

## Las lluvias de barro en el Mediterráneo Occidental: El caso de Mallorca

Lluís A. Fiol<sup>1</sup>, José A. Guijarro<sup>2</sup> y Joan J. Fornós<sup>3</sup>

1. Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears (vdbslfm4@ps.uib.es)

2. Instituto Nacional de Meteorología, Centro Meteorológico en Illes Balears (pmd@inm.es)

3. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears (dctjfa0@ps.uib.es)

(Recibido: 10-Dic-2001. Publicado: 28-Dic-2001)

### Resumen

Se presenta una relación de 222 días con lluvias de barro observadas en Palma de Mallorca (Mediterráneo Occidental) desde 1979. La serie presenta una tendencia creciente, y los casos se dan preferentemente en la mitad más cálida del año. Se han estudiado las situaciones meteorológicas asociadas a este fenómeno, que combinan advección cálida del sur en niveles bajos con sudoestes asociados a una depresión o vaguada en la troposfera media. Las muestras estudiadas presentan una textura limosa, y se componen principalmente de cuarzo y calcita. En unas pocas ocasiones se ha observado precipitación de barro seco en forma de esférulas, que han debido formarse por evaporación total de las gotas de la lluvia de barro durante su caída.

**Palabras clave:** lluvias de barro, polvo sahariano, meteorología, granulometría, análisis mineralógico, Mallorca

### 1. Introducción

Llama la atención el hecho de que, si bien a nivel popular el fenómeno meteorológico conocido como lluvias de barro es ampliamente conocido por su espectacularidad y el trastorno que provoca a los habitantes de los núcleos urbanos, en nuestras islas son muy escasos los trabajos que tratan el tema. Así, tras una breve nota anónima publicada por el Centro Meteorológico de Baleares (C.M.B., 1947), Colom (1948) y Jansá (1948) estudian las lluvias de barro ocurridas en la primavera de 1947, desde los puntos de vista geológico y meteorológico respectivamente; Fiol (1985) da a conocer 22 lluvias de barro registradas durante el periodo 1979-1985, y un análisis mineralógico de una de ellas, comentando su participación en la formación de un suelo que se acumula en los tejados del núcleo urbano de Palma de Mallorca; finalmente, Fornós *et al.* (1997) estudian aspectos mineralógicos y texturales, así como la aportación de este aerosol a sedimentos recientes tanto marinos como terrestres.

El aparente desinterés por este tipo de meteoro también se puede extender al ámbito de la península Ibérica, si bien en los últimos años ha ido aumentando la atención hacia este fenómeno en la vertiente mediterránea. Así, Capel Molina (1979) analiza una lluvia de barro caída en el sudeste peninsular; Martín-Vide y Moreno (1985) y Martín-Vide y Llasat (1991) nos dan noticia de las lluvias de barro en Barcelona a partir del registro del Observatorio Fabra (que comienza en 1944); Ávila y Rodá (1991) estudian los aportes que este aerosol proporciona al agua de lluvia, y cómo acaba neutralizando su acidez; Quereda y Olcina (1994) dan una relación de lluvias de barro en la Comunidad Valenciana (1988-1993) y estudian su génesis, comentando la posible relación entre el incremento de este fenómeno meteorológico y el cambio climático; y Ávila (1999) estudia la composición mineral y elemental del contenido particulado de las lluvias del Montseny, llegando a identificar áreas fuente del mismo en el Sáhara occidental, Atlas marroquí, y Sáhara central.

Más tradición en el estudio de este meteoro encontramos en las demás áreas del mundo donde se manifiestan procesos de transporte de polvo atmosférico similares, ya que cada vez es más evidente la necesidad de conocerlo por la trascendencia e implicaciones que tienen a diversos niveles. Si nos centramos en la zona mediterránea, diversos autores han tratado el tema desde diferentes puntos de vista: Prodi y Fea (1979) estudian las situaciones meteorológicas favorables para que tenga lugar este fenómeno en

la península italiana y la composición mineralógica de este aerosol, e insisten en la idea, ya expresada por otros autores, de su importancia como participantes en la formación de suelos durante el Cuaternario; Loje-Pilot *et al.* (1986) tratan de los efectos de este polvo sahariano a nivel del agua de lluvia y de los procesos sedimentarios en el Mediterráneo; Nihlén y Mattsson (1989) comentan la posibilidad de que la *terra rossa* del área griega se haya formado a partir de polvo eólico procedente del norte de África; Molinaroli *et al.* (1993) proponen un modelo para valorar los efectos de la latitud en la composición de los aerosoles en el Mediterráneo central, y diferenciar así entre los de procedencia sahariana y los de origen antropogénico; Prezerakos (1998) ilustra con un caso de estudio los mecanismos de generación en el norte de África de nubes de polvo y su transporte hasta Grecia y el sur de los Balcanes; Dulac *et al.* (1998), mediante observaciones Lidar (proyecto MEDUSE), detectan polvo desde menos de 2 hasta 6 km de altitud; y otros autores realizan estudios de simulación mediante modelos de elevación y transporte de polvo (Grigoryan y Sofiev, 1998; Balkanski *et al.*, 1998).

Nuestro interés por este fenómeno comenzó en 1979, relacionado con el comienzo de un estudio sobre el poblamiento florístico de la habitación urbana de Palma de Mallorca (Fiol, 1983), con la finalidad de conocer su participación en la formación de una estructura microedáfica que se forma en diversos lugares del citado medio. La recogida de agua de lluvia y de escorrentía para elaborar la tesis doctoral no hizo más que incrementar este interés para esclarecer las implicaciones, cada vez más numerosas y trascendentes, que se atribuyen a este fenómeno meteorológico.

## 2. Lluvias de barro observadas en Palma de Mallorca

Las primeras observaciones realizadas por uno de nosotros (Fiol) datan, como se ha dicho antes, de 1979, y se extienden hasta nuestros días (noviembre de 2001 en el momento de redactar este artículo). Sin embargo, durante los primeros años únicamente se anotaban cuando el fenómeno era muy patente, y no fue hasta 1982 cuando se procedió a su anotación sistemática. Particularmente exhaustivo fue el recuento durante el periodo 1988-90, durante el cual se recogieron muestras de agua de lluvia para su análisis mediante un embudo de polietileno de alta densidad, de 25 cm de diámetro, colocado en la terraza de un edificio del campus de la *Universitat de les Illes Balears* (UIB), pudiendo evaluar las cantidades de polvo arrastrado por la precipitación. Para completar la toma de muestras se recogió con un pincel el polvo depositado encima de superficies lisas adyacentes a los dispositivos relacionados con la recogida de las muestras de agua. Durante los años siguientes se prestó atención a la mayoría de las lluvias y al depósito seco que dejaban en una palangana de aluminio y sobre diversas superficies lisas, como lunas de automóviles, etc, recogiendo igualmente muestras con un pincel. En la tabla 1 se recoge la lista de observaciones de lluvia de barro efectuadas.

