



# I+D+i **GIZC** GESTIÓ INTEGRADA DE LA ZONA COSTANERA

Investigació per a la Sostenibilitat de la Zona Costanera de les Illes Balears



## Estimació del retrocés de la línia de la costa

**Proyecto específico:**

*Caracterización y diagnóstico del medio físico.  
Estimación del retroceso de la línea de costa de las Illes  
Balears.*

**Pau Balaguer Huguet**

**IMEDEA**

## Resumen:

En este informe referente al proyecto específico “*Caracterización y diagnóstico del medio físico. Estimación del retroceso de la línea de costa de las Illes Balears*” se presentan una serie de datos referentes al retroceso de las costas rocosas de la isla de Mallorca. Los datos obtenidos han sido a partir de la recopilación de trabajos previos sobre dinámica de las costas rocosas y a partir del análisis de fotografías aéreas de diferente fecha en las zonas de Betlem-Colònia de Sant Pere (Artà), Alcanada (Alcudia), Mal Pas – Bonaire (Alcudia), es Carnatge (Palma de Mallorca) y Ses Penyes Rotges (Calvià). Dentro del entorno de un proyecto de Gestión Integrada de la Zona Costera (ICZM), en el que se contemplan todos los factores, agentes y actores que intervienen en el ámbito del área costera, la caracterización del medio físico es un parte importante de estas iniciativas ya que según las características, tanto en la genética, como en la evolución del medio, condicionará los usos y finalidades de las diferentes zonas del área costera. Los resultados obtenidos que se han extraído a partir de estudios previos sobre dinámica y caracterización de la costa rocosa deben separarse según el proceso o tipo de erosión que se trate, de este modo las tasas de erosión de la costa rocosa de Mallorca a partir de desprendimientos o colapsos de acantilados costeros son de unos 0,8 mm/año, la disgregación granular continua de las paredes de los acantilados produce una tasa que oscila entre los 0,02 y los 0,08 mm/año, el retroceso atribuible a la bioerosión (a partir de procesos metabólicos de los organismos que viven sobre el sustrato rocoso en la línea de costa) es de 0,00709 mm/año para las *Melaraphe neritoides*, entre 3,7 y 2,095 mm/año para *Patella rustica* (Balaguer, 2005). En cuanto a los resultados obtenidos a partir del análisis de fotografías aéreas georeferenciadas de diferente fecha los valores de retroceso máximos oscilan entorno a -23,9 m ( $\pm 2,1$  m) y -13,8 m ( $\pm 0,5$  m) (en el periodo comprendido entre 1956 y 2002) en la zona de Alcanada (Alcudia), entre -4,3 m ( $\pm 1,2$  m) y -9,5m ( $\pm 1,2$  m) (en el periodo comprendido entre 1956 y 2002) en la zona Penya des Migdia - Bonaire (Alcudia), entre -4,5 m ( $\pm 1,2$  m) y -11 m ( $\pm 1,4$  m) (en el periodo comprendido entre 1956 y 2002) en la zona de la Colònia Sant Pere – Betlem (Artà), entre -25,7 m ( $\pm 2,25$ ) y -4, 7 m ( $\pm 2,25$  m) (entre 1956 y 2002), en la zona de Ses Penyes Rotges (Calvià) y entre -14,7 m ( $\pm 1$  m) y -2,5 m ( $\pm 1$  m) m (en el periodo comprendido entre 1956 y 2002) en la zona de Cala Pudent en la zona de Es Carnatge (Palma de Mallorca).

Los resultados obtenidos se presentan debidamente ordenados y con su respectiva metodología en el interior del informe. También se hace mención, a modo de recomendaciones de futuro, a la metodología más adecuada para el estudio del retroceso de las costas rocosas mediante la utilización de fotografías ortorectificadas.

El conocimiento de las dinámicas imperantes que determinan la dinámica y evolución de las costas rocosas es un factor fundamental a la hora de aplicar políticas de gestión adecuadas sobre el área costera. El conocimiento sobre las pautas de erosión de las costas es esencial tanto para políticas de gestión que aboguen por la conservación de determinados enclaves costeros como para políticas de gestión que puedan prever acciones de desarrollo urbano-residencial en zonas cercanas a la línea de costa.

