

Propiedades magnéticas de los sedimentos de tipo estuarino. El caso de las Rías Baixas

Magnetic properties of estuarine-like sediments. The study case of the Galician Rías

D. REY¹, N. LÓPEZ-RODRÍGUEZ¹, B. RUBIO¹, F. VILAS¹, K. MOHAMED¹,
O. PAZOS¹ Y M. F. BÓGALO²

¹ Dep. Xeociencias Mariñas e Ordenación do Territorio. Universidade de Vigo,
36200 Vigo (Spain). Fax: 986 812556. danirey@vigo.es

² Dep. Física Aplicada. Universidad de Burgos, 09006 Burgos (Spain).

RESUMEN

Este trabajo establece la utilidad de la susceptibilidad magnética como indicador de la influencia marina y evolución diagenética en sedimentos costeros de las Rías Baixas. Para ello se investigó la variabilidad geográfica de la susceptibilidad en 200 muestras de sedimentos marinos superficiales en las Rías de Vigo y Pontevedra. Su variabilidad vertical se estudió en 80 muestras de tres testigos de entre 60 y 90 cm de longitud extraídos en la Ría de Pontevedra. La susceptibilidad de las muestras superficiales aumenta progresivamente hacia mar abierto, y a medida que nos alejamos de las zonas de mayor influencia continental, estando relacionada con la textura y composición del sedimento, y por tanto, con su procedencia. Los testigos, más homogéneos litológicamente, mostraron una disminución muy importante de la susceptibilidad con la profundidad, estando ésta asociada a la evolución diagenética del sedimento. Para estudiar mejor estos procesos, se determinó la composición elemental y mineralógica, y además se midieron otras propiedades magnéticas de muestras representativas. Estos resultados se analizaron conjuntamente con los datos sedimentológicos disponibles, lo que permitió establecer que la variabilidad de

la susceptibilidad dependía de tres factores principales: (a) procedencia y origen de los sedimentos, (b) régimen hidrodinámico de la zona y (c) presencia de partículas contaminantes discretas de origen antropogénico. También puede concluirse que la evolución de las fases magnetomineralógicas durante la diagénesis temprana está controlada por el contenido en materia orgánica, lo que a su vez determina el potencial de oxidación-reducción.

Palabras clave: magnetismo ambiental, propiedades magnéticas, Rías Baixas, diagénesis, sedimentos marinos

ABSTRACT

Measurement of magnetic susceptibility has allowed the assessment of the marine influence and diagenetic evolution of coastal sediments from the Rías Baixas. This is based on geographically and vertically distributed data. The low-field susceptibility (χ) of over 200 samples of surficial seabed sediments of the Rias of Vigo and Pontevedra showed a significant increase towards the open sea and away from continental influenced areas. Vertical variability of the susceptibility was evaluated in 80 samples obtained from three 60 to 90 cm long gravity corers in the Ria de Pontevedra. These samples showed a very strong decrease in susceptibility with depth. The surficial susceptibility values correlated well with the textural characteristics of the sediments, suggesting a link between sediment provenance and origin of the magnetic signal. To further evaluate these relationships, the available sedimentological data were completed with a number of elemental and mineralogical analysis. In addition some basic magnetic parameters were obtained for selected specimens. The combined analysis of these data showed that the spatial variability of the susceptibility observed in the different granulometric fractions can be spatially related to: (a) sediment provenance and origin, (b) hydrodynamic regime established between the Rias and the adjacent shelf, (c) anthropogenic solid particulate pollution. It can also be concluded that the evolution of the magnetomineralogical phases during the early stages of burial and diagenesis is controlled by the organic matter content which in turn controls the redox potential.

Key words: environmental magnetism, magnetic properties, Rías Baixas, diagenesis, marine sediments.

INTRODUCCIÓN

La medición de las propiedades magnéticas de los sedimentos marinos y litorales de las rías gallegas y de su plataforma adyacente, proporciona datos muy importantes acerca de la sedimentación actual en estos medios, así como de posibles cambios en las condiciones (paleo)climáticas y (paleo)ambientales durante los últimos cientos de miles de años.

Estas técnicas, propias del Magnetismo Ambiental y del Paleomagnetismo, se basan en la medición de la susceptibilidad magnética y de otros parámetros asociados, a través de los que se determina su remanencia y el tipo de respuesta de los minerales cuando se exponen a un campo magnético. La utilidad de este tipo de medidas reside en que son relativamente baratas y rápidas, y en que aportan información acerca de la composición, concentración y tamaño de grano de los minerales magnéticos presentes en el sedimento (Thompson y Oldfield, 1986; Verosub y Roberts, 1995; Dekkers, 1997; Maher, 1999). De esta forma, el estudio de los minerales magnéticos presentes en sedimentos marinos actuales permite hacer consideraciones acerca de la dinámica sedimentaria de ciertas áreas, al ser posible determinar el origen de los minerales magnéticos del sedimento y establecer así su procedencia. También permite extraer información acerca de la evolución postsedimentaria del sedimento, a partir de las transformaciones diagenéticas que afectan a los minerales magnéticos durante el enterramiento. Además proporciona una buena base para correlacionar y comparar testigos extraídos en sondeos, datarlos, y en numerosas ocasiones, reconstruir la evolución de los cambios climáticos a tenor de la relación que se observa entre las variaciones paleoclimáticas y la ciclicidad de los cambios magnetomineralógicos. Las investigaciones más recientes indican la existencia de una relación importante entre la contaminación de elementos pesados y de ciertas propiedades magnéticas como la susceptibilidad (Chan *et al.*, 1998).

La aplicación y desarrollo de estas técnicas es relativamente reciente. Durante los últimos años han experimentado una gran expansión en las Ciencias Ambientales. El Dpto. de Geociencias Marinas y Ordenación del Territorio, de la Universidad de Vigo, es pionero en la aplicación de estas técnicas en España, participando activamente en diversos programas nacionales e internacionales.

Los ambientes sedimentarios presentes en estas rías, y en su plataforma adyacente, muestran una variabilidad magnética específica condicionada tanto por sus características actuales como por la evolución temporal de estos medios. Estas variaciones se deben a tres factores principales: a) la diversidad del origen (procedencia) de los minerales magnéticos presentes, que puede ser cósmico (meteoritos), detrítico (como consecuencia de los aportes sedimentarios o biogénesis), antropogénico (vertidos) y autigénico; b) las importantes variaciones energéticas que presentan los distintos subambientes de sedimentación; y c) el régimen hidrodinámico que se establece entre las Rías y la plataforma adyacente (*upwelling*), que controla en gran medida el equilibrio geoquímico del sedimento. Rey *et al.* (1998), López-Rodríguez *et al.* (1999), Rubio *et al.* (en prensa), han sugerido que existe una variabilidad importante en la susceptibilidad magnética de los sedimentos superficiales de las Rías de Vigo y Pontevedra, y que esta variabilidad depende principalmente de la concentración de ciertos minerales ferromagnéticos en el sedimento. En estas rías, esto está determinado por la acumulación en las zonas de alta energía de los carbonatos biogénicos que rebajan la concentración de los constituyentes magnetomineralógicos en el sedimento; así como por la disolución y autigénesis de dichas fases controladas

por las condiciones redox durante la diagénesis temprana (Rubio *et al.*, 1999; Mohamed *et al.*, 2000). De esta forma, los cambios en las condiciones de sedimentación o en su evolución geoquímica en el tiempo, quedan registrados de forma efectiva en las fases magnetomineralógicas correspondientes.

