

## Las playas y su proceso genético (2)

### Beaches and their formation (2)

**Carlos Garau Sagristá.** Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos.

*Ex Jefe de Costas de Cataluña y de Baleares.*

*Ex. Catedrático de Puertos y Costas de la Escuela Técnica Superior de I.C.C.P. de Barcelona. cgarsag@ciccp.es*

**Resumen:** El presente artículo, como el anterior sobre el mismo tema, tiene por objeto poner de relieve la importancia de contestar a diversas preguntas sobre el por qué de la existencia de una playa y de cuál fue su proceso genético, antes de plantear cualquier actuación sobre ella. En el primer artículo se presentaban varios ejemplos de la gran influencia que en la génesis de muchas playas y en su actual comportamiento tuvo la última elevación del nivel del mar que conocemos como transgresión Holocena: el caso de las playas del Maresme (Barcelona), constituida por materiales litoclásticos y los casos de playas con sistema dunar y materiales bioclásticos de las Baleares correspondiente a los sistemas playa-duna de Cala Agulla (Capdepera) y Cala Millor (Sant Llorenç des Cardessar) en Mallorca. Se hacía hincapié en la necesidad de paliar el proceso natural erosivo de estos tipos de playa de las Baleares mediante aportación de materiales extraídos de los yacimientos relictos submarinos, si bien se mencionaba el caso excepcional de las playas de la bahía de Alcudia, cuyos problemas requieren otro tipo de actuación. Aquí vamos a exponer como el transporte longitudinal de sedimentos, que actualmente implica la erosión de las playas del SE y un crecimiento innecesario de las del NO de dicha bahía, es también una consecuencia de los procesos litorales derivados de la variable topografía (hoy batimetría) recorrida por la orilla del mar a lo largo de la transgresión Holocena. Así mismo, se analiza el caso extremo de la Playa de Migjorn de Formentera que, desde hace años, ha quedado minimizada tras dar origen al gran sistema dunar de unos 7 millones de metros cúbicos. Siempre habida cuenta de que el clima marítimo puede considerarse invariante y sólo localmente influido por la evolución de la topografía litoral.

**Palabras Clave:** Transgresión Holocena, Transporte longitudinal y frontal, Producción de bioclastos, Masas arenosas: relictas, de la playa activa, del sistema dunar

**Abstract:** This article, as with the previous article on the same subject, underlines the need to respond to various questions concerning the reasons behind the existence of a beach and how these were formed, before considering any action regarding the same. The first article presented various examples of the considerable influence of the last raising of the sea level, known as the Holocene transgression, on the formation and current behaviour of many beaches. This being the case of the lithoclastic Maresme beaches (Barcelona), and that of beaches with dune systems and bioclastic materials in the Balearics: the Cala Agulla (Capdepera) and Cala Millor (Sant Llorenç des Cardessar) in Majorca. The article emphasized the need to offset the natural erosive process of these types of beaches in the Balearics by nourishment using materials taken from submarine relict beds, though mention was also made to the particular case of the beaches at the bay of Alcudia which required different remedial action. In this article we shall show how the longshore transportation of sediment, which currently leads to the erosion of beaches to the south-east and the unnecessary growth of those to the north-west of the bay, is also the result of littoral processes derived from the variable topography (now bathymetry) of the shoreline throughout the Holocene transgression. Analysis is made of the extreme case of the Playa de Migjorn in Formentera which has been extremely reduced after giving rise to a large dune system of some seven million cubic metres. This while considering the maritime climate as an invariable and only locally influenced by the evolution of the coastal topography.

**Keywords:** Holocene transgression, Longshore and cross-shore transport, Bioclast production, Sand masses: relict, active beach, dune system

## Introducción

En el anterior artículo con igual título (Revista de Obras Públicas, sep. 2006, N° 3.469, pp. 21-54), y al que en adelante nos referiremos como PPG-1, se mostraban dos tipos de playa en los que su proceso genético en el período final de la transgresión holocena había sido determinante de su naturaleza, tipología y comportamiento actual. Uno correspondía al caso de las playas litoclásticas del Maresme (Barcelona), cuyo proceso había conducido a la formación y crecimiento de amplias playas a lo largo de unos 60 km al norte del puerto de Barcelona, hasta unos 500 años A. C. y a partir de aquella fecha, aproximadamente, a su degradación por pasar a ser mayor el transporte neto de sedimentos hacia el SO que las aportaciones de ríos y rieras de aquel tramo de litoral. El otro correspondía a los casos de playas bioclásticas de las Baleares en cuyo trasdós existen sistemas dunares asociados, entre las que se describían específicamente las de Cala Agulla (T.M. de Capdepera) y Cala Millor (T. MM. de Sant Llorenç des Cardessar y de Son Servera) en Mallorca.

En dicho primer artículo se especificada reiteradamente que el transporte eólico, que a lo largo del tiempo ha formado un sistema dunar con un volumen generalmente muy superior al volumen de la playa activa (subaérea y sumergida, sujeta a la acción de los oleajes), sigue actuando y causando el retroceso de tales playas. Aunque las conclusiones referentes a Cala Agulla y Cala Millor son aplicables a casi todas las playas asociadas a un sistema dunar, en las Baleares, cuando se hablaba de la necesidad de aportar arena de las abundantes formaciones relictas submarinas para compensar la pérdida natural, y de tomar medidas para minimizar tal proceso de transporte eólico, se hacía la salvedad de que el caso de las playas de la Bahía de Alcudía era diferente.

Sin embargo, no se trata de que en esta bahía no tenga importancia el proceso genético. Precisamente el propio proceso natural de la formación de sus masas arenosas explica el actual proceso de transporte longitudinal, en función de las formas en planta y los salientes de la bahía que condicionaron, hasta hace unos 2.500 años, la formación de grandes acumulaciones de arena en la zona SE y, a partir de entonces su transporte lento hacia el NO.

Se trata de un caso no excepcional, pero sí poco frecuente y casi único como proceso natural en las Baleares. El actual transporte litoral es consecuencia

de las cambiantes formas de la línea de costa (hoy isóbatas) recorridas por la orilla del mar a lo largo de la transgresión Holocena. Su análisis es muy ilustrativo y, además del tipo de balance entre producción de bioclastos y volúmenes de las formaciones arenosas litorales y relictas, se necesita el estudio de las formas en planta en función de sus condicionantes (C.Garau, 1973, 1981, 1982a, 1984a, 1990, 1993).

Dada la estrecha relación entre este artículo y el anterior, la numeración de tablas y figuras es continuación de la del PPG-1.

## Análisis de la plataforma de la costa norte de Mallorca

En la Figura 8 se representa, a tamaño muy reducido, la Carta Marina de la costa norte de Mallorca. En ella se diferencian cuatro tramos que, a grandes rasgos, representan sectores de costa que, a lo largo de la evolución del nivel del mar desde -90 metros (hace unos 16500 años) hasta la posición actual (alcanzada hace unos 2500 años) han constituido lo que podemos considerar, a grandes rasgos, como unidades fisiográficas.

Con el fin de analizar la producción de bioclastos durante la transgresión Holocena, sobre dicha Carta Marina se han representado las sucesivas bandas de 15 metros de altura en que, a efectos de una valoración de sus respectivas superficies y fechas de alcance de su cota media por el nivel del mar, se pueda estimar aproximadamente la producción de bioclastos en cada tramo y en su conjunto. No se considera necesario reproducir aquí tales representaciones, pero sí los resultados de las diferentes superficies de cada tramo y las correspondientes fechas en función de la evolución del nivel del mar que se representaba en la Fig. 1 de PPG-1. En la Tabla 2 se exponen los resultados obtenidos, y en relación a ella se hacen las siguientes observaciones:

- a) En primer lugar hay que tener presente el objetivo buscado, consistente en analizar las áreas productoras de bioclastos, habida cuenta del correspondiente tramo de destino final de los sedimentos que acompañaron al nivel del mar en su elevación. De ahí las líneas de trazo y punto que separan los diferentes tramos, y las flechas que indican las directrices principales del transporte sedimentario frontal hacia tierra en cada tramo de la Figura 8.

**Tabla 2. Superficies de las diferentes franjas de 15 m de altura y fechas (años antes de hoy) en que cada orilla y batimétrica media fue alcanzada por el nivel del mar con la transgresión Holocena. Cuatro tramos de la costa norte de Mallorca comprendida entre los cabos de Formentor y de Pera**

Franja (prof. orilla/ prof. pie) (metros)	Fecha en que la orilla de la franja fue alcanzada	Fecha en que la cota media fue alcanzada	Bahía de Pollensa (Cabos Formentor y Pinar) (Km <sup>2</sup> )	Bahía de Alcudia (Cabos Pinar y Farrutx) (Km <sup>2</sup> )	Cap Farrutx a Morro Aubarca (Km <sup>2</sup> )	Morro Aubarca a Cap de Pera (Km <sup>2</sup> )
90/105	16500*		—	40,3	10,8	47,9
75/90	14500	15200	—	29,5	10,5	91,5
60/75	13000	14200	—	56,9	51,5	166,7
45/60	11500	11800	—	68,6	28,9	56,8
30/45	10000	10200	17,2	88,3	33,9	20,4
15/30	8000	8500	18,1	89,3	13,3	5,5
0/15	2500	6000	19,7	47,6	2,4	3,0
<b>Total 0/105</b>			<b>55,0</b>	<b>420,5</b>	<b>151,3</b>	<b>391,8</b>
1	2	3	4	5	6	7

b) Llama la atención el hecho de que los bioclastos de la Bahía de Pollensa deben proceder de los actuales fondos de profundidad más somera que los 45 metros. Los de épocas anteriores fueron a parar a la Bahía de Alcudia. Ello, unido a la reducida cota del terreno en el trasdós, explica el escaso volumen de las masas sedimentarias de la Bahía de Pollensa.

c) Las pendientes de los fondos de la Bahía de Pollensa son muy regulares. De ahí que las superficies de las tres franjas sean muy similares.

d) Las superficies de las franjas de la Bahía de Alcudia van aumentando desde los 90 m hasta los 15 metros, y ello se debe a la suavización de las pendientes con el asomeramiento. La superficie de la franja 90/105 es superior a la siguiente no sólo por ser de pendientes más suaves, sino por abarcar la plataforma situada por delante de la Bahía de Pollensa. A partir de 15 metros de profundidad la superficie disminuye a consecuencia de incluir las formaciones sedimentarias actuales (profundidad activa  $h_m \approx 12$  m), cuya pendiente de equilibrio ( $m_s \approx 0,0125$ ) es bastante superior a la de la plataforma litoral ( $m_p \approx 0,003$  entre -12 m y -65 m, y el sustrato se mantiene similar hasta la cota cero en la zona de Alcudia). (Recordar la nomenclatura de la Figura 1 de PPG-1).

e) En el tramo definido por el Cap Farrutx y el Morro de Aubarca se acusa un aumento de superficie en la franja 60/75 a causa de las suaves pendientes que conectan con el istmo sumergido que unía Mallorca y Menorca hasta hace unos 14500 años.