En total se han registrado 222 precipitaciones de barro, con cantidades anuales que presentan una tendencia ascendente, como se observa en la figura 1, en la que sólo se han representado las observaciones desde 1982 (obviando los primeros años en que las anotaciones distaban mucho de ser exhaustivas). No obstante, esta tendencia se ve interrumpida por el descenso del periodo 1992-96. La comparación de estos datos con los de otras estaciones resulta bastante problemática. Por ejemplo, el gráfico de la serie de Elche (hasta 1994) publicada por Quereda *et al.* (1996) presenta grandes discrepancias de detalle, coincidiendo únicamente en la tendencia general al aumento de la frecuencia en los últimos años. Esto es debido a que, si bien la llegada de masas de aire con polvo en suspensión debe de ser bastante concordante en zonas geográficas relativamente próximas como el sudeste peninsular y las Islas Baleares, sólo se perciben como lluvias de barro cuando se producen precipitaciones, que en éstas situaciones suelen caracterizarse por su escasez y elevada variabilidad espacial. A ésto se añade la dificultad y subjetividad de su medida, puesto que siempre hay una cierta cantidad de polvo en suspensión en el aire, y por tanto toda lluvia será portadora de partículas sólidas en cantidades variables, generalmente muy pequeñas; de ahí que para tener frecuencias objetivas de lluvias de barro tendría que establecerse un umbral inferior a partir del cual empezar a contabilizarlas, y eso implicaría la necesidad de una evaluación cuantitativa de los sedimentos de cada precipitación.

Tabla 1. Relación de días con observación de lluvia de barro en Palma de Mallorca

1979:	21-5, 12-7.
1980:	No se observaron (observaciones esporádicas los 3 primeros años).
1981:	22-9.
1982:	2-8, 28-8, 31-8, 5-9.
1983:	17-4, 8-5, 14-5, 31-5, 4-7, 19-9, 20-9.
1984:	19-6, 21-6, 1-7, 9-11.
1985:	24-4, 23-5, 3-7, 30-7.
1986:	1-3, 2-4, 6-4, 21-5, 26-7, 10-8, 24-8, 31-8, 7-9, 17-9, 25-9, 13-10.
1987:	9-6, 14-7, 15-7, 28-8, 23-10, 4-12.
1988:	17-1, 30-3, 2-4, 6-5, 7-5, 9-6, 16-6, 23-6, 29-6, 10-9, 16-10, 17-10, 18-10, 20-12.
1989:	30-3, 10-4, 23-4, 24-4, 25-4, 26-4, 13-5, 22-5, 29-5, 30-5, 5-7, 6-7, 10-7, 5-8, 10-8, 15-11, 16-11, 7-12, 26-12.
1990:	5-3, 8-3, 12-3, 14-3, 24-3, 1-4, 2-4, 29-4, 10-5, 11-6, 15-7, 28-7, 16-9, 25-9, 13-10.
1991:	6-3, 7-3, 30-3, 14-4, 16-4, 29-7, 30-7, 11-10, 6-11.
1992:	4-3, 4-4.
1993:	10-5, 26-5, 8-6, 9-6, 25-8, 26-8, 19-9.
1994:	No se hicieron observaciones.
1995:	26-6, 9-7, 31-7, 9-8, 10-8.
1996:	15-8, 14-11, 23-12.
1997:	22-1, 5-5, 11-5, 15-5, 24-5, 2-6, 4-6, 18-6, 2-7, 14-7, 16-7, 22-7, 23-7, 24-7, 4-8, 5-8, 8-8, 10-8, 25-8, 29-9, 6-11.
1998:	30-3, 12-5, 28-5, 2-6, 3-6, 5-6, 22-6, 16-8, 17-8, 18-8, 28-8, 1-9, 7-9, 11-9.
1999:	4-3, 12-3, 13-3, 14-3, 15-3, 24-3, 23-4, 27-4, 3-5, 16-5, 19-5, 30-5, 2-6, 9-6, 29-6, 7-7, 19-7, 27-7, 9-8, 19-8, 26-8, 27-9, 12-10, 25-10, 30-10, 12-11, 30-11, 15-12, 28-12.
2000:	23-2, 23-3, 26-3, 8-4, 11-4, 4-5, 10-5, 21-5, 5-6, 13-6, 10-7, 23-7, 24-7, 2-8, 23-8, 24-8, 25-8, 31-8, 13-9, 27-9, 30-10, 2-12, 21-12.
2001:	13-1, 8-3, 16-3, 27-4, 30-4, 9-5, 10-5, 18-5, 2-6, 10-6, 5-7, 19-7, 23-7, 15-8, 30-8, 24-9, 28-9, 6-10, 8-10, 13-10, 20-10.

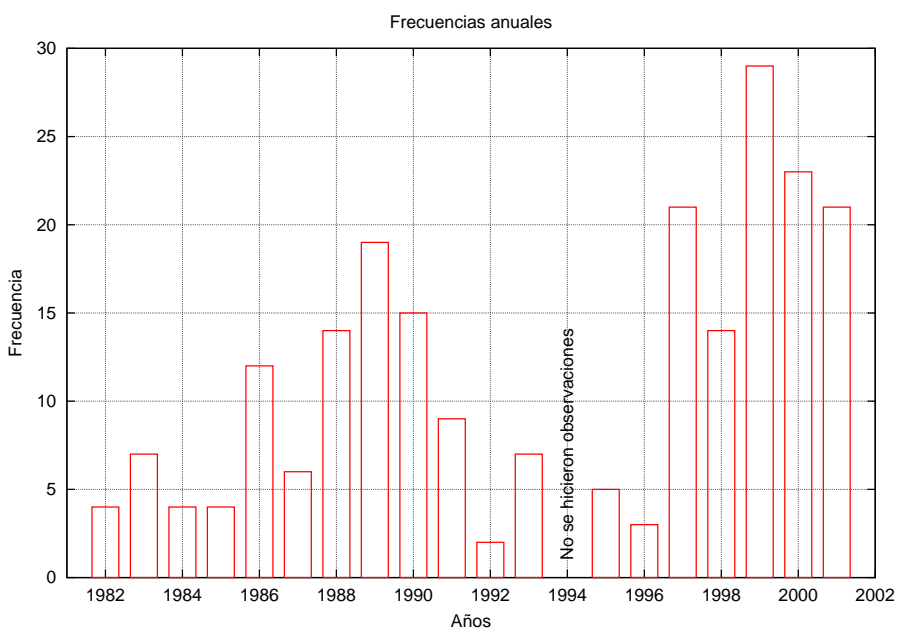


Fig. 1. Serie anual del número de observaciones de lluvia de barro en Palma de Mallorca.

Otros autores también han observado una tendencia creciente en la frecuencia anual de lluvias de barro, sin poder determinar qué parte de este aumento es debido a cambios en la circulación atmosférica y cuál a procesos de desertización inducidos por el hombre (Tegen y Fung, 1995; Moulin *et al.*, 1997; Ávila, 1999).

