

## **INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN BARCLIM BR-23/5 - La Formación Tudela en las Bardenas Reales de Navarra: primer registro paleoclimático de alta resolución del Óptimo Climático del Mioceno en Europa**

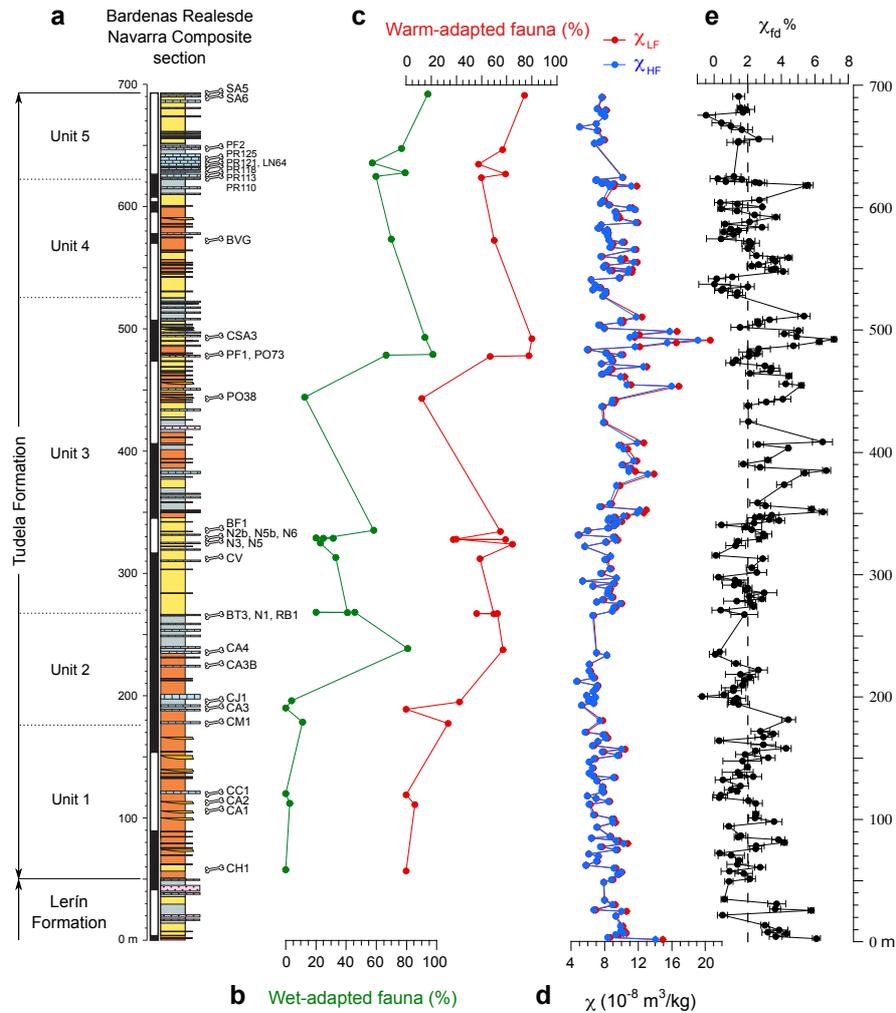
El desarrollo del proyecto ha estado condicionado por varios factores, entre los que destaca sobremanera la enfermedad grave y posterior fallecimiento de María Pilar Mata Campo, especialista en geoquímica y mineralogía del equipo de investigación. Estas circunstancias han hecho que varias de las actividades previstas inicialmente hayan sufrido retrasos o, en el caso del trabajo de campo, no se haya realizado finalmente. Esto ha condicionado, a su vez, que algunos de los análisis previstos inicialmente no se hayan obtenido, y que la interpretación de algunos resultados no se haya podido terminar. En cualquier caso, y a pesar de las circunstancias adversas sobrevenidas, se constata un importante grado de consecución del proyecto, que ha culminado en varios productos de investigación (e. g., una presentación de trabajo, dos comunicaciones a congresos científicos y una publicación científica actualmente en revisión). A continuación se detallan las actividades llevadas a cabo hasta la fecha, así como el grado de consecución de las mismas, respecto al plan de trabajo y cronograma planteados inicialmente:

