

## RESULTADOS PALEOMAGNETICOS DE LOS DEPOSITOS PLIO- PLEISTOCENOS DE LA CUENCA DE PALMA (MALLORCA, ESPAÑA)

F. M. González-Hernández \*, N. A. Mörner \*\*, J. L. Goy \*, C. Zazo \*\*\* y P. G. Silva \*\*\*\*

### Resumen

Se presentan los resultados paleomagnéticos obtenidos del análisis de los depósitos plio-pleistocenos que afloran en los bordes oriental (sección de Bahía Azul) y occidental (Banc d'Eivissa) de la cuenca de Palma. La sección de Bahía Azul está constituida por una terraza marina situada a +70-74 metros sobre el nivel medio del mar y, sobre ella, nueve sistemas dunares litorales separados por diferentes superficies de discontinuidad. Los depósitos de Banc d'Eivissa estudiados corresponden a otra terraza marina situada a +24-25 metros sobre el nivel medio del mar y dos sistemas dunares situados por encima de la misma, aunque en las proximidades del afloramiento estos sistemas dunares son más numerosos. La litología en ambos lugares es fundamentalmente calcarenítica y los afloramientos presentan diferentes grados de alteración que dificultan el establecimiento de una secuencia magnetoestratigráfica continua. Tanto el contenido paleontológico (Roselló y Cuerda, 1973) como los resultados paleomagnéticos obtenidos en la terraza marina y dunas de Banc d'Eivissa no permiten precisar la situación estratigráfica de estos depósitos y sólo es posible enmarcarlos dentro de la época de polaridad inversa de Matuyama. En la sección de Bahía Azul se interpreta que la mitad inferior de la serie (terrace marina y los tres primeros sistemas dunares) corresponde también a un intervalo de polaridad inversa dentro de la época de Matuyama. Por su contenido paleontológico, la terraza marina es asignada al piso Emiliense (Cuerda y Sacarés, 1992), es decir parte media del Pleistoceno inferior, lo que no está en contradicción con los datos paleomagnéticos obtenidos. Se considera, por tanto, incluida entre los crones de polaridad normal Jaramillo y Olduvai (Clr.1n y C2n respectivamente de Cande y Kent, 1995), aunque no puede descartarse rigurosamente que pueda situarse por debajo del cron Olduvai.

**Palabras clave:** *Magnetoestratigrafía, Plio-Pleistoceno, dunas, terrazas marinas, Mallorca, cuenca de Palma.*

### Abstract

The results from the paleomagnetic analysis of the plio-pleistocene deposits located in the eastern (Bahía Azul Section) and western (Banc d'Eivissa) borders of the Palma Basin are presented in this paper. The Bahía Azul section is composite by a marine terrace at +70-74 m a.s.l., overlapped by nine littoral dune systems separated by erosional surfaces. The Banc d'Eivissa section is constituted of a lower marine terrace at +24-25 m a.s.l., buried by two dune systems, although there are more numerous in the vicinity. The lithological spectrum at both sections holds a main calcarenitic nature, but the available outcrops display a different degree of weathering making difficult the establishment of a continuous magnetostratigraphic sequence. The paleontological content (Roselló y Cuerda, 1973) and paleomagnetic results of the Banc d'Eivissa deposits are not sufficient to establish a precise chronological sequence, and only is possible to locate them within the reverse polarity Matuyama epoch. On the contrary, the lower half of the Bahía Azul sequence (marine terrace plus the 3 first dune systems) presents a consistent reverse polarity. The paleontological content of these materials indicates an early Pleistocene age (Emilian cycle: Cuerda y Sacarés, 1992) which agrees with the obtained paleomagnetic

\* Dpto. de Geología. Fac. Ciencias. Univ. Salamanca, Plaza de la Merced s/n. 37004 Salamanca. fmgh@gugu.usal.es.

\*\* Paleogeophysics & Geodynamics, Stockholm University. S-10691 Stockholm (Sweden). morner@pog.su.se.

\*\*\* Dpto. de Geología. Museo Nac. de CC. Naturales (CSIC). Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid. mcnzc65@mncn.csic.es.

\*\*\*\* Dpto. de Geología. Univ. Salamanca. Esc. Politécnica Superior de Avila. Sto. Tomás, s/n. 05003 Avila. pgsilva@gugu.usal.es.

tic results. Therefore, the whole sequence is interpreted to be located between the normal polarity chrons of Jaramillo and Olduvay (Clr. 1n and C2n of Cande and Kent, 1995) within the Matuyama epoch, but can not be totally rejected the possibility that them could be placed after the Olduvay Chron.

**Key words:** *magnetostratigraphy, Plio-Pleistocene, aeolian dunes, Palma Basin, marine terraces, Mallorca.*

## Introducción

La isla de Mallorca se sitúa en el Promontorio Balear, el cual constituye la prolongación hacia el NE de las Zonas Externas de las Cordilleras Béticas en el Mediterráneo. La estructura de la isla está constituida por un conjunto de horsts y semigrabens (Pomar *et al.*, 1983a) generados en un contexto tectónico distensivo desde el Mioceno medio-superior a la actualidad. Anteriormente se había producido la etapa compresiva de estructuración alpina que dio lugar a las sierras de Tramuntana, Levante y Relieves Centrales, que constituyen los horsts más importantes de la isla. Esta estructuración tiene lugar desde el Oligoceno superior hasta el Mioceno medio y genera un sistema de cabalgamientos NE-SW con una dirección de transporte hacia el NW (Fallot, 1948; Gelabert, 1998).

La distribución de los semigrabens (fig. 1) está controlada por importantes accidentes tectónicos (Del Olmo y Alvaro, 1984) que han condicionado la evolución y el relleno de los mismos desde su génesis hasta la actualidad. La tectónica distensiva ha facilitado el movimiento de bloques con diferente comportamiento relativo, de manera que unas zonas de estos semigrabens han permanecido más o menos estables o sometidas a elevación (plataformas carbonatadas de Lluchmajor-Campos, Sineu-Algaida, Artá y Levante), mientras que otras presentan una clara subsidencia. Son precisamente estas zonas más subsidentes las que han dado lugar a las principales cuencas plio-cuaternarias de Mallorca (Campos, Palma, Inca y Sa Pobla-Alcudia).

La cuenca de Palma es la más occidental de las que forman el surco subsidente más activo de la isla que se desarrolla al Sur de la Sierra de Tramuntana, con dirección NE-SW, en el que también se localizan las cuencas de Inca y Sa Pobla-Alcudia (fig. 1). La Cuenca de Palma queda limitada al Oeste por la falla de Palma (Díaz del Río y Rey, 1987) que la separa de la Sierra de Tramuntana, al Este por los afloramientos de la «Unidad Arrecifal» (Pomar *et al.*, 1983 a) que forman la Plataforma de Lluchmajor-Campos y al Norte y NE por los antiformes de Marratxí y de Sta. Eugenia que la separan de la Cuenca de Inca (Silva *et al.*, 1998).

En este trabajo se presentan los resultados paleomagnéticos procedentes del análisis de los depósi-

tos de edad plio-pleistocena que afloran en los bordes de la cuenca de Palma (fig. 1) correspondientes a la sección de Bahía Azul situada en la parte oriental y los depósitos del Banc d'Eivissa situados en la parte occidental de la bahía. Anteriormente en la isla de Mallorca se han realizado estudios paleomagnéticos (una síntesis aparece en Parés *et al.*, 1992) encaminados básicamente a la aplicación estructural de esta técnica pero no con fines magnetoestratigráficos, que son los que se han planteado en este estudio.