A partir de los 15 metros de profundidad las pendientes del litoral aumentan fuertemente, con la excepción de algunas pequeñas calas.

f) En el tramo definido por el Morro de Aubarca y el Cap de Pera, la extensión de las superficies en profundidades por debajo de los 50 m se exagera enormemente, por incluir el mencionado istmo. De ahí que se establezca una línea de separación entre la cuenca o unidad fisiográfica de Mallorca y la de Menorca (línea de trazo y punto).

g) El asterisco de la fecha correspondiente a la franja comprendida entre los 90 y los 105 metros de profundidad se refiere al inicio de la transgresión Holocena. Es evidente que la producción de bioclastos en esta franja debió de ser muy abundante durante el período anterior de estabilidad del nivel del mar, pero aquí sólo analizamos la producción posterior.

En base a los datos de la Tabla 2, y aplicando la tasa de producción de bioclastos determinada por Canals y Ballesteros en  $100 \text{ gr}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ , se elabora la Tabla 3. Para pasar de los datos de superficie en Km<sup>2</sup> a m<sup>3</sup>, debemos multiplicar por el coeficiente

$$S \cdot 10^6 \text{ m}^2 \cdot (100 \text{ gr}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1} / 1,75 \cdot 10^6 \text{ gr}\cdot\text{m}^{-3}) \cdot N \text{ años} = 57,1429 \cdot S \cdot N \text{ m}^3$$

Siendo S la superficie de cada franja expresada en km<sup>2</sup>, N el número de años, y 1,75 la densidad media de la arena. De esta forma se elabora la Tabla 3, de cuyos resultados se puede resaltar lo siguiente:



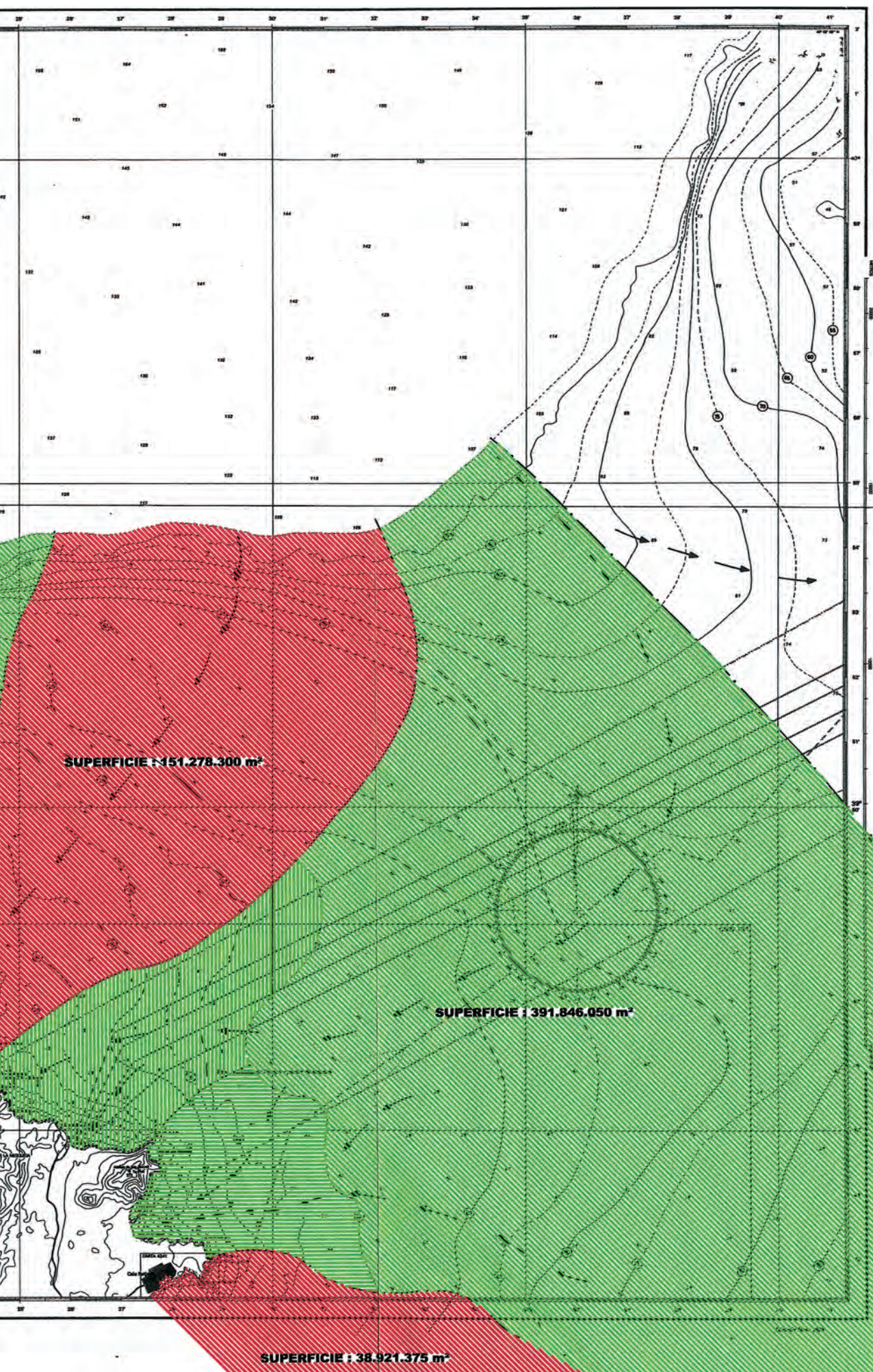


Fig. 8. Reproducción de la Carta Marina 425, con indicación de los diferentes tramos de la plataforma litoral de la costa Norte de Mallorca, y sus respectivas superficies sujetas a la producción de bioclastos desde el inicio de la trasgresión Holocena hasta hoy.

**Tabla 3. Producción de bioclastos desde el inicio de la transgresión holocena hasta hoy. Se aplica la producción media de 100 gr·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup> estimada por Canals y Ballesteros, a los datos de las Tabla 2 y a los tramos que allí se definen**

Franja (prof. orilla/ prof. pie) (metros)	Período sujeto a producción de bioclastos (años)	Bahía de Pollensa (Cabos Fortmentor y Pinar) (m <sup>3</sup> )	Bahía de Alcudia (Cabos Pinar y Farrutx) (m <sup>3</sup> )	Cap Farrutx a Morro Aubarca (m <sup>3</sup> )	Morro Aubarca a Cap de Pera (m <sup>3</sup> )
90/105	16500	---	37997143	10182857	45162857
75/90	15200	---	25622857	9120000	79474286
60/75	14200	---	46170286	41788572	135265143
45/60	11800	---	46256000	19486857	38299429
30/45	10200	10025143	51466286	19758857	11890286
15/30	8500	8791428	43374286	6460000	2671428
0/15	6000	6754286	16320000	822857	1028571
<b>Total 0/105</b>		<b>25570857</b>	<b>267206858</b>	<b>107620000</b>	<b>313792000</b>
1	2	4	5	6	7

**Producción post Holocena total en la costa norte de Mallorca: 714189715 m<sup>3</sup>**

- i) Siendo la producción total de bioclastos en este tramo de costa de unos 714 millones de metros cúbicos, se puede estimar que en toda la plataforma litoral de Mallorca debió ser del orden de 2,8·10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>.
- ii) Recordando que una estimación grosera de los volúmenes de las masas arenosas de las playas y sistemas dunares del último tramo (Morro de Aubarca al Cap de Pera) es de unos 5 millones de metros cúbicos, vemos que casi la totalidad de la producción ha quedado relicta al comparar con los 313,8 millones de metros cúbicos (cifra total de la columna 7 de la Tabla 3). También podemos recordar que de los 5 millones de metros cúbicos, menos de un 10% corresponde a las playas actuales propiamente dichas; el resto corresponde a los sistemas dunares.
- iii) Como ya se ha indicado, las diferencias en la topografía submarina que fue transgredida durante el Holoceno, en cada tramo, explica claramente la razón principal de la relativa escasa abundancia de masa sedimentaria subaérea en la Bahía de Pollensa, respecto de la existente en la Bahía de Alcudia (sistemas dunares de Es Comú de Muro, de Son Real, y de otras zonas del Término Municipal de Santa Margarita explotadas durante años para su extracción con destino a la construcción u otros usos).
- iv) Las flechas de transporte representadas sobre la Figura 8 justifican el actual transporte de arenas de la Bahía de Alcudia, desde el SE hacia el NO. Sin

embargo, ello requiere mayor explicación, lo cual se hace en el siguiente epígrafe.

