020>

Computing and Measuring Geomagnetically Induced Currents – Application to the Portuguese Infrastructure

R. Santos^{1,4}, M.A. Pais ¹, J. Alves Ribeiro ^{2,3}, J. Cardoso ⁴, F.J.G. Pinheiro ^{5,1}, P. Ribeiro¹

¹ Centro de Investigação da Terra e do Espaço da Universidade de Coimbra (CITEUC), Universidade de Coimbra, Portugal rute2rodrigues@gmail.com.

² Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, Portugal

³ Instituto Dom Luiz (IDL), Faculdade de Ciências de Lisboa, Universidade de Lisboa, Portugal

⁴ Laboratory for Instrumentation, Biomedical Engineering and Radiation Physics (LIBPhys), Universidade de Coimbra, Portugal

⁵ Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Lisboa, Portugal

Introduction

The first coordinated effort to assess the impact of Space Weather on the Portuguese energy transport infrastructure was the MAG-GIC project (PTDC/CTA-GEO/31744/2017). That initiative established the framework for evaluating the impact of geomagnetic activity on the Portuguese 150–400 kV transmission network by combining realistic grid parameters provided by the national transmission system operator, Redes Energéticas Nacionais (REN), with subsurface electrical conductivity models derived from magnetotelluric soundings. This effort led to the development of the first Three-Dimensional (3D) resistivity model for mainland Portugal (the B-S conductivity model) (Alves Ribeiro *et al.*, 2021; Baltazar-Soares *et al.*, 2023; Alves Ribeiro *et al.*, 2023), and provided the first precise Geomagnetically Induced Current (GIC) simulations for the country (Alves Ribeiro *et al.*, 2021).

The results of the MAG-GIC project highlighted the relevance of detailed geophysical conductivity models, realistic grid representations, and in-situ measurements for improving the assessment of geomagnetic impacts. A prototype GIC monitoring system was installed at the Paraimo substation about 50 km north of Coimbra, on 30 August 2021, and was in operation for about one year (Santos, 2021).

More recent efforts led to the development of higher-resolution regional conductivity models, such as the sAR30 model for southern Portugal, further refining the geoelectrical characterisation of the territory (Alves Ribeiro *et al.*, 2025). The effect of sAR30 on GIC simulations was studied using an upgraded version of the numerical tool, ShW-MAGICA (Santos, 2025).

An upgraded version of the GIC monitoring system was developed for transformer neutral cables at power substations. The ENERGIC system was conceived to operate autonomously under substation conditions, providing accurate and bidirectional measurements of quasi-DC currents (Santos, 2025).

Finally, GIC modelling methodologies were extended to pipeline grids, providing a first quantitative assessment of Space Weather impacts on Portuguese gas pipelines, and identifying their vulnerability to geomagnetic storms as well as the pipeline segments most susceptible to GIC effects (Santos, 2025).

ShW-MAGICA

Shield wires (ShW) are conducting lines installed above power phase lines to provide a low-impedance path to ground and protect the transmission infrastructure from lightning. The numerical modelling tool ShW-MAGICA integrated ShW for GIC simulations in power grids (Santos *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2025), leading to systematic changes in GIC estimates. Importantly, the results demonstrate that the effect of ShW can either mitigate or amplify GICs due to two competing effects that are identified and discussed: electrical resistance versus emf induction in ShW lines. The overall influence of ShW is dependent on the particular network topology. The strongest sensitivity associated with the inclusion of ShW is observed at substation grounding and transformer winding resistances, with relative variations of more than 20% and 10%, respectively. The analysis further shows that a realistic representation of geomagnetic drivers and Earth's conductivity structure affects significantly the impact of ShW on GIC amplitudes, and that the use of simplified uniform-field or half-space models may easily lead to an erroneous risk assessment.

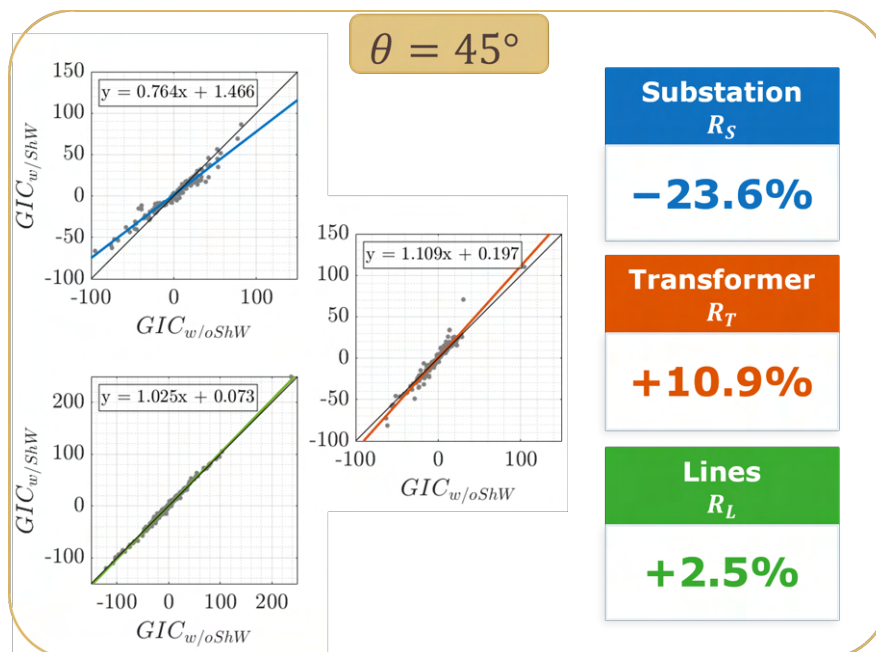


Figure 1: For a uniform and constant induced electric field of $|E| = 1 \text{ V km}^{-1}$ and southwest-northeast oriented, GIC values through (blue) the substation grounding resistances, (orange) the transformer winding resistances, and (green) along the power lines, when considering ShW ($GIC_{w/ShW}$) and neglecting them ($GIC_{w/oShW}$).

ENERGIC

The availability of in-situ measurements is essential for validating and constraining simulation results, especially given uncertainties in power grid parameters and subsurface conductivity models. The ENERGIC system was conceived to operate autonomously at transformer neutral cables under substation conditions, providing accurate and bidirectional measurements of quasi-DC currents. Its development highlighted the intrinsic challenges of low-frequency GIC measurements, particularly regarding offset stability, thermal effects, and electrical noise in operational environments, requiring a carefully designed and robust architecture.

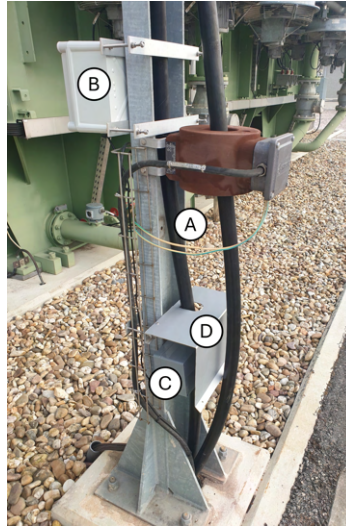


Figure 2: GIC prototype installed at Paraimo substation. A: neutral cable; B: Enclosure I; C: Enclosure II; D: Protection cover.

Pipe-MAGICA

By extending the GIC modelling framework beyond power systems, the Pipe-MAGICA numerical tool represents the first quantitative evaluation of geomagnetic effects on the Portuguese gas pipeline network. Although precise parameter values are not available for the pipeline grid, the simulations indicate that geomagnetic disturbances affecting mainland Portugal may locally drive pipe-to-soil potentials (PSP) beyond commonly accepted cathodic protection limits. As in the case of the transmission network, pipeline vulnerability is shown to be controlled by the combined influence of subsurface conductivity heterogeneity (which determines induced electric field gradients) and infrastructure geometry.

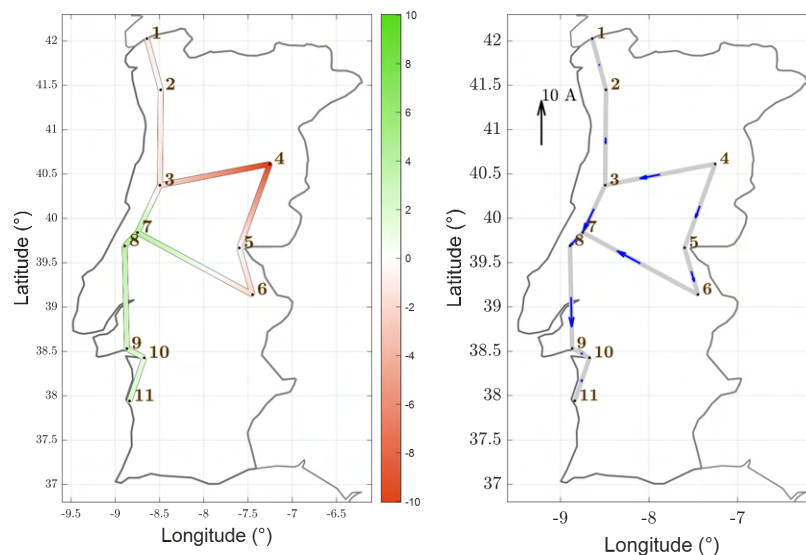


Figure 3: Spatial maps of PSP (left) and GICs (right) at the time of the highest PSP peak during the geomagnetic storm of 22 June 2015, 18:38.