La distribución mensual se muestra en la figura 2. Se observa una clara preferencia por el periodo más cálido del año, con un 84 % de las observaciones acumuladas entre los meses de marzo y septiembre, y máximos en agosto y julio, seguidos a corta distancia por mayo. Esto concuerda con lo descrito por otros autores, que afirman que el verano es la estación de máximo transporte de polvo en el Mediterráneo (Dulac *et al.*, 1996; Quereda *et al.*, 1996; Moulin *et al.*, 1997).

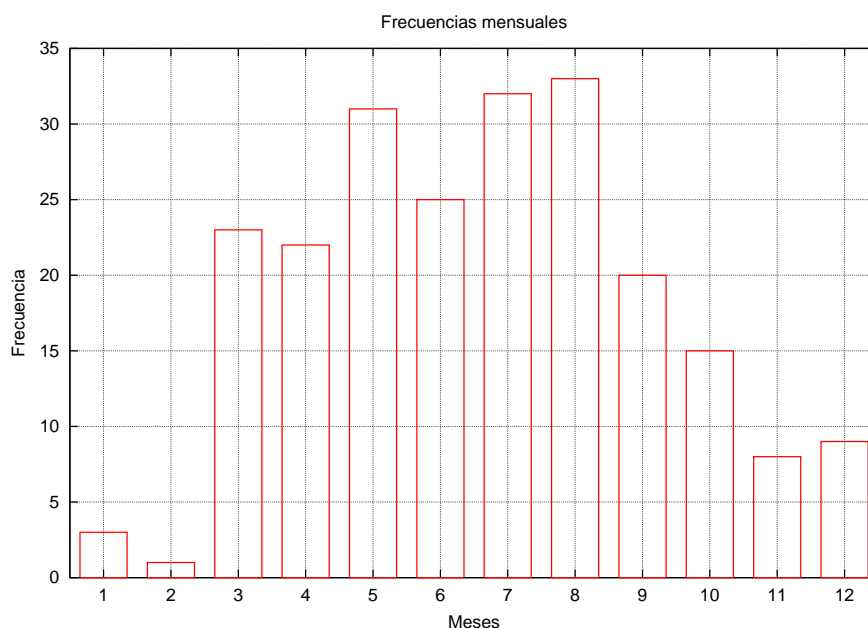


Fig. 2. Distribución mensual del número de observaciones de lluvia de barro en Palma de Mallorca.

### 3. Caracterización meteorológica

Para la caracterización de las situaciones meteorológicas asociadas a las lluvias de barro registradas se han utilizado, hasta 1995 inclusive, los mapas publicados en el Boletín Diario del Instituto Nacional de Meteorología (INM, 1979-95), y para los años posteriores se han revisado los almacenados en el banco de datos de esa misma institución, en el *Centro Meteorológico en Illes Balears*.

Para cada uno de los días en que se observó el fenómeno, se estudiaron primeramente los mapas de las 12:00 horas UTC, tanto de superficie como de los niveles de 850 y 500 hPa (correspondientes estos últimos a unas alturas aproximadas de 1500 y 5500 m, respectivamente). A continuación se consultaron también los mapas de horas anteriores (00:00 y 06:00) y posteriores (18:00 y 24:00, siempre UTC), para observar la evolución de cada situación a lo largo del día. Como complemento de estos mapas se disponía también de los radiosondeos de las 12:00 y 24:00, así como de las imágenes del satélite METEOSAT (desde 1995 en adelante, también cada 6 horas).

En la tabla 2 se presentan las frecuencias relativas de direcciones del flujo del aire, en superficie y 500 hPa, asociadas con los días de lluvia de barro. En superficie predominan los vientos de entre este y sudoeste, que totalizan un 56 % de los casos, pero también es frecuente encontrar vientos flojos de dirección variable en un ambiente de bajas presiones relativas (33 %). El resto de las direcciones del viento en superficie están muy pobremente representadas.

Tabla 2. Frecuencias relativas (en tantos por mil) de observaciones simultáneas de dirección del flujo atmosférico en superficie y en el nivel de 500 hPa, en los días con observación de lluvia de barro. (A y B indican situaciones de altas y bajas presiones relativas, respectivamente, con vientos flojos de dirección variable).

500 hPa	Superficie										TOTAL
	B	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N	A	
B	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	10
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SE	0	0	5	9	0	0	0	0	0	0	14
S	32	0	54	45	5	5	0	0	0	5	146
SW	243	18	113	140	54	95	27	0	5	5	700
W	32	0	5	18	0	5	14	0	0	9	83
NW	14	9	0	5	0	0	0	5	9	0	42
N	5	5	0	0	0	0	0	0	5	0	15
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	331	37	177	217	59	105	41	5	19	19	1010

Por otra parte, el sudoeste es con mucho el viento predominante en el nivel de 500 hPa (70 %), seguido a gran distancia por los de procedencia sur (15 %) y oeste (8 %). Vemos pues que los vientos del tercer cuadrante acumulan una frecuencia del 93 %, quedando el resto de direcciones con frecuencias nulas (caso de nordeste y este) o muy escasas. Estos vientos suelen estar asociados a una vaguada bien marcada (49 %) o a una depresión cerrada (39 %), generalmente situada en la península Ibérica o sus proximidades. En los mapas de 850 hPa se observa una clara advección térmica sobre Mallorca en el 79 % de los casos estudiados, con flujo de componente sur.

Por tanto el retrato robot de las situaciones meteorológicas típicamente asociadas con las lluvias de barro en Mallorca (o en las islas Baleares) incluyen bajas presiones relativas con vientos flojos en superficie, advección cálida de componente sur en el estrato situado encima de la capa superficial, y vientos del sudoeste en la troposfera media asociados a una depresión o a una profunda vaguada, elementos ya apuntados en estudios anteriores (C.M.B., 1947; Jansá, 1948; Quereda y Olcina, 1994; Quereda *et al.*, 1996).

Este esbozo sinóptico puede, naturalmente, presentar variaciones. Así, aparte de la presencia o ausencia de una baja cerrada en 500 hPa, la depresión de superficie puede ser bastante intensa, sobre todo cuando es producto de una ciclogénesis a sotavento de la cordillera del Atlas (García-Moya *et al.*, 1989). Por otra parte, cuando es débil suele estar asociada a otras depresiones situadas en el norte de África, generalmente de núcleo cálido. Esto aporta las condiciones de convección térmica que propician la formación de torbellinos de polvo y su inicial suspensión en la atmósfera, de modo similar a lo observado por Shengjie *et al.* (1998) en el noroeste de China, donde las tormentas comienzan a levantar arena con vientos medios de 5 a 5,3 m/s, muy próximos al umbral de 6 m/s observado en túnel de viento.