- v) Nótese en la columna 7 que la producción de bioclastos en la franja superior de 15 metros, durante los últimos 6000 años, es tan sólo de una quinta parte de la masa arenosa actual (ii). Ello corrobora la presunción de que su origen se debe a etapas anteriores de la transgresión Holocena.

### **El proceso genético y el problema actual en la Bahía de Alcudia**

#### **La situación actual**

Es bien sabido que en la actualidad existe un transporte longitudinal de arenas desde el SE al NO que, de un lado, afecta muy negativamente a las playas de Santa Margarita y Muro, muy especialmente en el comienzo de la playa continua que hoy se inicia al NO del puerto de Can Picafort. De otro lado, se está produciendo un aumento innecesario de la playa de Alcudia.

Este transporte longitudinal ha sido estimado entre unos 5.000 y 10.000 m<sup>3</sup>/año, tanto mediante el análisis de fotografías aéreas (C. Garau, ≈1985, en un estudio realizado por encargo de la asociación hotelera de la Bahía de Alcudia) como por la aplicación de las conocidas fórmulas de transporte longitudinal basadas en el clima marítimo local (Estudio de la dinámica litoral en la Bahía de Alcudia, realiza-

do por HIDTMA para la Demarcación de Costas, en 1998).

Estas circunstancias han motivado en varias ocasiones la práctica desaparición de la playa de Can Picafort y la posterior recuperación mediante aportaciones de arena. La última operación de este tipo se realizó en mayo de 2001, y levantó una fuerte oposición por parte de algunos grupos ecologistas. Por lo que veremos más adelante, en este caso tenían bastante razón, ya que la alimentación intermitente no resuelve el problema y sería insostenible a largo plazo.

A este respecto, debo manifestar que a raíz del estudio de 1998, y como responsable de la Demarcación de Costas en aquellas fechas, propuse a los tres Ayuntamientos que formasen una mancomunidad a fin de actuar de acuerdo e interesar de la Dirección General de Costas la actuación según la solución que se describe más adelante. Creo que la mancomunidad se constituyó, pero no llegó a ningún acuerdo o, por lo menos, no se formuló mancomunadamente la petición sugerida.

### El proceso genético y la evolución futura

Aunque en la Figura 8 ya se representa cualitativamente el transporte longitudinal que, la diferencia entre la forma actual de las playas de la Bahía de Alcudia y la forma inducida por los salientes pone en evidencia, vamos a examinar algunos rasgos del proceso genético que ayudarán a comprender la razón de tal diferencia. Para ello se ha confeccionado la Figura 9

sobre parte de la Carta Marina 425. Para su mejor comprensión se hacen las siguientes aclaraciones:

- a) En la figura se representan las posiciones de la orilla cada 5 metros, desde los -35 m hasta hoy. Para ello se utiliza el **compás de playas**, si bien no se representan aquí los pasos necesarios por la proliferación de líneas auxiliares, pero que es muy sencillo con tal **compás**. Las posiciones pares se resaltan en rojo y las impares en verde. Para estimar la fecha de cada posición, se utiliza la Figura 2 de PPG-1.
- b) Debido al fuerte entrante, partir de la isóbata -35 m las formas de la playa vienen determinadas por los salientes que muestra en cada situación el correspondiente contorno exterior.
- c) Nótese que para las isóbatas -35 m a -20 m la forma de la orilla, prácticamente determinada por los salientes de la respectiva época, queda frente al tramo SE de la bahía, donde apenas existen playas aunque sí extensos sistemas dunares, excepto la de S'Arenal comprendido entre las puntas Pedacet y Llarga, en T.M. de Artá. Para apreciar mejor esta circunstancia, en la Figura 9 se indica la normal a las sucesivas posiciones de la orilla de la playa por el morro del actual dique de abrigo del puerto deportivo de Ca'n Picafort (línea de trazos finos), y en la Tabla 4 se indican las longitudes de la playa a uno y otro lado.
- d) Al alcanzar los -15 m, hace unos 7.500 años, los salientes de los cabos Formentor, Pinar, Menorca y Farrutx eran ya muy similares a los actuales. Aunque el bajo de Els Bacs (-13 m) seguía aflorando y

**Tabla 4. Características de las sucesivas posiciones de la playa en la última fase de la trasgresión Holocena. Longitudes al NO y SE de la normal trazada por el morro del puerto deportivo de Ca'n Picafort. Estimación del transporte frontal en base a la tasa de 2,15 m<sup>3</sup>/año por metro lineal de orilla obtenida para Es Trenc en PPG-1**

Nivel (m)	Fecha (años)	Longitud NO (m)	Longitud SE (m)	Longitud total (m)	Transporte eólico (m <sup>3</sup> /año)	Transporte eólico en el período (m <sup>3</sup> )
-35	-10000	500	5800	6300	13545	10986500
-30	-9300	800	7500	8300	17845	10707000
-25	-8700	800	7500	8300	17845	12448500
-20	-8100	2200	8800	11000	23650	14895500
-15	-7500	3900	8200	12100	26015	28272500
-10	-7000	6100	8100	14200	30530	55685500
-5	-5000	7900	3800	11700	25155	65037500
0	-2500	10100	2400	12500	26875	33593750
0	Hoy	10100	0	10100	0	—
1	2	3	4	5	6	7



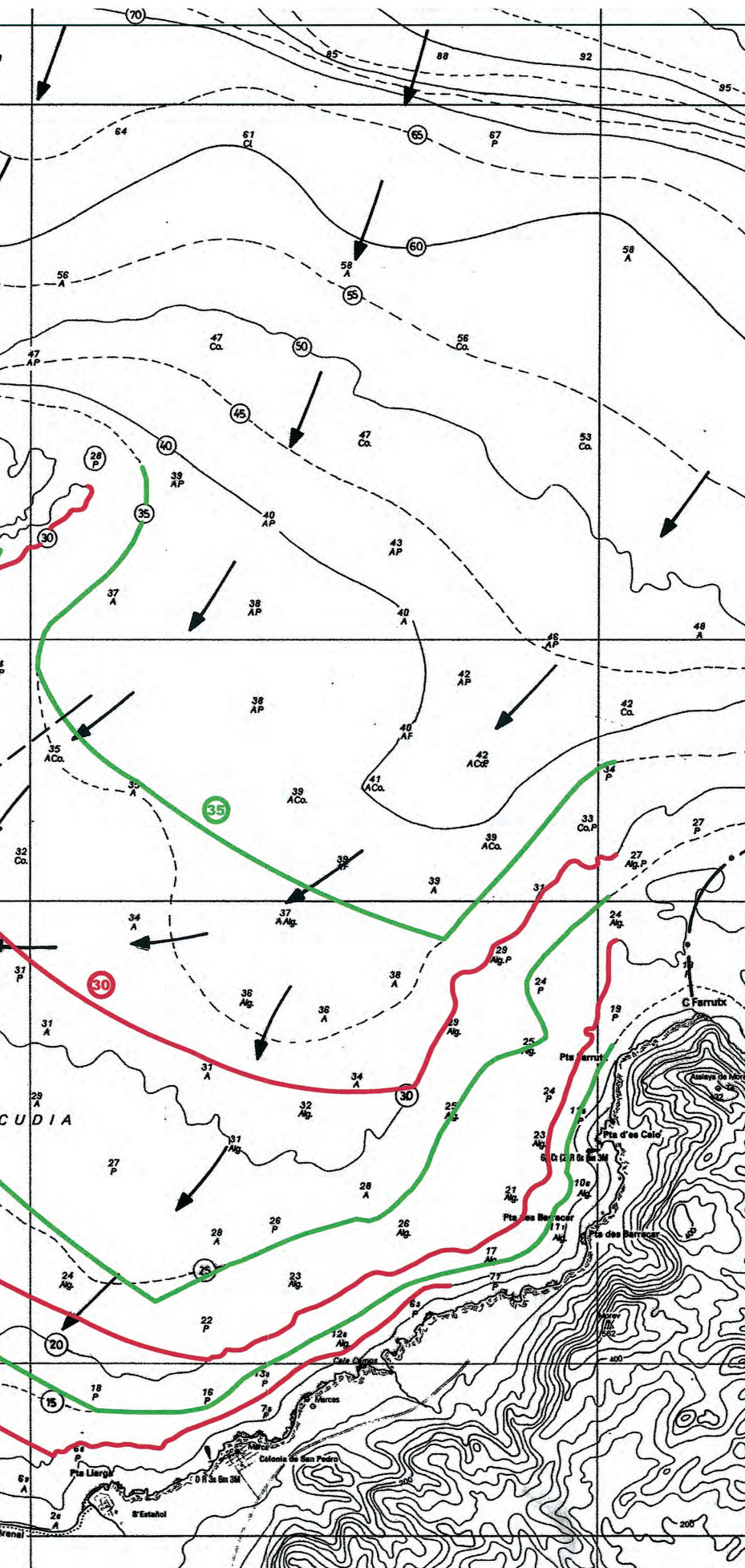


Fig. 9. Reproducción parcial de la Carta Marina 425, con las sucesivas formas de la playa durante la última fase de la trasgresión Holocena. Se representan las orillas que evolucionaron ascendiendo y retrocediendo en respuesta a la elevación del nivel del mar, desde los -35m (hace unos 10000 años) hasta contrastar su evolución natural hacia la posición actual y hacia el futuro. Se muestran para cada 5m y se colorean en rojo las pares y en verde las impares, tanto la propia orilla teórica de la formación arenosa, trazada con el compás de playas, como el tramo de orilla de la correspondiente bahía hasta los salientes que condicionan la forma en planta de la playa. Es excepción la línea roja de la orilla estimada para el nivel cero alcanzado hace unos 2500 años, que no se colorea más allá de la playa por ser ya la actual que figura en la Carta Marina. Por lo expuesto en el texto, no obedece a la forma inducida por los salientes a causa del proceso evolutivo altamente influenciado por el juego de las capacidades de transporte frontal y longitudinal, la baja topografía en la zona NO (Alcudia), y por el efecto de alargamiento del tramo de playa comprendido entre la normal a las sucesivas orillas por el morro del actual puerto deportivo de Ca'n Picafort y el contorno Norte de la Bahía de Alcudia. En amarillo se representa la línea de tendencia a largo plazo si no se alterase el proceso natural y finalmente la playa se ajustase a la forma inducida por los salientes y anulándose el transporte longitudinal.

los extensos bajos del entorna ejercían cierta influencia, pronto dejarían de tenerla. En la Figura 9 se representa la playa definida teóricamente por los salientes, aun sabiendo que, a causa del alargamiento del tramo NO y la consiguiente falta de arena, la orilla tendría que estar bastante más atrás, como ocurre actualmente. Igual criterio se ha seguido al representar las posiciones de -10 y -5 metros, que corresponden a las formas teóricas inducidas por los salientes de la correspondiente época; aunque sabemos que debieron estar más atrás, no hay información alguna para estimar la posición real.