## Contexto geológico y geomorfológico

La sedimentación postorogénica que ha rellenado las cuencas de la isla está excelentemente documentada en diferentes trabajos de síntesis como son Pomar *et al.* (1983a), Barón y González (1984), Alvaro *et al.* (1984), Simó y Ramón (1986) y Fornós *et al.* (1991) entre otros.

La sección de Bahía Azul se localiza (fig. 1) en el labio levantado de la falla normal de Enderrocat (Díaz del Río *et al.*, 1993) que se encuentra afectando claramente a las unidades del Plioceno superior («Calcarenititas de Sant Jordi») y cuya traza delimita el área de sedimentación cuaternaria en la cuenca de Palma, a excepción de los depósitos eólicos. El sustrato de los depósitos pliocenos y cuaternarios en los bordes de la Bahía de Palma está formado por la «Unidad Arrecifal» ya citada que se encuentra afectada por una importante fase erosiva de edad intramessiniense por la distribución de unidades a escala regional (Pomar *et al.*, 1983a). Sobre esta superficie erosiva se disponen (fig. 2) los sedimentos desde messinienses hasta cuaternarios (terrazza marina de Es Pas des Verro y sistemas dunares suprayacentes). Los depósitos messinienses están constituidos por el «Complejo Terminal» o «Calizas de Santanyí» que, en este sector, están representadas por estromatolitos y colapso-brechas (Pomar *et al.*, 1983b). El Plioceno está representado por las «Calcarenititas de Sant Jordi», atribuidas al Plioceno superior, aunque en zonas más centrales de la cuenca aparecen también las «Calcisiltitas de Son Mir» en la base, atribuidas al Plioceno inferior-medio. La terraza marina de Es Pas d'es Verro se encuentra a unos 70-74 m sobre el nivel medio del mar (Cuerda y Sacarés, 1966, 1992) apoyándose tanto sobre el Plioceno

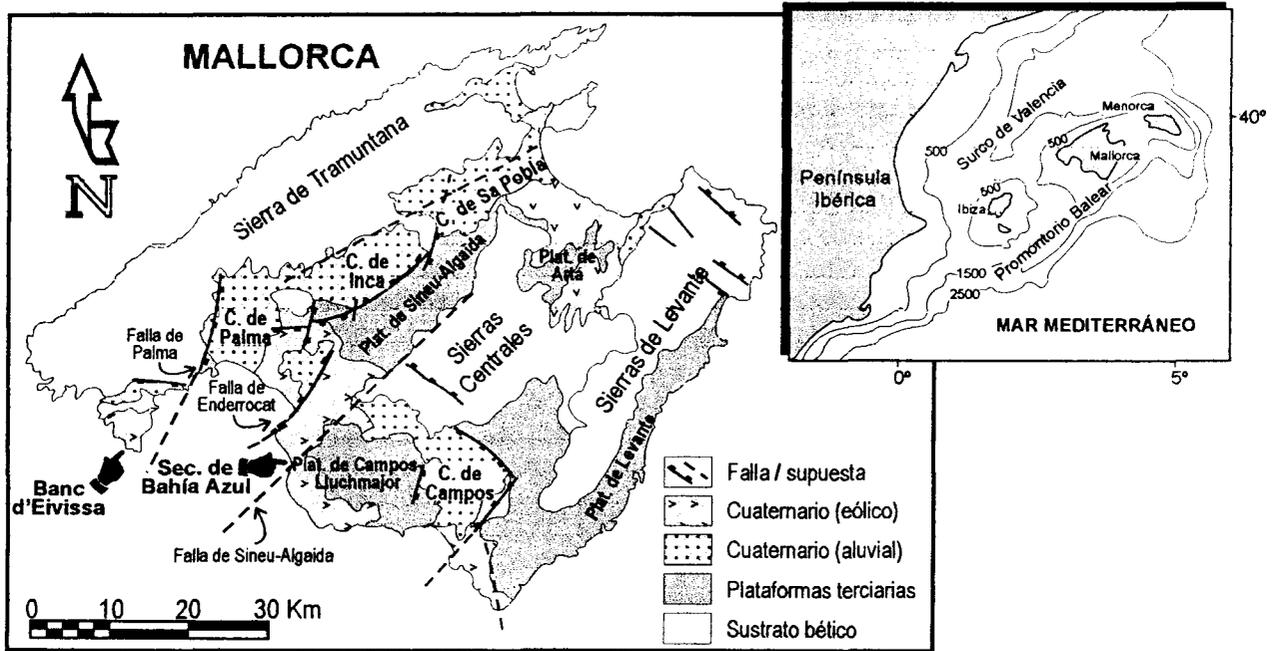


Fig. 1.—Situación de los depósitos plio-pleistocenos analizados y distribución de las principales cuencas sedimentarias de Mallorca y de los accidentes tectónicos más importantes que las controlan.

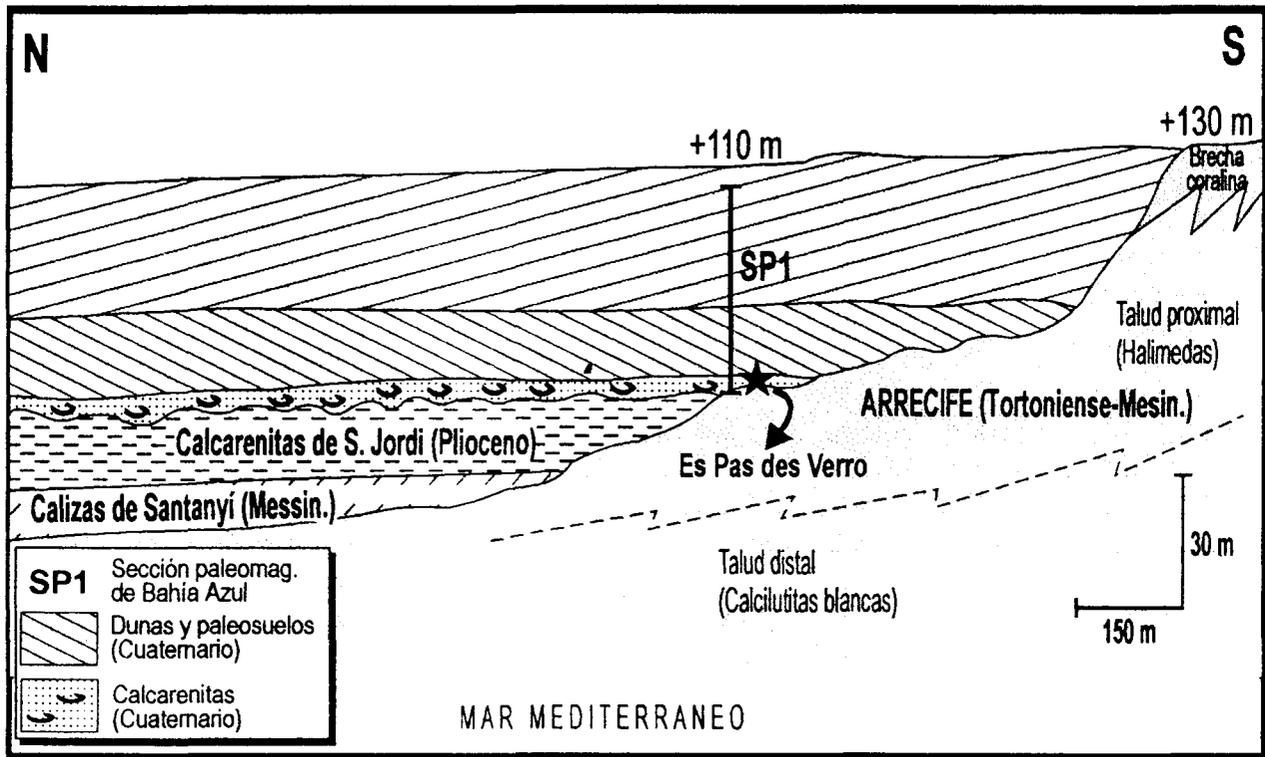


Fig. 2.—Corte geológico de los acantilados del área de Bahía Azul según Pomar *et al.* (1983b) y situación de la sección paleomagnética analizada (SP1). Explicación en texto.