Una vez en el aire, el ascenso dinámico propio del ambiente depresionario facilita el mantenimiento del polvo en las capas bajas de la atmósfera y su transporte a centenares, en ocasiones miles, de kilómetros (Quereda *et al.*, 1996). Es por esto por lo que la máxima frecuencia del fenómeno se da principalmente en verano, siguiendo en importancia los meses anteriores y posteriores, más cálidos que los invernales, pues la sequedad del suelo y las bajas térmicas se combinan para favorecer el proceso inicial de formación de nubes de polvo y arena en las zonas áridas del norte de África.

Como ejemplo ilustrativo presentaremos el caso del 8 de agosto de 1997. En la figura 3 aparece la zona del mediterráneo occidental, vista por el satélite METEOSAT ese día a las 10:30 h UTC, en la que se observa una nube de polvo de forma anular extendiéndose desde África hacia las Islas Baleares. También hay abundante nubosidad convectiva en el Sáhara argelino, así como sobre la península Ibérica y el norte de Mallorca.

En ese momento había una baja relativa en superficie sobre la península Ibérica y el norte de África que impulsaba vientos de levante sobre Baleares, mientras que en el mapa de 850 hPa se observan vientos de componente sur advectando las isotermas sobre las islas, y en 500 hPa la situación también era típica, con una depresión atlántica y vientos del sudoeste sobre nuestra zona mediterránea (fig. 4).

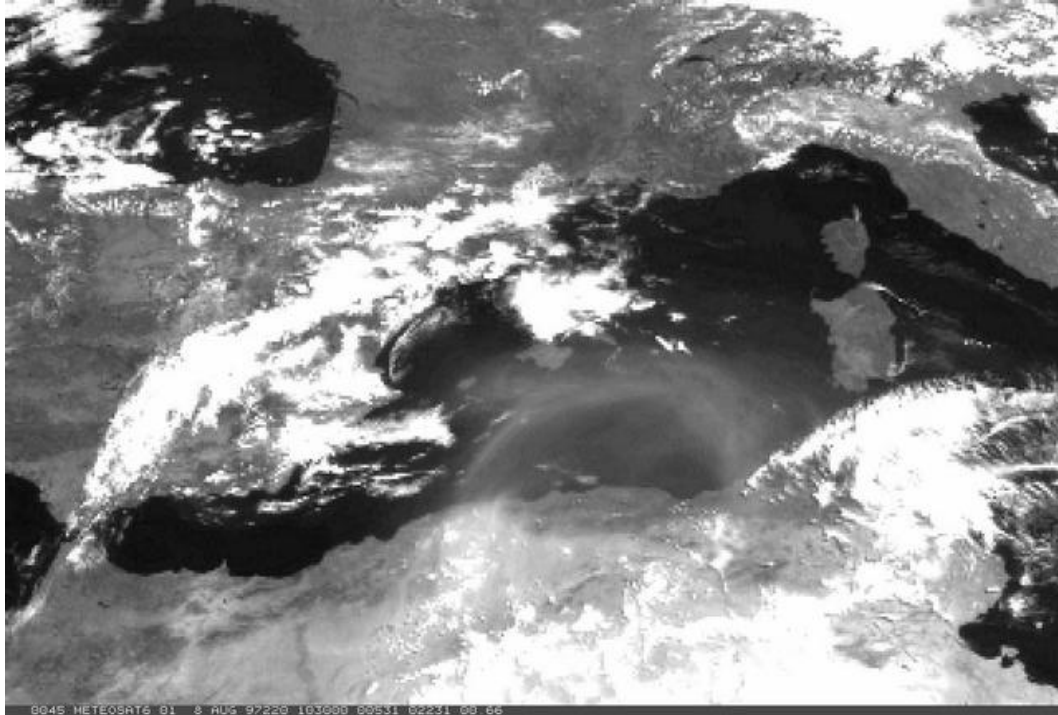


Fig. 3. Nube de polvo, con forma anular, extendiéndose desde el norte de África hacia las Islas Baleares (8-Ago-97 a las 10:30 h UTC).

Un fenómeno oceanográfico muy ligado al mismo tipo de situaciones de lluvias de barro es el de las *rissagas*, como se las conoce en Baleares (y particularmente en Ciutadella, en el extremo occidental de la isla de Menorca), o *seiches* en la denominación francesa, más extendida internacionalmente. Consiste en oscilaciones de corto periodo (unos 10 minutos) y gran amplitud (pueden superar los 2 m entre los niveles más alto y más bajo) en el interior del puerto de la citada localidad. (Se han observado también en otros puertos de Baleares, pero es en Ciutadella donde resultan más espectaculares). Como consecuencia de estas oscilaciones se producen fuertes corrientes hacia dentro y hacia fuera del puerto (que se ubica en el fondo de una cala estrecha y alargada), corrientes que pueden producir graves daños a las embarcaciones allí atracadas. Jansá (1986) y Ramis y Jansá (1987) describen cómo las situaciones atmosféricas con advección cálida del sur en los niveles bajos generan una inversión térmica por contraste con la capa más superficial que, en contacto con el mar Mediterráneo, permanece relativamente inalterada. Esta inversión, en combinación con vientos moderados a fuertes del sudoeste en 500 hPa, genera fenómenos ondulatorios que se amplifican debido a la inestabilidad condicional que suele haber también en la troposfera media, originando bandas de nubes convectivas y oscilaciones de presión que, en resonancia con la oscilación propia de las aguas del puerto, pueden aumentar hasta producir dicho fenómeno.