- e) Por el contrario, al representar la posición estimada para el momento de estabilizarse el mar hace unos 2500 años (línea roja para nivel cero), se dibuja la línea por delante de la actual en la mitad SE y por detrás en la mitad NO, situándola en este caso en las proximidades del borde lado mar del Lago Esperanza.
- f) Finalmente, en la figura 9 se representa en línea amarilla la posición de la playa correspondiente a la evolución a largo plazo en el supuesto de que no se alterase el proceso natural de transporte longitudinal hacia el NO, ni se aportasen arenas en Ca'n Picafort. En el supuesto de que se aportasen las arenas necesarias para evitar el retroceso de las zonas de Ca'n Picafort y Muro, dejaría de producirse el retroceso indicado. Debe entenderse que el largo plazo para tal proceso sería de varios siglos (unos XV, como orden de magnitud) y que los volúmenes de aportación en la segunda hipótesis serían del orden de unos 12 millones de metros cúbicos. Queda claro que en este caso la aportación de arenas es una actuación insostenible, a pesar de que, debido a la lentitud del proceso, cada aportación efectuada ha producido un efecto positivo para los usuarios de la playa de Ca'n Picafort (T.M. de Santa Margarita) durante varios años. Por otro lado, el lento engrosamiento de la playa de Alcudia no se ve con malos ojos, al no tener presente el resultado a largo plazo.
- g) La estimación del transporte eólico frontal se ha efectuado en base al cálculo de la playa de Es Trenc ( $20.7/65=2,15 \text{ m}^3/\text{año}$  por metro de orilla, según PPG-1, p. 53). Para el transporte longitudinal, se ha tomado  $7500 \text{ m}^3/\text{año}$ , valor medio de las estimaciones antes indicadas.

h) Conviene aclarar que los valores de la columna 6 de la Tabla 4 se obtienen multiplicando la longitud total de la columna 5 por la tasa de  $2,15 \text{ m}^3/\text{año}$  por metro de orilla. Los valores de la columna 7 se obtienen de multiplicar la semisuma de los valores de la columna 6 por la duración del período determinado por los datos de la columna 2, entre cada posición y la siguiente.

- i) Debe tenerse presente que la longitud de la playa, en el tramo NO de la ortogonal por Ca'n Picafort, pasó de unos 500 a unos 10.100 metros (columna 3). Ello significa que el volumen de la sección de la masa arenosa disminuyó, por esta causa, hasta quedar reducida a menos de un 5 % de la existente hace unos 10.000 años, en el tramo de Alcudia.

#### Algunos comentarios sobre el proceso transgresivo

El retroceso de la playa, cuando se produce la elevación del nivel del mar, siendo los terrenos posteriores de pendiente más suave que la de equilibrio de su frente ( $m'_s$ ), se produce por dos mecanismos fundamentales: 1) El transporte frontal de los oleajes, ya sea por rebase o bien por la suavización de la pendiente de su frente a causa del transporte eólico; y 2) El transporte eólico irreversible hacia el trasdós. Naturalmente, como hemos visto, también juega normalmente su papel el transporte longitudinal, ya que se trata de procesos tridimensionales.

Generalmente actúan ambos mecanismos de transporte frontal, variando la mayor o menor influencia de uno u otro en función de diversas características. El tamaño del sedimento afecta enormemente, pues a partir de cierto valor se anula totalmente la acción eólica: por ejemplo, en las playas de la Costa Brava, con arenas gruesas ( $D_{50} \approx 2 \text{ mm}$ ), como en Lloret y Tossa, es prácticamente despreciable. El valor de la pendiente que se va invadiendo afecta mucho, pues cuanto más suave mayor es el desplazamiento de la masa sedimentaria que se precisa y mayor es el área de la sección de la formación arenosa.

En el caso de pendientes suaves en el trasdós, será frecuente la existencia de una albufera tras el cordón arenoso. La playa retrocederá en función del área de la sección de su masa sedimentaria y de las capacidades de transporte de todos los mecanismos.

En el caso de Alcudia que nos ocupa, la topografía de la plataforma que se fue invadiendo determinó la configuración de las playas (línea roja de cota ce-

ro), albuferas y sistemas dunares al final de la transgresión Holocena. Tal configuración determinó la tendencia al transporte longitudinal por los oleajes de SE a NO, finalmente determinado por la tendencia al ajuste de la forma inducida por los salientes que el **compás de playas** permite detectar fácilmente.

### La solución al problema

Hasta aquí se ha visto como el análisis del proceso genético de las playas de la Bahía de Alcudía explica la formación y el comportamiento actual de las formaciones sedimentarias. En este caso, y en la situación actual, pueden considerarse despreciables las pérdidas de arena hacia los sistemas dunares, puesto que algunos han sido sustituidos por urbanizaciones (Ca'n Picafort, parte norte de Muro, y toda el área de Alcudía) y otros, como Es Comú de Muro, han sido erosionados por el transporte y retroceso descritos, de manera que presentan un frente con corte alto que impide el transporte eólico hacia el trasdós. Lo más destacable es que la alimentación con arena de préstamos en cabecera (la Playa de Ca'n Picafort al NO del puerto) no es una solución sostenible, ya que implica de un lado el innecesario aumento de la playa de Alcudía hasta llegar a la larga al aterramiento del puerto, y de otro lado la innecesaria explotación de grandes y lejanos yacimientos de arenas relictas.

La solución que propuse a los ayuntamientos (Alcudía, Muro, y Santa Margarita) y a la Dirección general de Costas, consiste en la construcción de un mínimo de obras de estabilización y el trasvase periódico de ciertos volúmenes de arena desde el NO hacia el SE. Tal mínimo consistiría en sendas construcciones de espigón sumergido en prolongación de los diques derechos de los desagües de S'Oberta (Muro) y del Lago Esperanza (Alcudía) y de un espigón emergido en cabecera, al NO del puerto deportivo de Ca'n Picafort (Santa Margarita). Los dos primeros con objeto de minimizar el transporte longitudinal y de retener la arena que, al ritmo de la nueva situación, fuese necesario trasvasar a cabecera. El tercero con objeto de retener los volúmenes trasvasados y ralentizar dicho transporte. La actuación precisaría el complemento de una aportación inicial de arena de préstamos, pero ya no se precisarían nuevas aportaciones en el futuro. El seguimiento del comportamiento posterior daría la clave para comprobar si los gastos periódicos de trasvase aconsejaban alguna otra obra de ralentización

del transporte longitudinal. El impacto paisajístico sería mínimo, ya que los espigones sumergidos sólo introducirían una mancha oscura en el fondo, como otras muchas naturales, y el emergido quedaría integrado en el paisaje del puerto existente.

### La Playa de Migjorn (Formentera): gran sistema dunar y escasa playa

El caso de la Playa de Migjorn, en la isla de Formentera, constituye un ejemplo paradigmático del hecho que pretendo poner de relieve al describir como la génesis de los sistemas dunares finis o post Holocenos se han producido a costa de extensas playas primitivas. Así como en PPG-1 veíamos como la actual playa de Es Trenc, en el sur de Mallorca, está actualmente en proceso de retroceso agudo (unos 20 m en 60 años), vamos a describir y analizar el proceso que ha conducido a la formación de un extenso y voluminoso sistema dunar mientras la playa ha quedado reducida a unas pequeñas formaciones con trasdós rocoso que impide ya el transporte eólico hacia las dunas.

### Descripción de la playa y del sistema dunar

La Playa de Migjorn (Formentera, Islas Baleares) queda enmarcada por dos macizos rocosos: el saliente del cabo de Berbería al Oeste y La Mola al Este. Aunque los respectivos salientes limitan la unidad fisiográfica de las formaciones arenosas y, aparentemente la orilla del entrante se aproxima a la del "compás de playas" centrado en el saliente de Berbería, se trata de un hecho casual ya que dicha orilla es prácticamente rocosa en su totalidad, y son los fondos rocosos los que juegan un papel fundamental en la estabilidad de las formaciones arenosas submarinas y de los escasos tramos de playa subaérea. Esto se apreciará en la documentación fotográfica que se acompaña, la cual, además de mostrar la belleza del paraje, en este caso es imprescindible para comprender la actual situación y evaluar el proceso de generación de los sistemas dunares. En la Figura 10 se muestra la parte Sur de la Isla y su plataforma litoral. En las fotografías F-1 a F-8 se muestra el tramo de costa en cuya zona posterior se formó el sistema dunar. En la F-9 se muestra el tramo que sigue, ya en pleno macizo de La Mola, y en la F-10 aparece la Punta Grava donde se

aprecia el final de la formación arenosa submarina o extremo Este de la unidad fisiográfica.