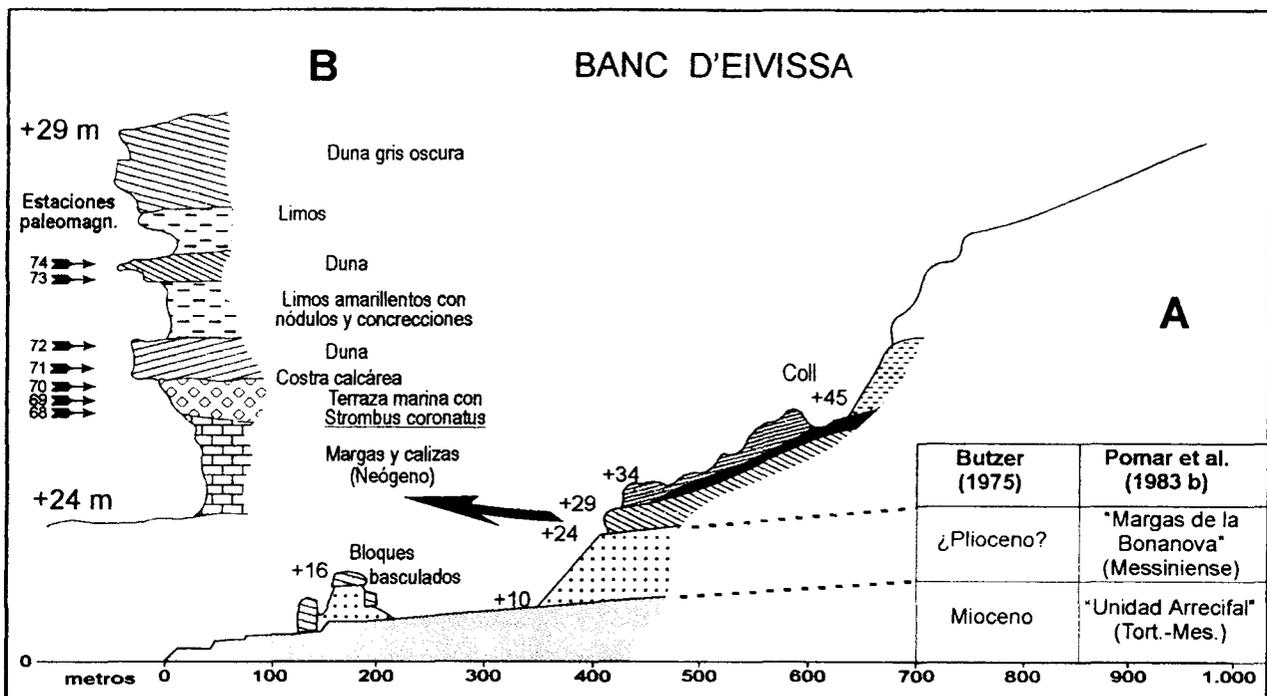


Fig. 3.A.—Esquema geológico del área de Banc d'Eivissa (simplificado de Roselló y Cuerda, 1973) y edades asignadas por diferentes autores al sustrato pre-cuaternario. B. Depósitos plio-pleistocenos y situación de las estaciones paleomagnéticas muestreadas.

como sobre la «unidad Arrecifal». Por su parte, los sistemas dunares que la fosilizan se apilan en todo este sector debido a la existencia de una barrera topográfica formada por un escarpe labrado en la «Unidad Arrecifal», aproximadamente perpendicular a la dirección de los vientos que las generaron de componente Oeste y Suroeste.

Los depósitos del Banc d'Eivissa se sitúan en un promontorio con forma de flecha que se eleva desde el nivel del mar hasta los 110-120 m en su parte más alta, localizado en el labio levantado de la falla normal de Palma (fig. 1). La base de los mismos se encuentra a una altura aproximada de 24-25 m sobre el nivel medio del mar (fig. 3) y está constituida por unos conglomerados marinos con fauna, de base erosiva (Roselló y Cuerda, 1973), y, sobre ellos, un conjunto de sistemas dunares que según Butzer (1975) pueden ser agrupados en seis grandes «hemiciclos» que abarcan todo el Cuaternario. Este autor separa en el sustrato pre-cuaternario del promontorio una parte inferior que considera de edad miocena de otra parte superior que considera de probable edad pliocena. Por su parte, Pomar *et al.* (1983b) consideran que el sustrato precuaternario que aflora en este promontorio corresponde a la «Unidad Arrecifal» en la base y a la unidad «Margas de la Bonanova», que diferentes autores consideran de edad messiniense inferior (Pomar *et al.*,

1983a; Simó y Ramón, 1986). En este afloramiento, esta última unidad está compuesta por sedimentos margosos marinos en la base que verticalmente evolucionan a margas ocreas y arcillas rojas con conglomerados continentales y se interpreta como el registro de una pulsación regresiva en áreas con relativa influencia terrígena marginal (Pomar *et al.*, 1983a).

### Litología y bioestratigrafía de los depósitos plio-pleistocenos

En el Banc d'Eivissa se muestreó una sección de aproximadamente 18 m (desde +10 hasta +28 m sobre el nivel medio del mar) que incluía los sedimentos situados por encima de la «Unidad Arrecifal» (fig. 3), aunque el grado de alteración de las muestras y la mala calidad de los datos no permitió el establecimiento de una secuencia magnetoestratigráfica fiable del conjunto. Únicamente algunos datos obtenidos de los depósitos plio-pleistocenos superiores pueden ser tenidos en consideración debido a que su litología y comportamiento son similares a la de los depósitos analizados en Bahía Azul, que han aportado datos de mayor calidad y que permiten hacer una interpretación más amplia de los resultados obtenidos en los citados sedimentos del Banc d'Eivissa.

La terraza marina, de entre 1 y 2 m de potencia, corresponde a un conglomerado marino con cantos redondeados y aplanados que hacia techo disminuyen pasando a una calcarenita. El contenido faunístico de la misma, con la presencia de *Strombus coronatus*, hizo que fuera situado estratigráficamente entre el Plioceno final y la base del Pleistoceno (Roselló y Cuerda, 1973). Dicho nivel marino está fosilizado por un conjunto de sistemas dunares separados por paleosuelos que llegan a alcanzar una cota de 120 m en las proximidades del afloramiento, de los que se han muestreado los dos sistemas dunares inferiores situados sobre la terraza marina. Las dunas están constituidas por calcarenitas bioclásticas y los paleosuelos, en los cuales aparece fauna de gasterópodos continentales, por limos y arcillas rojizas.