LOCALIZACIÓN Y OBJETIVOS

Este estudio se centra en el sector más noroccidental de la Península Ibérica, en particular en las Rías de Vigo y Pontevedra (Fig. 1). Estas rías se caracterizan por tener la forma de un embudo alargado orientado E-W. Sus bocas aparecen protegidas de los temporales de invierno por las Islas Cíes en el caso de la Ría de Vigo, y las de Ons y Onza en la Ría de Pontevedra. De esta forma, las zonas más externas se hallan más expuestas al oleaje y presentan una influencia marina más importante que las zonas más internas, más protegidas y de mayor in-

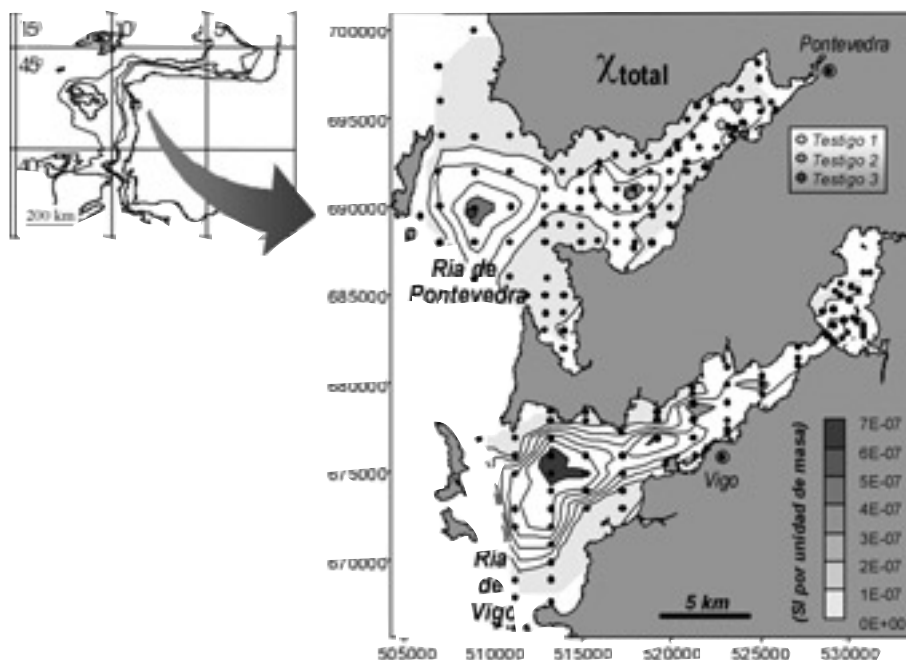


FIG. 1.—Localización de la zona de estudio, distribución de las muestras (círculos pequeños) y de los tres testigos estudiados (círculos grandes). Además puede observarse la variación de la susceptibilidad magnética (χ) en sedimentos superficiales de las Rías de Vigo y Pontevedra. Nótese que la susceptibilidad aumenta hacia mar abierto y hacia la zona central de las rías.

FIG. 1.—Location of the study area, surficial samples (small dots) and gravity cores (big dots). The susceptibility variation of surficial sediments in the Rías of Vigo and Pontevedra can also be observed. Note that susceptibility increases towards the open sea and towards the central axis of the Rías.

fluencia continental. Otros aspectos importantes a destacar son la existencia de *upwelling* estacional que genera una alta producción de carbonatos biogénicos, y un escaso aporte actual de material detrítico de origen fluvial. En este contexto, los sedimentos más gruesos, gravas y arenas, se localizan paralelamente a la costa, concentrándose en las zonas más expuestas, donde a menudo forman playas. Contienen una proporción importante de carbonatos biogénicos. Los sedimentos más finos, arena fina y fango, ocupan las zonas centrales y más profundas, ya que son áreas más resguardadas del oleaje, y están constituidos por arenas finas detríticas, minerales de arcilla, y óxidos, hidróxidos y sulfuros autigénicos. Estas características están controladas de forma importante por el oleaje, una circulación termohalina ligeramente estuarina y la existencia de *upwelling* estacional.

El objetivo de este trabajo es evaluar la utilidad de las técnicas del magnetismo ambiental en el estudio de la dinámica sedimentaria y evolución diagenética en medios litorales de tipo estuarino.

METODOLOGÍA

El muestreo se realizó sobre una malla rectangular de 1 a 2 km² (figura 1), en cuyos nudos se tomaron unas 200 muestras de sedimento superficial con una draga tipo *shipeck*. La analítica se realizó dividiendo el total de la muestra en dos partes iguales. Una de ellas se utilizó para determinar la granulometría, contenido en carbonato cálcico y materia orgánica. Además, también se determinó la concentración de 13 elementos mayoritarios y traza (Al, Fe, Mn, Ti, Zn, Cu, Cr, Pb, As, Cd, Sr, Ni y Co) mediante la técnica de espectrometría de plasma (ICP-AES) con un sistema óptico mixto secuencial/multicanal modelo "JY70 plus", previa digestión triácida de las muestras (Rubio *et al.*, 2000). La otra parte de la muestra se reservó para la medición de los parámetros magnéticos, siendo el principal, en el que se basa este estudio, la susceptibilidad magnética (χ). Este parámetro, que permite determinar la capacidad de magnetización del sedimento (Thompson y Oldfield, 1986), se determinó para la fracción total de la muestra, considerando ésta como la fracción menor de 2 mm. La fracción mayor de 2 mm se desprecia, ya que está constituida mayoritariamente por gravas biogénicas (conchas) o fragmentos contaminantes discretos de gran tamaño, lo que restaría significado estadístico a las mediciones magnéticas. Los resultados mostraron una fuerte dependencia de la susceptibilidad con la granulometría de las muestras. Consecuentemente se decidió separar las fracciones fango (< 0.063 mm) y arena (2 mm - 0.063 mm) y medir las propiedades magnéticas de cada una de ellas independientemente. La separación de la fracción arena se realizó previo ataque con H₂O₂ para su disgregación; mientras que la de los fangos se hizo por tamizado húmedo directo. Sólo se obtuvo una cantidad de muestra suficiente para medir la susceptibilidad de cada fracción en aquellas muestras cuyo contenido de arena y/o fango fue superior al 10%.

Estos datos fueron completados con un estudio de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) utilizando un microscopio Philips XL 30, con resolución de 3.5 nm y tensión de aceleración entre 0.2 y 30 kv, y con microanálisis de Rayos X (EDX) con detector "Super Ultra Thin Window", que permite el análisis cualitativo y semicuantitativo de los elementos a partir del nº atómico 5 (Boro). Estos estudios se realizaron principalmente sobre la fracción arena, con el fin de poder determinar la mineralogía característica. La determinación de la mineralogía de la fracción fango se realizó por Difracción de Rayos X. El estudio con el SEM de la fracción fango se realizó sobre extractos magnéticos obtenidos al circular una suspensión alrededor de un imán de Neodimio.