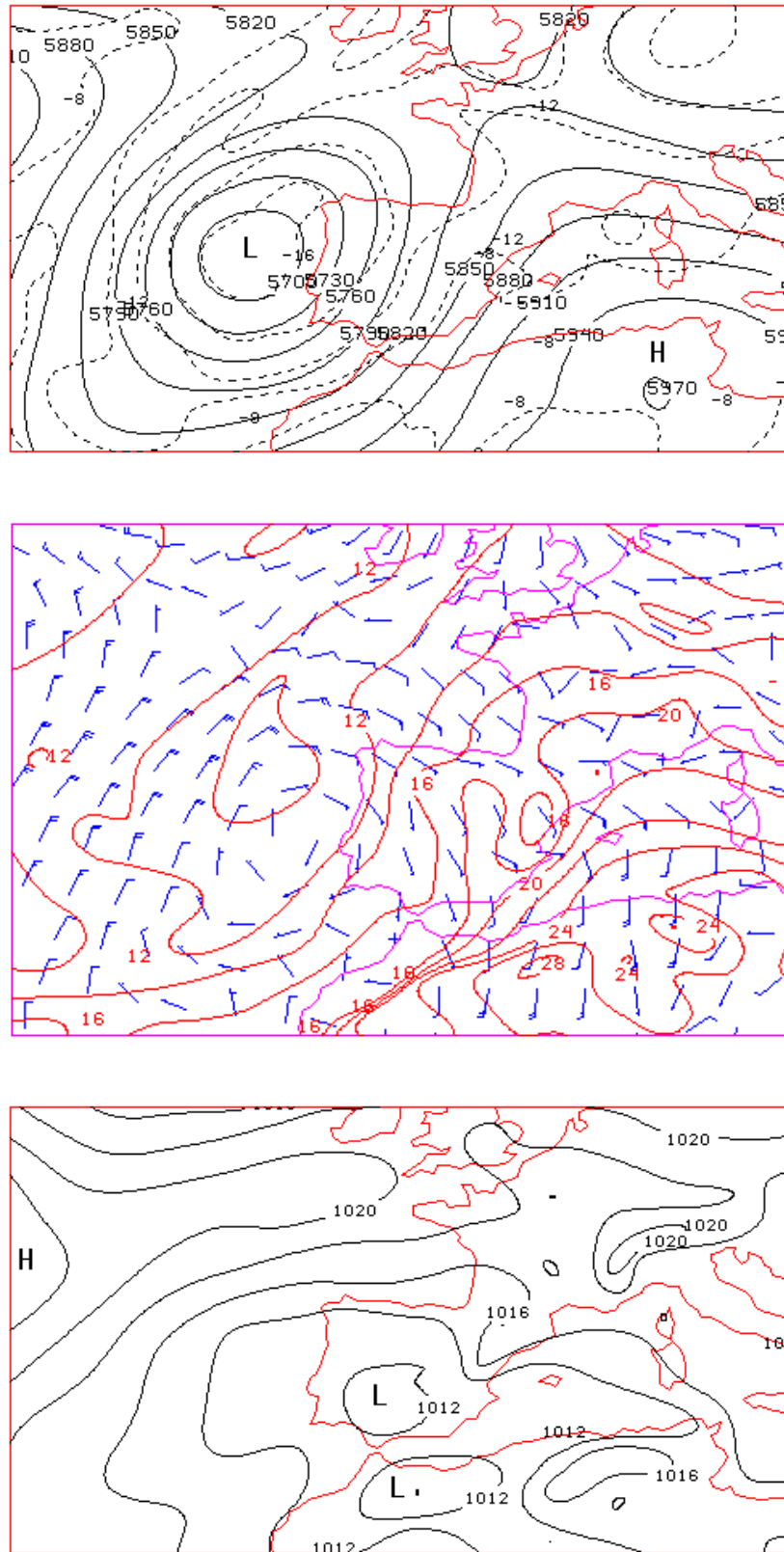


Fig. 4. Situación meteorológica del 8 de agosto de 1997 a las 12:00 h UTC. De abajo a arriba: Isóbaras en superficie, vientos e isotermas al nivel de 850 hPa, e isohipsas (líneas continuas) e isotermas (a trazos) al nivel de 500 hPa.

## 4. Análisis de muestras de barro seleccionadas

### 4.1. Metodología

Como se ha mencionado anteriormente, siempre que era posible se tomaban muestras con un pincel de las lluvias de barro observadas. Las muestras obtenidas de superficies conocidas se pesaron con una balanza de precisión y, en las 6 ocasiones en que las cantidades fueron suficientemente grandes, se realizaron difractogramas de rayos X y granulometrías.

Para las granulometrías y análisis texturales, las muestras se analizaron con un granulómetro Coulter-LS, obteniendo curvas acumulativas, histogramas de frecuencias y parámetros estadísticos elementales. Los difractogramas se obtuvieron con un difractómetro de rayos X Siemens D-5000, tanto sobre muestras con orientación aleatoria como orientadas por sedimentación de una suspensión al vacío sobre un substrato poroso. También se trataron las muestras con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para eliminar la materia orgánica. Se calentaron réplicas de las mismas a 375 y 600°C durante 1 hora y se trataron con etilen-glicol a 60°C para poder diferenciar los minerales arcillosos.

### 4.2. Textura de las muestras

Todas las muestras presentan una textura limosa, como indica el hecho de que la fracción de limo representa un 73,58 % en volumen por término medio (6,66 % de limo muy fino, 9,52 % fino, 18,38 % medio, 19,38 % grueso y 19,65 % muy grueso), oscilando entre el 49,93 y el 83,78 %. La siguiente fracción más representada es la arenosa, con un promedio del 18,59 % en volumen (7,87 % muy fina, 6,69 % fina, 2,99 % media y 1,05 % gruesa), y valores individuales de entre 5,74 y 46,46 %. La fracción arcillosa tiene únicamente un valor medio del 7,83 %, con valores que oscilan entre 5,46 y 14,87 %.

Los principales parámetros estadísticos de los análisis granulométricos aparecen en la tabla 3. La media tiene un valor de 57,19  $\mu\text{m}$  (limo muy grueso), con valores que van de los 20,11  $\mu\text{m}$  (limo grueso) a 128,9  $\mu\text{m}$  (arena fina). La mediana presenta un valor medio de 27,43  $\mu\text{m}$ , y un rango que va de 9,26 a 58,92  $\mu\text{m}$ . La desviación típica tiene una media de 83,17  $\mu\text{m}$  con valores entre 27,10 y 165,00  $\mu\text{m}$ . Todas las muestras analizadas presentan una distribución leptocúrtica (curtosis media = 9,6) y están sesgadas hacia la derecha (sesgo medio = 2,65).

Tabla 3. Análisis granulométricos ( $\mu\text{m}$ ) y parámetros texturales.

Muestra	Media	Mediana	Moda	D. típ.	Asimetría	Curtosis
6-5-88	35,94	33,53	47,19	27,10	1,50	6,34
10-4-89	128,90	58,92	47,19	165,00	2,20	5,15
24-4-89	26,15	18,61	34,22	28,30	2,81	12,80
5-7-89	20,11	9,26	8,49	29,60	3,26	13,00
6-3-91	56,70	17,65	24,81	142,00	4,04	16,10
4-3-92	75,31	26,61	20,02	107,00	2,09	4,19
Medias	57,19	27,43	30,32	83,17	2,65	9,60

La distribución granulométrica muestra dos tipos de curvas, aunque todas tienen una distribución de frecuencia similar, con valores máximos para el tamaño correspondiente al limo. Esta distribución de frecuencias puede ser unimodal o bimodal, en cuyo caso encontramos un máximo secundario en el tamaño de arena fina.

### 4.3. Composición mineralógica

Los análisis mineralógicos de las muestras de polvo muestran la presencia de minerales arcillosos, cuarzo, feldespato, y carbonatos. Los difractogramas de rayos X reflejan una baja cristalización de los minerales arcillosos y un predominio del cuarzo, seguido de los minerales carbonatados (tabla 4).



El componente principal de todas las muestras es el cuarzo que, caracterizado por picos de reflexión a 3,34 y 4,26 Å, está bien representado en todas las difracciones realizadas. Los análisis semicuantitativos arrojan un valor medio en todas las muestras del 60,71 %, oscilando entre el 40,9 % y el 73,75 %.