Conclusions

Overall, the results presented have contributed to a more comprehensive and physically consistent framework for assessing space weather impacts on critical ground-based infrastructures in mainland Portugal, and the presented strategies may be extended to other mid-latitude networks. Our work focuses on bridging advances in modelling and observational capabilities with the practical goal of improving space weather risk assessment.

References

- J. Alves Ribeiro, F. J. Pinheiro, and M. A. Pais (2021).** First Estimations of Geomagnetically Induced Currents in the South of Portugal. *Space Weather*, 19(1), DOI:10.1029/2020SW002546
- J. Alves Ribeiro, F. J. Pinheiro, M. A. Pais, R. Santos, J. Cardoso, P. Baltazar-Soares, and F. A. Monteiro Santos (2023).** Toward More Accurate GIC Estimations in the Portuguese Power Network. *Space Weather*, 21(6), DOI: 10.1029/2022SW003397
- J. Alves Ribeiro, F. J. Pinheiro, R. Santos, and M. A. Pais (2025).** Effect of spatial resolution of conductivity models for Geomagnetically Induced Currents estimation: case study in a geological complex region. *Geophysical Journal International*, 242, 1–20, DOI:10.1093/gji/ggaf277
- P. Baltazar-Soares, F. J. Martínez-Moreno, J. Alves Ribeiro, F. Monteiro Santos, P. Ribeiro, M. A. Pais, A. Mateus, and J. Pous (2023).** Crustal Imaging of Portugal Mainland Using Magnetotelluric Data. *Earth and Space Science* 10(7), DOI:10.1029/2022EA002732
- R. Santos, M. A. Pais, J. A. Ribeiro, J. Cardoso, L. Perro, and A. Santos (2022).** Effect of shield wires on GICs: Equivalent resistance and induced voltage sources. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 143:108487, DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108487
- R. R. Santos, M. A. Pais, J. M. Cardoso, J. A. Ribeiro, and F. J. Pinheiro (2025).** The influence of Shield Wires on GIC simulations for realistic power grids. *Electric Power Systems Research*, 244:111540, DOI: 10.1016/j.epsr.2025.111540
- R. R. d. Santos (2021).** Development of instrumentation for measuring geomagnetically induced currents (GICs) and effect of shield wires on GIC simulations. MSc thesis, Universidade de Coimbra (Portugal). <https://hdl.handle.net/10316/98060>
- R. R. d. Santos (2025).** Computing and Measuring Geomagnetically Induced Currents – Application to the Portuguese Infrastructure. *PhD thesis*, Universidade de Coimbra (Portugal).

Magnetic Susceptibility as a multidisciplinary tool: from granite emplacement to environmental and forensic applications

H. Sant'Ovaia, C. Cruz, A. Gonçalves, A. Mota, F. Noronha

Instituto de Ciências da Terra, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Rua do Campo alegre, s/n 4169-007, Porto, hsantov@fc.up.pt

Abstract

Magnetic susceptibility has evolved from a classical petrophysical parameter into a versatile and powerful proxy applied across multiple scientific disciplines. Over the last two decades, our team has explored the potential of magnetic susceptibility and, particularly, Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) in a wide range of geological contexts. Initially focused on understanding the emplacement of granitic plutons and the tectonic evolution of the Iberian Massif, these investigations progressively expanded to include environmental monitoring, forensic sciences and public health-related studies. This multidisciplinary research trajectory demonstrates the remarkable capacity of magnetic methods to provide rapid, non-destructive and cost-effective insights into both natural processes and anthropogenic impacts.

Two decades of research

The earliest studies concentrated on the application of AMS to unravel the emplacement mechanisms of Variscan granites in Portugal within the Central Iberian Zone, the Galicia-Trás-os-Montes Zone and the Ossa-Morena Zone. These studies aimed to characterize the internal magnetic fabrics preserved within granitic rocks and to interpret them as indicators of magma flow and deformation during emplacement. AMS proved particularly valuable because it records subtle preferred orientations of magnetic minerals, which frequently reflect magmatic processes not readily observable through conventional structural analyses. A particularly important milestone was achieved through the compilation and analysis of AMS data from more than twenty-one Variscan granite plutons ranging in age from approximately 320 to 296 million years. This extensive dataset provided a unique opportunity to investigate the evolution of tectonic stress regimes throughout a significant portion of the Variscan orogeny. A major outcome of this research was the recognition that magnetic fabrics can serve as reliable kinematic indicators of tectonic processes associated with the Variscan orogeny (Sant'Ovaia *et al.*, 2024).

By integrating AMS data with gravimetric surveys, it became possible to develop three-dimensional geometric models of granite plutons and to infer their subsurface architecture, providing new constraints on pluton emplacement mechanisms, magma transport pathways and the temporal evolution of regional stress fields (e.g., Cruz *et al.*, 2023).

The growing recognition of AMS as a robust structural tool stimulated its application to other lithologies. Studies on subvolcanic rocks and veins extended magnetic fabric

analyses to shallower magmatic systems, contributing to the understanding of dike emplacement mechanisms and magma propagation processes (e.g., Oliveira *et al.*, 2025).

Similarly, research involving metamorphic rocks explored the relationships between AMS fabrics and finite strain ellipsoids. The results contributed to ongoing discussions regarding the interpretation of magnetic anisotropy in deformed geological materials and reinforced the importance of integrating magnetic analyses with classical structural geology methodologies (e.g., Sousa *et al.*, 2025).

Another significant research direction emerged through collaborations within metallogeny-focused researchers. These investigations examined the relationship between magnetic mineralogy, oxidation-reduction conditions of granitic magmas, and associated mineralization processes. The findings demonstrated that magnetic properties could serve as useful indicators in mineral exploration and metallogenic studies, offering complementary information to traditional geological and geochemical approaches (e.g., Gonçalves *et al.*, 2022).

While geological applications remained a central focus, the versatility of magnetic susceptibility encouraged its expansion into environmental sciences. Research on urban soils and mining waste materials revealed that magnetic properties are highly sensitive to anthropogenic contamination (e.g., Lourenço *et al.*, 2014; Sant'Ovaia *et al.*, 2023). Industrial emissions, urban activities and mining operations often introduce magnetic particles into the environment, producing measurable changes in magnetic susceptibility and remanent magnetization. Consequently, magnetic methods emerged as efficient tools for identifying contaminated areas and mapping the spatial distribution of pollutants.

Environmental applications were further extended through the analysis of biomonitoring materials such as tree leaves and tree barks. Magnetic susceptibility measurements performed on leaves and bark revealed clear spatial patterns related to pollution sources and transport pathways. These findings established magnetic monitoring as a valuable approach for assessing urban air quality and environmental health (e.g., Sant'Ovaia *et al.*, 2012, 2025).

The interdisciplinary character of this research eventually led us to exploratory studies involving human tissues and forensic investigations. The capacity to detect and characterize magnetic particles within biological materials suggested potential applications in environmental exposure assessment, forensic investigations and biomedical research (e.g., Guedes *et al.*, 2013; Sant'Ovaia *et al.*, 2015). As concerns regarding the health impacts of particulate matter continue to increase worldwide, magnetic techniques may provide innovative approaches for tracking particle exposure and studying their biological implications.

Scientific Highlights

What began as an effort to understand granite emplacement and tectonic evolution evolved into broad multidisciplinary research including geology, environmental sciences, metallogeny, forensic investigations and public health-related studies. Across all these domains, magnetic susceptibility has consistently proven to be a rapid, non-destructive, sensitive and cost-effective proxy capable of providing valuable information about both natural processes and anthropogenic influences. By bridging geology, environment and

life sciences, magnetic susceptibility offers innovative pathways for understanding complex interactions between Earth systems, human activities and environmental health.

Acknowledgments

The project, RESTAURA – NORTE 2030 – FEDER-02704900, is funded by the 2021–2027 Northern Regional Program (Norte 2030) and falls under the scope of the Institute of Earth Sciences (ICT) project – UID/04683/2025. The authors acknowledge the financial support provided to the ICT through the multi-annual funding contract with the Foundation for Science and Technology (FCT), under project UID/04683/2025 with the DOI <https://doi.org/10.54499/UID/04683/2025>. C. Cruz was financially supported by <https://doi.org/10.54499/2023.07410.CEECIND/CP2833/CT0002> (FCT – Portugal). A. Mota was financially supported by FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., through the doctoral fellowship SFRH/BD/13757/2022, with the DOI <https://doi.org/10.54499/2022.13757.BD>.