Además se recogieron 3 testigos de entre 90 y 60 cm a lo largo del eje central de la Ría de Pontevedra (figura 1). Se obtuvieron radiografías, se determinaron el tamaño de grano, contenido en carbonatos, materia orgánica, metales pesados y mineralogía (SEM, DRX). También se realizó una extracción secuencial (Ure et al., 1993), para caracterizar el hierro ligado a las distintas fracciones del sedimento (cambiable, óxidos e hidróxidos y orgánico/sulfídico). Además se tomaron muestras a cada tres centímetros para estudiar con más detalle sus propiedades magnéticas (susceptibilidad, coercitividad y remanencia de saturación).

La analítica se realizó en el Centro de Apoyo Científico y Tecnológico a la Investigación (C.A.C.T.I.) de la Universidad de Vigo. Las medidas de los distintos parámetros magnéticos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Magnetismo Ambiental y Paleomagnetismo del Departamento de Geociencias Marinas y Ordenación del Territorio de la Universidad de Vigo, con un puente de susceptibilidad tipo *Kappabridge* "KLY-3", un imanador de pulsos tipo "MMPM9", una unidad anhisterética "AGICO LDA-3/AMU1" y magnetómetro *spinner* tipo "AGICO JR5A". Además se utilizaron un magnetómetro criogénico "2G" y el electroimán del Laboratorio de Paleomagnetismo del ETH de Zurich (Suiza) y el "MicroMag" del Laboratorio de Paleomagnetismo de la UNAM (México).

DISTRIBUCIÓN SUPERFICIAL DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA Y SU RELACIÓN CON LAS CARACTERÍSTICAS TEXTURALES DEL SEDIMENTO.

La representación geográfica de la susceptibilidad de bajo campo por unidad de masa (χ) de los sedimentos superficiales muestra una variación espacial característica: aumenta gradualmente hacia mar abierto y hacia las zonas centrales y más profundas de las dos Rías (Fig. 1), variando entre -1×10^{-7} y 10×10^{-7} unidades SI. Los valores de susceptibilidad más elevados aparecen asociados a los ejes longitudinales de ambas Rías, donde la profundidad es mayor y los sedimentos finos aparecen en mayor proporción (Fig. 2a). Por el contrario, las zonas de susceptibilidad más baja se sitúan en la costa, donde la profundidad es menor, y la característica sedimentológica principal es la presencia de sedi-

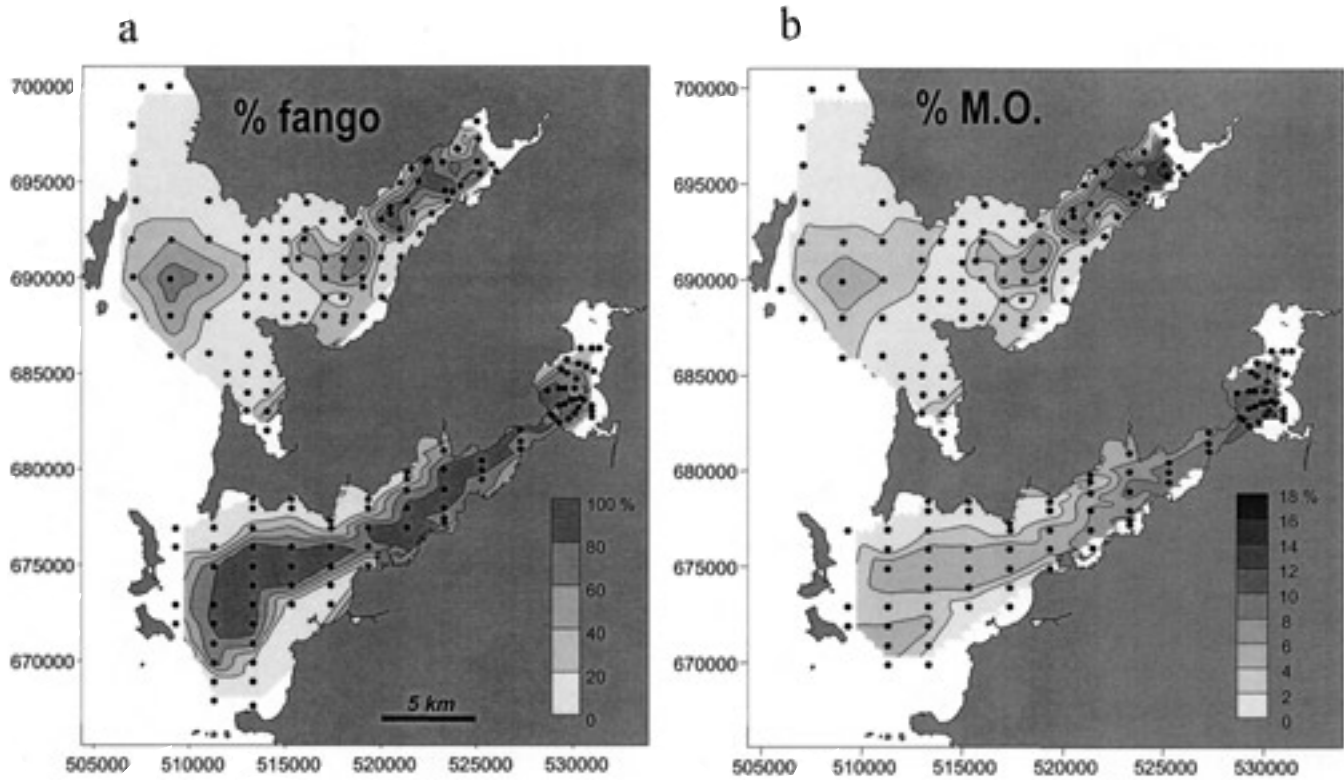


FIG. 2.—Proporción de (a) fangos y (b) materia orgánica (% M.O.) de los sedimentos superficiales de las Rías de Vigo y Pontevedra. Los círculos negros indican la posición de las muestras utilizadas, ya que no fue posible medir la susceptibilidad de aquellas muestras cuyo contenido en fangos fuese inferior al 10 por ciento.

FIG. 2.—Proportion of (a) mud and (b) organic matter in surficial sediments from the rías of Vigo and Pontevedra. Black dots indicate the location of the samples used, as it was not possible to measure the susceptibility of those samples with mud content less than 10 per cent.

mento arenoso carbonatado de origen biogénico. Se observaron valores negativos de susceptibilidad en las muestras constituidas principalmente por arenas carbonáticas diamagnéticas.

Dado el notable control que ejerce la granulometría sobre la susceptibilidad magnética, las muestras se segregaron en sus fracciones gruesa y fina, midiéndose por separado la susceptibilidad de cada una de ellas (Fig. 3). Como consecuencia de esto se observó un patrón de variación espacial específico para cada una de estas fracciones. Esto ratifica el fuerte control que ejercen las características texturales y mineralógicas del sedimento sobre la susceptibilidad magnética de la muestra total.