Los minerales carbonatados (calcita y dolomita), segundo componente en importancia, también están presentes en todas las muestras. La calcita es la dominante, con un pico reflexivo a 3,03 Å. Su presencia media en las muestras es del 26,3 %, con valores que oscilan entre el 22,17 y el 31,11 %. La dolomita, con una reflexión a 2,88 Å, presenta una variabilidad mucho mayor, ya que sus valores van desde 2,89 hasta 19,17 %, con una media de 7,29 %.

Los minerales del grupo de los feldspatos están representados por la microclina, con una reflexión a 3,25 Å y otra a 4,22 Å (que coincide con la del cuarzo, presente en todas las muestras). También hallamos plagioclasa, con reflexión a 3,19 Å. El valor medio del feldespato potásico en todas las muestras es de 1,06 %, con valores entre 0 y 2,06 %, mientras que la plagioclasa presenta un valor medio de 2,35 %, con valores que oscilan entre 0,73 y 4,09 %.

Las arcillas, el grupo de menor importancia entre los minerales presentes, están representadas principalmente por la illita y la caolinita. La caolinita se identificó por la reflexión de 7 Å. La ausencia de clorita se puso de manifiesto por la falta de su reflexión base a 14 Å. El valor medio de la caolinita, no detectada en todas las muestras, fue del 1,93 %, con valores entre 0 y 5,42 %. La presencia de la illita se muestra por las reflexiones a 10 y 5 Å de las muestras no tratadas, que permanecen invariables tras el tratamiento con etilen-glicol. Este mineral solamente estaba presente en una de las muestras, con un valor del 2,21 %, lo que da un promedio en todas las muestras de 0,37 %.

Tabla 4. Composición mineralógica de las muestras.

Muestra	Illita	Caolinita	Cuarzo	Feld.K	Plag.	Calcita	Dolomita
6-5-88	0,00	0,00	73,75	0,00	1,19	22,17	2,89
10-4-89	0,00	0,26	63,53	1,56	3,17	26,70	4,78
24-4-89	0,00	0,69	64,55	2,06	0,73	27,84	4,14
5-7-89	0,00	1,20	62,48	0,00	4,09	25,42	6,82
6-3-91	2,21	3,99	59,04	2,04	2,26	24,55	5,91
4-3-92	0,00	5,42	40,90	0,71	2,69	31,11	19,17
Medias	0,37	1,93	60,71	1,06	2,35	26,30	7,29

## 5. Precipitaciones de barro seco en forma de esférulas

### 5.1. Descripción

En ausencia de lluvia, la precipitación por sedimentación del polvo arrastrado por los vientos de procedencia sahariana solamente se percibe en los casos en que es especialmente abundante. Generalmente este polvo se presenta como una capa continua, sin las huellas típicas de las gotas de lluvia, y su observación a la lupa binocular revela un aspecto similar al de las muestras obtenidas tras una lluvia de barro normal.

Sin embargo, en 6 ocasiones se encontró que el polvo precipitado, en lugar de aparecer disgregado como es habitual, se hallaba compactado en forma de pequeñas bolitas de barro seco. Las 6 muestras se recogieron a lo largo de tres episodios, en las siguientes fechas: 26-8-99, 23-7-00, 24-7-00, 23-8-00, 24-8-00 y 25-8-00.

Su observación mediante lupa binocular con objetivo milimetrado revela un conjunto de esferas bastante regulares, con tamaños comprendidos entre 40 y 300  $\mu\text{m}$ , aunque los más frecuentes se hallan entre 80 y 200  $\mu\text{m}$ . En la microfotografía electrónica de barrido de la figura 5 se observan las formas esféricas, cuya

uniformidad se ve alterada únicamente por una concavidad más o menos regular, como la que presenta el ejemplar de la parte superior derecha de la figura. También es posible apreciar una separación granulométrica tal que las partículas más finas tienden a situarse preferentemente en la superficie, sobre todo en la periferia de la concavidad, mientras que las más gruesas parecen ocupar el interior. Ocasionalmente también se han observado ejemplares irregulares, producto de la aglomeración del polvo sobre alguna fibra presente en el aire.

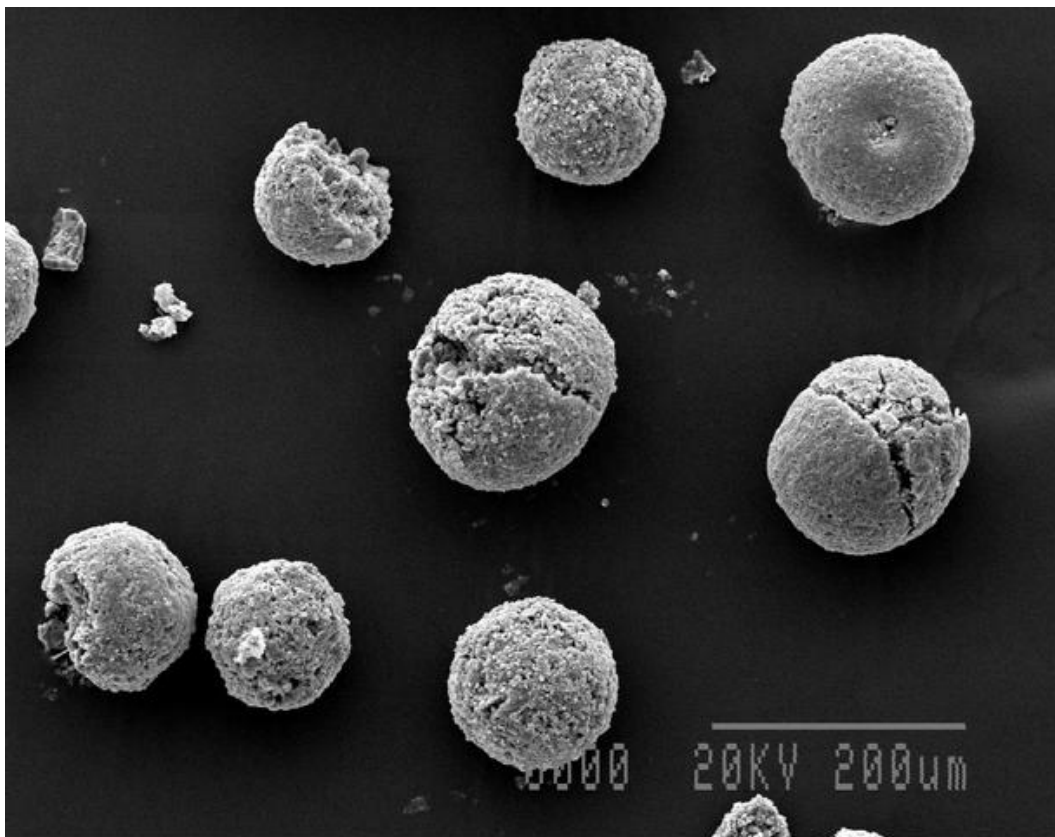


Fig. 5. Muestra de esférulas de barro observadas al microscopio electrónico.