References

- Cruz, C., Nogueira, P., Máximo, J., Noronha, F., Sant’Ovaia, H. (2023)** Granite emplacement within a suture shear zone in the Southwestern Iberian Variscan Belt: The Santa Eulália Plutonic Complex. *Geological Society of London*, 180:13 pp. DOI: <https://doi.org/10.1144/jgs2022-131>
- Gonçalves, A., Sant’Ovaia, H., Noronha, F. (2022)** Role of Variscan granites in the genesis of Freixo de Numão W(Sn) district (Northern Portugal). *Journal of Iberian Geology*, 48: 309–353. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41513-022-00195-2>.
- Guedes, A., Murray, R.C., Ribeiro, H., Sant’Ovaia, H., et al. (2013)** The potential application of magnetic susceptibility as a technique for soil forensic examinations. In: Duncan Pirrie, Alastair Ruffell and Lorna Dawson (eds). *Environmental and Criminal Forensics. Geological Society, London, Special Publications*, 384: 65-73. DOI: <http://doi.org/10.1144/SP384.7>.
- Lourenço, A.M., Sequeira, E., Sant’Ovaia, H., Gomes, C.R. (2014)** Magnetic, geochemical and pedological characterization of soils from different environments and geological backgrounds near Coimbra, Portugal. *Geoderma*, 213: 408-418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.035>.
- Oliveira, A., Sant’Ovaia, H., Martins, H.C.B., Font, E. (2025)** Low-field magnetic fabrics and mineralogy of subvolcanic dykes from northern Portugal: Magma flow and petrogenetic implications. *J. Iberian Geology*, 51, 199–238. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41513-024-00276-4>.
- Sant’Ovaia, H., Lacerda, M.J., Gomes, C. (2012)** Pollution by particles: an environmental magnetism study using biological collectors located in Braga, Porto, Valongo and Trancoso (Northern Portugal). *Atmospheric Environment*, 61: 340-349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.059>.
- Sant’Ovaia, H., Marques, G., Gomes, C., Rocha, A. (2015)** Magnetic susceptibility and isothermal remanent magnetization in human tissues: a study case. *Biometals*, 28: 951-958. DOI: <https://doi.org/10.1007/S10534-015-9879-Z>.
- Sant’Ovaia, H., Cruz, C., Guedes, A., Ribeiro, H., et al. (2023)** Contamination Fingerprints in an Inactive W (Sn) Mine: The Regoufe Mine Study Case (Northern Portugal). *Minerals*, 13, 497. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13040497>.
- Sant’Ovaia, H., Cruz, C., Gonçalves, A., Nogueira, P., Noronha, F. (2024)** Deciphering Iberian Variscan Orogen Magmatism Using the Anisotropy of Magnetic Susceptibility from Granites. *Minerals*, 14(3), 309. DOI: <https://doi.org/10.3390/min14030309>.
- Sant’Ovaia, H., Cruz, C., Maccouin, M., Durães, N., et al. (2025)** Tree Barks as Biosensors of Airborne Pollution in Portugal and Senegal: Geochemical and Magnetic Characterization. *Book of abstracts of XIV Congresso Ibérico de Geoquímica*, S. Miguel, Açores, Portugal, p. 60.
- Sousa, M., Sant’Ovaia, H., Noronha, F. (2025)**. Deciphering deformation and magmatism along Finisterra Terrane: AMS petrofabric and geochemistry of sodium-rich orthogneisses of the “Foz do Douro Metamorphic Complex. *Journal of Iberian Geology*, 51: 179–197. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41513-025-00293-x>

Magnetobiocronología del sector oeste de la Cuenca de Jaca-Pamplona (Pirineo central): implicaciones tectosedimentarias y paleogeográficas

P. Sierra-Campos¹, J. C. Larrasoaña^{1,2}, P. Calvin³, E. L. Pueyo¹, G. Bernaola⁴, E. Izquierdo-Llavall¹, M. Montes⁵, A. Luzón⁶, E. Bellido⁵, M. P. Mata⁵, E. Beamud⁷, R. Scholger⁸, E. Font⁹, A. Payros¹⁰, M. Domínguez⁵

¹ CN IGME, CSIC, Unidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain. p.sierra@igme.es

² Departamento de Ciencias, Universidad Pública de Navarra, Pamplona, Spain.

³ Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, Salamanca, Spain.

⁴ Departamento de Ingeniería Minera y Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Universidad del País Vasco (EHU), Bilbao, Spain.

⁵ CN IGME, CSIC, Madrid, Spain.

⁶ Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain.

⁷ Laboratorio de Paleomagnetismo CCiTUB-GEO3BCN CSIC, Barcelona, Spain.

⁸ Palaeomagnetic Laboratory Gams, Montanuniversität Leoben, Gams, Austria.

⁹ Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal

¹⁰ Departamento de Geología, Universidad del País Vasco (EHU), Bilbao, Spain

Se ha realizado un estudio magnetobioestratigráfico en el sector central de la cuenca de Jaca-Pamplona a través de las secciones de Izaga y Martes para obtener un nuevo modelo de edad de los principales eventos paleogeográficos, sedimentarios, cronológicos y climáticos registrados en esta zona de la cuenca que carecía de datos magnetobioestratigráficos.

La columna comienza en la parte alta de las turbiditas del Grupo Hecho y continúa en las margas prodeltaicas de las Formaciones Larrés y Pamplona. Intercaladas entre las dos últimas se encuentran las Limolitas de Urroz. Por encima de la Fm. Pamplona y de manera erosiva, se encuentran las facies fluviales de la Arenisca de Martes, que marcan el inicio de la sedimentación netamente continental, seguidas de la mitad inferior de las facies aluviales del Grupo Campodarbe.

Se han muestreado 556 niveles estratigráficos a lo largo de casi 5950 metros de columna estratigráfica compuesta y se han desmagnetizado un total de 592 especímenes, la mayoría térmicamente, para obtener las direcciones paleomagnéticas y calcular la latitud de su VGP. En las facies marinas, la desmagnetización térmica ha permitido identificar dos componentes, una de baja temperatura (<240°C) interpretada como la componente viscosa, con direcciones coherentes con el campo actual y otra con una temperatura de desbloqueo entre 350°-600°C, portada por magnetita, que se ha interpretado como primaria y se ha utilizado para construir la secuencia de polaridad local. Por otra parte, en las facies continentales se han identificado dos componentes de alta temperatura, una con temperaturas de desbloqueo entre 450°-570°C (C1) cuyo portador es la magnetita y otra con temperaturas de desbloqueo entre 600°-680°C (C2), portada por hematites. La componente C2 define con precisión numerosos cambios de

polaridad, por lo que se interpreta como primaria y ha sido utilizada para construir la secuencia local de polaridad. La componente C1 presenta un registro muy pobre y algo errático de los mismos cambios de polaridad, que unido a otras evidencias, parece indicar un origen pedogénico.

En esta secuencia local se han identificado 21 magnetozonas que comprenden desde el cron C19r (~41.3 Ma, Luteciense superior) hasta el cron C12r (~33.2 Ma, Rupeliense inferior), registrando unos 8 Ma de sedimentación prácticamente continua en la parte noroeste de la cuenca de Jaca-Pamplona. La gran resolución de este nuevo modelo de edad ha permitido calcular las tasas de acumulación aportando una visión de la evolución tectosedimentaria de la cuenca. La continentalización generalizada en la cuenca, uno de los principales eventos ocurridos, tuvo lugar en el cron C16n.2n, hace ~36.1 Ma (Priabonense), una edad similar a la reportada en otros trabajos de la Cuenca Surpirenaica.

Paleomagnetismo en las rocas volcánicas y volcanoclásticas de la cuenca de Erillcastell (Pirineos Centrales)

A. Simón-Muzás¹, R. Soto², J. Gisbert³, C. García-Lasanta⁴, B. Housen⁴, A. Casas-Sainz³

¹ Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, Salamanca, España, asimu@usal.es

² Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC, Unidad de Zaragoza, España

³ Departamento de Ciencias de la Tierra, Geotransfer-IUCA, Universidad de Zaragoza, España

⁴ Geology Department, Western Washington University, Bellingham, WA, USA

La cuenca de Erillcastell, situada en los Pirineos Centrales (prov. Lleida), está rellena con rocas del Carbonífero superior-Pérmico y se extiende aproximadamente 12 km en dirección WNW-ESE. En esta cuenca se preservan depósitos volcánicos y volcanoclásticos emitidos durante los episodios magmáticos registrados a gran escala en ese periodo interestratificados con sedimentos lacustres y fluviales. La cuenca de Erillcastell, junto con la de Castejón-Laspaúles y Estac, están incorporadas en los mantos de cabalgamiento que constituyen el extremo sur de la Zona Axial a modo de *têtes plongeantes* (Séguret, 1972; Soriano *et al.*, 1996; Saura *et al.*, 2025). Esta configuración estructural es consecuencia de la compresión Alpina ocurrida durante el Cenozoico.