La susceptibilidad de la fracción gruesa (Fig. 3b) está completamente dominada por el contenido en carbonato cálcico. Muestra valores más bajos para la Ría de Pontevedra, de granulometría más gruesa y mayor contenido en carbonatos en la fracción arena, que en la Ría de Vigo. En términos generales, se observa una disposición paralela a la costa de las isolíneas (Fig. 3b) indicando una mayor variabilidad transversal que longitudinal. Los valores más altos se sitúan en los ejes centrales de las dos rías. Los más bajos en las zonas más expuestas al oleaje, donde el material es más grueso y más rico en carbonato biogénico, reflejando la mayor incidencia del oleaje. Los valores anormalmente altos que se observan en la Ría de Vigo, están relacionados con la presencia de partículas ferromagnéticas discretas de origen antropogénico, tal y como veremos más adelante.

La susceptibilidad de la fracción fina (< 63 micras) muestra un incremento progresivo, de aproximadamente un orden de magnitud, desde la zona más interna y de mayor influencia continental, hasta mar abierto (Fig. 3a). La disposición perpendicular a la costa de las isolíneas, al contrario que en la fracción arena, indican una mayor variabilidad longitudinal que transversal. La magnitud de la susceptibilidad es inversamente proporcional a su contenido en materia orgánica (Fig. 2b). Esta relación fue cuantificada en la Ría de Vigo por López-Rodríguez *et al.* (2000) ($R^2 = -0.4727$).

CONSTITUYENTES MAGNÉTICOS Y ORIGEN DE LA VARIABILIDAD SUPERFICIAL

La variación de la susceptibilidad magnética está controlada principalmente por la textura, teniendo las fracciones arena y fango unas características magnetomineralógicas claramente diferentes. Los sedimentos más gruesos poseen porcentajes elevados de CaCO_3 biogénico. La naturaleza diamagnética del carbonato, unido a una menor concentración de otros minerales de tipo para- y ferromagnético en este tipo de sedimentos, hace que su susceptibilidad sea por lo general muy baja. Un caso extremo lo constituye el carácter diamagnético de las arenas de playa, que son los sedimentos dominantes en las zonas de mayor exposición al oleaje.

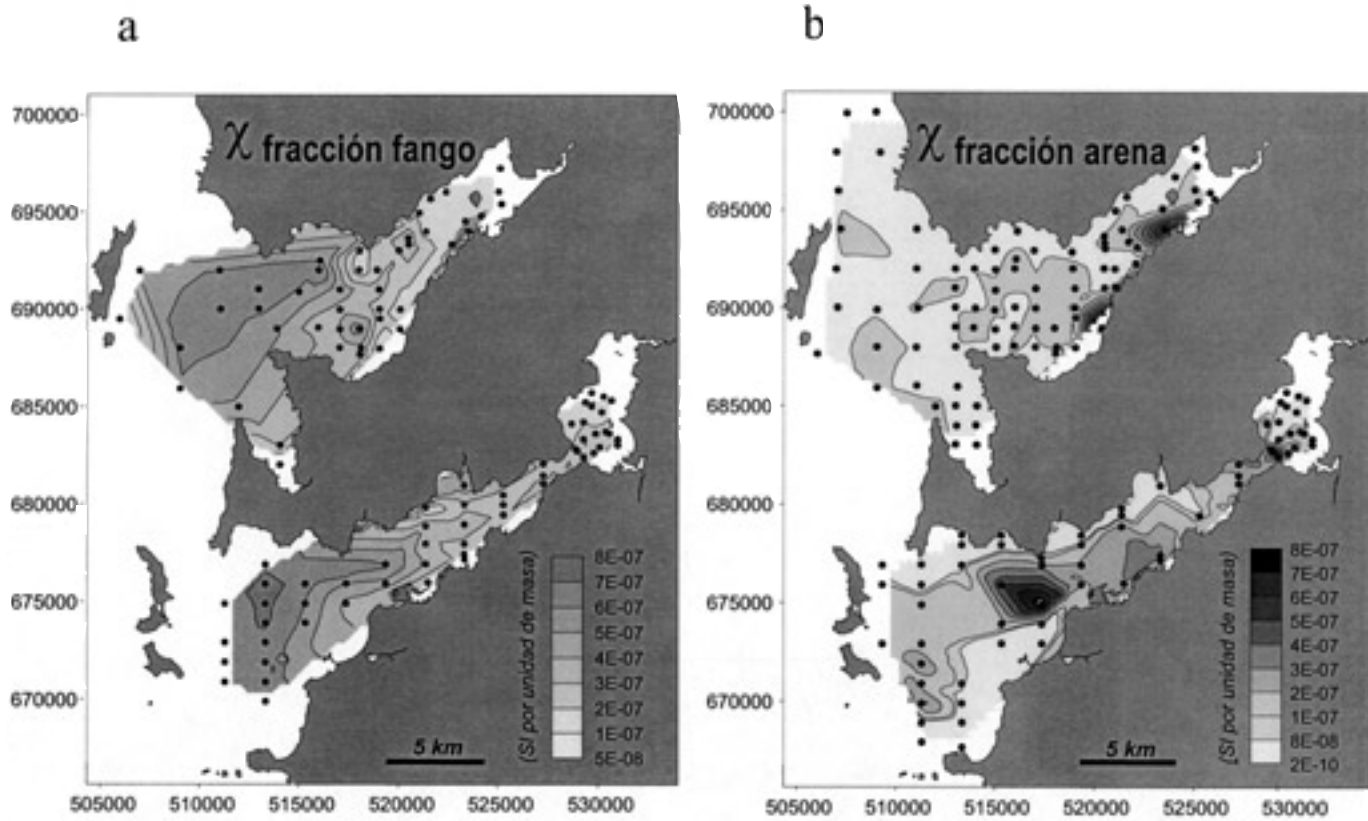


FIG. 3.—(a) Variación espacial de la susceptibilidad (χ) de la fracción fina (< 0.63 mm) y (b) de la fracción gruesa (0.63 – 2 mm). Los puntos negros indican la localización de las muestras utilizadas.

FIG. 3.—(a) Susceptibility spatial variation for the coarse fraction (0.063 – 2 mm) and (b) fine (< 0.063 mm) fractions.

De esta forma, la señal magnética reside principalmente en la fracción fina, cuya importancia aumenta hacia las zonas más profundas y protegidas de las rías. Consecuentemente, la relación arena/fango explicaría la variabilidad de χ a gran escala, lo que en gran medida está controlado por el régimen hidrodinámico al que está expuesta cada zona. Además de este control existe una variabilidad de segundo orden que estaría controlada principalmente por la variabilidad intrínseca de los fangos y, localmente, por la presencia de partículas contaminantes discretas. Consecuentemente, comprender la naturaleza de las fases magnéticas en cada una de las fracciones y las razones de su variabilidad es fundamental para poder construir un modelo que pueda tener implicaciones sedimentológicas y diagenéticas.

Las propiedades magnéticas del sedimento están controladas por la concentración, mineralogía y tamaño de grano de los minerales magnéticos implicados. El estudio petrológico y magnético de estas fases va a permitir establecer su procedencia y ambiente de sedimentación.