Estas esférulas se disgregan fácilmente en contacto con el agua, y entonces es fácil reconocer al microscopio óptico, además de las partículas minerales, otras de origen biótico (espículas de esponja, diatomeas, etc), ya observadas anteriormente en las lluvias de barro (Colom, 1948; Fiol, 1985). Su composición mineralógica también es similar a la de otras lluvias de barro estudiadas (Fiol y Guijarro, 2000).

## 5.2. Discusión

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los ingredientes de las situaciones meteorológicas asociadas con las lluvias de barro es un estrato de aire cálido y seco, de procedencia norte-africana, que es el que transporta el polvo en suspensión. Las lluvias generadas en capas superiores producen un arrastre inicial del polvo, al mismo tiempo que tiene lugar un proceso de evaporación de las gotas de lluvia que pueden llegar a impedir que ésta llegue al suelo.

Esto permite suponer que, con una concentración de polvo suficientemente elevada, el resultado de la evaporación total del agua de las gotas de lluvia de barro debe conducir a la formación de estas esférulas.

Al mismo tiempo cabe aventurar que durante la caída de las gotas, y por rozamiento con el aire que las rodea, se puede generar una circulación toroidal del agua de las mismas y partículas en suspensión, de modo que en la zona periférica ecuatorial el movimiento, relativo a la propia gota, sería hacia arriba, mientras que en el eje central lo haría en el mismo sentido del descenso. Y también cabe pensar que, al ir desecándose la gota progresivamente, las primeras partículas en perder movilidad serán las más gruesas, pudiendo las más finas seguir circulando durante algún tiempo, lo que permitiría explicar la preferencia de éstas a ocupar la zona externa y la depresión cóncava, que estaría situada en la parte trasera de la gota (según el sentido de caída). Estas hipótesis deberían contrastarse, no obstante, con algún modelo hidrodinámico que simulase el proceso de formación de las esférulas.

En la figura 6 se puede observar el sondeo termodinámico efectuado en Palma de Mallorca a las 00 horas UTC del día 26-8-1999, fecha en que se tomó una de las muestras de esférulas. Se observa la presencia de la capa cálida y seca (mayor separación entre las líneas de temperatura y punto de rocío) desde algo por encima de la superficie hasta unos 700 hPa, y la mayor humedad en la troposfera media, prácticamente saturada por corresponderse con la capa nubosa de la que debió desprenderse la precipitación.

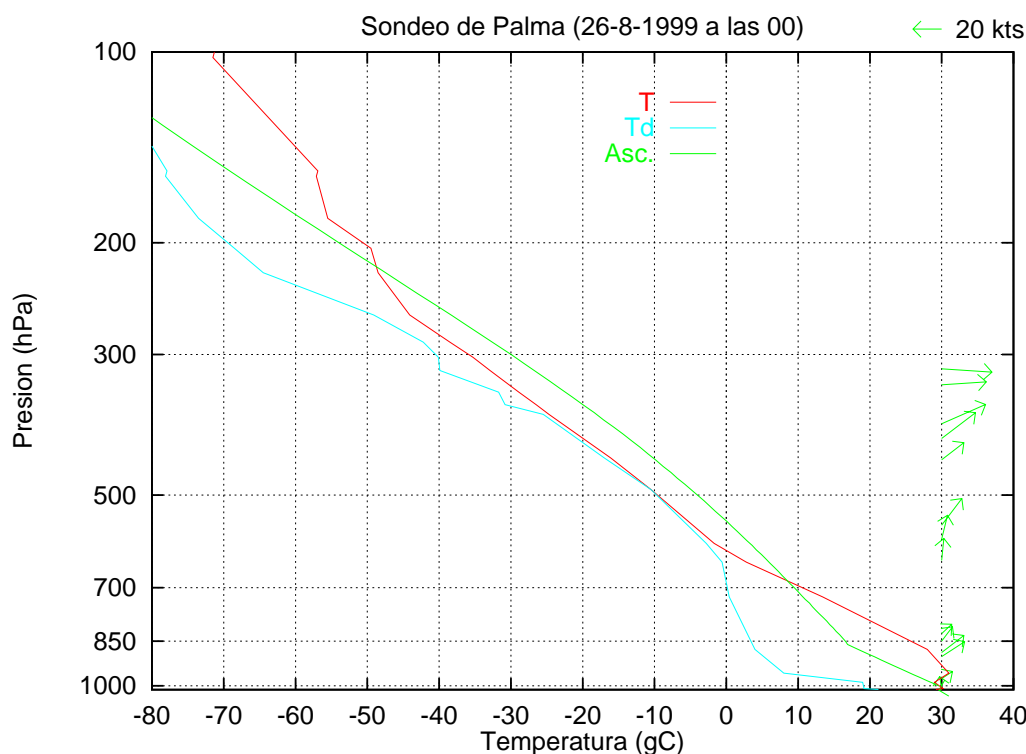


Fig. 6. Radiosondeo efectuado en Palma de Mallorca el 26-8-1999 a las 00 horas UTC.

Este proceso de evaporación parcial o total de las gotas de lluvia al atravesar el aire sahariano debe ser lo habitual en los episodios de lluvia de barro. Resulta extraño entonces que estas esférulas se hayan observado únicamente en tres de esos episodios, concentrados en julio y agosto de 2000 (excepto la muestra de agosto de 1999), y que tampoco conozcamos citas de observaciones similares en otros lugares. Si resulta necesaria alguna combinación de tamaño grande de gota y elevada concentración de polvo, o la existencia de algún otro componente en el aire que actúe como aglutinante, es algo que queda también en el terreno de las hipótesis.

## 6. Conclusiones

Se ha observado un aparente aumento de la frecuencia de las lluvias de barro, que concuerda con las observaciones efectuadas en otros lugares. Sin embargo, la dificultad de la estandarización de las medidas y la aleatoriedad espacial del fenómeno hacen poco comparables las series con un mayor nivel de detalle.

Preferentemente tienen lugar durante la época cálida del año, en la que se dan las condiciones de mayor sequedad del terreno y mayor frecuencia de los fenómenos convectivos que levantan el polvo en las áreas desérticas.

Las situaciones meteorológicas asociadas con las lluvias de barro en Baleares suelen combinar vientos de levante en superficie, relativamente frescos y húmedos por su recorrido marítimo, vientos de componente sur de procedencia norte-africana en las capas inmediatamente superiores, que son las que trasportan el polvo, y vientos del sudoeste en la troposfera media (asociados a una depresión o vaguada en la península Ibérica o sus proximidades), en la que se generan las precipitaciones que lavarán el polvo en su caída. Estas situaciones son también las relacionadas con el fenómeno de las *rissagas* (o *seiches*) en el puerto de Ciudadela (Menorca) y otros de nuestro archipiélago.

Las gotas de lluvia, al atravesar la capa de aire sahariano, sufren un proceso de evaporación que puede llegar a ser total. Si han arrastrado mucho polvo, pueden compactarse y llegar al suelo como precipitación de barro seco en forma de diminutas esferas.