La longitud del fondo de la bahía definida por Berbería y Punta Grava, es de unos 10 km. De ellos, el borde rocoso continuo de poniente abarca unos 4 km, seguido del frente del sistema dunar que abarca unos 4,1 km y, tras él hacia levante, sigue el tramo rocoso de la Mola de unos 1,9 km hasta la Punta Grava. En los 4,1 km del borde litoral del sistema dunar hay unos pocos tramos de playa con orilla arenosa:

Unos 450 m en el extremo Oeste, pero con afloramientos rocosos en la orilla y en el trasdós (F-2).

Tras unos 1200 m de borde rocoso (F-3 y F-4), salvo pequeños entrantes, unos 400 m hacia levante (F-5). Se trata de una orilla sinuosa a causa de los fondos casi emergentes a unos 25 m de la orilla.

Continuando hacia levante, tras unos 1700 m de borde rocoso (F-6, F-7), salvo pequeños entrantes, se presenta el último tramo de playa de unos 350 m (F-8). Se trata de la única zona con playa sumergida arenosa, si bien en su trasdós aparece el sustrato rocoso.

Aunque los fondos arenosos continúan a lo largo de unos 1900 m hasta la Punta Grava (F-10), ya no emerge la playa, salvo en minúsculos entrantes de los cuales los más destacados aparecen en un primer tramo (F-9).

Las fotografías requieren algunos comentarios: a) De la F-1 a la F-8 presentan continuidad y corresponden al frente del sistema dunar; éste empieza en la parte derecha de F-1 y termina en la urbanización de la parte derecha de F-8. b) En la F-8, tras esta urbanización y tras el sistema dunar se observa el comienzo del macizo de la Mola, que ya no contiene masa arenosa subaérea en consideración. c) En las F-5, F-6, F-7 y F-8 se puede apreciar las grandes extracciones de arena realizadas en las dunas. d) La F-9 es prácticamente contigua a la F-8 y muestra gran parte del macizo de La Mola; no se incluyen otras dos fotos del litoral, por su similitud a las características de la F-10. Esta última recoge la Punta Grava que representa el extremo de levante de la unidad fisiográfica, siendo espectacular el cambio del fondo: éste pasa de una extensa zona arenosa a fondos rocosos que acusan el saliente submarino que cierra la unidad fisiográfica (ver la Figura 10). En cuanto a la vegetación que aparece en las fotografías F-9 y F-10, y en el segundo plano de la F-8, no debe llevar a confusión con los sistemas dunares, a pesar de su similitud. Se trata de la cobertura vegetal de un macizo rocoso con calizas y

areniscas superficiales cuya rugosa costra facilita la retención de sedimento, lo cual permite el arraigo de una flora autóctona prácticamente similar a la de las dunas locales. Las fotografías han sido facilitadas por la Demarcación de Costas.

#### Estimación del volumen de arena del sistema dunar

El examen de la información gráfica pone de relieve la gran desproporción entre el volumen de la masa arenosa total de las dunas y el de la masa de arena de las playas. Es importante hacer una estimación aproximada del volumen del sistema dunar. Para ello, y aceptando un margen de error razonable para la cifra global, se ha estimado la altura media de las extracciones, se ha aplicado dicha altura a las correspondientes superficies, y se ha aplicado un espesor mitad a las zonas contiguas. El resultado es el siguiente:

Volumen total del sistema dunar nativo . . . 7.000.000 m<sup>3</sup>  
Volumen extraído (incluido en dicho total) .570.000 m<sup>3</sup>

#### Estimación de tiempos del proceso evolutivo.

Aunque es presumible que hace tiempo que se alcanzó la situación actual, es interesante comprobar si los volúmenes y tasas utilizados resultan coherentes con los tiempos. Partiendo de que la estabilización del nivel del mar se alcanzó hace unos 2500 años, de que la tasa de transporte eólico es del orden de 2,15 m<sup>3</sup>/año por metro lineal de orilla si no existe impedimento, de que inicialmente la playa tenía una longitud de unos 4.100 metros, y habida cuenta de que la longitud de contacto entre la playa y el sistema dunar se redujo linealmente hasta anularse (como ocurre prácticamente en la actualidad) obtenemos:

$$2.700.000 / (4100 \cdot 2,15) = 1.588 \text{ años,}$$

lo cual significa que la actual situación se habría alcanzado aproximadamente hace unos 900 años. La hipótesis de reducción lineal (coeficiente 2 en el cálculo) corresponde exclusivamente al supuesto de que el retroceso se debiese tan sólo a la reducción de longitud, sin tener en cuenta el paulatino afloramiento del escarpe que actualmente existente en el trasdós.

Si bien el resultado podría considerarse razonable, es muy posible que se alargase más el proceso a cau-

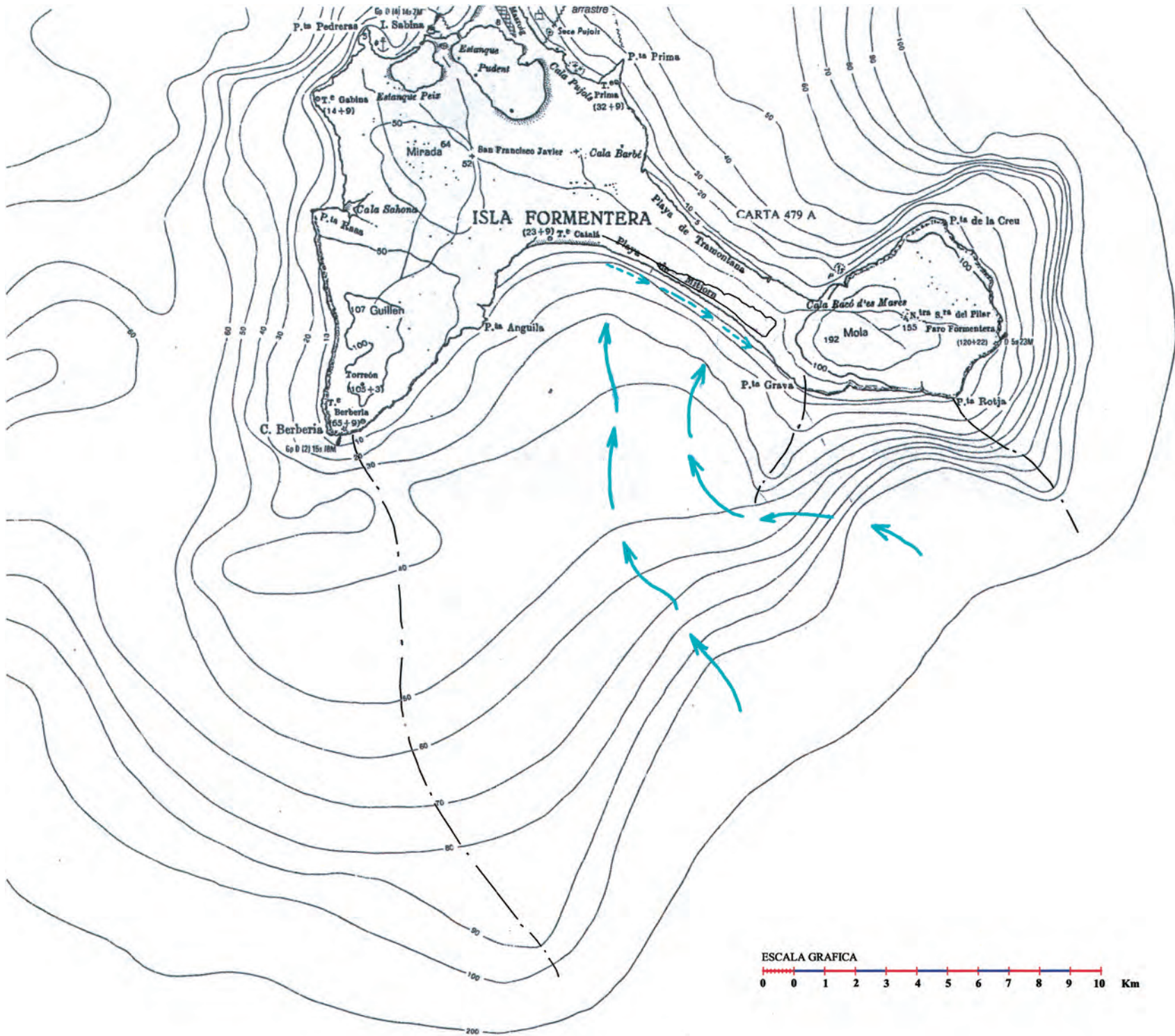


Fig. 10. Reproducción parcial de la Carta Marina 7ª que recoge la parte sur de la Isla de Formentera y su plataforma litoral. Sobre ella se indican las líneas que separan la unidad fisiográfica (trazo y punto), las flechas (trazo continuo) de máximo transporte frontal que acompañó la transgresión Holocena, y las flechas (de trazos) de transporta longitudinal en la etapa final.











F-9



F-10

sa del freno que implica la existencia del frente casi vertical del borde rocoso. Tal circunstancia tenía poca importancia cuando la playa estaba adelantada en un centenar de metros (lo cual implica tan sólo unos 4 millones de m<sup>3</sup>, siendo presumible que hace 2500 años estuviese adelantada en unos 170 metros); sin embargo, en la etapa final tuvo que ralentizar mucho el proceso. Es muy posible que la actual situación de escasa playa se alcanzase no hace muchos años, pues en la Carta Marina (reproducida parcialmente en la Figura 10) se representa playa más al oeste de la zona que recibe el topónimo de Playa de Migjorn y además está el hecho de que tal topónimo se aplique a una zona tan extensa, la mayor parte sin playa, y con tan relativamente escasa superficie arenosa en la actualidad. ¿Tendría sentido bautizar hoy con el nombre de Playa a la costa que se aprecia en las fotografías F-1, F-3, F-4, F-6, y F-7?