LA FRACCIÓN ARENA

La composición de la fracción arena se estudia fácilmente en el SEM. Esto pone de manifiesto que los constituyentes magnetomineralógicos de las arenas son:

- a) Granos ferro- y paramagnéticos de origen detrítico. Principalmente ilmenohematitas y magnetitas procedentes del Macizo Hespérico.
- b) Granos ferro- y paramagnéticos de origen antropogénico, principalmente cenizas volantes de composición muy variable (lámina 1a).
- c) Granos autigénicos paramagnéticos proporcionalmente menos importantes. Por lo general aparecen como reemplazamientos y/o rellenos goetíticos (lámina 1b) y glauconíticos (lámina 1c) de fragmentos esqueléticos.

LA FRACCIÓN FANGO

La observación al SEM de extractos magnéticos de la fracción menor de 63 micras mostró la presencia de cenizas volantes de alto contenido en hierro (inserto en lámina 1d), sin embargo no fue posible observar diferencias importantes entre las muestras más externas e internas de las rías que justificase esta variabilidad. El análisis por XRD de esta fracción muestra la presencia de goetita como único mineral magnético importante, muy posiblemente porque la concentración del resto no sea lo suficientemente elevada. Las únicas diferencias significativas entre las muestras residen en la mayor presencia de arcilla de origen continental en la zona interna, y en la presencia de goetita y calcita en la zona externa.

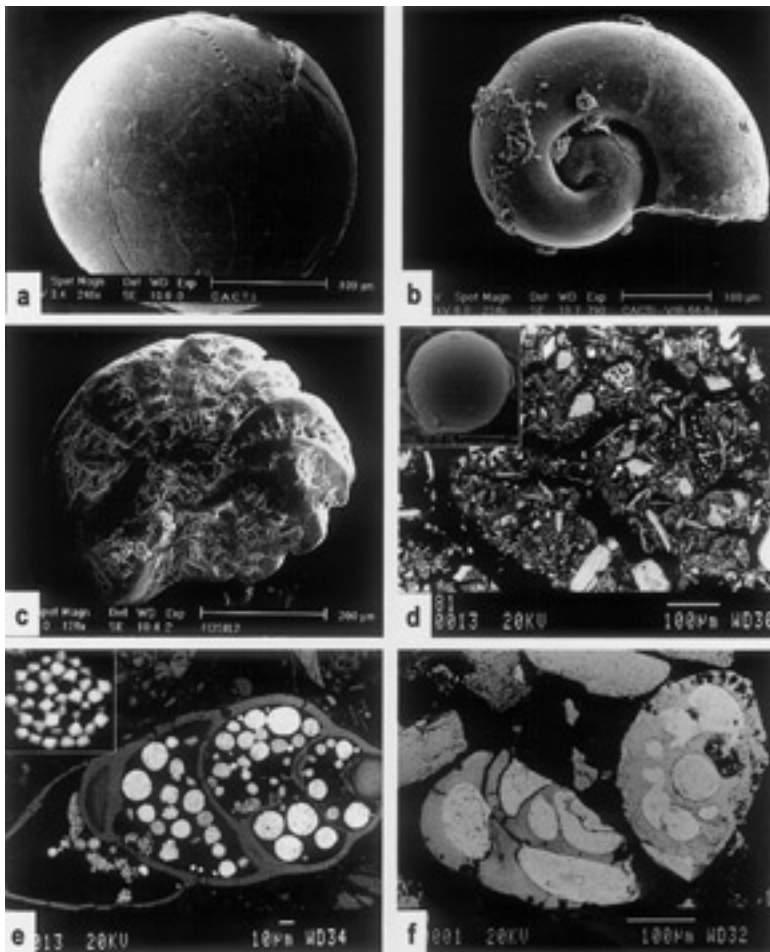


LÁMINA 1.—(a) Las cenizas volantes como ésta, de más de 200 micras de diámetro, junto con otros tipos de fragmentos metálicos contaminantes de origen antropogénico constituyen una fuente importante de señal magnética en las arenas. (b) Reemplazamiento autigénico de un gasterópodo por goetita autigénica. (c) Reemplazamiento de la concha de un foraminífero por glauconita paramagnética. (d) Aspecto general de una muestra de fango de la zona interna de las rías. Algunos de los monosulfuros presentes han sido marcados con una flecha. El inserto muestra una diminuta ceniza volante de escasamente 3 micras de diámetro, relativamente abundantes en los fangos superficiales. (e) Piritas framboidales en el interior de las cámaras de un foraminífero de la zona externa de las rías y ampliación de uno de los framboides (inserto). (f) Reemplazamiento de Ca (zonas oscuras) por Fe (zonas claras) en una concha de la zona externa.

LÁMINA 1.—(a) Large fly ash like this together with other pollutant metallic fragments of anthropogenic origin are an important source of the magnetic signal in the sands. (b) Goethite gastheropoda replacement. (c) Paramagnetic glauconite replacing a foraminifera shell. (d) General view of the inner part of the Ría de Vigo muds. Arrows indicate monosulfides. The inset shows a tiny fly ash, relatively abundant in the uppermost part of these muds. (e) Framboidal pyrites within foraminifera chambers from the external part of the rías and blow up of one of the framboids. (f) Replacement of Ca (dark) by Fe (clear) in a shell fragment, again from the external part.

Los experimentos de adquisición de la imanación remanente isotérmica (IRM), realizados sobre muestras representativas de la fracción fango de la Ría de Pontevedra, demostraron una mayor efectividad a la hora de discriminar entre las zonas externa e interna a las que aparece asociada la variabilidad observada. Estos experimentos se basan en el estudio de la remanencia que adquieren a temperatura ambiente las sustancias ferromagnéticas, al exponerlas progresivamente a campos magnéticos cada vez más fuertes, hasta que alcanzan la saturación (Fig. 4). Cada muestra proporciona una curva característica cuya forma y magnitud están determinadas por la composición, concentración y tamaño de grano de los minerales magnéticos presentes. En este caso las curvas son muy similares, mostrando una adquisición muy rápida en campos inferiores a 200 mT (pendiente muy acusada). A partir de ahí las curvas se aplanan indicando que las muestras alcanzan la saturación (tramo final plano). Esto indica la presencia de minerales de baja coercitividad. Aunque como ya mencionamos