En Bahía Azul, la sección analizada fosiliza a la «Unidad Arrecifal» que está constituida, en este punto, por packstones de Hallimeda con grandes bloques de corales masivos que, justo debajo del contacto con las calcarenitas pleistocenas, presentan porosidad de tipo caverna rellena de arenas fosfatadas (Pomar *et al.*, 1983b). Los sedimentos cuaternarios pueden ser divididos en dos tramos diferentes (fig. 4). Los 2-2,5 m inferiores corresponden a depósitos marinos de playa y el resto de la serie está compuesta por unidades eólicas separadas por diferentes superficies de discontinuidad.

Los depósitos de playa están formados por calcarenitas bioclásticas amarillentas con fragmentos de fósiles y conchas dispersos y con estructuras verticales de bioturbación. Corresponden al yacimiento de Es Pas des Verro asignado al piso Emiliense (parte media del Pleistoceno inferior) por la fauna característica que contiene (Cuerda y Sacarés, 1966; 1992 y Pomar y Cuerda, 1979). Hacia techo son más rojizas y presentan pasadas centimétricas de conglomerados (desde 2 hasta 15 mm de diámetro) que lateralmente llegan a acuñarse. Los 30 cm superiores corresponden a un nivel rojo de gran continuidad lateral con una carstificación evidente en afloramiento. Todo el conjunto se ha interpretado como una secuencia regresiva de playa en la que el primer tramo corresponde a las facies de shoreface y el segundo a las de foreshore-backshore. El último nivel representa un período de emersión y subsiguiente carstificación, marcando una clara superficie regresiva. Esta superficie está fosilizada por 35-40 m de dunas que se han agrupado en nueve sistemas separados por superficies de diferentes características. Todos ellos están constituidos por calcarenitas bioclásticas con muy poco cuarzo.

Las superficies que separan los diferentes sistemas (fig. 4) se pueden dividir en dos tipos atendiendo a la magnitud de los hiatos sedimentarios que representan. Por una parte están las cicatrices de erosión (C

en fig. 4) que corresponden a superficies erosivas que separan láminas con distinta dirección y/o inclinación sin ninguna otra característica asociada. Se interpretan como pequeñas paradas en la sedimentación que no representan grandes lapsos de tiempo y que corresponden a trenes dunares consecutivos. Por otra parte están las superficies de rubefacción, los paleosuelos y los horizontes aluviales-coluviales (SR, P y A-C en fig. 4), que se interpretan como períodos de no sedimentación eólica más o menos largos dependiendo de sus características asociadas.

Las superficies de rubefacción (SR) se manifiestan por una cicatriz de erosión que presenta además un pequeño horizonte de 5-10 cm de grosor por debajo de la misma donde se observan procesos de rubefacción de la duna inferior y concentración de hierro y, en algunos puntos, una disolución importante de los bioclastos. Los paleosuelos (P) corresponden a niveles de potencia variable, desde 10-15 cm hasta 40-50 cm, compuestos de arenas y/o limos de color rojizo que generalmente presentan evidencias de bioturbación en mayor o menor medida. En ninguno de ellos se ha observado la presencia de gasterópodos fósiles. En los de mayor desarrollo aparecen un gran número de cantos angulosos de los mismos sistemas dunares. En algunos casos estos cantos parecen corresponder a pequeños coluviones mientras que en otros proceden del sustrato dunar del que se individualizan por la disolución del material colindante y quedan incorporados al paleosuelo. Los niveles aluviales-coluviales (A-C) corresponden a niveles de 30 cm a 1 m de potencia que presentan contactos netos y, en algunos puntos, base erosiva sobre el sistema dunar inferior. Están formados por un gran número de clastos dentro de una matriz limo-arcillosa de color rojizo. Hay mezcla de cantos desde muy angulosos a relativamente redondeados, con diámetros muy variables desde centimétricos a decimétricos, y de diferente procedencia. Unos corresponden a los sistemas dunares inferiores, otros parecen ser de carácter alóctono y muy probablemente otro conjunto de origen diagenético. La matriz presenta bioturbaciones puntuales y está fuertemente encostrada. Parece tratarse de mezcla de coluviones con depósitos aluviales poco transportados. Los dos niveles de este tipo identificados se localizan en la parte superior de la serie a unos 100 metros de altura separados por un sistema dunar de entre 1,5 y 3 m de potencia.

## Metodología

El muestreo se realizó mediante la obtención de entre dos y tres testigos orientados por estación, los cuales fueron extraídos mediante taladro eléctrico. Los niveles marinos se muestrearon con un intervalo de 20 a 40 cm. En los niveles de dunas supra-

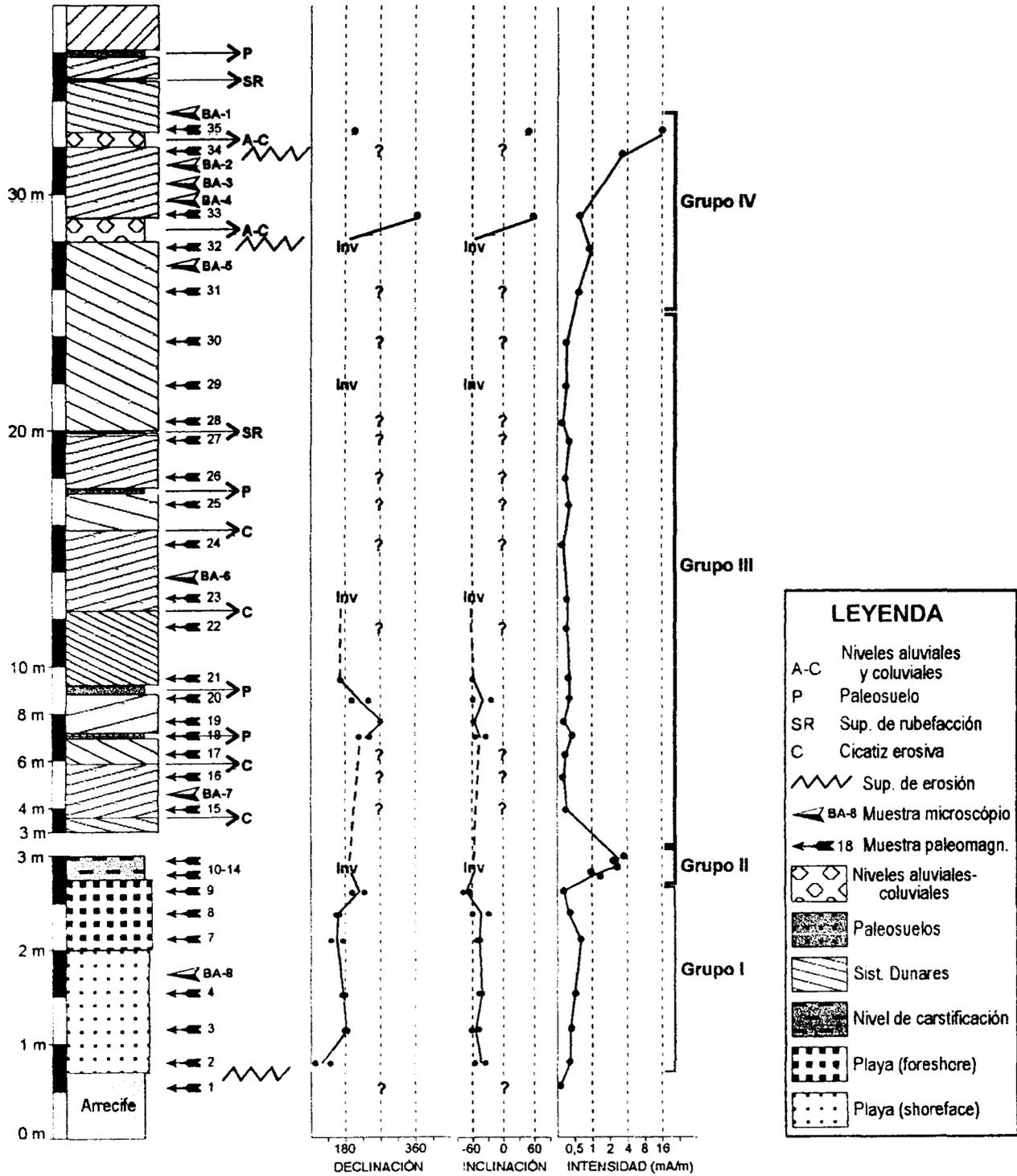


Fig. 4.—Sección estratigráfica, intensidad, inclinación y declinación magnética de Bahía Azul. La intensidad magnética se expresa en escala logarítmica en miliamperios por metro. Explicación en texto.

yacentes se realizaron un mínimo de 2 estaciones en cada sistema dunar.