Los resultados obtenidos con los métodos utilizados, se han ejecutado únicamente en el ámbito de la isla de Mallorca, aunque cabe precisar que son perfectamente aplicables al resto de islas del archipiélago puesto que se dispone de todo el material necesario (cartografía de detalle, fotografías aéreas, fotografías oblicuas). De todos modos las tasas de retroceso de las costas tienen una estrecha relación con el tipo de material que forma la línea de costa, de modo que los resultados obtenidos sobre un tipo de material es extrapolable (siempre y cuando se tengan en cuenta algunas consideraciones referentes al contexto) a cualquier zona costera constituida por los mismos materiales a lo largo de todo el archipiélago.

**Pau Balaguer Huguet**

**IMEDEA**

**Grupo de Oceanografía Física**

**971 61 04 81**

## **Introducción:**

La costa rocosa de Mallorca se caracteriza por la naturaleza carbonatada de sus materiales y su marcado control estructural. La evolución de los acantilados está regida por los procesos erosivos que los afectan, éstos pueden ser de dos tipos: episodios catastróficos (que determinan los máximos volúmenes de erosión) distribuidos temporalmente de forma irregular, con cambios puntuales importantes en la morfología de la costa y procesos continuos de erosión (biológicos, disolución y desintegración granular) que ofrecen unas tasas más moderadas (Villanueva et al., 2000; Balaguer et al., 2001; Palmer et al., 2001; Vidal et al., 2001; Villanueva et al., 2001; Balaguer 2005; Gómez-Pujol, 2006) y no implican cambio en la fisionomía costera del litoral mallorquín.

Las costas formadas por playas han recibido genéricamente el nombre de costas de acumulación (Zenkovich, 1967; Philpott, 1984; Sanjaume, 1985), éstas se caracterizan por la necesidad de contar con la presencia de una fuente “constante” de suministro de sedimento. Su formación se produce en las costas que forman parte de llanuras, en el interior de depresiones morfoestructurales, al pie de costas acantiladas de perfil cóncavo y en interior de radas y calas. El término playa, en este trabajo, se considera como un tipo de costa formado por materiales no consolidados, independientemente de los procesos de erosión o acumulación que se puedan dar, ya que éstos dependerán de la interacción de los agentes que intervienen en la dinámica externa.

El incremento de la población sobre la zona costera es un hecho palpable y de hecho se experimenta en las islas Baleares desde casi bien la mitad de la década de los años sesenta con la irrupción del fenómeno turístico en el entramado socioeconómico. El aumento de población sobre la línea de costa en las Illes Balears puede producir un conflicto entre el desarrollo y riesgos naturales de tipo geológico derivados de la inestabilidad que puedan presentar algunos taludes marítimos, acantilados verticales, del peligro de fuga de sedimentos de una playa que deje desprotegida la primera línea de viviendas localizadas en la línea de costa y de la posible presencia de cuevas cárstico-marinas en el subsuelo de las costas rocosas (no tienen porque ser costas altas ni acantilados) causando un peligro potencial de derrumbe de las edificaciones que puedan construirse debido una falta de planificación y gestión adecuada carente de sentido de la sostenibilidad.

Con el fin de identificar las zonas con una mayor potencialidad de producirse desprendimientos, inestabilizaciones y derrumbes sobre la zona costera, se ha procedido a elaborar una lista con los puntos que a priori presentan mayor probabilidad en todo el ámbito costero de las Baleares.

Las tasas de erosión con mayor representatividad son aquellas que comprenden un lapso de tiempo de larga duración (Moore & Griggs, 2002), en este trabajo se ofrecen las tasas de erosión extraídas a partir del análisis de fotografías aéreas de diferentes fechas para el período 1956 –

2002 de una serie de zonas en las que a partir de la observación directa tanto en el campo como en las fotografías aéreas, como en las fotografías oblicuas de la línea de costa, se observa un retroceso patente. En este informe de proyecto específico nos hemos limitado a caracterizar una serie de estos ejemplos catalogados localizados en la zona N-NE y S-SW de Mallorca. La particularidad o relación que presentan estas zonas estudiadas es que en todas las secuencias estratigráficas los materiales correspondientes al Cuaternario o bien son los materiales predominantes o bien los materiales de la columna estratigráfica que condicionan el desencadenamiento de los procesos de inestabilización.