### Conclusión

El análisis de las playas y sistemas dunares del Migjorn de Formentera ha mostrado como el proceso natural de cesión de arena desde la extensa playa primitiva, hacia su trasdós y a causa del transporte eólico, ha conducido hasta unas mínimas playas en la actualidad y a la formación de un extenso sistema dunar con un volumen de unos 7 millones de metros cúbicos. Los tiempos resultantes de la aplicación de las tasas a las características del proceso y los volúmenes de las masas arenosas, han resultado coherentes. Ello es prueba de que la tasa de transporte eólico en una playa con sistema dunar, cuando no existe impedimento, es del orden de la estimada en Es Trenc para los últimos 60 años (unos 2,15 m<sup>3</sup> por metro lineal y año). Podrá por tanto utilizarse en casos similares en que el retroceso de la playa no haya llegado a alcanzar las dunas altas o los afloramientos rocosos. En tales casos, como ocurre en la playa de Es Carbó que se representaba en la Figura 7 de PPG-1, el transporte eólico queda muy restringido a causa del alto talud de erosión de la duna.

Es preciso reflexionar sobre el proceso natural que, en la Playa de Migjorn de Formentera, ha significado la paulatina reducción de una playa ancha, de unos 4.100 metros de longitud hace unos 2.500 años, hasta una formación que, con el mismo frente sólo presenta pequeños tramos de mínima anchura y con aflora-

mientos rocosos. Su belleza persiste, pero de su atractivo y utilidad para usos típicos de playa apenas queda un 5 por ciento de la superficie que ofrecía a principios de nuestra era.

Se ha visto que las playas de la Bahía de Alcudia, en la actualidad, presentan un problema muy diferente, atribuible al transporte longitudinal que los oleajes inducen desde el SE al NO. Sin embargo, se ha visto que el estudio del proceso genético también explica la causa de tal problema derivado de la diferencia entre la forma alcanzada tras el proceso genético y la forma que inducen los salientes actuales de la Bahía. Se ha expuesto que la alimentación en cabecera (playa de Ca'n Picafort) con arena de préstamos no es una solución sostenible y se ha presentado una solución razonable.

### Comentario final

El estudio de las playas es apasionante. Es un tema difícil al que he dedicado muchas horas por una doble circunstancia. De un lado el hecho de haber asumido la responsabilidad de las playas del litoral catalán a mis 31 años, en 1964 cuando los conocimientos generales sobre este tema eran mínimos y los problemas del litoral de Cataluña eran, y siguen siendo, muy importantes y muy variados; ello me obligó a pensar por mi cuenta. De otro lado el hecho de tener la ocasión de conocer, amar y estudiar las playas de las Baleares. El contraste y la comparación de playas reales tan diversas han sido, para mí, mucho más ilustrativos y útiles que los estudios en modelo reducido.

El continuo esfuerzo en la comprensión de los procesos litorales me llevó a la elaboración del que yo llamo compás de playas, en el año 1973, cuyo uso ha sido descrito por mí en diversos artículos y ponencias (ver bibliografía en PPG-1), tanto en las situaciones en que la playa se ajusta a su forma como en aquellos casos en que sirve para el trazado indirecto. Sin embargo, aunque se que muchos ingenieros lo utilizan, no he visto que lo hagan con la adecuada metodología, descrita en dichos artículos o ponencias. Por ello se hace sin la debida comprensión de su significado, utilidad y limitaciones.

Mi otro avance fundamental en el conocimiento de las playas consiste en el perfil esquemático que se representa en la Figura 1 (PPG-1, p. 23). Sin embargo,

no he visto que ningún consultor lo utilice, mientras se utiliza como panacea el que yo llamo nefasto perfil Dean. Este consiste en asimilar el perfil de la playa a una parábola, lo cual por desgracia es como una caricatura de la realidad, pues el parecido se debe a que el perfil real de una playa tiene tres pendientes de distinta naturaleza: i) la pendiente situada por debajo del perfil activo, que muy frecuentemente es la indeformable del sustrato o plataforma de apoyo ( $m_p$ ); ii) la de la zona de rotura de la ola ( $m'_s$ ); iii) y la de reflexión de la ola residual ( $\tan \delta$ ). Dado que, salvo excepciones, siempre suele darse ( $\tan \delta > m'_s > m_p$ ), el ajuste a una parábola, habida cuenta del importante factor atribuible al tamaño de la arena, da resultados aparentemente buenos. Sin embargo, mientras el perfil Dean da sólo una forma general aproximada, mi perfil esquemático estima el valor de la pendiente en la zona de rotura hasta la cuarta cifra decimal. Mientras el perfil Dean sólo cuenta al tamaño del sedimento, mi perfil además de la fundamental importancia del tamaño ( $D_{50}$ ) tiene en cuenta otros factores: el clima a través del período máximo (T), el coeficiente de abrigo local ( $k_a$ ), los posibles efectos de fondos indeformables situados por encima del límite del transporte significativo ( $F_p$ ), y en ciertos casos el efecto del transporte frontal ( $F_q$ ). Mientras el perfil Dean no establece los límites superior e inferior de aplicación, el perfil esquemático permite estimar todos los valores importantes y características del frente arenoso; y en el caso de las oscilaciones del nivel (marea astronómica o atmosférica y entumecimientos de temporal) permite estimar la pendiente del tramo superior o frente subaéreo ( $\tan \delta'$  que ya no tiene el carácter puro de reflexión que corresponde a  $\tan \delta$ ). El ajuste de los parámetros que define ha sido contrastado en innumerables playas reales y también en los perfiles de ensayos en modelo reducido efectuados por otros investigadores.

Creo interesante reproducir una vez más (ver C. Garau, 1993) el juicio que emitía Harry Swart el 2.10.87 sobre mi perfil esquemático:

...“Only now that I see it in English and not in Spanish I fully recognize the potential of this approach. I have very little problem with your concept as it is and I feel that it falls as a method between the completely black box approaches such as those by myself or Dean on the one hand, and the more

detailed flow description approaches by authors such as Marcel and Stive, on the other hand. A great advantage of this approach is that it gives a physical interpretation of parameters, it thus allows for a better understanding of differences between model and prototype processes”...

Quiero expresar mi agradecimiento a muchos compañeros que han confiado en mi experiencia para diagnosticar y solucionar problemas en las playas que estaban bajo su gestión. Cada estudio ha servido para mejorar la visión de los procesos litorales. No es oportuno mencionar sus nombres, bastante numerosos desde el año 1973 en que se publicó mi primer artículo. Expreso un recuerdo agradecido, por sus enseñanzas y ejemplo, a dos profesores de la Escuela: Ramón Iribarren y Eduardo Torroja: el primero porque me dio los fundamentos de la Ingeniería Marítima y el segundo porque me los dio sobre el comportamiento de los materiales y me estimuló a pensar por mi cuenta.

En el complejo tema de playas y procesos litorales, se ha preferido acudir al renombre de especialistas extranjeros, y creo que ha faltado una discusión sincera y fructífera que quizás habría ayudado a que la Ingeniería de Costas española ocupara un lugar puntero a nivel mundial. Máxime cuando aquí tienen tanto valor paisajístico y económico las playas.

#### **Aclaraciones sobre aspectos que afectan a la opinión pública**

##### **A. Algunas afirmaciones recogidas en la prensa**

Los medios de comunicación son muy sensibles al tema de las playas, y muy especialmente en las zonas turísticas como Baleares. Sin embargo, debido a la complejidad de los procesos sedimentarios litorales, también es frecuente la divulgación de ideas y afirmaciones contrarias a la realidad, sin fundamento científico. A modo de ejemplo, estimo conveniente reproducir las siguientes *opiniones* tomadas de la prensa de estas islas, en fechas no muy lejanas, que se refieren a aspectos y casos concretos tratados en el presente artículo y que se enumeran para ulteriores comentarios:

1. “Playas emblemáticas de Mallorca sufren grave degradación, como por ejemplo las de es Trenc,

Cala Agulla, y Can Picafort. En el caso de Cala Agulla (Capdepera) preocupa en gran medida su mal estado sobre todo a raíz del último temporal importante, en el que se registró una notable pérdida de arena. Las piedras con poco sedimento y grietas evidencian el daño causado, y se pone en peligro la salud de las personas. El turismo también se ve perjudicado.”

2. “La experiencia reciente de regeneración de arena de forma masiva en Can Picafort -que pese a la alta inversión realizada ha fracasado puesto que otros temporales se llevaron casi toda la arena depositada- moviliza a científicos y ecologistas, que se oponen a estas complejas acciones artificiales.”
3. “No se recomienda las regeneraciones masivas y que implican maquinaria pesada. Se rechaza la extracción de arena desde el fondo marino porque perjudica la fauna de esta ámbito (que vive sobre y dentro de la arena, herbarios submarinos).”
4. “La extracción de arena desde el fondo marino agreda el equilibrio sedimentario del lecho marino, es decir que la naturaleza intenta tapar el desnivel provocado por dicha extracción y se produce un movimiento del sedimento desde la orilla hacia el fondo marino.”
5. “Conviene evitar la extracción de arena desde el fondo marino y mantener las algas (posidonia) en la orilla, ya que amortigua muy bien el oleaje y retienen arena. Se aconseja, para regenerar, arena fósil o arena de las paleodunas de las mismas características que aquellas de la playa considerada.”