Los análisis se han llevado a cabo en el Laboratorio Paleomagnético de Stockholm (Universidad de Stockholm). Las medidas de la magnetización remanente (MRN) inicial y las posteriores a los sucesivos pasos de desmagnetización se realizaron con el magnetómetro denominado HSM SQUID-Based Spinner Magnetometer. La desmagnetización progresiva de las muestras se realizó únicamente por el método de campos alternantes (Tarling, 1983; Banda *et al.*, 1986) con un desmagnetizador diseñado exclusivamente para el laboratorio («AF demagnetizer»). La desmagnetización se realizó a intervalos de 2,5-5 mT o 5-10 mT, dependiendo de las características y comportamiento de los especímenes, con un promedio de 8-12 pasos por muestra.

Se analizaron un mínimo de dos especímenes de testigos diferentes por cada estación (excepto en algunos casos en los que sólo fue posible tomar uno). No se han realizado pruebas de estabilidad de la magnetización ni pruebas de laboratorio para estudiar el tipo de minerales que portan la magnetización. Sin embargo, se ha realizado el estudio petrológico de algunas muestras de la sección para controlar posibles procesos de alteración, identificar sus características y facilitar así la interpretación de los resultados paleomagnéticos.

## Resultados paleomagnéticos

### *Sección de Bahía Azul*

Las muestras de esta sección se tomaron en la carretera que desciende desde la urbanización Bahía Azul hasta el mar, por un acantilado prácticamente vertical, apareciendo en la figura 4 su situación. La intensidad de la MRN (mA/m) se representa en escala logarítmica mediante un punto que corresponde a la media de los especímenes de cada estación. Los valores de declinación e inclinación se representan de diferentes formas: *a*) un punto en una estación significa que los especímenes dieron valores muy similares. En algún caso es que únicamente se disponía sólo de un espécimen; *b*) dos puntos representan especímenes de la misma estación que dieron valores ligeramente diferentes; *c*) *Inv* o *Nor* indica que no fue posible aislar direcciones de magnetización estables pero las componentes indicaban claramente polaridad inversa o normal; *d*) las interrogaciones corresponden a todos los análisis que no se han tenido en cuenta por problemas de interpretación debido a diferentes razones que se exponen a continuación. Las muestras se han agrupado en cuatro conjuntos atendiendo a sus características (fig. 4):

El grupo I corresponde a las calcarenitas bioclásticas marinas de la parte inferior de la columna (estaciones 2 a 9, ya que la estación 1 se tomó en los depósitos arrecifales y no se considera). Presentan una intensidad de MRN de entre 0,3 y 0,75 mA/m. La correlación de los valores de especímenes distintos de la misma estación es buena. Una vez eliminada la componente viscosa, que es relati-

vamente importante en algunas muestras, todas presentan componentes inversas en las fases minerales de baja y alta coercitividad (fig. 5-A). En lámina delgada presentan una alta porosidad relativa, buena conservación en general de los clastos, cemento predominantemente esparítico y, en menor medida, sintaxial. No se observan alteraciones importantes.

El grupo II está compuesto por las muestras tomadas en el horizonte carstificado a techo de los depósitos marinos (estaciones 10 a 14). La intensidad de MRN se sitúa entre 1 y 4 mA/m. Durante la desmagnetización no ha sido posible aislar direcciones de magnetización estables en la mayor parte de los casos, sin embargo, las estaciones 10 a 13 (a.i.), presentan componentes inversas en las fases minerales de alta coercitividad, mientras que en las de baja coercitividad se presentan una o varias componentes normales o inversas con valores de declinación e inclinación anómalos (fig. 5-B). Estas se asocian a la presencia de *minerales secundarios* formados durante la carstificación, mientras que la componente inversa en las fases de alta coercitividad se considera la característica. La correlación entre especímenes distintos es mala.

El grupo III incluye las estaciones de los sistemas dunares inferiores (15 a 30). Presentan intensidades de MRN entre 0,04 y 0,6 mA/m. Se ha observado que los valores más altos de MRN entre especímenes de la misma estación casi siempre están asociados a la presencia de fases minerales de baja coercitividad con componentes magnéticas normales, por lo que se asocian a magnetizaciones químicas (de alteración) o viscosas. Un ejemplo de ello se puede observar en la figura 5 (C y D), donde el espécimen 20 a, de menor intensidad que el 20 b, aún conserva la componente inversa (considerada característica) de alta coercitividad. En cambio, en el 20 b los minerales originales se han disuelto y se han generado los productos, de baja coercitividad, que reflejan una componente normal probablemente actual. En general, las muestras de este grupo presentan comportamientos que las hacen especialmente difíciles de interpretar. La correlación entre valores de distintos especímenes es muy mala y, generalmente, no es posible aislar direcciones de magnetización estables. Esto se debe a diferentes razones. En algunos casos, la intensidad de los especímenes es demasiado baja para los límites de medida del magnetómetro utilizado (valores muy próximos o menores de 0,1 mA/m no han sido considerados debido a los elevados porcentajes de error de las medidas), en otros casos especímenes de la misma estación ofrecían resultados contradictorios y, por último, la existencia de procesos de alteración postdeposicional han invalidado bastantes medidas. En lámi-