En cuanto a los objetivos iniciales en el momento de emprender este trabajo estos se basaban en:

- Establecer el retroceso de la línea de costa (a partir del análisis de ortofotos, en Baleares disponemos de las fotografías aéreas de los años 1956, 1973, 1979, 1983, 1990 y 2001, de manera que se pueden obtener tasas de erosión/retroceso del litoral para una serie de 45 años.
- Elección de varias zonas piloto de las costas rocosas de Balears cuyo retroceso es actualmente activo y en los que el resultado del estudio (tasa de erosión -m de costa retrocedida/año-) sea mayor que la media del error cuadrático (RMS) de las fotografía aéreas georeferenciadas y ortofotos utilizadas. La obtención de varias tasas medias de retroceso permitirá hacer estimaciones para el conjunto de las islas relacionándolo con trabajos de caracterización i clasificación de la costa.
- Establecimiento de una tasa de retroceso medio de los últimos 45 años para todos los sistemas dunares de las Balears. El procedimiento del análisis es el mismo que el propuesto para las costas rocosas aunque en este caso la evolución de la línea de costa se considerará a partir de los cambios ocurridos en el primer cordón dunar o foredune de acuerdo con lo propuesto por Moore & Grigs (2002).
- Para las zonas de aguas de transición o lagunas se calculará una tasa de pérdida de superficie ( $m^2/año$ ) por la que se determinará el impacto de las modificaciones causadas por el hombre, cambios de las condiciones climáticas, etc.

Actualmente, la mayor parte de estos objetivos considerados como “ideales” a la hora de la caracterización del medio físico de la zona costera de las Illes Balears pasan a ser recomendaciones de cara a la implantación de una iniciativa de GIZC. El cálculo del retroceso de manera secuencial, dependiendo de las fechas en las cuales se tomaron fotografías aéreas será un apunte importante ya que se podrán relacionar los períodos de mayor o menor retroceso de la línea de costa con estudios de clima marítimo que puedan desprender un aumento o disminución de episodios de temporales marinos.

## Áreas de Estudio

El estudio del retroceso de la línea de costa a partir de la georeferenciación de fotografías aéreas se ha realizado, de manera preliminar, en la isla de Mallorca (Illes Balears, España). Las zonas escogidas para aplicar este método de estudio se localizan en tramos costeros en los cuales los materiales correspondientes al Cuaternario conforman la mayor parte de la línea de costa. Las características sedimentológicas y texturales de estos materiales, normalmente constituidos por depósitos de eolianitas pertenecientes a paquetes dunares fósiles correspondientes a los periodos glaciares (generalmente Riss y Wurm), depósitos marinos/0 de playa correspondiente a los periodos interglaciares, depósitos de conglomerados, brechas y materiales arenosos – arcillosos (abanicos aluviales) cuya acumulación responde al transporte fluvio-torrencial con una elevada energía. Normalmente estos depósitos de materiales del Cuaternario suelen presentar, en la columna estratigráfica, niveles menos cohesionados lo que provoca el inicio de procesos de erosión diferencial y el posterior dismantelamiento de los acantilados o escarpes localizados en la misma línea de costa. La erosión diferencial de los acantilados y escarpes localizados en la línea de costa provoca el descalce de la base del acantilado haciendo colapsar, o en algunos casos rotar, los niveles superiores (Figura 1).

Las “pruebas piloto” de estudio del retroceso de la línea de costa a partir de la georeferenciación simple de fotografías aéreas se ha realizado sobre una serie de tramos litorales en los que se observa a priori, mediante fotografías oblicuas de la línea de costa (consultar anexo de zonas de estudio potencial), procesos patentes de denudación de las costas rocosas, especialmente escarpes y acantilados.