En los materiales de naturaleza ígnea se realizó un estudio paleomagnético en el laboratorio de paleomagnetismo de la Western Washington University (WWU) con el objetivo de aislar componentes paleomagnéticas primarias que pudiesen determinar la existencia o ausencia de rotaciones de eje vertical (VAR) a escala de cuenca. Para ello, en 15 estaciones de muestreo (137 especímenes) distribuidas a lo largo de toda la cuenca, se desmagnetizaron especímenes térmicamente (Th) y por campos alternos (AF). Las desmagnetizaciones Th se realizaron en pasos crecientes de temperatura hasta los 580°C o 680°C en un equipo TD48-DC. Las desmagnetizaciones de campos alternos se llevaron a cabo en pasos crecientes hasta los 120 mT en un equipo DTech D-2000. El valor de magnetización tras cada paso se midió con un magnetómetro criogénico SQUID. Complementariamente se realizaron estudios de la mineralogía portadora de la magnetización remanente natural: ciclos de histéresis y curvas de adquisición de la magnetización remanente isotérmica (IRM) y de *backfield*.

La mineralogía ferromagnética es principalmente la magnetita y la titanomagnetita ya que se registran caídas del valor de magnetización (Fig. 1A) a los 560°C y 580°C durante las desmagnetizaciones Th. Puntualmente se registran caídas a los 675°C. Las curvas de IRM y de *backfield* muestran saturación completa antes de alcanzar 1 T exceptuando las muestras M19 y M40. Estos resultados respaldan que, salvo en esas dos muestras donde domina un mineral de alta coercitividad como la hematita, la presencia de minerales de baja coercitividad como la magnetita son los responsables principales del comportamiento ferromagnético.

El análisis paleomagnético ha permitido aislar dos componentes paleomagnéticas. La componente de baja temperatura/bajo campo (CI) se registra por debajo de 310°C en los especímenes desmagnetizados por Th y por debajo de los 20 mT en los desmagnetizados por AF. Se ha registrado en 22 especímenes y, aunque en ocasiones es similar a la componente del campo magnético actual, presenta distribuciones aleatorias de forma generalizada. La componente de alta temperatura/alto campo (Ch) se ha podido aislar mediante desmagnetizaciones Th entre los 350°C -360°C hasta los 580°C-600°C-680°C (Fig. 1A). En los especímenes desmagnetizados por AF, está definida desde los 20 mT hasta los 100-120 mT.

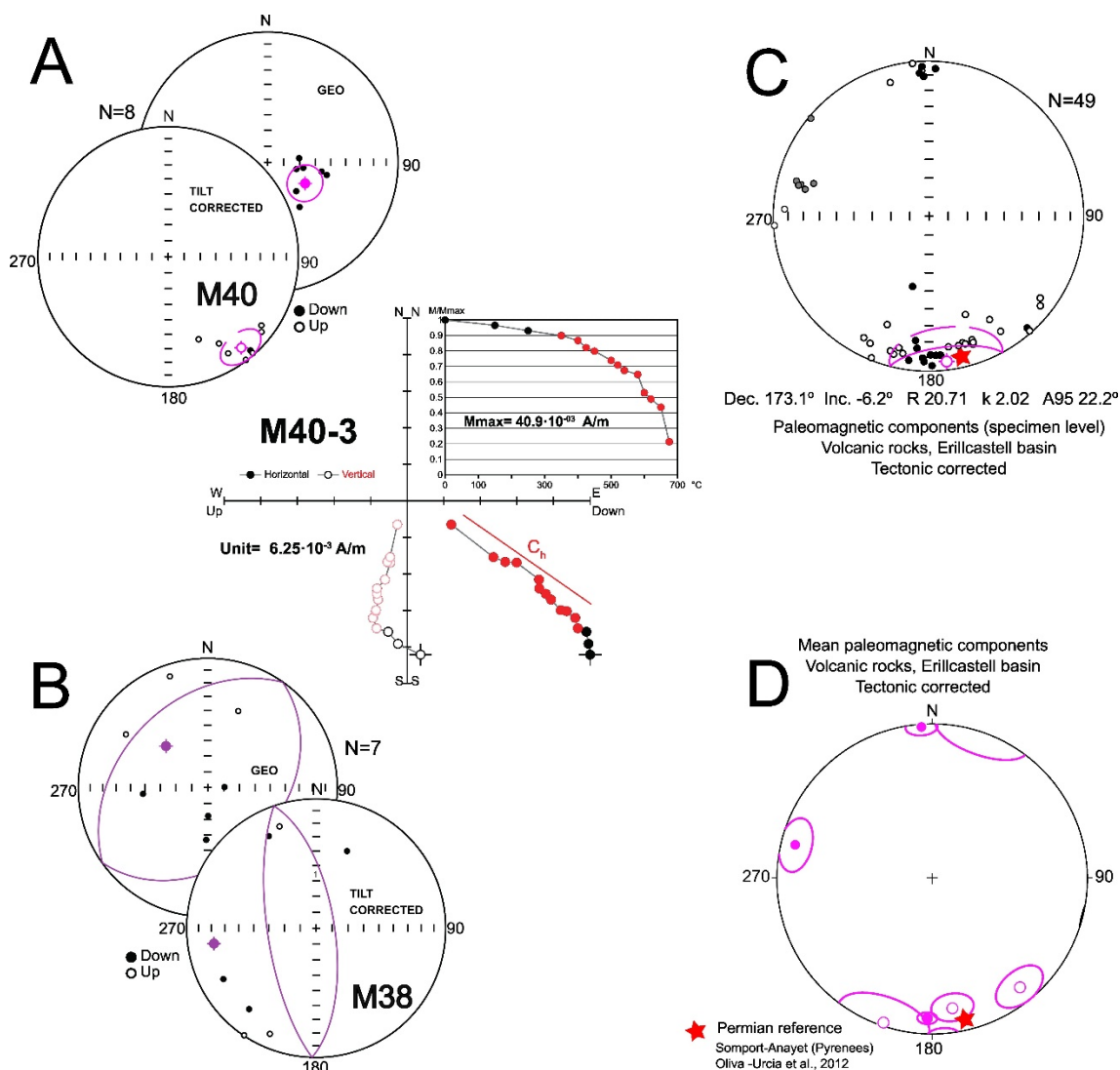


Figura 1. Resultados del estudio paleomagnético. A) Estereogramas (hemisferio inferior) mostrando las componentes paleomagnéticas Ch aisladas a nivel de espécimen y la componente promedio en la estación M40 in situ y tras la corrección tectónica. Diagrama ortogonal donde se observa la componente Ch aislada en el espécimen M40-3 y la caída del valor de magnetización a los 580°C y a los 675°C. B) Estereogramas (hemisferio inferior) mostrando las componentes paleomagnéticas Ch aisladas a nivel de espécimen en la estación M38. Se observa una distribución aleatoria que no permite definir un valor promedio para Ch. C) Estereograma (hemisferio inferior) mostrando las componentes Ch a nivel de espécimen en las estaciones donde se ha podido aislar tras la corrección tectónica. Para la obtención del valor promedio no se ha tenido en consideración los especímenes de la estación M4 que se orientan hacia el W y se escapan de la tendencia general. D) Estereograma (hemisferio inferior) mostrando los valores promedio de la componente Ch en las estaciones donde se ha podido aislar tras la corrección tectónica. Se observa como los valores promedio, excepto en un caso, se sitúan próximos a la referencia del Pérmico de los Pirineos.

A pesar de haberse aislado la componente Ch en un elevado número de especímenes (102 de los 137 analizados), tan sólo en 6 de las 15 estaciones analizadas las componentes aisladas a nivel de espécimen (Tabla 1; Fig. 1 C) se agrupan permitiendo definir una componente promedio estable (Fig. 1 A y B). En 5 de ellas, la componente Ch tras la corrección tectónica simple (restitución de la estratificación o del plano basal del depósito a la horizontal) se aproxima a la referencia del Pérmico en los Pirineos (Fig. 1 C y D) lo que parece indicar que se trata de la componente primaria. La determinación o no de rotaciones de eje vertical no se ha podido confirmar o descartar ya que se registran desviaciones de 19 y 29° entre estaciones situadas a 30-40 m de distancia.

Tabla1. Resultados paleomagnéticos a nivel de estación. NRM: magnetización remanente natural (A/m); e: desviación estándar de la NRM; Ch: componente paleomagnética Ch; método de desmagnetización (Th: térmico; AF: por campos alternos); n/N: n número de especímenes empleados para calcular el valor promedio del total N de especímenes desmagnetizados; D (BTC) and I (BTC): declinación e inclinación antes de la corrección tectónica; α_{95} y k son los parámetros estadísticos de la distribución fisheriana; So: plano de estratificación o plano basal de referencia (dip direction and dip, dirección de buzamiento y buzamiento).