**1) Pesado de las muestras:** se han pesado un total de 311 muestras (provenientes de los estudios magnetobioestratigráficos realizados en la zona hasta la fecha) con el fin de normalizar las propiedades magnéticas respecto a la masa. Durante el desarrollo de la actividad se ha aprovechado para hacer, a partir de la litología, color, textura y estructuras sedimentarias de las muestras, una identificación más detallada de lo inicialmente previsto de su ambiente deposicional (lago carbonatado, zona palustre y zona distal de abanico aluvial). Estos nuevos datos han sido cruciales de cara a hacer una interpretación sedimentológica detallada del conjunto de las rocas aflorantes en las Bardenas Reales y de contextualizar el significado paleoclimático de las propiedades magnéticas y geoquímicas analizadas en el proyecto. (Actividad completada al 100% durante el primer mes del proyecto, en la UPNA).

**2) Propiedades magnéticas y geoquímicas no invasivas del conjunto de las muestras:**

**2a)** Se ha medido la **susceptibilidad magnética** de todas las muestras, a dos frecuencias (470 y 4700 Hz), con la ayuda de un susceptómetro MS3 acoplado a un sensor MS2D (ambos de Bartington Instruments Ltd.). Esto ha permitido realizar una estimación tanto de la cantidad de nanopartículas magnéticas con un tamaño de grano superparamagnético (SP, <25 nm) ( $\chi_{fd}$ ) como de sus variaciones relativas ( $\chi_{fd}\%$ ) respecto al total de partículas magnéticas (Figura 1). Con el fin de corroborar los resultados, la susceptibilidad a doble frecuencia (976 y 15616 Hz) ha sido medida también con la ayuda de un susceptómetro MFK2 (Agico). La congruencia y robustez de las medidas (Figura 2) es notable debido a que derivan de la media de entre 3 (en el caso del MFK2) y 5 (en el caso del MS3-MS2B) medidas por muestra. Con posterioridad, se ha medido la **IRM** de las muestras a campos de 0.08, 1.2 y 2.7 T en lugar de los 0.1, 0.3 y 1.2 T

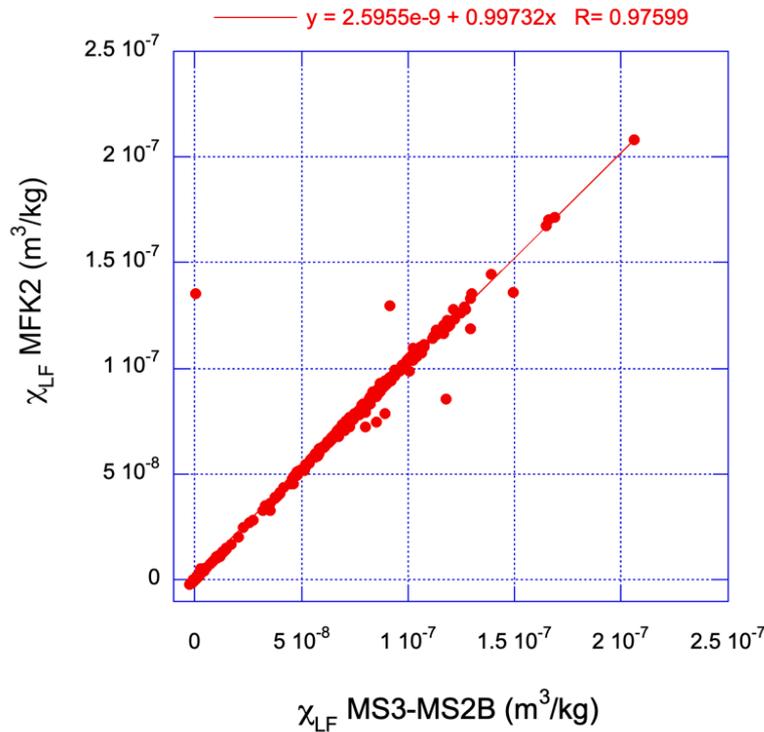
previstos inicialmente. Ello es debido a que estos campos permiten estimar no sólo la concentración de la hematites como estaba previsto, sino también la de la goetita, cuyo significado paleoclimático difiere del de la hematites. Para ello, se ha usado un magnetómetro criogénico SRM755 (2G Enterprises) y un imanador de pulso IRM10-30 (ASC Scientific). (Actividad completada al 100% durante los meses 1-2 y 10-11 del proyecto, en la UPNA y el Laboratorio de Paleomagnetismo del Geo3BCN-CCiTUB de Barcelona).