La textura de las muestras recogidas es preferentemente limosa, con una fracción arenosa variable, mientras que la fracción arcillosa es bastante pequeña. Los minerales que predominan en su composición son el cuarzo y los carbonatos (calcita principalmente).

## Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro agradecimiento al Dr. Ferran Hierro por las microfotografías electrónicas realizadas.

## Bibliografía

Ávila A, Rodá F, 1991: Red rains as major contributors of nutrients and alkalinity to terrestrial ecosystems at Montseny (NE Spain). *Orsis*, 6: 215-229.

Ávila A, 1999: Las lluvias de barro y el transporte y deposición de material sahariano sobre el nordeste de la península Ibérica. *Orsis*, 14:105-127.

Balkanski Y, Schulz M, Guelle W, Moulin C, Lambert C, Dulac F, Bergametti G, Marticorena B, 1998: Meteosat and Ground-based Optical Measurements of Desert Dust within European project MEDU-SE. *First LAS/WMO International Symposium on Sand and Dust Storms (ISSDS-I)* (Damasco, 2-7 Nov. 1997):137-138.

C.M.B., 1947: Lluvia de barro. *Boletín Mensual Climatológico* (Centro Meteorológico de Baleares, Palma de Mallorca), 53:1.

Capel-Molina JJ, 1979: Lluvias de barro, registradas el 7 de enero de 1979, en el sureste de la Península Ibérica. *Anales del Colegio Universitario de Almería (Ciencias)*, 103-111.

Colom G, 1948: Las lluvias de barro en Baleares bajo el punto de vista geológico. *Revista de Geofísica*, 26:194-210.

Dulac F, Moulin C, Lambert CE, Guillard F, Poitou J, Guelle W, Quénel CR, Schneider X, Ezat U, 1996: Quantitative remote sensing of African Dust transport to the Mediterranean. In *The Impact of African Dust Across the Mediterranean* (S. Guerzoni and R. Chester, Eds.), Kluwer, The Netherlands, 25-49.

- Dulac F, Hamonou E, Schneider X, Moulin C, Chazette P, Liberti GL, Paronis D, Lambert CE, Legrand M, Défossez JB, Balis D, Papayannis A, Ancellet G, Mihalopoulos N, 1998: Meteosat and Ground-based Optical Measurements of Desert Dust within European project MEDUSE. *First LAS/WMO International Symposium on Sand and Dust Storms (ISSDS-I)* (Damasco, 2-7 Nov. 1997):65-72.
- Fiol L, 1983: *Estudi del poblament florístic de l'habitatció urbana de Palma de Mallorca*. Tesi de Llicenciatura, Universitat de les Illes Balears, 225 pp. (Inédita).
- Fiol L, 1985: Estudi d'una formació microedàfica a l'habitatció urbana de Palma de Mallorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 29: 37-62.
- Fiol L, Guijarro JA, 2000: Esfèrules de pols eòlica, un tipus peculiar de deposició seca a la ciutat de Palma (Mallorca). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 43:131-138.
- Fornós JJ, Crespí D, Fiol L, 1997: Aspectes mineralògics i texturals de la pols procedent de les pluges de fang a les Illes Balears: la seva importància en alguns processos geològics recents. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 40: 113-122.
- García-Moya JA, Jansá A, Díaz-Pabón R, Rodríguez E, 1989: Factors influencing the Algerian sea cyclogenesis. *XIV Asambleu de la Societat Geofísica Europea* (Barcelona, 13-17 de marzo).
- Grigoryan SA, Sofiev MA, 1998: Meteosat and Ground-based Optical Measurements of Desert Dust within European project MEDUSE. *First LAS/WMO International Symposium on Sand and Dust Storms (ISSDS-I)* (Damasco, 2-7 Nov. 1997):89-98.
- I.N.M. (1979-95): *Boletín Diario*. Instituto Nacional de Meteorología, Madrid.
- Jansá JM, 1948: Lluvias de barro registradas en Baleares durante la primavera de 1947. *Revista de Geofísica*, 26:182-193.
- Jansá A, 1986: Respuesta marina a perturbaciones mesometeorológicas: la risaga de 21 de junio de 1984 en Ciudadela (Menorca). *Revista de Meteorología*, 7:5-30.
- Loÿe-Pilot MD, Martin JM, Morelli J, 1986: Influence of Saharan dust on the rain acidity and atmospheric input to the Mediterranean. *Nature*, 321:427-428.
- Martín-Vide J, Moreno MC, 1985: Les pluges de fang a Barcelona. *Rev. Catalana de Geografia*, 1:60-70.
- Martín-Vide J, Llasat MC, 1991: Las lluvias de barro: análisis estadístico de una serie de 43 años en Barcelona. *Geographicalia*, 28:161-173.
- Molinaroli E, Guerzoni S, Rampazzo G, 1993: Contribution of Saharan dust to the Central Mediterranean Basin. *Geological Society of America Special Paper*, 284:303-311.
- Moulin C, Guillard F, Dulac F, Lambert CE, 1997: Long-term daily monitoring of Saharan dust load over ocean using Meteosat ISCCP-B2 data, 1. Methodology and preliminary results for 1983-1994 in the Mediterranean. *J. Geophys. Res.*, 102:16947-16958.
- Nihlén T, Mattsson JO, 1989: Studies on eolian dust in Greece. *Geografiska Annaler*, 71-A:269-274.
- Prezerakos NG, 1998: Dust storms over Sahara Desert Leading to Dust Deposit or Coloured Rain in the South Balkans. *First LAS/WMO International Symposium on Sand and Dust Storms (ISSDS-I)* (Damasco, 2-7 Nov. 1997):21-38.
- Prodi F, Fea G, 1979: A case of transport and deposition of Saharan dust over the Italian peninsula and Southern Europe. *J. Geophys. R.*, 84:6951-6960.
- Querada JJ, Olcina J, 1994: Lluvias de barro en la vertiente mediterránea de la Península Ibérica. *Invest. Geográf.*, 12:7-22.

Quereda JJ, Olcina J, Montón E, 1996: Red dust rain within the spanish mediterranean sea. *Climatic Change*, 32:215-228.

Ramis C, Jansá A, 1987: Situación meteorológica a escala sinóptica y a mesoescala simultánea a la aparición de las rissagues. I Jornadas sobre *Rissagues de Ciutadella i altres oscil·lacions de la mar de gran amplitud a la Mediterrànea* (Institut Menorquí d'Estudis):27-38.

Shengjie N, Jiming S, Yongchang Y, Jianren S, Tao Z, Chengchang Z, Yao C, Rentai J, Shenghua H, 1998: Statistical Analysis and Observational Study on Sand Storm in Mt. Helanshan Area. *First LAS/WMO International Symposium on Sand and Dust Storms (ISSDS-I)* (Damasco, 2-7 Nov. 1997):39-52.

Tegen I, Fung I, 1995: Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification. *J. Geophys. Res.*, 100:18707-18726.