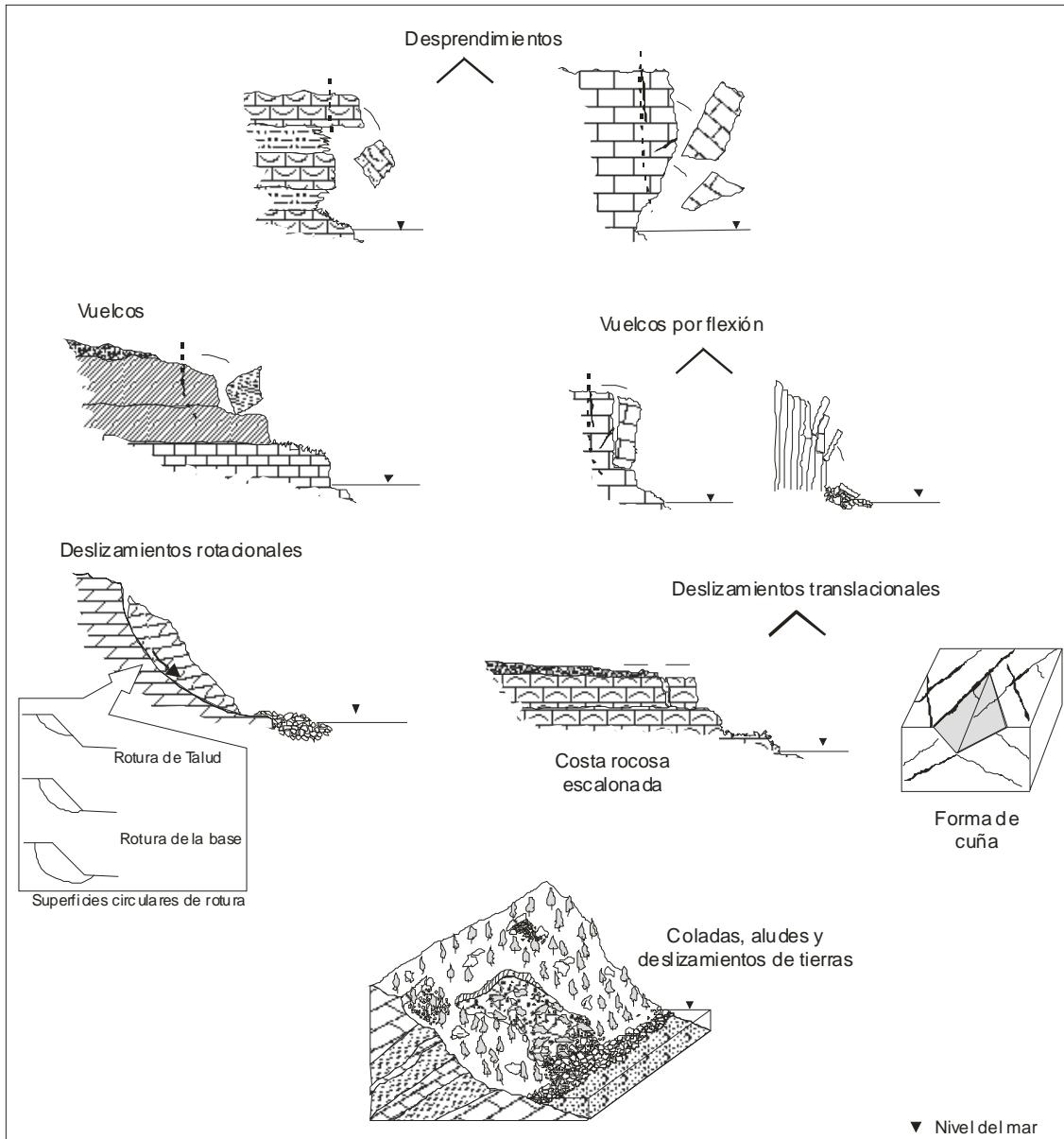
Las zonas en los que se ha aplicado el estudio del retroceso de la línea de costa han sido:

- Ses Penyes Rotges (Calvià, SW Mallorca)
- Cala Pudent – Es Carnatge (Palma de Mallorca, Badia de Palma)
- Colònia de Sant Pere – Betlem (Artà, NE Badia de Alcúdia)
- Es Faralló de Alcanada (Alcúdia, W Badia de Alcudia)
- Penya des Migdia – Bonaire (Alcudia, E Badia de Pollença)

Los resultados varían de una zona a otra dependiendo de las características de exposición al oleaje, así como las variaciones texturales y sedimentológicas que pueda haber entre las diferentes zonas.