**Figura 1.** Variaciones estratigráficas de la susceptibilidad magnética medida a alta ( $\chi_{HF}$ ) y baja ( $\chi_{LF}$ ) frecuencia y del parámetro  $\chi_{fd}\%$ , que se han representado junto con la columna estratigráfica compuesta de las Bardenas Reales y los datos paleoecológicos obtenidos en la zona a partir del estudio de los micromamíferos fósiles. La línea discontinua asociada al parámetro  $\chi_{fd}\%$  indica las posiciones con cantidades apreciables ( $\chi_{fd}\%>2$ ) de partículas SP formadas por procesos edáficos.

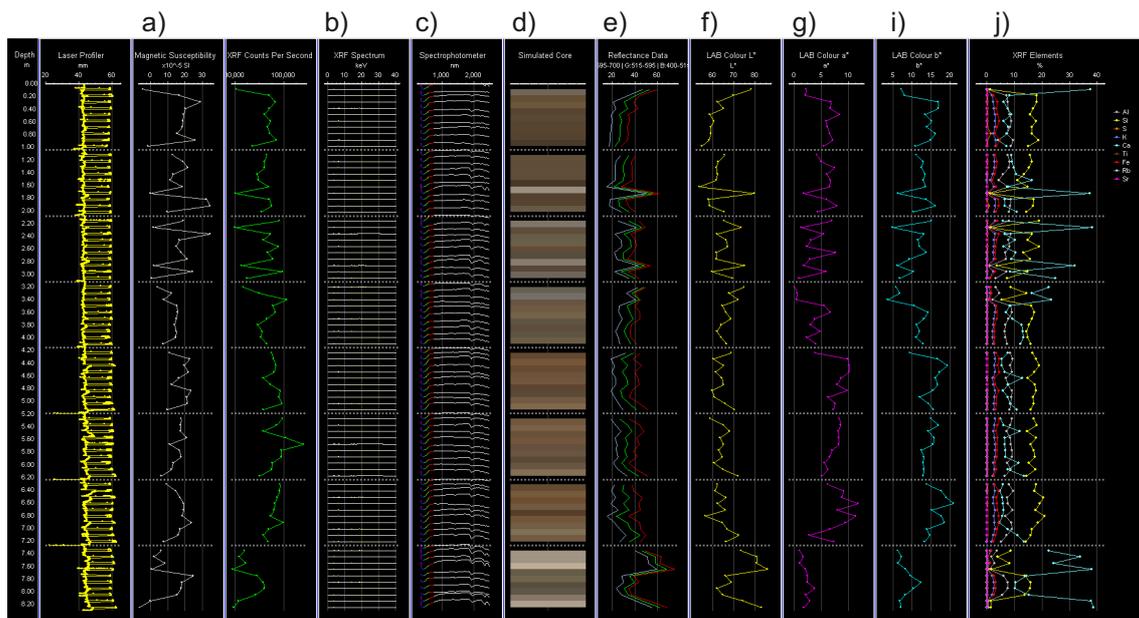
**2b)** Se ha medido la **fluorescencia de rayos-X (XRF) portátil** de todas las muestras, utilizando un BoxScan que lleva integrado un sensor pXRF (Olympus Vanta) (Figura 3). Se ha puesto especial énfasis en analizar la relación entre la cantidad de Ti y Al en las muestras estudiadas, que muestra valores muy constantes entre 0.04 y 0.05 que demuestran una procedencia exclusivamente pirenaica para el material detrítico de las muestras estudiadas. Asimismo, la

relación entre el Rb y el Sr muestra variaciones grosso-modo congruentes con las mostradas por el parámetro  $\chi_{fd}\%$ , de manera que parecen señalar los periodos en los que los procesos edáficos fueron más importantes. (Actividad completada al 100% durante el mes 7 del proyecto, en la Litoteca del IGME-CSIC en Peñarroya-Pueblonuevo, Córdoba).



**Figura 2.** Ejemplo de correlación entre la susceptibilidad magnética medida a baja frecuencia ( $\chi_{LF}$ ) en los equipos MS3-MS2B y MFK2.