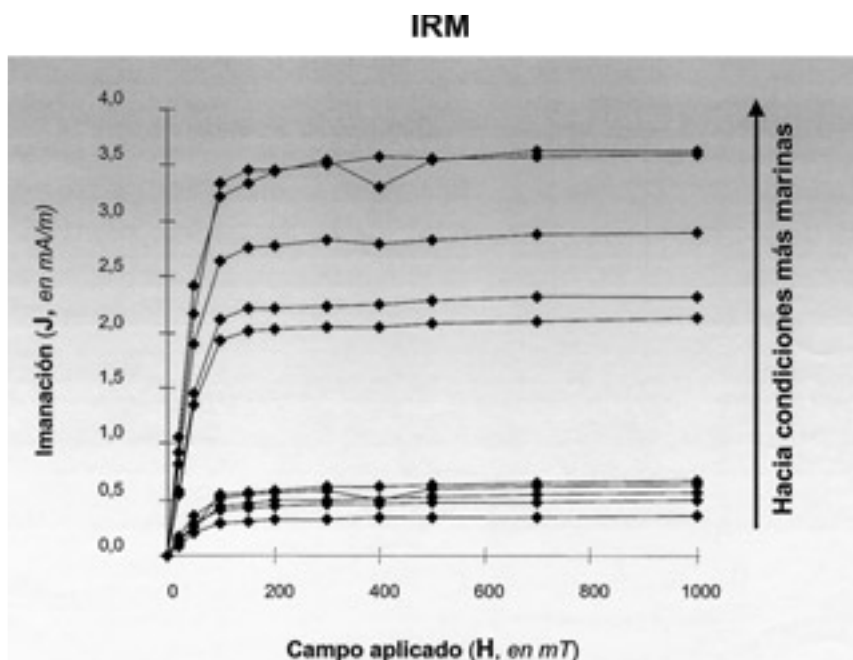


FIG. 4.—Diagramas de la adquisición progresiva de la Imanación Remanente Isotérmica (IRM) de la fracción fango de 10 muestras representativas de la Ría de Pontevedra. En estos diagramas se representa la magnitud escalar de la imanación remanente (J) de una muestra después de exponerla escalonadamente a campos magnéticos (H) cada vez mayores. El valor de la imanación de saturación aumenta a medida que la influencia marina es mayor

FIG. 4.—Isothermal Remanent Magnetization (IRM) diagrams of 10 representative samples from the Ría de Pontevedra. They represent the scalar magnitude of the remanent magnetization (J) of the samples after their stepwise exposure to increasingly high magnetic fields (H). It should be noticed that the value of magnetization saturation increases with the importance of the marine influence.

se detectó goetita en XRD, no existen evidencias en estos experimentos de su presencia, lo que es perfectamente atribuible a su baja concentración. En segundo lugar es de destacar que la coercitividad de las muestras es similar, ya que todas las muestras estudiadas alcanzan la saturación para valores de campo semejantes. Esto indica que la composición mineralógica de las muestras es homogénea en lo que se refiere a las fases magnéticas. Dadas las condiciones subóxicas/reductoras del sedimento derivadas de la evolución diagenética temprana del mismo, como veremos en más detalle a continuación, solo la greigita y/o magnetita, y quizá la pirrotina son las fases ferromagnéticas estables en estas condiciones. Por último, hemos de señalar que los valores de saturación mayores tienen lugar en las muestras procedentes de las zonas más externas de las rías. Como la coercitividad de las muestras es similar, la variabilidad de la susceptibilidad sólo puede estar controlada por cambios en la concentración y/o en el tamaño de grano de las fases magnéticas implicadas. Para poder discriminar entre estos dos factores, es necesario recurrir a otros parámetros magnéticos.

En la Fig. 5 se presenta un compendio de estos parámetros, proyectándose las distintas propiedades frente a su longitud geográfica. Aquí se observa claramente cómo la susceptibilidad (χ) de la fracción fango aumenta hacia mar abierto (Fig. 5a). El parámetro SIRM/ χ se construye dividiendo el valor de la imanación remanente de saturación por el de la susceptibilidad magnética para la muestra estudiada. La normalización del valor de saturación con respecto a la susceptibilidad hace que éste sea independiente de la concentración. Consecuentemente, su utilización tiende a reflejar variaciones en el tamaño de grano. En las rías estudiadas, su valor varía muy poco con la longitud (Fig. 5b), indicando que la variación de la susceptibilidad depende principalmente de cambios en la concentración y no en la granulometría.

El parámetro χ_{fd} (Fig. 5c) muestra la dependencia de la susceptibilidad de la frecuencia con la que se mide. Este parámetro es función de la abundancia relativa de minerales de tamaño ultrafino de tipo superparamagnético (granos SP), y por tanto es independiente de la concentración. Cuanto más abundantes son éstos en una muestra, mayor es su dependencia de la frecuencia. Como vemos en la figura 5c, el porcentaje se sitúa consistentemente alrededor del 6%, excepto en la zona más interna y de mayor influencia continental donde se encuentra por debajo del nivel de detección del instrumento. Esta dependencia moderada de la frecuencia delata la existencia de material magnético ultra fino en las muestras. Además indica que la variación de la susceptibilidad no depende del tamaño de grano, ratificando que ésta se debe a variaciones en la concentración de los minerales magnéticos.

La autigénesis de minerales magnéticos durante el enterramiento temprano, es diferente en distintas zonas de las rías, como consecuencia de diferencias en su evolución diagenética. Esto también es evidente en las curvas termomagnéticas de la figura 6, en las que se representa la variación de la susceptibilidad con la temperatura. Las transformaciones mineralógicas que tienen lugar durante el ca-

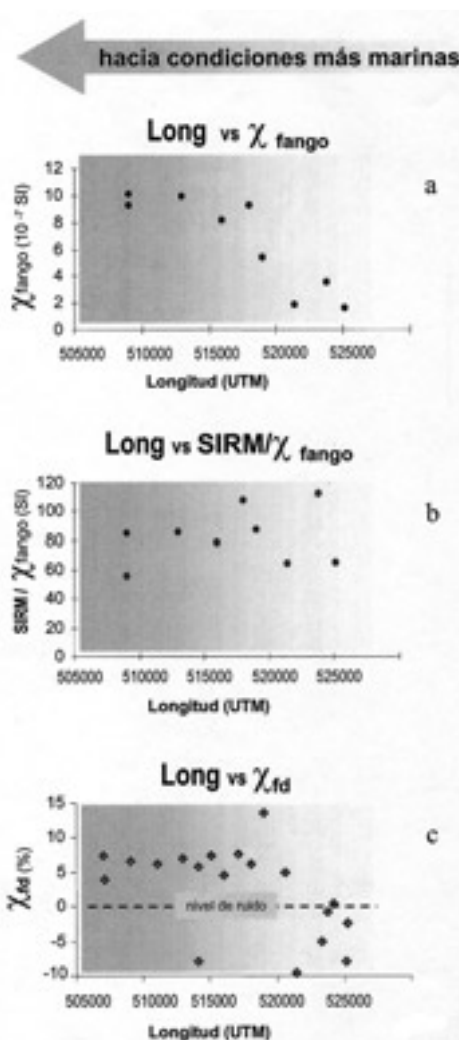


FIG. 5.—La proyección de los distintos parámetros magnéticos con respecto a la longitud nos permite observar su variación con respecto a la mayor influencia marina que se observa hacia el Oeste en la Ría de Pontevedra. (a) La susceptibilidad aumenta hacia mar abierto. (b) La relación entre el valor de saturación de la IRM (SIRM) y la susceptibilidad es constante a lo largo de la ría indicando que se debe principalmente a un aumento en la concentración de minerales magnéticos. (c) La dependencia de susceptibilidad con la frecuencia indica la presencia de material magnético ultrafino. En las zonas más internas de la ría, la susceptibilidad es tan baja que se sitúa por debajo del nivel de ruido del instrumento.