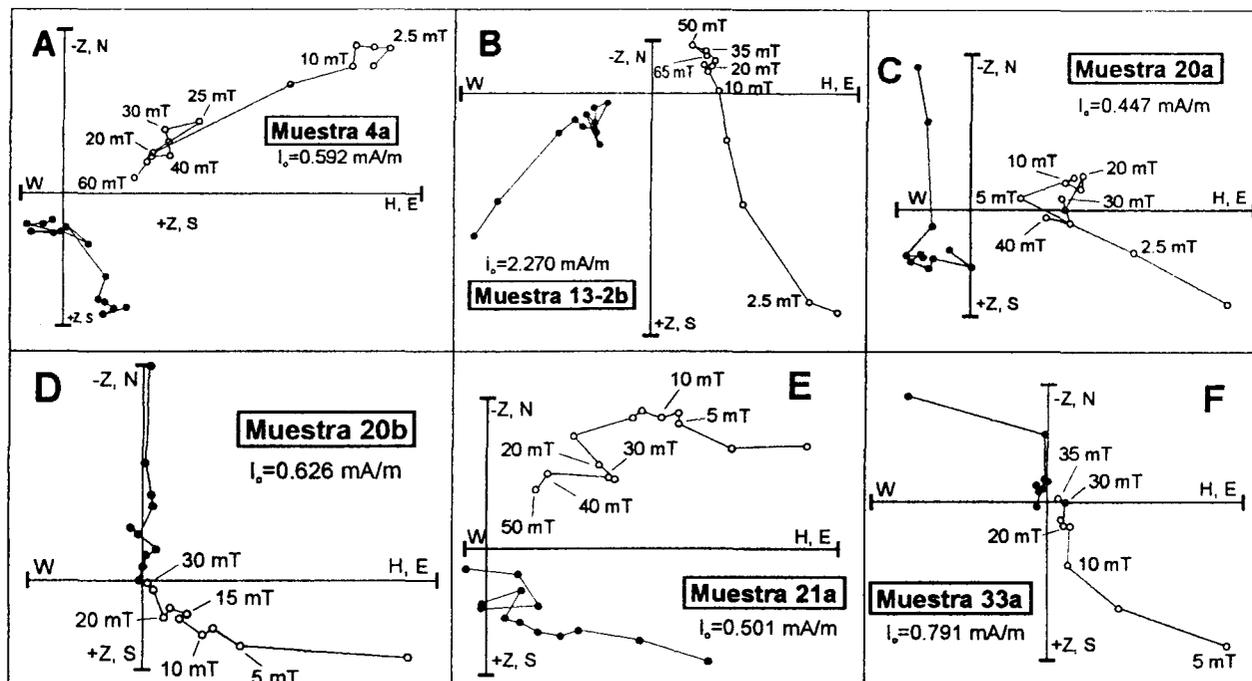


Fig. 5.—Diagramas ortogonales de desmagnetización progresiva de varios especímenes representativos de los diferentes grupos de muestras de la sección de Bahía Azul. Situación de las muestras en figura 4. Explicación en texto. Círculos huecos: componente vertical (inclinación); Círculos negros: componente horizontal (declinación); mT: militeslas.

na delgada se han identificado diferentes procesos que indican modificaciones diagenéticas relativamente importantes como granos de cuarzo con bordes corroídos, reemplazamiento de cuarzo por carbonatos, disolución total o parcial de clastos y generaciones sucesivas de cemento con diferentes texturas.

Una parte importante de las estaciones han sido desechadas por la baja fiabilidad de los resultados obtenidos (fig. 4). Solamente las estaciones 18 a 21 (ambas incluidas), 23 y 29 presentan datos de calidad aceptable (fig. 5-E). En estos casos presentan polaridades inversas en las componentes de alta coercitividad, mientras que los minerales de baja coercitividad, en muchos casos, presentan valores no coherentes. Excepto la muestra 18 que fue tomada en un paleosuelo, las restantes corresponden a sistemas dunares.

El grupo IV está constituido por las estaciones situadas en la parte superior de la serie (31 a 35). La intensidad de MRN se sitúa entre 0,6 y 16 mA/m, con una clara tendencia a aumentar de las estaciones inferiores a las superiores. Corresponden a los sistemas dunares que se encuentran erosionados por niveles aluviales y que en afloramiento se observan más alterados. La correlación entre diferentes especímenes es relativamente buena, sin embargo, cada estación presenta valores muy diferentes de la

inmediatamente inferior y superior, habiéndose aislado también direcciones anómalas. Bastantes especímenes presentan componentes normales asociadas a minerales de baja coercitividad, por lo que se asocian a procesos de alteración (fig. 5-F). En lámina delgada también se observan procesos diagenéticos importantes con desarrollo de estructuras edáficas en algún caso.

#### Sección del Banc d'Eivissa

Las muestras tomadas en la terraza marina (fig. 6), correspondientes a las estaciones 68 a 70, presentan una intensidad de MRN entre 0,1 y 0,8 mA/m. Su comportamiento es muy desigual durante el proceso de desmagnetización. La mayor parte de los especímenes de las estaciones 68 y 69 no se han conseguido desmagnetizar más allá del 30-40 % de su intensidad inicial y, alguno de ellos no ha sido posible desmagnetizarlo. En otras estaciones, sin embargo, los especímenes ya habían perdido el 80 % de su intensidad de magnetización a campos de 5 mT (fig. 6-B), observándose el mismo comportamiento que en los especímenes alterados de la sección anterior. La correlación entre valores de diferentes especímenes es mala y no se ha conseguido aislar direcciones estables en la mayor parte de

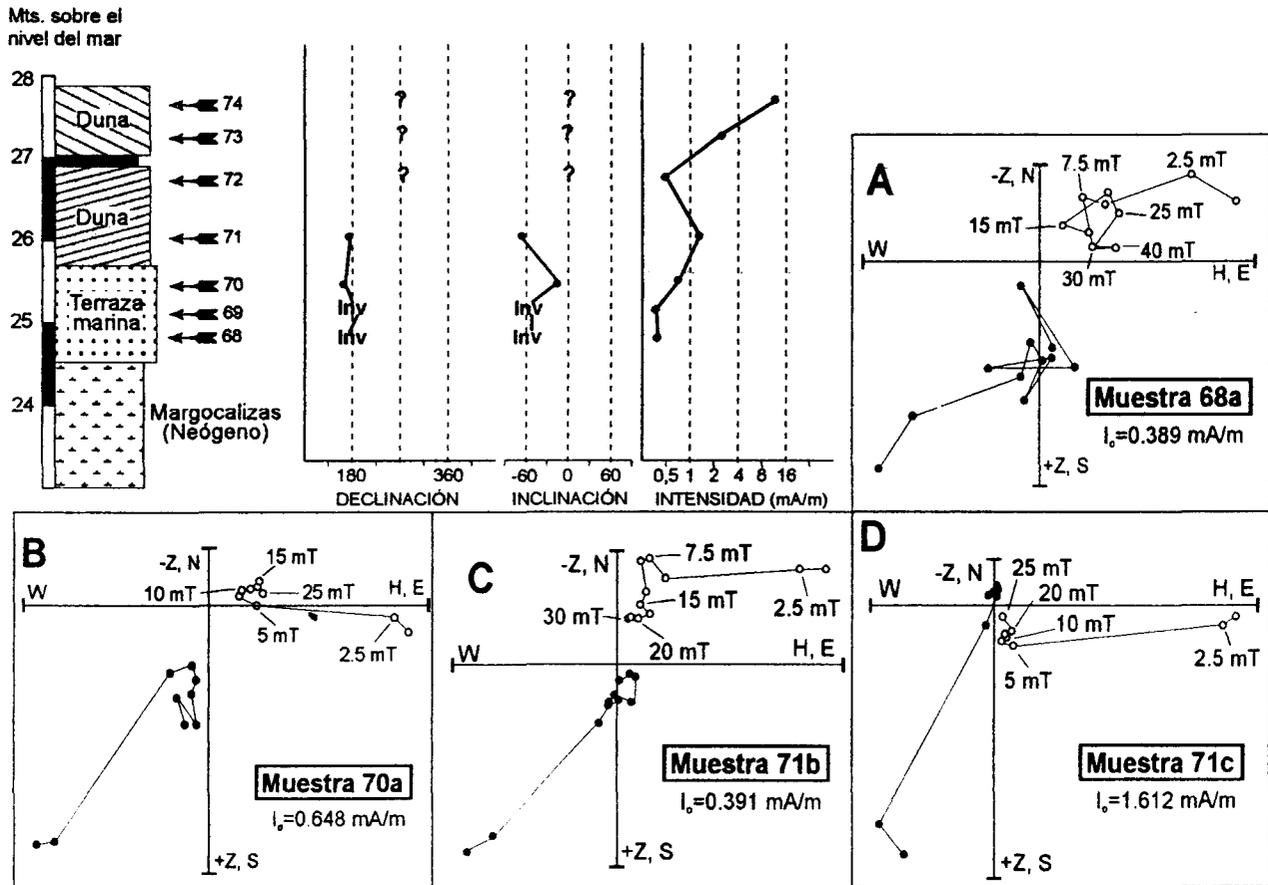


Fig. 6.—Intensidad, inclinación y declinación magnética de los depósitos plio-pleistocenos de Banc d'Eivissa y diagramas ortogonales de desmagnetización progresiva de varios especímenes representativos. Situación de las muestras en figura 3. Explicación en texto. La intensidad magnética se expresa en escala logarítmica en miliamperios por metro. Círculos huecos: componente vertical (inclinación); Círculos negros: componente horizontal (declinación). mT: militeslas.

los casos. Algunos presentan polaridad inversa (fig. 6; A y B), aunque la calidad de los datos es baja. En la muestra 70 a (fig. 6-B) se puede observar un valor de declinación en torno a 210° y unos valores de inclinación negativa muy someros del orden de 10-15°.