**2c)** Se han hecho los análisis de **espectroscopía de infrarrojos** de todas las muestras, tanto del rango visible-infrarrojo cercano (VNIR) como de onda corta (SWIR) (300-2500 nm), utilizando un sensor TerraSpec/LabSpec integrado en el mismo BoxScan disponible en la Litoteca del IGME en Peñarroya. El análisis automatizado de las muestras ha permitido hacer una primera estimación de la composición mineralógica de las muestras estudiadas; cabe comentar, en cualquier caso, que existen todavía algunas incertidumbres en lo que se refiere a la cuantificación de los minerales identificados a partir de la señal VNIR y SWIR, por lo que no se dispone todavía de una tabla con la abundancia relativa de los distintos minerales presentes en las rocas. Entre éstos destacan, por su significado paleoambiental, la hematites y la goetita (marcadoras de condiciones relativamente más áridas y húmedas, respectivamente). En cualquier caso, las nuevas medidas de IRM realizadas van a permitir establecer las variaciones relativas entre las concentraciones de ambos minerales, por lo que su significado paleoclimático va a poder ser examinado con más detalle. (Actividad completada al 100% durante el mes 7 del proyecto, en la Litoteca del IGME-CSIC en Peñarroya-Pueblonuevo, Córdoba).

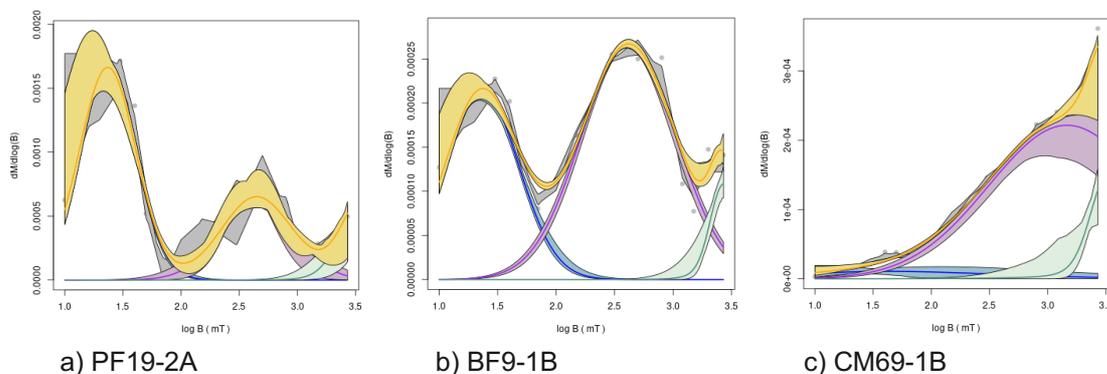


**Figura 3.a** Ejemplo de las medidas de una de las colecciones de muestras de las Bardenas Reales realizadas con el BoxScan en la litoteca del IGEM-CSIC en Peñarroya-Pueblonuevo (Córdoba). El equipo proporciona el espectro de XRF (b), una estimación de los principales elementos identificados (j), el espectro VNIR y SWIR (c), una estimación cuantitativa del color de las muestras obtenida a partir de los datos de reflectancia (d-i) y la susceptibilidad magnética normalizada por el volumen (a).

**3) Propiedades magnéticas y geoquímicas de muestras seleccionadas y calibración de los datos obtenidos mediante técnicas no invasivas:** a partir de la interpretación conjunta de los datos obtenidos en las actividades anteriores para todo el conjunto de muestras, se han seleccionado 20 muestras representativas de la variabilidad composicional, geoquímica y magnética registrada. Debido a que el análisis paleoclimático está basado en la estimación de la intensidad de los procesos edáficos sufridos por los materiales estudiados con posterioridad a la sedimentación y con anterioridad a su enterramiento, para este fin se han seleccionado sólo lutitas de origen aluvial distal que fueron acumuladas y alteradas únicamente en condiciones subaéreas. Se han descartado, por tanto, no sólo calizas y margas lacustres/palustres alteradas en condiciones subaéreas, sino también lutitas de origen aluvial distal alteradas en condiciones de lámina de agua. Entre las propiedades medidas para estas 20 muestras seleccionadas destacan:

**3a) Adquisición detallada de la IRM:** se ha medido la IRM a 15 campos de intensidad creciente con un espaciado logarítmico, y se ha procedido a la identificación de componentes utilizando el software Max UnMix (<http://shinyapps.its.carleton.edu/max-unmix/>). Es importante destacar que estas medidas no son destructivas, de manera que se han realizado con las muestras que ya estaban disponibles. Se ha constatado la presencia de magnetita, hematites y goetita en todas las muestras, si bien la proporción relativa entre ellas cambia entre las distintas muestras (Figura 4). De modo preliminar, parece haber una relación inversa entre el contenido en partículas SP (parámetro  $\chi_{fd}$ %) y el de hematites y goetita, lo cual sugiere que la formación edáfica de estos

minerales ocurre a expensas de la destrucción de partículas SP. Esta relación ha de ser corroborada por otros resultados, pero se considera de suma importancia para interpretar correctamente los parámetros magnéticos analizados en términos paleoclimáticos. (Actividad completada al 100% durante el mes 10 del proyecto, en el Laboratorio de Paleomagnetismo del Geo3BCN-CCiTUB de Barcelona).



**Figura 4.** Ejemplo de identificación de componentes de la IRM en varias muestras de las Bardenas Reales representativas de contenidos altos (muestra PF19-2A,  $\chi_{fd}\% < 1$ ), intermedios (muestra BF9-1B,  $2 < \chi_{fd}\% < 4$ ) y bajos (muestra CM69-1B,  $\chi_{fd}\% > 4$ ) en partículas SP formadas por procesos pedogénicos. Se observa como las muestras con contenidos bajos en estas partículas muestran una contribución relativa de hematitas (componente morada) y goetita (componente verde) más alta (CM69-1B), mientras que las que tienen contenidos más altos en partículas SP muestran un predominio de magnetita (componente azul) (PF19-2A) y las que tienen contenidos intermedios muestran una contribución comparable de los tres minerales (BF9-1B). Los puntos y franja grises representan los datos de IRM y su suavizado, mientras que la franja amarilla muestra el ajuste de los datos en base a la contribución de tres componentes que señalan la magnetita (franja azul), hematitas franja morada) y goetita (franja verde).

**3b) Medida de las propiedades magnéticas a baja temperatura:** estas medidas implican la manipulación y alteración de las muestras disponibles, de manera que se pensaban realizar, con el fin de no destruir las muestras paleomagnéticas que se dejan como archivo del registro sedimentario estudiado, con nuevo material obtenido en la posición estratigráfica correspondiente a las muestras seleccionadas. Dicho trabajo de campo se ha ido postponiendo en vistas de la enfermedad grave sufrida por nuestra compañera, y al final no ha sido llevado a cabo tras su posterior fallecimiento. (Actividad no completada).

**3c) Análisis de difracción de rayos-X:** al igual que las propiedades magnéticas a baja temperatura, estas muestras dependían de la obtención de nuevo material; en ausencia del mismo, no se han llevado a cabo. (Actividad no completada).

**3d) Análisis de fluorescencia de rayos-X (XRF) convencional:** como en los dos casos anteriores, la falta de nuevo material ha imposibilitado la realización de estos análisis. (Actividad no completada).

**4) Interpretación conjunta de datos:** dicha interpretación se ha llevado a cabo en dos fases. En primer lugar, se han examinado las variaciones en la cantidad relativa de partículas SP como indicadores de la intensidad de los procesos