Site	Demagnetizat. method						In situ (BTC)		α_{95}	k	S0 Dip dir.	S0 Dip	Corrected (BTC)	
	NRM (A/m)	std. Dev	C	Th (°C)	AF (mT)	n/N	D	I					D	I
M1	5.26E-02	2.24E-02	Ch	360-600	20-120	7/9	230.8	78.7	18.2	11.92	192	83	199.1	-1.8
M3	2.06E-02	2.58E-02	Ch	300-580	20-120	9/9	81.6	79.1	4.1	156.57	192	83	181.6	10.7
M4	3.33E-03	1.03E-03	Ch	310-600	20-120	8/9	292.5	-0.2	11.6	23.95	192	83	283.5	10.4
M18	4.70E-03	1.48E-03	Ch	350-640	20-120	8/9	297	63.6	6.5	73.77	22	85	355.7	2.2
M40	3.72E-02	1.96E-02	Ch	350-675	20-120	8/9	119.5	63	11.3	25.05	158	80	141.3	-11.2
M41	6.81E-02	5.54E-03	Ch	350-660	20-120	9/9	184.1	60.5	9.2	32.22	158	80	171.1	-16.5

Referencias

Saura, E., Marti, J., Cires, J., Clariana, P. (2025). The Permo-Carboniferous Basins of the Catalan Pyrenees (NE Iberia): An Example of Interacting Tectonics and Collapse Calderas. *TECTONICS*, 44(7).

Séguret, M. (1972). Étude tectonique des nappes et séries décollées de la partie centrale du versant sud des Pyrénées. *Université des Sciences et Techniques du Languedoc*, 2, 155.

Soriano, C. Martí, J., Casas J.M. (1996). Palinspastic reconstruction of Permo-Carboniferous basin involved in Alpine deformation: the Erill Castell-Estac basin, Southern Pyrenees, Spain. *Geologie en Mijnbouw*, 75, 43-55. Kluwer Academic Publisher. Netherlands.

Divulgación científica del Magnetismo Terrestre en España y Portugal (Red Maglber, 2021-2026)

R. Soto

Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Campus Aula Dei, Zaragoza
r.soto@igme.es

Resumen

Este trabajo recopila actividades de divulgación científica del Magnetismo Terrestre realizadas por miembros de la Red Maglber en los últimos 25 años (2001-2026). Destaca la importancia de acercar este campo a los diferentes niveles educativos y al público general y persigue visibilizar y favorecer la divulgación científica de los recursos ya existentes y generados por miembros de la Red.

Abstract

This work compiles scientific outreach activities on Earth Magnetism carried out by members of the Maglber Network over the last 25 years (2001–2026). It highlights the importance of bringing this field closer to different educational levels and the general public, and aims to make visible and promote the dissemination of developed resources created by members of the network.

Introducción

La divulgación científica en el ámbito del Magnetismo Terrestre desempeña un papel esencial para acercar a la sociedad un fenómeno clave para nuestro planeta. En este trabajo consideramos el Magnetismo Terrestre en sentido amplio y englobando disciplinas como el Geomagnetismo (estudio del Campo Magnético Terrestre), el Paleomagnetismo (estudio del registro magnético preservado en las rocas), el Magnetismo de Rocas (estudio de propiedades magnéticas de minerales y rocas) y el Magnetismo Ambiental (estudio de procesos medioambientales, paleoclimáticos y de contaminación atmosférica o urbana a través del estudio de magnetismo de rocas).

El interés por los fenómenos magnéticos se manifiesta desde edades tempranas, siendo frecuente observar la fascinación que generan en niños y adultos experiencias simples como la atracción entre imanes, el movimiento de una aguja imantada o la contemplación de auroras. Este carácter intuitivo y visual confiere al magnetismo terrestre un notable potencial como herramienta educativa y divulgativa. Su carácter interdisciplinar entre la Física y la Geología, sin embargo, con conceptos físicos y matemáticos complejos, dificulta su asimilación en determinados niveles educativos y su comprensión por parte de públicos no especializados. Es por ello que el acceso efectivo a estos conocimientos queda muchas veces restringido al mundo académico, limitando su difusión y su potencial impacto social. Así, resulta imprescindible promover estrategias de divulgación que faciliten la comprensión del Magnetismo Terrestre, sin perder rigor científico, con el objetivo de fomentar el interés por las Ciencias de la Tierra y mejorar la alfabetización científica de la sociedad.

Con el objetivo de visibilizar y favorecer la divulgación científica de los recursos ya existentes y generados por miembros de la Red Maglber (Red de Paleomagnetismo y

Magnetismo de rocas de España y Portugal; <https://maglber.geo3bcn.csic.es/Inicio.html>), este trabajo recopila parte de las actividades de divulgación científica realizadas por miembros de dicha Red desde el año 2001 al 2026 en el marco de su 25 aniversario.

Metodología

Para recopilar actividades de divulgación científica relacionadas con el Magnetismo Terrestre realizadas por miembros de la Red Maglber se envió, durante el mes de Mayo de 2026, una encuesta al Foro de discusión y lista de distribución en redIRIS PALEOMAG (<https://www.rediris.es/list/info/paleomag.html>). La encuesta tuvo carácter público y su participación fue voluntaria. En total se recogieron 24 respuestas.

Divulgación científica en Magnetismo Terrestre en el marco del *academic houseworking*

La divulgación científica es considerada por numerosos autores como una de las actividades que forman parte del denominado *academic housework* (trabajo doméstico académico), es decir, el conjunto de tareas necesarias para el funcionamiento de una institución académica (centros de investigación, universidades) que, sin embargo, reciben un reconocimiento limitado en los sistemas de evaluación científica (Heijstra *et al.*, 2017). Estas actividades, como la presencia en comités o grupos de trabajo, mentorización, organización de eventos o la divulgación científica, son tareas invisibles y poco reconocidas, restan tiempo a la investigación y, en gran medida, están asumidas de forma desproporcionada por mujeres (Heijstra *et al.*, 2017; O'Meara *et al.*, 2017). Respecto a las tareas de divulgación científica, éstas incluyen la organización de eventos, participación en medios, charlas públicas o actividades educativas. La participación en divulgación científica por género es difícil de cuantificar, ya que estas actividades suelen registrarse dentro de categorías más amplias del *academic housework*. En general, las mujeres académicas asumen una mayor carga de *academic housework* que los hombres, realizando aproximadamente entre 1 y 1,5 actividades adicionales al año (Guarino y Borden, 2017).

En el marco de la Red Maglber, la divulgación científica constituye, como en otras disciplinas, una actividad de *academic housework*, puesto que presenta un reconocimiento limitado en los sistemas de evaluación científica (acceso libre o promoción interna de plazas de empleo público, contratos de investigación *tenure track*, méritos de investigación, entre otros). Teniendo en cuenta los datos recogidos en la encuesta mencionada en el anterior apartado, de los miembros de la Red Maglber que han realizado actividades de divulgación científica relacionada con el Magnetismo Terrestre, un 54,2% son mujeres y un 45,8% hombres (Fig. 1).

Recursos de divulgación científica del Magnetismo Terrestre en la Red Maglber

La mayor parte de los miembros de la Red Maglber que han contestado a la encuesta han realizado actividades de divulgación científica del Magnetismo Terrestre, un 83,3%, frente a 16,7% de miembros que no han realizado. Dentro de ellas, el 58,3% de los miembros las ha realizado dirigidas al público general, mientras que un 33,3% las ha realizado dirigidas a estudiantes de Educación Secundaria y un 8,3% dirigidas a estudiantes de Educación Infantil y Primaria (Fig. 1).

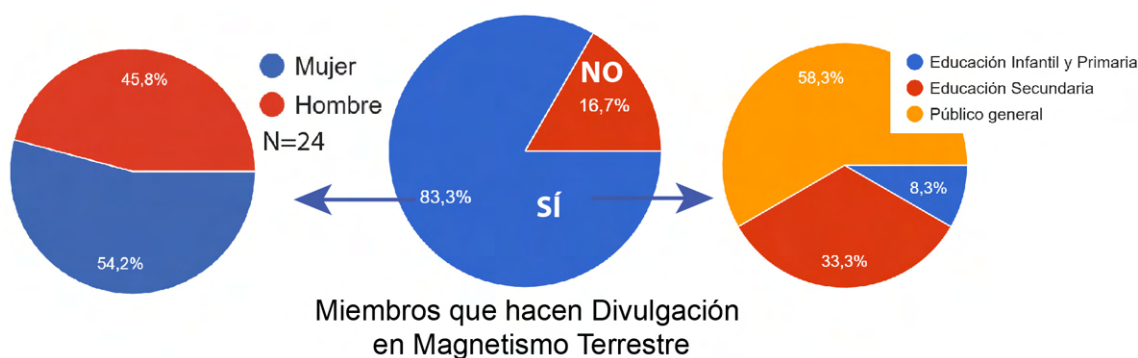


Fig. 1. Gráficas mostrando datos recogidos en las 24 encuestas realizadas.

Los recursos de divulgación científica en el ámbito del Magnetismo Terrestre desarrollados por miembros la Red Maglber comprenden un conjunto muy heterogéneo de iniciativas. A partir de las respuestas recopiladas en la encuesta realizada, estos recursos pueden agruparse en 3 categorías principales (ver Tabla 1 para aquellos disponibles online):

(1) actividades presenciales de divulgación científica, como charlas en centros educativos, talleres prácticos y participación en ferias y rutas científicas, que constituyen uno de los formatos más habituales.