Las muestras recogidas en los depósitos dunares suprayacentes (estaciones 71 a 74) presentan una intensidad de MRN muy variable que oscila entre 0,3 y 7 mA/m. La mayor parte de la intensidad inicial (aproximadamente el 70-80 %) se pierde a campos pequeños de entre 0 y 5 mT (fig. 6; C y D). En general tampoco se han aislado direcciones estables de magnetización en la mayor parte de los especímenes, y cuando se ha conseguido presentan valores anómalos. La correlación entre especímenes de la misma estación es mala debido, en muchos casos, a la existencia de alteraciones relativamente importantes de las muestras. Así, tal como ocurría en las muestras recogidas en los sis-

temas dunares de la sección de Bahía Azul, se puede comprobar cómo unos valores relativos altos de la intensidad de la MRN indican una alteración más o menos importante del sedimento original. Un ejemplo puede verse en la figura 6 (C y D) donde aparece el espécimen 71b (MRN = 0,391 mA/m) que indica polaridad inversa, y el espécimen 71c (MRN = 1,612 mA/m) que refleja una polaridad normal. En este último caso, esta componente corresponde a los minerales generados durante la meteorización, representando una componente secundaria de alteración que ha «borrado» la polaridad original del sedimento. También puede observarse en los gráficos de estos especímenes la importante componente viscosa que presentan y que se elimina en los primeros pasos de desmagnetización. En el caso de las estaciones 73 y 74 la alteración es muy importante y los valores obtenidos de declinación e inclinación indican unas direcciones anómalas.

## Discusión

Consideramos que únicamente la parte inferior de la sección de Bahía Azul presenta unos datos de calidad suficiente para ser considerados con fines magnetoestratigráficos. Los depósitos marinos inferiores, el primer paleosuelo y el segundo y tercer sistema dunar presentan polaridades inversas claras. No se ha podido establecer una polaridad característica para el primer sistema dunar que fosiliza la terraza marina, por lo que hay un intervalo temporal que no se ha cubierto. Considerando que este sistema, al igual que el tercero (entre el metro 10 y 17), sólo presenta cicatrices erosivas que separan tres generaciones de dunas y que podrían considerarse como superficies de segundo orden, en el sentido de jerarquía utilizado por Brookfield (1977) o Kocurek (1988), entonces se puede asumir que el intervalo de tiempo que representan es relativamente pequeño a escala geológica. En este sentido, Havholm y Kocurek (1994) señalan la posibilidad de que las grandes superficies de discontinuidad («super-superficies») que separan las distintas unidades eólicas pueden representar cantidades de tiempo muy superiores a las de las acumulaciones eólicas entre dichas superficies. Esto induce a pensar que es muy improbable que esta unidad eólica, o cualquier otra, pueda representar un pequeño intervalo de polaridad normal. Sería más probable, en cambio, que esto ocurriera en el segundo paleosuelo que separa el segundo y tercer sistema dunar, si se considera el mismo como una «super-surface» en el sentido anteriormente señalado, o en la superficie regresiva carstificada a techo de las calcarenitas de playa. Por la misma razón podemos considerar que las estaciones 21 y 23 son representativas del tercer sistema dunar. En cuanto al resto de la sección, no se han obtenido datos de calidad suficiente que registren un cambio a polaridad normal que nos hubieran servido para acotar más objetivamente el intervalo temporal o para registrar el paso del Pleistoceno inferior al medio (Matuyama a Brunhes).

En cuanto a los depósitos de Banc d'Eivissa hay que señalar que la polaridad inversa que registra la terraza marina y el primer sistema dunar no sirve para precisar su posición estratigráfica concreta. Tampoco su contenido paleontológico aporta datos concluyentes ya que si bien Roselló y Cuerda (1973) señalan que el mismo parece indicar un plioceno final (básicamente por la presencia de *Strombus coronatus*), en el SE de la Península Ibérica la presencia de este gasterópodo no es indicativa de una edad concreta ya que se encuentra también en depósitos del Pleistoceno inferior (Bardají *et al.*, 1995).

Además, se ha encontrado una relación directa entre la intensidad de MRN y la alteración de las

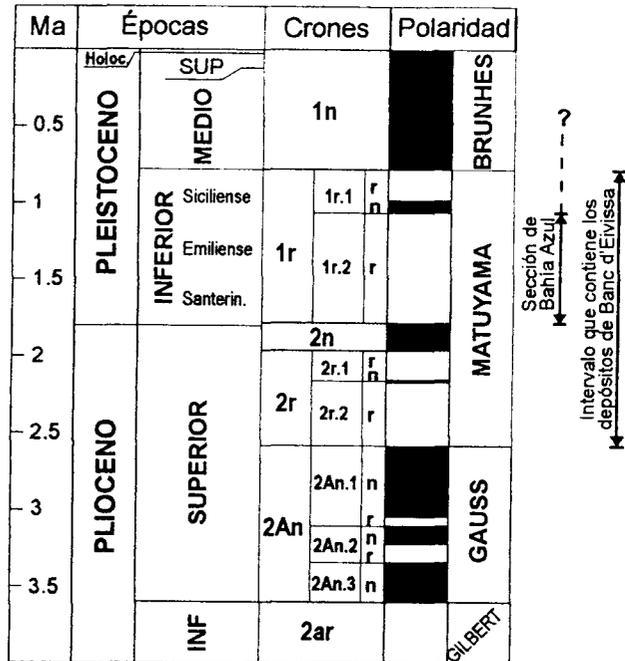


Fig. 7.—Escala temporal de polaridad geomagnética de los últimos 4 Ma (Cande y Kent, 1995) y situación propuesta de la parte basal de la sección de Bahía Azul y de los depósitos plio-pleistocenos de Banc d'Eivissa.

muestras, tanto en la sección de Bahía Azul como en los depósitos de Banc d'Eivissa, constatándose también que durante el proceso de alteración se produce la destrucción de minerales de alta coercitividad, que consideramos portadores de la componente magnética característica, y la formación de minerales de baja coercitividad que aportan componentes secundarias de polaridad normal o con valores anómalos de declinación e inclinación.