edáficos a lo largo del tiempo. La comparación de estos resultados junto con la información sedimentológica y paleoecológica derivada de las faunas de micromamíferos, indica que los procesos edáficos no muestran una intensidad más alta durante el Óptimo Climático del Mioceno (OCM, hace 17-15.5 millones de años), lo cual parece ir en contra de lo identificado por otros autores en zonas de Asia o América (Figura 5). La explicación parece residir en que la formación de partículas SP no sigue una relación lineal con las condiciones de temperatura y humedad cuando estas sobrepasan un umbral determinado, lo cual es consistente con las condiciones climáticas subtropicales que prevalecían en la Península Ibérica durante el OCM. En cualquier caso, tanto los datos sedimentológicos como paleoecológicos indican un aumento progresivo de la humedad y temperatura asociados al OCM, lo cual apunta a cambios lentos en la distribución de las corrientes marinas a nivel global como principal mecanismo desencadenante del óptimo climático (Figura 5). Estos resultados han sido discutidos en las Jornadas Técnicas del Departamento de Riesgos Geológicos y Cambio Global del IGME-CSIC (celebradas en Enero del 2024 en Madrid), y han sido presentados en el *XIII Maglber – Magnetism in Iberia; Results and New Frontiers*, (celebrado en Julio de 2023 en Oporto, Portugal). Asimismo, han sido objeto de una publicación científica que ha sido enviada recientemente al *Journal of Iberian Geology* para su publicación (ver siguiente apartado). En segundo lugar, se ha constado que los datos geoquímicos (relación Ti/Al) señalan una procedencia exclusivamente pirenaica para el material terrígeno de los materiales estudiados, lo cual minimiza los factores que pueden alterar el significado paleoclimático de los datos magnéticos y geoquímicos obtenidos. Además, la relación Rb/Sr ha permitido corroborar la robustez de las medidas magnéticas (parámetro  $\chi_{fd}\%$ ) como indicadoras de la intensidad de los procesos edáficos. Un avance significativo ha sido la posibilidad de establecer las abundancias relativas de hematites y goetita, cuya formación por procesos edáficos parece ocurrir a expensas de la destrucción de partículas SP. Esto podría explicar por qué el contenido en SP no muestra una relación clara con las condiciones climáticas asociadas al OCM: un aumento en la temperatura y humedad (ya altas de por sí en un contexto subtropical) habría dado lugar a la transformación de las partículas SP en hematites y/o goetita (Figura 5), lo que explicaría su menor relevancia durante el pico del OCM. Estos datos se están tratando en la actualidad y se van a presentar en el XI Congreso Geológico de España que se va a realizar a principios de julio en Ávila (con la consiguiente publicación de la comunicación en el próximo volumen de Geotemas). Se espera que, en combinación con el resto de analíticas que quedan pendientes de ser realizadas (puntos 3c-d), arrojen nueva luz sobre la evolución climática de la zona durante el OCM una vez se establezcan y comparen las proporciones relativas entre hematites y goetita (relacionada con condiciones más áridas y húmedas, respectivamente) con las de las partículas SP. Es de esperar que este trabajo culmine en una nueva publicación científica adicional que será enviada a una revista internacional de prestigio del ámbito de las geociencias, previsiblemente a lo largo del año 2025. Cuando estén todos los datos interpretados y éste último trabajo enviado a publicar, se preparará un resumen divulgativo de los resultados finales para alguna revista o plataforma online de divulgación (e. g., The Conversation, <https://theconversation.com/es>). (Actividad completada al 100% durante los meses 2 y 7-12 del proyecto).

5) Redacción y envío de una publicación científica que recoja los principales resultados del proyecto: como se ha comentado anteriormente, esta tarea ha culminado exitosamente con el envío de un trabajo a la revista *Journal of Iberian Geology*, indexada en la base de datos *Web of Science* (FI 2023: 1.3), que recoge varias de las principales comunicaciones presentadas en el *XIII Maglber – Magnetism in Iberia; Results and New Frontiers*, celebrado en Julio de 2023 en Oporto (Portugal). (Actividad completada al 100% durante los meses 10 y 12 del proyecto). La publicación está en proceso de revisión, pero la calidad de los afloramientos y del registro sedimentario de las Bardenas Reales, así como de los datos obtenidos, invitan a pensar que verá la luz con modificaciones menores-moderadas (previsiblemente hacia finales del presente año)