FIG. 5.—Plotting the magnetic parameters against their longitude is a good way of controlling their dependence of the marine influence. (a) Magnetic susceptibility increases towards de open sea. (b) The relationship between the value of the saturation of magnetization and susceptibility is constant along the ría, indicating that the observed change in susceptibility is mostly due to increasing concentration of the same magnetic minerals. (c)The frequency dependence of susceptibility indicates the occurrence of ultrafine magnetic material. In the inner part of the ría the susceptibility is so low that it is impossible to calculate.

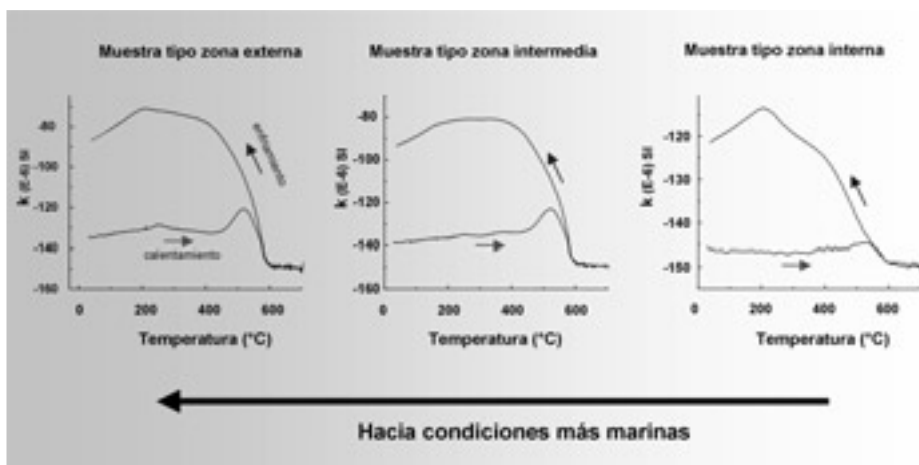


FIG. 6.—Curvas de variación de la susceptibilidad magnética con la temperatura. Se obtienen midiendo la susceptibilidad de forma continua desde temperatura ambiente hasta 700 °C y durante su enfriamiento. La marcada diferencia entre las curvas de calentamiento y de enfriamiento indica la alteración de las muestras durante el calentamiento. La intensidad de esta alteración es mayor en las muestras de las zonas más externas y marinas que las de las zonas internas.

FIG. 6.—Variation of the magnetic susceptibility with temperature obtained by continuous measurement of the susceptibility during heating up to 700 °C and subsequent cooling to room t° . The striking difference between the heating and cooling cycles is due to alteration of the magnetic minerals during heating. The intensity of this alterations is higher in samples from the more external and marine influenced areas.

lentamiento en el laboratorio, se muestran como cambios bruscos en el valor de la susceptibilidad magnética. Es notable la aparición de una cúspide, seguida de una caída a partir de los 500 °C como consecuencia de la neoformación de magnetita en el horno, lo que produce un aumento de la susceptibilidad durante el enfriamiento. Por último, es de destacar que la presencia de una mayor proporción de óxidos de Fe en las muestras de la zona externa y media da lugar a una respuesta más intensa durante el calentamiento.

DIAGÉNESIS TEMPRANA DE LOS ÓXIDOS DE FE

La evolución de las fases magnetomineralógicas durante la diagénesis temprana de los sedimentos finos que dominan el eje longitudinal de las Rías está controlada por el contenido en materia orgánica (Rubio *et al.*, en prensa), que a su vez determina su potencial redox. Esta dependencia se observa claramente al comparar la susceptibilidad de la fracción fango (Fig. 3a) con el contenido en materia orgánica (Fig. 2b). López-Rodríguez *et al.* (1999), midieron la susceptibilidad de un grupo de muestras situadas a lo largo del eje de la Ría de Pontevedra antes y después de ser atacadas con ditionita (Mehra y Jackson, 1960). De

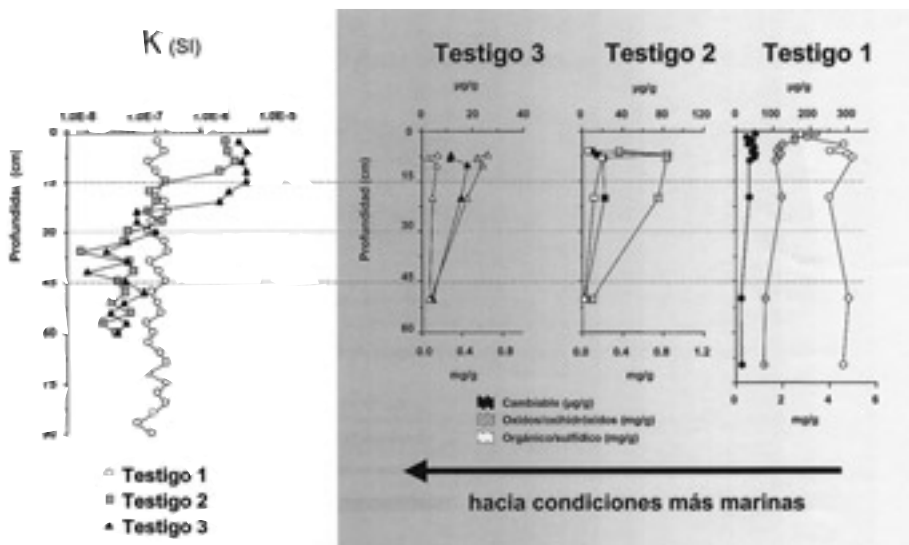


FIG. 7.—(a) Variación de la susceptibilidad magnética con la profundidad en tres testigos de gravedad de la Ría de Pontevedra. (b) Resultados de la especiación del Fe con respecto a la profundidad de las muestras en los testigos estudiados. Obsérvese que la importancia del Fe ligado a óxidos e hidróxidos es más importante cuanto más marinas son las condiciones (i.e. Testigos 3 y 2 con respecto al 1) y hacia la parte superior de los mismos.

FIG. 7.—(a) Variation of magnetic susceptibility with depth in three gravity cores from the Ría de Pontevedra. (b) Results of the sequential extractions of Fe are plotted against the samples depth. The importance of the Fe linked to oxides and hydroxides is greater in the more external cores (i.e. cores 3 and 2 vs core 1), and towards the upper part of these two cores.

esta forma demostraron que existe una relación entre la concentración de óxidos y oxihidróxidos autigénicos en los sedimentos superficiales y la susceptibilidad magnética, aumentando ambas hacia mar abierto, donde las condiciones reductoras son menos importantes. Los datos obtenidos en nuestros testigos corroboran estos resultados. De esta forma, el testigo 1, situado en la parte más interna y protegida de la Ría de Pontevedra (figura 1a), está dominado por fases sulfídicas y orgánicas (Fig. 7b). Los testigos 2 y 3, situados en zonas progresivamente más externas, de mayor influencia marina, y sometidos a la removilización y oxigenación periódica del sedimento durante los temporales, están dominadas por fases oxidadas.