#### Comentarios

- a) Sobre la primera opinión, nada que objetar. Resalta hechos ya referidos en mi primer artículo (Estrenc y Cala Agulla) y en el presente (Can Picafort), y sus graves consecuencias sobre el paisaje, el uso de la playa y la industria turística.
- b) En la segunda se hace una afirmación acorde con lo expuesto anteriormente acerca de los problemas de la Bahía de Alcudia. Sin embargo, tal afirmación pretende dar a entender que la falta de éxito en las aportaciones de arena a Can Picafort significa el fracaso general de las aportaciones de arena. Creo que en el presente artículo se explica claramente la razón de que la aportación de arenas en el extremo SE del sistema de playas de la Bahía de Alcudia no es una actuación sostenible. Una vez más es necesario insistir en que lo más importante es un buen diagnóstico del problema que pueda presentar una playa en concreto.
- c) Sobre la crítica de las regeneraciones masivas, carece de sentido tal expresión, y el hecho de implicar maquinaria pesada tampoco aclara nada. Depende de cada situación concreta. En cuanto a la afirmación de que la extracción de arena del fondo marino perjudica la fauna, tiene tanto valor como la afirmación contraria si no se justifica. Me permito afirmar que durante y tras las extracciones realizadas en la zona de Refeubeig (Cala bastante abierta, situada al oeste del Cabo de Cala Figuera que cierra la Bahía de Palma por el oeste) se hizo un seguimiento de las operaciones y del comportamiento posterior (se puede consultar en la Demarcación de Costas); de sus resultados se desprende que no hubo afección a la fauna y que la biodiversidad de la delgada capa que alberga la vida del fondo arenoso marino se recobraba en pocas semanas, e incluso aumentaba pasado el primer mes. Esto último se interpretó como consecuencia de la mayor proporción de finos en la capa superficial, resultante de la propia operación de dragado, ya que el efluente del caudal vertido en la cántara de la draga, devuelve al mar los finos (inadecuados para la arena de playa).
- d) La afirmación de que “la naturaleza intenta tapar el desnivel provocado por la extracción” es tan sólo una presunción injustificada. Claro está que si se hace un hoyo en la zona del perfil activo de una playa ocurrirá tal predicción, pero las extracciones del fondo marino deben hacerse siempre en formaciones arenosas relictas, es decir, arenas fósiles dejadas por la acción efectiva del mar al elevarse el nivel durante la transgresión Holocena, como se ha dicho reiteradamente.
- e) Es frecuente oír comentarios oponiéndose a toda extracción del mar. Sin embargo se trata de un temor a los errores que indudablemente se han producido en el pasado, por realizarse actuaciones sin previo diagnóstico correcto. En cuanto a la presunción de que la posidonia muerta protege las playas, se trata de una mera hipótesis injustificada. El “alga” (como se denomina a la posidonia en Mallorca) muerta que se acumula en la orilla pre-



senta dos efectos nocivos: 1.- Al desmenuzarse y quedar en suspensión en el agua, se produce un aumento de la viscosidad del líquido y, con ello, el aumento de la ola que se refleja en la orilla (tn  $\delta$  en la Figura 1, R.O.P. N° 3.469, p. 23) de manera que se produce arrastre de sedimento hacia el mar; y 2.- Aunque el "alga" seca depositada sobre la orilla proteja en algún momento cierta zona, el frente vertical que presenta su perfil (por acciones posteriores al temporal que produjo su arranque y a otros tipo *swell*  $\{K_a < 1\}$  que produjeron su transporte y depósito en la orilla) implica una re-

flexión de la ola que en definitiva causa el arrastre de sedimento hacia el fondo. Es por tanto engañoso el supuesto efecto protector de la posidonia seca. Por otra parte, los fuertes temporales tipo *sea*  $\{K_a \geq 1\}$  (gran altura de ola en relación al período) que causan el arranque de la posidonia, o no encuentran la orilla "protegida" por el alga muerta o bien, en caso de encontrar posidonia, lo que hace es ponerla rápidamente en suspensión, de manera que aumenta la altura de la ola residual que se refleja en la orilla causando así el arrastre de arena hacia el mar. Recuérdense las expresiones (1), (2) y



Fig. 11. Contraste de los anchos de playa emergida y sumergida entre los años 1955 y 2005. Playa de Magaluf, T.M. de Calviá (Mallorca). Véase como las zonas vegetadas son incluso más extensas y tupidas actualmente que antes de la "alimentación masiva" con arenas procedentes de los fondos marinos relictos da la zona de Refeubeig. FOTOS CEDIDAS POR ESTOP FOTOS AÉREAS.

(3) de la Figura 1 (PPG-1, p. 23) que definen el concepto de  $K_a$  (C. Garau, 1981,1990). Este *coeficiente de abrigo* se puede evaluar por la condición  $K_a = K_w \cdot K_r \cdot K_d$ , donde  $K_w$  es la relación entre la altura de ola  $H_s$  antes de ser afectada por la batimetría y topografía local (aunque sí por el efecto de *decay* o pérdida de altura en su recorrido desde el área de generación), y la altura de ola teórica de Iribarren  $H_0$  dada por la expresión  $H_0 = 0,1276 \cdot T^{3/2}$ ; y siendo  $K_r$  y  $K_d$  los coeficientes de refracción y difracción debidos a tal batimetría y topografía local, respectivamente.

f) Finalmente se aconseja utilizar arena de las paleodunas de las mismas características de la playa considerada. El problema se plantea por el hecho de que, en caso de existir tales paleodunas, constituyen bienes tan apreciados como las propias playas; son escasas y generalmente protegidas. Por el contrario, como se ha visto, los yacimientos relictos en los fondos marinos de la plataforma litoral son extraordinariamente abundantes y la experiencia de su explotación en las Baleares ha mostrado que, con el debido control, su efecto negativo es despreciable. Evidentemente, deben evitarse los

**PAGINA OMITIDA  
INTENCIONADAMENTE**

errores cometidos en el pasado que, por desgracia, se han dado. La afirmación implícita sobre la conveniencia de que la arena sea de tamaño similar (el  $D_{50}$  es característica principal) al de la playa considerada, se comentará más adelante.

## B. Un aspecto fundamental

Es frecuente oír comentarios en el sentido de que las aportaciones de arena a las playas implican siempre el soterramiento de la posidonia que antes existía en su pie. Como muestra del error a que puede inducir tal generalización, en la Figura 11 se reproducen las orto fotografías de la playa de Magaluf, antes y después de las aportaciones de arena. De su observación y contraste podemos resaltar lo siguiente:

1. Si comparamos el ancho de playa seca. Observamos el gran aumento habido entre 1955 y 2005. Ello se debe a la alimentación artificial de arena, realizada por la Dirección General de Costas entre los años 1990 y 1996.
2. Si comparamos el ancho de la formación arenosa, tanto emergida como sumergida, observamos que no existe variación apreciable.
3. Puede apreciarse que se trata de una formación de perfil incompleto. Su pie corresponde a su encuentro con los rugosos fondos rocosos, en parte colonizados por la posidonia, a profundidades que varían entre unos 3 y unos 5 metros. La variación del fondo vegetado entre ambas fechas es prácticamente inapreciable, a pesar de las aportaciones de arena y al aumento del ancho de playa seca.
4. Si analizamos las áreas de vegetación marina, que la extraordinaria claridad de las aguas permite apreciar hasta profundidades del orden de los 10 metros y aun superior, ofrecen mayor superficie total en 2005 que en 1955.

### Comentarios

Aquí tenemos una prueba evidente del error en que pueden incurrir las irresponsables afirmaciones sobre ineficacia y perjuicios de las regeneraciones de playa mediante aportación de arena. Recuérdese que a lo largo de estos dos artículos se ha aludido a diversas playas de Mallorca regeneradas mediante aportación masiva de arena, entre ellas precisamen-

te la de Magaluf, exponiendo su perfecto comportamiento.

Es presumible que quienes rechazan la extracción y aportación masiva de arena para corregir los graves problemas que presentan muchas playas de las Baleares, crean que en este caso de Magaluf debería haberse perdido más o menos rápidamente. Probablemente se sorprenderían de ver y analizar estas fotografías a la luz de los cuatro aspectos señalados anteriormente. Dudo que sean capaces de comprender lo que les parecerá u truco fotográfico, sabiendo que han transcurrido más de 10 años desde la última aportación. Sin embargo la explicación es muy sencilla: el tamaño de la arena de aportación (procedente de los fondos marinos de Refeubeig antes mencionados) era del orden de  $D_{50} = 0,4$  mm, mientras la arena nativa de la playa de Magaluf era del orden de  $D_{50} = 0,25$  mm; ello hizo que el frente de avance tuviese sección prácticamente triangular, de modo que su pie apenas varió. La aplicación del perfil esquemático (R.O.P. N° 3.469, p. 23) permite la estimación cualitativa de tal efecto.

Volviendo atrás, en la opinión 5 reproducida anteriormente, se aconseja regenerar con arena de las mismas características de la playa considerada. Ésta es una medida generalmente aceptada. Sin embargo aquí vemos que en la mayoría de los casos es más favorable un tamaño mayor que el nativo, por dos razones: 1) porque requiere menos volumen de arena aportada; 2) porque evita el recubrimiento de las posibles coberturas vegetales (posidonia), que tanto preocupan a muchos biólogos, a pesar de ser los fondos menos productores de bioclastos y los más abundantes en la plataforma costera de las Baleares, como afirmaron Canals y Ballesteros (1997) tras sus excelentes estudios de estas aguas. En cuanto a la arena fósil, son precisamente las abundantes arenas relictas en el fondo del mar balear las que por su origen merecen tal calificación.