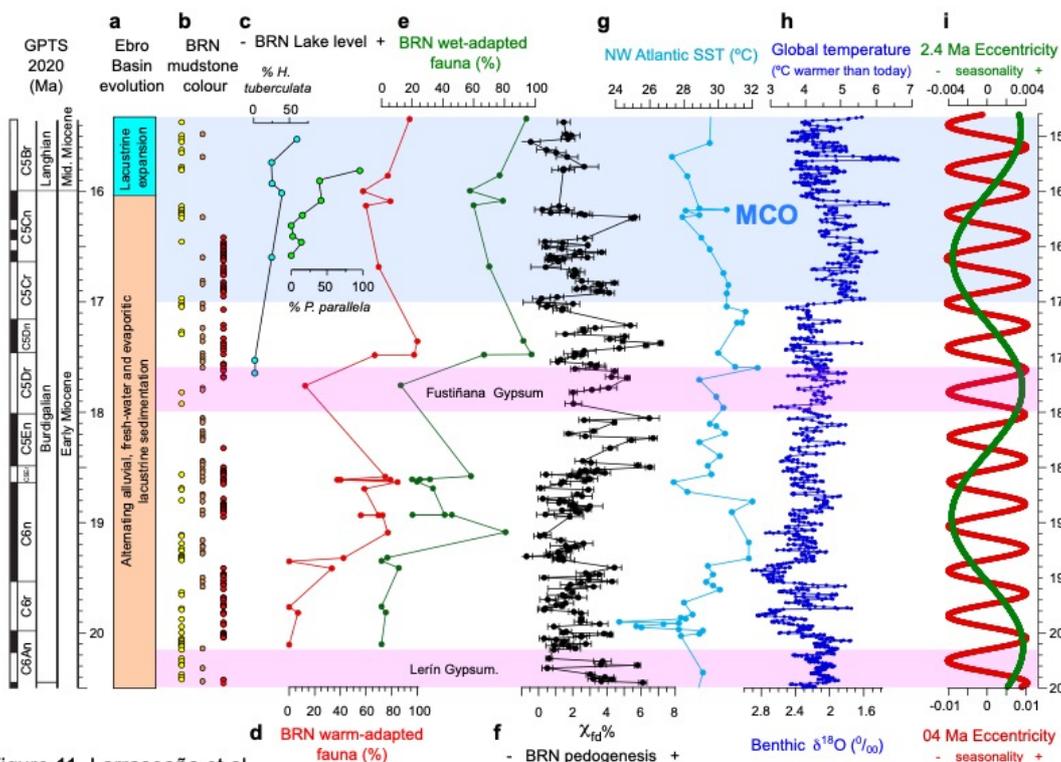


Figure 11. Larrasoña et al.

**Figura 5.** Resumen de los datos obtenidos en el proyecto a partir de la comparación de las propiedades magnéticas (f) con el resto de indicadores sedimentológicos (a, b) y paleoambientales obtenidos en las Bardenas Reales a partir del registro fósil de ostrácodos y carofitas (c) y micromamíferos (c, e). Todos los datos se han representado en función de la edad de los materiales y en paralelo a datos paleoclimáticos previos que aportan información sobre las condiciones climáticas a nivel continental (g) y global (h) durante el comienzo y pico del Óptimo Climático del Mioceno (MCO). Se observa como los datos sedimentológicos y paleoecológicos indican un aumento progresivo en las condiciones de temperatura y humedad que van en consonancia con la evolución del MCO. No se observa lo mismo para las variaciones de la intensidad de los procesos edáficos, que parecen estar más relacionados con la amplitud de la variabilidad climática (i) y la formación de secuencias evaporíticas en la zona. Figura tomada del trabajo enviado a publicar en *Journal of Iberian Geology*.

## Resultados de la investigación:

Larrasoaña, J.C., Suarez-Hernando, O., Beamud, E., Garcés, M., Pérez-Landazábal, J.I., Gómez-Polo, C., Ruiz-Sánchez, F.J., Mata, M.P., Murelaga, X. (2024). Calibrating lower-middle Miocene mammal faunas and unravelling climate change during the Miocene Climate Optimum; the Bardenas Reales de Navarra record (Ebro basin, NE Iberian Peninsula). *Journal of Iberian Geology*, under review.

Larrasoaña, J.C., Suarez-Hernando, O., Pérez-Landazábal, J.I., Beamud, E., Gómez-Polo, C., Garcés, M., Ruiz-Sánchez, F.J., Mata, M.P., Murelaga, X. (2023). Are magnetic enhancement mechanisms of Cenozoic alluvial Iberian sediments similar to those affecting the Chinese loess? Insights from the Miocene Tudela Formation (Bardenas Reales de Navarra, Ebro basin. XIII Maglber – Magnetism in Iberia; Results and New Frontiers, 25-28 de Julio, Oporto (Portugal). *Book of Abstracts*, 73-74.

Larrasoaña, J.C., Pérez-Landazábal, J.I., Gómez-Polo, C., Garayo, E., Beamud, E., González-Blázquez, J., Mata, M.P., Murelaga, X. (2024). Propiedades magnéticas y geoquímicas de lutitas aluviales de las Bardenas Reales de Navarra (Mioceno inferior y medio, Cuenca del Ebro); resultados iniciales e implicaciones paleoclimáticas. XI Congreso Geológico de España, 2-6 de Julio, Ávila. *Geotemas*, en prensa.