(2) desarrollo de materiales didácticos y educativos, incluyendo presentaciones, guías, experimentos demostrativos y recursos adaptados a diferentes niveles formativos.

(3) actividades de comunicación digital y prensa, tales como páginas web, redes sociales, vídeos divulgativos o participación en medios de comunicación.

Otras iniciativas que no están contempladas en estas categorías principales son las de formación y mentoría, la realización de bases de datos, visualización de datos geomagnéticos o aplicaciones interactivas.

Referencias

Heijstra, T.M., Einarsdóttir, Þ., Pétursdóttir, G.M., Steinpórsdóttir, F.S. (2017). Testing the concept of academic housework in a European setting: Part of academic career-making or gendered barrier to the top? *European Educational Research Journal*, 16 (2–3): 200–214. DOI: 10.1177/1474904116668884.

O'Meara, K., Kuvaeva, A., Nyunt, G., Waugaman, C., Jackson, R. (2017). Asked more often: Gender differences in faculty workload in research universities and the work interactions that shape them. *American Educational Research Journal*, 54(6): 1154–1186. DOI: 10.3102/0002831217716767.

Guarino, C.M., Borden, V.M.H. (2017). Faculty service loads and gender: Are women taking care of the academic family? *Research in Higher Education*, 58(6): 672–694. DOI: 10.1007/s11162-017-9454-2.

Tabla 1. Recursos divulgativos en abierto y accesibles online realizados por miembros de la Red Maglber.

Categoría	Tipo de recurso	Ejemplos identificados y enlace
(1) Actividades presenciales	Eventos científicos	-Pint of Science: "Paleomagnetismo, más allá del cine de catástrofe". https://www.youtube.com/watch?v=90NCIznwvOo
(2) Materiales didácticos y educativos	Experimentos (material docente)	-“Crea tu propia brújula”; “Líneas de campo de un imán”; “Minerales magnéticos”; “Péndulo de Curie”; “Prospección magnética”; “El gran puzle de los continentes: reconstruyendo Pangea”. http://pc213fis.fis.ucm.es/divulga_experimentos.html
	Publicaciones didácticas	-Monografía “Magnetismo Terrestre”. Revista Enseñanza de las Ciencias de la Tierra (AEPECT). https://raco.cat/index.php/ECT/issue/view/25209
	Libros y capítulos	- Libro Blanco Geomagnetismo y Aeronomía. https://tienda.boe.es/detail.php?id=9788493893224
	Recursos docentes online	-“Geociencias en el colegio”; Viaje al núcleo externo: Donde nace el campo magnético de la Tierra; El campo magnético de la Tierra: de brújulas antiguas a satélites modernos; ¿Cuánto dura un día?; Geofísica a dos metros bajo tierra; Espectáculo de luces en el cielo: Auroras; ¿Dónde estaba mi pueblo hace 100 millones de años?; La datación arqueomagnética: cuando la arqueología encontró a la geofísica; Inversiones de polaridad del campo magnético de la Tierra; El campo magnético terrestre: origen y características; ¿Qué es magnético en la superficie de la Tierra?; Superhéroes magnéticos y su poder para conocer el campo magnético de la Tierra en el pasado; Una ventana al interior Magnético de la Tierra. https://www.igeo.ucm-csic.es/cultura-cientifica/geociencias-en-el-colegio/
(3) Comunicación digital y prensa	Videos divulgativos online	-“Paleomagnetismo. El concepto” https://www.youtube.com/watch?v=WLZobNYk4kA -¿Qué hace el Grupo de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos? https://www.youtube.com/watch?v=KBM_h2qes3w&t=348s -“Un nuevo método para medir el tiempo entre hogares”. https://www.youtube.com/watch?v=nmeHECoEnQY&t=345s -“ Así estiman con gran precisión el tiempo entre hogares prehistóricos con arqueomagnetismo”. https://www.youtube.com/watch?v=FFq_MEJ2Zgg -“ La letra...con música entra: Geofísica y Tectónica de placas”. https://www.youtube.com/watch?v=riv3eJocauA&t=81s -“ Construyendo una brújula”. https://www.youtube.com/watch?v=OZO4NtiA52U -“Minerales magnéticos”. https://www.youtube.com/watch?v=rmZLwoS4A28 -“ La temperatura de Curie y el campo magnético del pasado”. https://www.youtube.com/watch?v=IT-3Oz5a3cl -“ ¿Por qué se Volvió Loca la Brújula de Colón?” https://www.youtube.com/watch?v=8gQ2zlp_MSQ -“Entre auroras, brújulas y satélites: lo que el magnetismo terrestre revela sobre nuestro planeta”. https://www.youtube.com/live/sUswLsHu67k -“ Entrevista a Javier Pavón, geofísico experto en geomagnetismo”. https://www.youtube.com/watch?v=kh2DaTdweI8 -““ El campo magnético terrestre se debilita: la Anomalía del Atlántico Sur”. https://www.youtube.com/watch?v=iy0Q8P-8J_I&t=145s -“En busca del polo perdido”. https://www.youtube.com/watch?v=wmvwG3otWdw
	Documentales	-“Paleomagnetismo, la atracción irresistible” https://www.youtube.com/watch?v=n_uKssS5N5U
	Webs/canales Youtube	-Página de divulgación Divulga – PaleomagMadrid (UCM). http://pc213fis.fis.ucm.es/divulgacion_index.html -Canal Youtube Geotransfer. https://www.youtube.com/@geotransfer2703
	Podcasts	-“Las muestras más antiguas del magnetismo terrestre” https://www.ivoox.com/muestras-mas-antiguas-del-magnetismo-terrestre-18-05-24-audios-mp3_rf_129080572_1.html -“ El campo magnético de la Tierra se debilitó hace 2.000 años”. https://www.rtve.es/play/audios/a-golpe-de-bit/campo-magnetico-tierra-debilito-2000-anos/17073761/ -“ Movimiento del Polo Norte Magnético en los últimos 22.000 años”. https://cienciaes.com/entrevistas/2022/10/06/polo-n-magnetico/ -“ Y si las rocas hablaran”. https://www.spreker.com/episode/y-si-las-rocas-hablaran-carlos-ruiz-martinez-50110581 -“Estudios de Paleomagnetismo”. https://www.ivoox.com/estudios-paleomagnetismo-podcasttht-08x09-26may14-26-05-13-audios-mp3_rf_3163035_1.html
	Prensa	ABC, National Geographic, La presse, Muy Interesante, etc... http://pc213fis.fis.ucm.es/divulga_prensa.html

Remagnetización: obstáculo, enigma y oportunidad

J.J. Villalaín ¹, A.M. Casas ², P. Calvín ³, S. Torres. ⁴, B. Moussaid ⁵, R. Soto ⁶, C. García-Lasanta ⁷, B. Oliva-Urcia ², M.F. Bógalo ¹, V.C. Ruiz-Martínez ⁸, T. Román-Berdiel ², G. Fernández-González ¹, A. Gil-Imaz ², H. El Ouardi ⁹, L. Yenes ¹, M. Calvo ¹

¹ Dpto. Física, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, villa@ubu.es

² Dpto. Ciencias de la Tierra, Geotransfer-IUCA, Universidad de Zaragoza

³ Dpto. de Geología, Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca

⁴ Dpto. de Geología y Geoquímica, Fac. de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid

⁵ Laboratoire Bio Géosciences et Ingénieries des Matériaux, École Normale Supérieure, Université Hassan II de Casablanca (Marruecos)

⁶ Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Unidad de Zaragoza, CSIC.

⁷ Western Washington University, Bellingham, Washington (EE.UU.)

⁸ Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Univ. Complutense de Madrid

⁹ Department of Geology, Moulay Ismail University of Meknès (Marruecos)

El grupo de paleomagnetismo de la Universidad de Burgos (UBU), en colaboración permanente con el grupo Geotransfer de la Universidad de Zaragoza (UNIZAR) ha desarrollado un gran número de proyectos de investigación en los que las remagnetizaciones regionales juegan un papel central. En esta comunicación se presentarán sus principales contribuciones durante los últimos 25 años.

La magnetización remanente natural es habitualmente la suma de una magnetización primaria y magnetizaciones secundarias (remagnetizaciones), normalmente inestables y de origen viscoso. Sin embargo, en ocasiones las remagnetizaciones pueden ser muy estables a escala geológica y manifestarse en áreas muy extensas (remagnetizaciones regionales). Estos fenómenos son más frecuentes en áreas deformadas y en muchas ocasiones sustituyen totalmente la magnetización primaria. Se han propuesto principalmente dos mecanismos que explican la extensión y estabilidad de las remagnetizaciones: mecanismo termoviscoso y magnetización química. Mucho más complejo es determinar el mineral portador, su origen y, sobre todo, el mecanismo propagador. Los mecanismos más frecuentemente aceptados son la migración de fluidos orogénicos en regímenes compresivos o los procesos diagenéticos relacionados con el enterramiento en cuencas sedimentarias. Desde los orígenes de la técnica paleomagnética, las remagnetizaciones se han considerado una rémora para la interpretación de los datos y un obstáculo, a veces insalvable, para propósitos geocronológicos y tectónicos. Por ello se diseñaron test de estabilidad paleomagnética (prueba de pliegue entre otros) para identificarlas, dar garantías a las interpretaciones basadas en magnetizaciones primarias, o incluso datar e interpretar las magnetizaciones secundarias (Villalaín *et al.*, 1994).