Si bien es cierto que en el pasado, e incluso recientemente en el caso de la playa de Can Picafort o en el Maresme de la costa catalana, se han cometido errores que es necesario evitar con diagnósticos adecuados, el rechazo injustificado de las alimentaciones con arena extraída de fondos marinos relictos, realizada con los controles adecuados, carece de fundamento. Tal postura significaría, a la larga, un futuro muy negro para todas las playas con sistema dunar asociado. Y éstas son, precisamente, las playas vírgenes más apreciadas en las Baleares. ♦

Referencias:

-AHRENS, J.P. AND TITUS, M.F., 1985. "Wave runup formulae form smooth slopes". Journal of Watrway, port, Coastal and Ocean Engineering. Vol III n.1, jean: pp. 128-133.

-ANTIA, E.E., 1996. "Rates and Patterns of migration of shoreface-connected sandy Ridges Along the southern North Sea coast". JOURNAL OF COASTAL RESEARCH, 12(1).

-BATTJES, J.A., 1974. "Surf similarity". Proceedings 14 th Coastal Engineering Conference: pp. 466-480.

-CANALS, M., Y BALLESTEROS, E., 1997. "Production of carbonate particles by phytobenthic communities on the Mallorca-Menorca shelf, northwestern Mediterranean Sea". Deep-Sea Research II, Vol.44, Nº. 3-4, pp. 611-629.

-CESNUT, CH.B. and GALVIN, C.J. Jr., 1974. "Lab. Profile and reflection Changes for H/L=0.02". Proceedings 14 th Coastal Engineering: pp. 958-977.

-CLARK, J. A., FARREL, W. E., & PELTIER, W. R., 1978. "Global changes in Postglacial Sea Level: A Numerical Calculation". Quaternary Research, V. 9. pp. 265.-287.

-CUERDA-BARCELÓ, J., 1975. "Los tiempos Cuaternarios en las Baleares". Gráficas Miramar. Palma de Mallorca. 350 pp.

-DILLENBURG, S.R.; ROY, P.S.; COWELL, P.J.; and TOMARELLI, L.J., 2000. "Influence of antecedent topografy on coastal evolution as tested by the shoreface traslation-barrier model (STM)". JOURNAL OF COASTAL RESEARCH, 12(1).

-EITNER, V., 1996. "Morphological and sedimentological development of a tidal inlet and its catchement area (Otzumer balje, southern North Sea)". JOURNAL OF COASTAL RESEARCH, 12(1).

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1973a. "Aplicación de los principios del método de los Planos de Oleaje al estudio de los movimientos de arenas". Revista de Obras Públicas, julio: pp. 643-664.

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1973b. "El rozamiento y la estabilidad de las playas". R.O.P., agosto: pp. 777-788.

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1974. "Reflexión del oleaje sobre la playa". R.O.P., diciembre: pp. 869-882.

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1981. "Condiciones de la estabilidad de las playas. Análisis de la función polar de los salientes". R.O.P., enero: pp. 29-48.

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1982a. "Algunas consecuencias y aplicaciones del conocimiento de la función polar de los salientes". R.O.P., julio: pp. 463-478.

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1982b. "Afecciones por y sobre los procesos litorales". I Curso sobre Puertos e Instalaciones Deportivas. Palma de Mallorca, octubre. (Servicio de Publicaciones del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos).

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1983. "Evolución histórica de las formaciones arenosas del Maresme y deltas del Besos y del Llobregat". Estudio previo para el diseño de las playas de levante de Barcelona, INYPSA. (MOP y Ayuntamiento de Barcelona. No publicado).

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1984a. La forma de una playa cuando existe una dirección claramente predominante de los oleajes". R.O.P., enero: pp.15-24.

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1984b. "Laspendientes de la playa y el tamaño de la arena". R.O.P., diciembre: pp. 943-960.

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1985a. "Discusión sobre el artículo anterior". R.O.P., marzo: pp. 195-198.

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1985b. "Littoral Processes on the Maresme Coast: Man's Impact or Natural effects?". Thalassas, Revista de Ciencias del Mar, Vol. 4, Nº 1, 1986, (Proceedings/Symposium on: Man's Impact on Coastal Environment, Barcelona, 1985).

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1986a. "Las pendientes de la playa y el tamaño de la arena (2)". R.O.P., agosto: pp. 601-612.

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1986b. "Un model de perfil de platja". Espais nº2 (Generalitat de Catalunya): pp. 71-78.

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1989a. "Perfil de la playa y tamaño de la arena (3)". R.O.P., marzo: pp. 161-175

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1989b. "Ingeniería de Costas: soluciones duras o blandas versus condiciones genéticas". R.O.P., mayo: pp. 341-357.

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1990. "El perfil de la playa y sus factores de equilibrio". R.O.P., mayo: pp. 35-42.

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1992. "Investigación sobre la zona de reflexión. Confirmación de una teoría". R.O.P., diciembre: pp. 21-32.

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 1993. "Análisis tridimensional de una playa". JORNADAS ESPAÑOLAS DE INGENIERÍA DE COSTAS Y PUERTOS (III).

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 2001. "Efectos de la transgresión Holocena en la génesis de las actuales masas sedimentarias litorales". JORNADAS ESPAÑOLAS DE INGENIERÍA DE COSTAS Y PUERTOS (VI).

-GARAU-SAGRISTÁ, C., 2005. Estudio de la playa de Cala Agulla. su génesis y sus actuales problemas". Demarcación de Costas en lles Balears. (No publicado).

-GOURLAY, M.R., 1980. "Beaches: Profiles, processes and permeability". Proceedings 17 th Coastal Engineering, febr.: pp. 1320-1339.

-GRAAFF, J. VAN DE, 1986. "Probabilistic design of dunes; an example from the Netherlands". Coastal Engineering, febr., pp. 479-500.

-GRANJA, H.M. and DE GROOT, T.A.M., 1996. "Sea-level rise and neotectonism in a Holocene coastal environment at Cortegaça Beach (NW Portugal): A case of study". JOURNAL OF COASTAL RESEARCH, 12(1).

-INMAN, K., 1983. "Application of coastal Dynamics to the Reconstruction of Paleocoastlines in the vicinity of La Jolla, California". Quaternary Coastlines and Marine Archaeology. Academic Press, pp. 1-49

-IRIBARREN, R., 1954. "Obras marítimas. Oleajes y diques". Dossat, S.A.

-JONSON, D.L., 1983. "The California Continental Borderland: Landbridges, watergaps and biotic dispersals". Quaternary Coastlines and Marine Archaeology. Academic Press: pp. 481-527.

-KHUN, T. S., 1962. "The Structure of Scientific Revolutions". (Trad. de A. Cotín, México, FCE-Breviarios, 1992).

-KRIEBEL D.L. and DEAN, R.G., 1984. "Beach and dune response to severe storms" Proceedings 19 th Coastal Engineering, Houston

-KRIEBEL, D.L. and DEAN, R.G., 1985. "Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion". Coastal Engineering, sep.: pp. 221-245.

-MÖRNER, N., 1971. "Eustatic changes during the last 20000 years and a metod of separating the isostatic and eustatic factors in an uplifted area". Palaeogeografy. Palaeoclimatology. Palaeoecology, pp. 153-481.

-PSUTY, N.P. and MOREIRA, M.E.S.A., 2000. "Holocene sedimentation and sea level rise in the Sado Estuary, Portugal". JOURNAL OF COASTAL RESEARCH, 16(1).

-RASCH, M., 2000. Holocene sea level changes in Disko Bugt, West Greenland". JOURNAL OF COASTAL RESEARCH, 16(2)

-ROY, P. S. & STEEPLE'S, A. W., 1980. "Geological controls on processes-response, S. E. Australia". Proceedings 19th. Coastal Engineering Conference, pp. 913-933.

-SCHWAB, W.C.; THIELER, E.R.; ALLEN, J.R.; FOSTER, D.S., SWIFT, B.A.; and DENNY, J.F., 2000. "Influence of inner-continental shelf geologic framework in tehe evolution and behavior of the barrier-island system between Fire Island Inlet and Shinnecock Inlet, Lon Island, New York". JOURNAL OF COASTAL RESEARCH, 16(1).

-SCHWAB, W.C.; RODRIGUEZ, R.W.; DANFORTH, W.W.; and GWEN, M.H., 1996. "Sediment distribution on a storm-dominated insular shelf: Luguillo, Puerto Rico, U.S.A." JOURNAL OF COASTAL RESEARCH, 12(1).

-SCRUTTON, C. T., 1978. "Periodic Growth Features in Fossil Organisms and the Length of Day and Month". Tidal Friction and the Earth's Rotation I. Ed. by Brosche/Sündermann. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1978, p. 154-196.

-SIMPSON, G. G., 1983. "Fósiles e historia de la vida". Editorial Labor, 240 pp.

-SULIVANOV, A.O., 1996. "Morphological changes on Russian Coasts under Rapid sea-level changes: Examples from Holocene History and implications for the future". JOURNAL OF COASTAL RESEARCH, 12(1).

-SUNAMURA, T. and OKAZAKI, S., 1996. "Breaker types and wave reflection coefficient: laboratory relationships". JOURNAL OF COASTAL RESEARCH, 12(1).

-SWART, D.H., 1974. "A schematisation of onshore-offshore transport". Proceedings 14 th Coastal Engineering: pp. 884-900.

-THIELER, E.R.; PILKEY, O.H. JR; YOUNG, R.S.; BUSCH, D.M.; and CHAI, F., 2000. "The use of mathematical models to predict beach behavior for U.S. Coastal Engineering: A critical review". JOURNAL OF COASTAL RESEARCH, 16(1).

-TOOLEY, M. J., 1978. "Sea-Level changes in north-west England during the FLANDRIAN STAGE". Oxford Research Studies in Geog. Clarendon Press, Oxford, 232 pp.

-U.S. Army, C.E.R.C. 1973-1977-1984. "SHORE PROTECTION MANUAL".

-VELLINGA, P., 1984. "A tentative description of universal erosion profile for sandy beaches and rock beaches. Coastal Engineering, 8: pp. 177-188.