Los datos de microscopía electrónica, discutidos más ampliamente en Rubio *et al.* (1999) muestran la presencia extensiva de pirita (lámina 1d) en sedimentos de la zona interna. La presencia de piritas framboidales (lámina 1e) indica un crecimiento rápido de las mismas y un ambiente anóxico. Esta piritización aparece mediada por monosulfuros (lámina 1d) y por sulfuros intermedios del tipo de la makinawita y greigita. Por el contrario, en las zonas más externas, las condiciones reductoras son menos importantes debido a la oxigenación pe-

riódica de los sedimentos: se observan reemplazamientos de carbonatos por óxidos e hidróxidos de hierro (lámina 1f), principalmente goetita, indicando la alternancia de condiciones subóxicas-óxicas con anóxicas. La pirita también aparece en estas zonas, pero por lo general asociada a microambientes confinados, tales como cámaras de foraminíferos (lámina 1e).

En la figura 7b podemos observar que la presencia de las fases oxidadas es proporcionalmente más importante en la parte superior de estos tres testigos. La evolución de estas fases en la vertical, como consecuencia de la diagénesis, está controlada por la posición del límite de oxidación-reducción en profundidad. Esta zonación diagenética es fácilmente identificable al medir la variación de la susceptibilidad magnética (χ) y correlacionarla con la profundidad (figura 7a) en los tres testigos estudiados. Los testigos 3 y 2 (zona externa y media respectivamente), y situados en condiciones cada vez más marinas, presentan, en la parte superficial de los mismos, valores de susceptibilidad más altos, que el testigo 1. En estos dos testigos también puede observarse una disminución brusca de la susceptibilidad por debajo de los 25 cm en el testigo 3 y de los 12 cm en el testigo 2. Estas variaciones se deben a la existencia de cambios en las características de los constituyentes magnetomineralógicos asociados a los procesos diagenéticos descritos con anterioridad. En particular a procesos de disolución y precipitación asociados con el aumento progresivo de las condiciones reductoras en profundidad y hacia las zonas más internas y protegidas de la ría.

CONCLUSIONES

La variación de la susceptibilidad magnética (χ) de los sedimentos marinos superficiales de las Rías de Vigo y Pontevedra muestra una distribución espacial característica: aumenta hacia mar abierto y hacia la zona central de la ría. Esta distribución se debe a las condiciones hidrodinámicas específicas en cada zona y a su consecuente evolución geoquímica. De esta forma, el primer factor de control es la presencia de carbonatos biogénicos diamagnéticos que dominan las fracciones gruesas, y cuya distribución está controlada por el oleaje. El segundo factor importante es el contenido en materia orgánica, que controla el potencial redox de la fracción fina. Consecuentemente, la concentración de óxidos y oxihidróxidos es mayor hacia el eje central de la ría, dominado por los fangos, y hacia mar abierto, donde las condiciones reductoras son menos importantes debido a una mayor oxigenación del fondo por el oleaje.

Este estudio demuestra la utilidad de la medición de las propiedades magnéticas para identificar determinados procesos en medios litorales, particularmente en aquellas zonas en las que existe un acoplamiento importante de los procesos hidrodinámicos y geoquímicos. Entre sus ventajas con respecto a otras técnicas destacamos su mayor sensibilidad a la presencia de las distintas fases mineralógicas en la que aparece el hierro, la rapidez de estas determinaciones, su bajo coste y carácter no destructivo.

AGRADECIMIENTOS

Contribución n.º 219 del Grupo EX1 a los proyectos, PGDIT99-MARAE1 de la XUGA, MAR97-0626 de la C.I.C.Y.T. y FMRX980247 (Mag-Net) de la Unión Europea, y PICG 437 de la Unesco. Algunas de las medidas se realizaron durante las sucesivas estancias de D. Rey y K. J. Mohamed en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la Escuela Politécnica Federal de Zurich (ETH) y de M. F. Bógalo en el de la Universidad Autónoma de México. Los constructivos comentarios de Pedro Herranz y Juan José Villalaín contribuyeron a mejorar el manuscrito original.

REFERENCIAS

- CHAN, L. S., YEUNG, C. H., YIM, W. W.-S., OR, O.L. (1998): Correlation between magnetic susceptibility and distribution of heavy metals in contaminated sea-floor sediments of Hong Kong Harbour. *Environmental Geology*, 36 (1-2): 77-86
- DEKKERS, M. (1997): Environmental Magnetism: An introduction. *Geologie en Minjbouw*, 76: 163-182
- LÓPEZ-RODRÍGUEZ, N., REY, D., RUBIO, B., PAZOS, O., VILAS, F. (1999): Variaciones de la susceptibilidad magnética en los sedimentos de la Ría de Vigo (Galicia). Implicaciones para la dinámica sedimentaria y contaminación antropogénica de la zona. *Thalassas*, 15: 85-94
- LÓPEZ-RODRÍGUEZ, N., REY, D., RUBIO, B., VILAS, F. (2000): Correlación negativa entre la susceptibilidad magnética y el contenido en metales pesados de origen antropogénico en un medio litoral. *Geotemas*, 1 (1): 111-116
- MAHER, B. (1999): *Environmental Magnetism*. 390p., Cambridge U. Press.
- MEHRA, O. P., JACKSON, M. L. (1960): Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner.* 7: 317-327.
- MOHAMED, K., LÓPEZ-RODRÍGUEZ, N., REY, D., RUBIO, B., VILAS, F. (2000). Propiedades magnéticas y geoquímicas de los sedimentos de la Ría de Pontevedra (Galicia) como indicadores de la evolución diagenética. Abstract III Symposium on the Iberian Continental Atlantic Margin: pp. 61-62.
- REY, D., PAZOS, O., RUBIO, B., LÓPEZ-RODRÍGUEZ, N., VILAS, F. (1998): Seabed Susceptibility variability in coastal stuarine-like sediments and iron oxides fate during early diagenesis. Case study in littoral sediments from NW Spain. *Geologica Carpathica*, 49, nº3: 234-235.
- RUBIO, B., PYE, K., RAE, J. E., REY, D. (*en prensa*): Sedimentological characteristics, magnetic properties and heavy metal distribution in subtidal sediments, Ria de Pontevedra, NW Spain. *Sedimentology*,
- RUBIO, B., REY, D., NOMBELA, M. A., PYE, K., VILAS, F. (1999): Aplicación de imágenes de electrones retrodispersados en microscopía electrónica de barrido a sedimentos litorales. *Thalassas*, 15: 71-84.
- RUBIO, B., NOMBELA, M. A., VILAS, F. (2000): Geochemistry of Major and Trace Elements in Sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): an Assessment of Metal Pollution. *Marine Pollution Bulletin*. 40, nº 11: 968-980
- THOMPSON, R., OLDFIELD, F. (1986): *Environmental magnetism*. 227p., Allen y Unwin. London.

- URE, A. M., QUEVAUVILLER, P. H., MUNTAU, H., GRIEPINK, B. (1993): Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the Commission of the European Communities. *Int. Journal of Environ. Anal. Chem.*, 51: 135-151.
- VEROSUB, ROBERTS, A. P. (1995): Environmental Magnetism: Past, Present and Future. *Journal of Geophysical Research*, 100, B2: 2175-2192.