En 2000 comenzó la colaboración entre el recién creado grupo de Paleomagnetismo de la UBU y el grupo de Geodinámica de la UNIZAR desarrollando un proyecto financiado por la Junta de Castilla y León que pretendía abordar la cinemática de la Placa Ibérica durante el Cretácico a partir de estudios paleomagnéticos en la Cuenca de Cameros. Los resultados demostraron que las series cretácicas de la cuenca mostraban únicamente una componente secundaria de edad cretácica que impedía alcanzar los objetivos propuestos. Sin embargo, de la necesidad se hizo virtud: dirigimos todo

nuestro interés al estudio de aquella remagnetización. La remagnetización resultó ser sintectónica, pero los test de pliegue incrementales no daban soluciones satisfactorias, por lo que se plantearon soluciones asimétricas al test de pliegue. En este trabajo (Villalaín *et al.*, 2003) se desarrolló por primera vez una técnica, basada en el análisis de círculos menores, para determinar los paleobuzamientos de las capas en el momento de la adquisición de la remagnetización. Se generaron así reconstrucciones palinspásticas de la geometría del borde de cuenca previa a la inversión. Estas permitieron separar qué parte de la deformación correspondía a la fase sin-rift y qué parte a la fase compresiva. En trabajos posteriores (Soto *et al.*, 2008; Casas *et al.*, 2009), el grupo perfeccionó la técnica utilizando el método de intersección de círculos menores para definir con precisión la dirección de remagnetización que se utilizaba como referencia. El grupo continuó el uso de la técnica de restitución a partir de direcciones de remagnetización en cuencas del norte de Iberia como Maestrazgo, Vasco Cantábrica, Cameros o Luistánica (Soto *et al.*, 2008; Casas *et al.*, 2009; Soto *et al.*, 2011; García-Lasanta *et al.*, 2017; Calvín *et al.*, 2023a). En todos los casos, las remagnetizaciones mostraban sistemáticamente polaridad normal, edad cretácica y permitían definir la geometría previa a la inversión de las cuencas. Además, las remagnetizaciones cretácicas se han utilizado para resolver otros problemas geológicos, como, p. ej., la edad y origen de las brechas de la base del Jurásico en la Cordillera Ibérica (Villalaín *et al.*, 2008).

La técnica para realizar reconstrucciones palinspásticas a partir de direcciones de remagnetización se fue consolidando y perfeccionando. La propuesta metodológica se realizó en Villalaín *et al.* (2015). Calvín *et al.*, (2017a) generan un código python (pySCu) que automatiza los análisis con círculos menores (cálculo de intersección de círculos menores y paleobuzamientos) y establecen criterios sobre la propagación de incertidumbres en los resultados finales. Además, en Calvín *et al.* (2020) se analizan las hipótesis de partida del método de reconstrucción y sus limitaciones en relación con la existencia de rotaciones de eje vertical o la falta de coaxialidad de las estructuras. El grupo de investigación decidió buscar contextos alternativos para estudiar remagnetizaciones similares a las ibéricas. En 2009 se realizó un estudio piloto en el Alto Atlas Marroquí, que, según la experiencia previa del grupo, presentaba condiciones óptimas para desarrollar remagnetizaciones regionales: entre otras, un importante desarrollo de cuencas extensionales jurásicas con potencias kilométricas. Además, la curva de deriva polar aparente (APWP) de la placa africana, con un movimiento muy amplio a lo largo del cretácico, representa una sólida referencia para la datación de direcciones paleomagnéticas. Finalmente, la complejidad de la historia tectónica del Alto Atlas, con actividad diapírica y magmática entre los regímenes extensional y compresivo de la cadena, representaba un reto para la aplicación de la técnica de restitución propuesta por el grupo. El estudio demostró que las formaciones jurásicas del Alto Atlas presentaban una remagnetización interpliegue con polaridad sistemáticamente normal y propiedades similares a las de las cuencas ibéricas. Este trabajo abrió una nueva línea de trabajo muy fructífera que dio contenido a tres proyectos de la Agencia Nacional de Investigación, tres tesis doctorales y una gran cantidad de publicaciones. Todos estos trabajos han demostrado que la remagnetización se extiende manteniendo las mismas propiedades magnéticas a lo largo de una gran área de 10000 km². Mediante la técnica de intersección de círculos menores se ha calculado la dirección de remagnetización con mucha precisión y su comparación con las direcciones esperadas a partir de la APWP de la placa africana condujo a una datación precisa de la remagnetización en 100 ± 5 Ma. Todo ello ha permitido aplicar nuestro método de reconstrucción para realizar reconstrucciones palinspásticas a 100 Ma en diferentes áreas de la cordillera resolviendo una gran cantidad de problemas en relación con la evolución tectónica de

las cuencas atlásicas (Torres-López *et al.*, 2014; Moussaid *et al.*, 2015; Torres-López *et al.*, 2016; Calvín *et al.*, 2017b; Calvín *et al.*, 2018a; Torres-López *et al.*, 2018; Moussaid *et al.*, 2024, Casas *et al.*, 2023, etc.). El último de los proyectos paleomagnéticos desarrollados en el Atlas fue mucho más ambicioso y abordó un muestreo paleomagnético con una densidad de muestreo sin precedentes, añadiendo 424 nuevas estaciones paleomagnéticas a las de los trabajos previos. Se han llegado a obtener 582 paleobuzamientos a la edad de la remagnetización (Villalaín *et al.*, 2023) que han permitido estudiar las principales estructuras del Alto Atlas Central y clasificarlas como diferentes modelos de evolución de cuencas (rift continental, tectónica salina, transtensión) e inversión (cabalgamientos, transpresión, etc.) (Casas *et al.*, 2023). Todo este trabajo, junto con otros enfoques como el análisis de ASM, magnetismo de las rocas o análisis de campos potenciales, se recoge en el libro *Tectonic Evolution of the Moroccan High Atlas: A Paleomagnetic Perspective* (Calvín *et al.*, 2023b). En la actualidad se están desarrollando modelos 3D a 100 Ma a partir de los paleobuzamientos.

Además, en los trabajos mencionados, así como en otros más específicos se ha abordado el problema del mecanismo de remagnetización, los minerales portadores, su tamaño de grano y la propagación del fenómeno (Calvín *et al.*, 2018b; Calvín *et al.*, 2018c; Calvín y Villalaín, 2020; Villalaín *et al.*, 2023; Calvín *et al.*, 2023c). En ellos se concluye que tanto las remagnetizaciones cretácicas de las cuencas mesozoicas Ibéricas como las del Alto Atlas son magnetizaciones químicas (ChRM) ligadas a la diagénesis por enterramiento durante la fase extensional. El mineral portador en calizas marinas es magnetita en estado monodominio estable (SSD), mientras que en las series continentales de lechos rojos es hematites. Los estudios de magnetismo de rocas y de anisotropía magnética en calizas remagnetizadas han permitido concluir que el proceso de remagnetización química implicó el crecimiento progresivo de magnetita en un espectro de tamaños de grano entre superparamagnético (SP) y SSD. Estos granos crecieron reemplazando cristales de pirita, siguiendo el campo de esfuerzos en el momento de la remagnetización. Se ha discutido mucho sobre la interpretación de la aparente sincronía entre las remagnetizaciones cretácicas Ibéricas y del norte de África. Se llegó a proponer un evento térmico a escala regional que actuó como catalizador de las remagnetizaciones. En la actualidad estamos explorando la hipótesis de un proceso de desbloqueo prolongado en el tiempo, de modo que la edad del registro magnético queda condicionada por la larga duración del supercrón normal del Cretácico.

Referencias

- Calvín, P., Villalaín, J. J., Casas-Sainz, A. M., Tauxe, L., Torres-López, S. (2017a). pySCu: A new python code for analyzing remagnetizations directions by means of small circle utilities. *Computers & Geosciences*, 109, 32–42.
- Calvín, P., Casas-Sainz, A. M., Villalaín, J. J., Moussaid, B. (2017b). Diachronous folding and cleavage in an intraplate setting (Central High Atlas, Morocco) determined through the study of remagnetizations. *Journal of Structural Geology*, 97, pp. 144–160.
- Calvín, P., Casas-Sainz, A. M., Villalaín, J. J., Moussaid, B. (2018a). Extensional vs. compressional deformation in the Central High Atlas salt province: A paleomagnetic approach. *Tectonophysics*, 734–735.
- Calvín, P., Villalaín, J. J., Casas-Sainz, A. M. (2018b). Anisotropic magnetite growth in remagnetized limestones: Tectonic constraints and implications for basin history. *Geology*, 46, 751–754.
- Calvín, P., Villalaín, J. J., & Casas-Sainz, A. M. (2018c). The carriers of AMS in remagnetized carbonates. Insights for remagnetization mechanism and basin evolution. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 282, 1–20.