## Conclusiones

Se interpreta que la parte inferior de la serie de Bahía Azul, hasta el metro 17 aproximadamente, representa un intervalo de polaridad inversa dentro de la época de Matuyama, sin poder hacer más precisiones teniendo en cuenta sólo los datos paleomagnéticos. Estos datos no contradicen la situación estratigráfica asignada al yacimiento de Es Pas des Verro, considerado perteneciente al piso Emiliense (parte media del Pleistoceno inferior) por su contenido faunístico (Cuerda y Sacarés, 1966; 1992; Pomar y Cuerda, 1979). Por ello se considera que la sección obtenida se sitúa entre los cronos de polaridad normal Clr. 1n, Jaramillo, y C2n, Olduvai (Cande y Kent, 1995), lo que equivale a un rango de edades entre 1.07 y 1.77 Ma (fig. 7), sin poder

hacer más precisiones, ya que no se ha registrado ningún cambio de polaridad en la mitad inferior de la serie y en la mitad superior no se han obtenido datos fiables. Sin embargo, rigurosamente tampoco puede excluirse totalmente que la sección considerada, o parte de la misma, pueda situarse por debajo del Cron Olduvai.

En cuanto a los depósitos del Banc d'Eivissa, tanto el nivel marino como el primer sistema dunar que lo fosiliza presentan polaridad inversa, aunque los datos son de baja calidad y la alteración de los materiales es, en general, muy alta. Como se ha señalado anteriormente, el contenido paleontológico del primero no permite asignarlo al Plioceno superior o al Pleistoceno inferior y los datos paleomagnéticos, sin oponerse a esta situación estratigráfica, no permiten más precisiones que su atribución a la época de polaridad inversa de Matuyama (fig. 7) que abarca desde 2.581 Ma hasta 0,780 Ma (Cande y Kent, 1995).

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dra. M. L. Osete los comentarios sobre los análisis realizados que han facilitado la interpretación de los mismos y al Dr. E. Molina por la revisión de las láminas delgadas. Este trabajo se ha financiado con los Proyectos de Investigación PB 98-0265 y PB 98-0514.

#### Referencias

- Alvaro, M., Barnolas, A., Del Olmo, P., Ramírez del Pozo, J. y Simó, A. (1984). El Neógeno de Mallorca: Caracterización sedimentológica y bioestratigráfica. *Bol. Geol. Min.*, 95, 3-25.
- Banda, E., Parés, J. M. y Freeman, R. (1986). La técnica del paleomagnetismo. Estudio piloto en los bordes de la cuenca Balear. *Estudios Geol.*, 42, 147-165.
- Bardají, T., Goy, J. L., Mörner, N. A., Zazo, C., Silva, P. G., Somoza, L., Dabrio, C. J. y Baena, J. (1995). Towards a Plio-Pleistocene chronostratigraphy in Eastern Betic Basins (SE Spain). *Geodinamica Acta*, 8, 2, 112-126.
- Barón, A. y González, C. (1984). Distribución espacial del Mio-plioceno en la isla de Mallorca. *I Congreso Español de Geología*, I, 137-148.
- Brookfield, M. E. (1977). The origin of bounding surfaces in ancient aeolian sandstones. *Sedimentology*, 24, 303-332.
- Butzer, K. W. (1975). Pleistocene littoral sedimentary cycles of the Mediterranean Basin: A Mallorquin view. *After the Australopithecines* (K. W. Butzer and G. Isaac, Eds.), Mouton Press, The Hague, 25-71.
- Cande, S. C., y Kent, D. V. (1995). Revised calibration of the geomagnetic polarity time scale for the late Cretaceous and Cenozoic. *J. Geophys. Res.*, 100, 6093-6095.
- Cuerda, J. y Sacarés, J. (1966). Nueva contribución al estudio del Pleistoceno marino del término de Lluchmajor (Mallorca). *Bol. Soc. Hist. Nat. Balear*, 12, 63-100.
- Cuerda, J. y Sacarés, J. (1992). *El Cuaternari al Migjorn de Mallorca*. Direcció General de Cultura, Conselleria de Cultura, Educació i Esports, Govern Balear, Palma de Mallorca, 130 págs.
- Del Olmo, P. y Alvaro, M. (1984). Control estructural de la sedimentación neógena y cuaternaria de Mallorca. *I Congreso Español de Geología*, III, 219-228.
- Díaz del Río, V. y Rey, J. (1987). La tectónica reciente en la Bahía de Palma (Balears) y sus implicaciones morfoestructurales. *Bol. Geol. Min.*, 98, 342-348.
- Díaz del Río, V., Somoza, L., Goy, J. L., Zazo, C., Rey, J., Hernández Molina, F. J. y Mateu, G. (1993). *Mapa Fisiográfico de la Bahía de Palma y memoria explicativa*. Instituto Español de Oceanografía, Publ. Esp., n.º 16, 39 págs.
- Fallot, P. (1948): *Etude geologique de la Serra de Majorque*. Tesis Doctoral, Universidad de París, 420 págs.
- Fornós, J. J., Marzo, M., Pomar, L., Ramos Guerrero, E. y Rodríguez Perea, A. (1991). Evolución tectonosedimentaria y análisis estratigráfico del Terciario de la isla de Mallorca. En: F. Colombo (Ed.) *I Congreso del Grupo Español del Terciario, Vic 1991. Libro-Guía Excursión n.º 2*, Univ. de Barcelona, 145 págs.
- Gelabert, B. (1998). *La Estructura geológica de la mitad occidental de la Isla de Mallorca*. ITGE, Colección Memorias, Ministerio de Medio Ambiente: 129 págs.
- Havholm, K. G. y Kocurek, G. (1994). Factors controlling aeolian sequence stratigraphy: clues from super bounding surface features in the Middle Jurassic Page Sandstone. *Sedimentology*, 41, 913-934.
- Kocurek, G. (1988). First-order and super bounding surfaces in eolian sequences-Bounding surfaces revisited. *Sedim. Geol.*, 56, 193-206.
- Parés, J. M., Freeman, R. y Roca, E. (1992). Neogene structural development in the Valencia trough margins from palaeomagnetic data. *Tectonophysics*, 203, 111-124.
- Pomar, L. y Cuerda, J. (1979). Los depósitos marinos pleistocénicos en Mallorca. *Acta Geol. Hispanica.*, 14, 505-513.
- Pomar, L., Marzo, M. y Barón, A. (1983a). El Terciario de Mallorca. *El Terciario de las Baleares*, L. Pomar, A. Orador, J. J. Fornós y A. Rodríguez Perea (Eds.), Inst. Estudios Baleáricos, Univ. Palma de Mallorca, 21-44.
- Pomar, L., Esteban, M., Calvet, F. y Barón, A. (1983b). La Unidad Arrecifal del Mioceno superior de Mallorca. *El Terciario de las Baleares*, L. Pomar, A. Orador, J. J. Fornós y A. Rodríguez Perea (Eds.), Inst. Estudios Baleáricos, Univ. Palma de Mallorca, 139-175.
- Roselló, V. M., y Cuerda, J. (1973). Notas sobre el Plioceno y Cuaternario del Banc d'Eivissa (Mallorca). *Cuadernos de Geografía, Univ. Valencia*, 13, 5-13.
- Silva, P. G., González-Hernández, F. M., Goy, J. L. y Zazo, C. (1998). Origen y desmantelamiento del Antiforme Plio-Cuaternario de Marratxí (Mallorca, España). *Geogaceta*, 23, 143-147.
- Simó, A., y Ramón, X. (1986). Análisis sedimentológico y descripción de las secuencias deposicionales del Neógeno postorogénico de Mallorca. *Bol. Geol. Min.*, 97, 445-472.
- Tarling, D. H. (1983). *Paleomagnetism*. Chapman and Hall, New York, 379 págs.

Recibido el 4 de junio de 2000.  
Aceptado el 27 de agosto de 2000.