- Calvín, P., Villalaín, J.J. (2020).** Disentangling the timing of chemical remagnetizations in carbonates. Case of the Central High Atlas basin (Morocco). *The IRM Quarterly*. Vol. 29 (4). 2-3.
- Calvín, P., Pueyo, E.L., Ramón, M.J., Casas-Sainz, A.M., Villalaín, J.J. (2020).** Analysing non-coaxial folding effects in the Small Circle Intersection method. *Geoph. J. Int.* 222, 940-955.
- Calvín, P., Oliva-Urcia, B., Kullberg, J.C., Torres-López, S., et al. (2023a).** Applying magnetic techniques to determine the evolution of reactive diapirs: A case study of the Lusitanian basin. *Tectonophysics* 868: 230088.
- Calvín, P., Casas-Sainz, A.M., Román-Berdiel, T., Villalaín J.J. (Eds.). (2023b).** Tectonic Evolution of the Moroccan High Atlas: A Paleomagnetic Perspective. *Springer Nature*, 646 pp.
- Calvín, P., Bógalo, M.F., Villalaín, J.J., et al. (2023c).** Magnetic Properties of the Jurassic Sedimentary Rocks of the Central High Atlas Affected by a Regional Chemical Remagnetization. In: P. Calvín, et al. (Eds.). *Tectonic Evolution of the Moroccan High Atlas*, 249-284.
- Casas, A.M., J.J. Villalaín, R. Soto, A. Gil-Imaz, et al. (2009).** Multidisciplinary approach to an extensional syncline model for the Mesozoic Cameros Basin. *Tectonophysics* 470 3–20.
- Casas, A.M., Villalaín, J.J., Román-Berdiel, T., et al. (2023).** Kinematics of Structures and Basin Evolution in the Central High Atlas. Constraints from AMS and Paleomagnetic Data. In: P. Calvín et al., (Eds.) *Tectonic Evolution of the Moroccan High Atlas*, Springer Nature, 487-646.
- García-Lasanta, C., Casas-Sainz, A., Villalaín, J.J., Oliva-Urcia, et al. (2017).** Remagnetizations used to unravel large-scale fold kinematics: A case study in the Cameros basin (Northern Spain). *Tectonics*, 36 (4), pp. 714-729.
- Moussaid, B., J.J.Villalaín, A. Casas-Sainz, H. El Ouardi, et al. (2015).** Primary vs. secondary curved fold axes: Deciphering the origin of the Aït Attab syncline (Moroccan High Atlas) using paleomagnetic data. *J. of Structural Geology*, 70, 65-77.
- Moussaid, B., Villalaín, J.J., El Ouardi, H., Casas-Sainz, A., et al. (2024).** The Taguelft syncline (Moroccan Central High Atlas) an example of extension-related mini-basin evidenced by paleomagnetic data. *Tectonophysics*, 874: 230232.
- Soto, R., J.J. Villalaín , A. M. Casas (2008).** Remagnetizations as a tool to analyze the tectonic history of inverted sedimentary basins: A case study from the Basque-Cantabrian basin (north Spain). *Tectonics*, Vol. 27, TC1017, 1- 16.
- Soto, R., A. M. Casas-Sáinz, J. J. Villalaín (2011).** Widespread Cretaceous inversion event in northern Spain: evidence from subsurface and palaeomagnetic data. *Journal of the Geological Society*, London, Vol. 168, 899-912.
- Torres López, S.; J.J. Villalaín, A.M Casas; H. El Ouardi; et al. (2014).** Cretaceous widespread remagnetization in Mesozoic sediments of the High Atlas (Morocco). A common origin for the Cretaceous remagnetizations in the western Tethys? *J. Geol. Soc. London*. 23:2013-107.
- Torres-López, S., Casas, A.M., Villalaín, J.J., El Ouardi, H., Moussaid, B. (2016).** Pre-Cenomanian vs. Cenozoic folding in the High Atlas revealed by palaeomagnetic data. *Terra Nova*, 28 (2), pp. 110-119.
- Torres-López, S., Casas, A.M., Villalaín, J.J., Moussaid, B., et al. (2018).** Evolution of the Ridges of Midelt-Errachidia Section in the High Atlas Revealed by Paleomagnetic Data. *Tectonics*, 37 (9), pp. 3018-3040.
- Villalaín, J.J.; Osete, M.L.; Vegas, R.; García-Dueñas, V. Y Heller, F. (1994).** Widespread neogene remagnetization in Jurassic limestones of the south-iberian paleomargin (Western Betics, Gibraltar Arc). *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 85, 15- 33.
- Villalaín, J. J., Fernández-González, G., Casas, A. M., Gil-Imaz, A. (2003).** Evidence of a Cretaceous remagnetization in the Cameros Basin (North Spain): implications for basin geometry, *Tectonophysics*, 377 (1-2), 101- 117.
- Villalaín, J.J., Casas-Sainz, A.M., Soto, R. (2015).** Reconstruction of inverted sedimentary basins from syn-tectonic remagnetizations. A methodological proposal. *Geological Society S. P.*, 425, pp. 233-246.
- Villalaín, J.J. Calvín, P. Falcón, I. et al. (2023).** Paleomagnetism of the Central High Atlas. The Widespread Cretaceous Remagnetization and Structural Implications. In: P. Calvín, et al. (Eds.) *Tectonic Evolution of the Moroccan High Atlas*, pp. 285-346.

Financiado por el proyecto PID2024-159094NB-I00 (MICIU /AEI /10.13039/501100011033 / FEDER, UE)

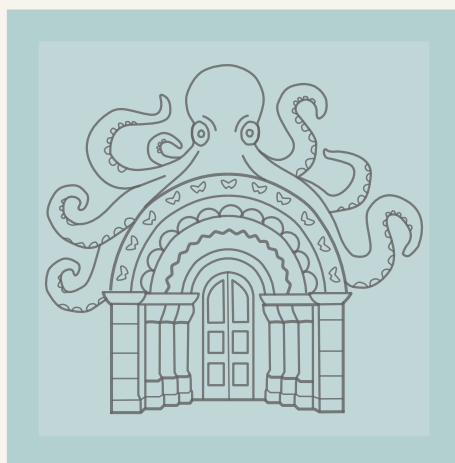
LISTADO DE PARTICIPANTES DEL CONGRESO MAGIBER 2026

Aitor Aranguren Iriarte	aitor.aranguren@ehu.eus	Universidad del País Vasco
Ivan Asensio Cantero	ivan.asensio@ehu.eus	Universidad del País Vasco
Elisabet Beamud Amorós	betbeamud@ub.edu	Universidad de Barcelona - CSIC
Manuel Calvo Rathert	mcalvo@ubu.es	Universidad de Burgos
Antonio Casas Sainz	acasas@unizar.es	Universidad de Zaragoza
Claudia Cruz	claudiacfcruz@gmail.com	Universidade do Porto
Irene de Felipe Martín	idefelipe@usal.es	Universidad de Salamanca
Eric Font	efont@uc.pt	Universidade de Coimbra
Miguel Garces Crespo	mgarces@ub.edu	Universidad de Barcelona
Juan Cruz Larrasoña Gorosquieta	jc.larra@igme.es	Centro nacional IGME-CSIC
Raúl Lázaro González	raul.lazaro@unizar.es	Universidad de Zaragoza
Belén Oliva Urcia	boliva@unizar.es	Universidad de Zaragoza
Javier Pavón Carrasco	fjpavon@ucm.es	Universidad Complutense de Madrid
Emilio Pueyo	unaim@igme.es	Centro nacional IGME-CSIC
Alexandra Ribeiro da Mota	up201100453@fc.up.pt	Universidade do Porto
Rute Rodrigues dos Santos	rute2rodrigues@gmail.com	Universidade de Coimbra
Lidia Rodríguez Méndez	lidia.rodriguez@ehu.eus	Universidad del País Vasco
Teresa Román Berdiel	mtdirb@unizar.es	Universidad de Zaragoza
Elisa María Sánchez Moreno	emsanchez@ubu.es	Universidad de Burgos
Helena Sant'Ovaia	hsantov@fc.up.pt	Universidade do Porto
Pablo Sierra Campos	p.sierra@igme.es	Centro nacional IGME-CSIC
Ana Simón Muzás	asimu@usal.es	Universidad de Salamanca
Ruth Soto Marín	r.soto@igme.es	Centro nacional IGME-CSIC
Ana Marta Vasques Gonçalves	ana.goncalves@fc.up.pt	Universidade do Porto
Néstor Vegas Tubía	nestor.vegas@ehu.eus	Universidad del País Vasco
Juan José Villalaín	villa@ubu.es	Universidad de Burgos

Maglber 2026

Out-of-Phase

25 ANIVERSARIO



Melide, A Coruña

PATROCINADORES