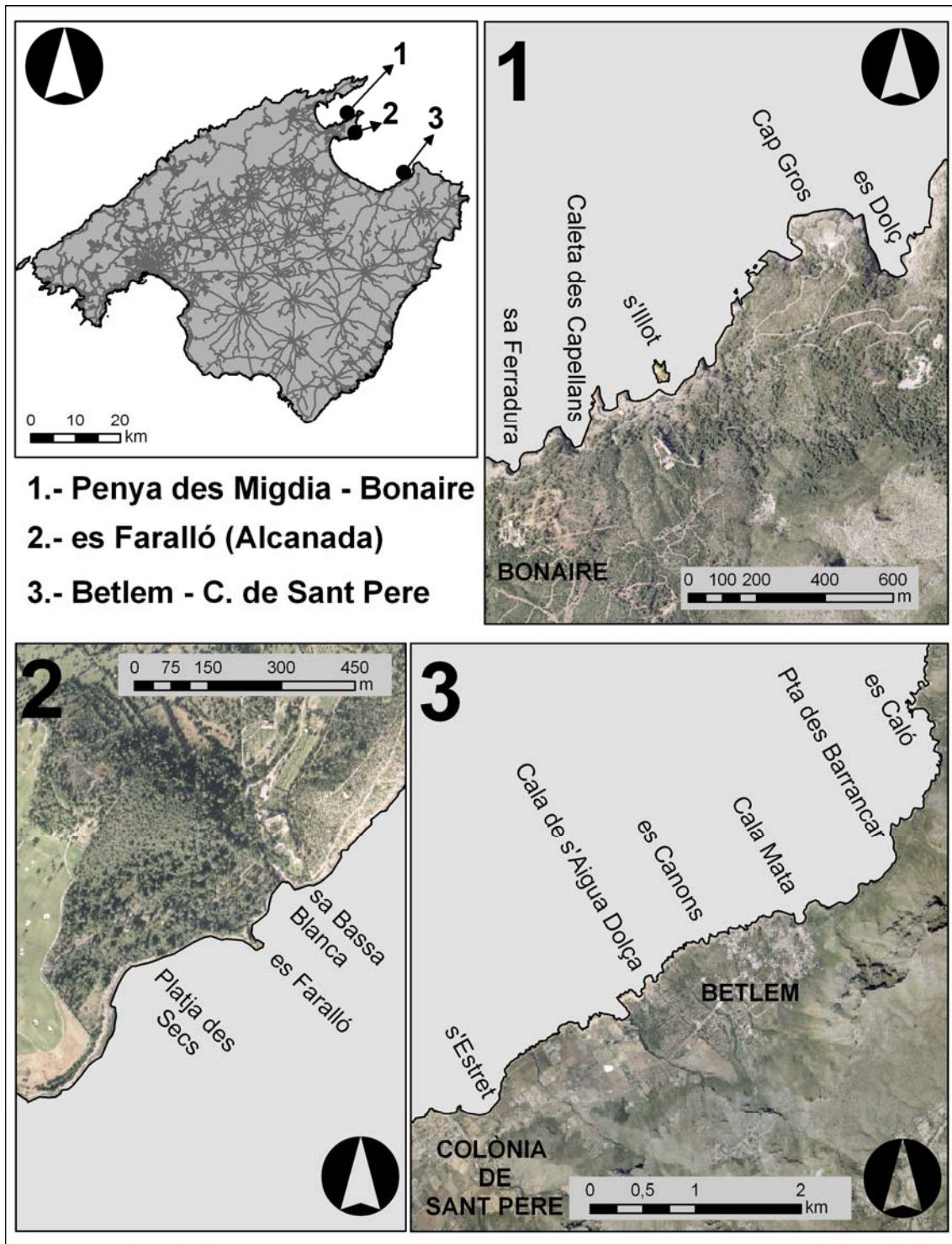
Las zonas de estudio de Es Faralló de Alcanada y de Colònia de Sant Pere – Betlem se localizan en el interior de la Badia de Alcudia (Figura 2) y la zona de estudio de Penya des Migdia – Bonaire se localiza en el interior de la Badia de Pollença (Figura 2). Ambas bahías se localizan en el Norte y Nordeste de la isla de Mallorca y presentan una gran variedad de formas

2ey modelados litorales. Mientras que en el fondo de las bahías se desarrollan sistemas de playa, restinga, albufera y sistemas dunares, los flancos están constituidos por costas rocosas y en su mayor parte acantilados de diversas alturas, así como también de materiales diferente y de edad y ambiente deposicional diverso. Es en los flancos en los que se han llevado a cabo parte de nuestros estudios (Figura 2) y en donde los acantilados bajos y medianos (alturas entre los 3 y los 30 m) cuyos escarpes y paredes deben su origen al desmantelamiento activo de los depósitos Pleistocenos (Cuaternario). Tanto los acantilados y vertientes de forma cóncava de grandes



**Figura 1:** Principales tipos de movimientos de masas y/o desprendimientos que pueden observarse a lo largo de la costa de las Illes Balears.

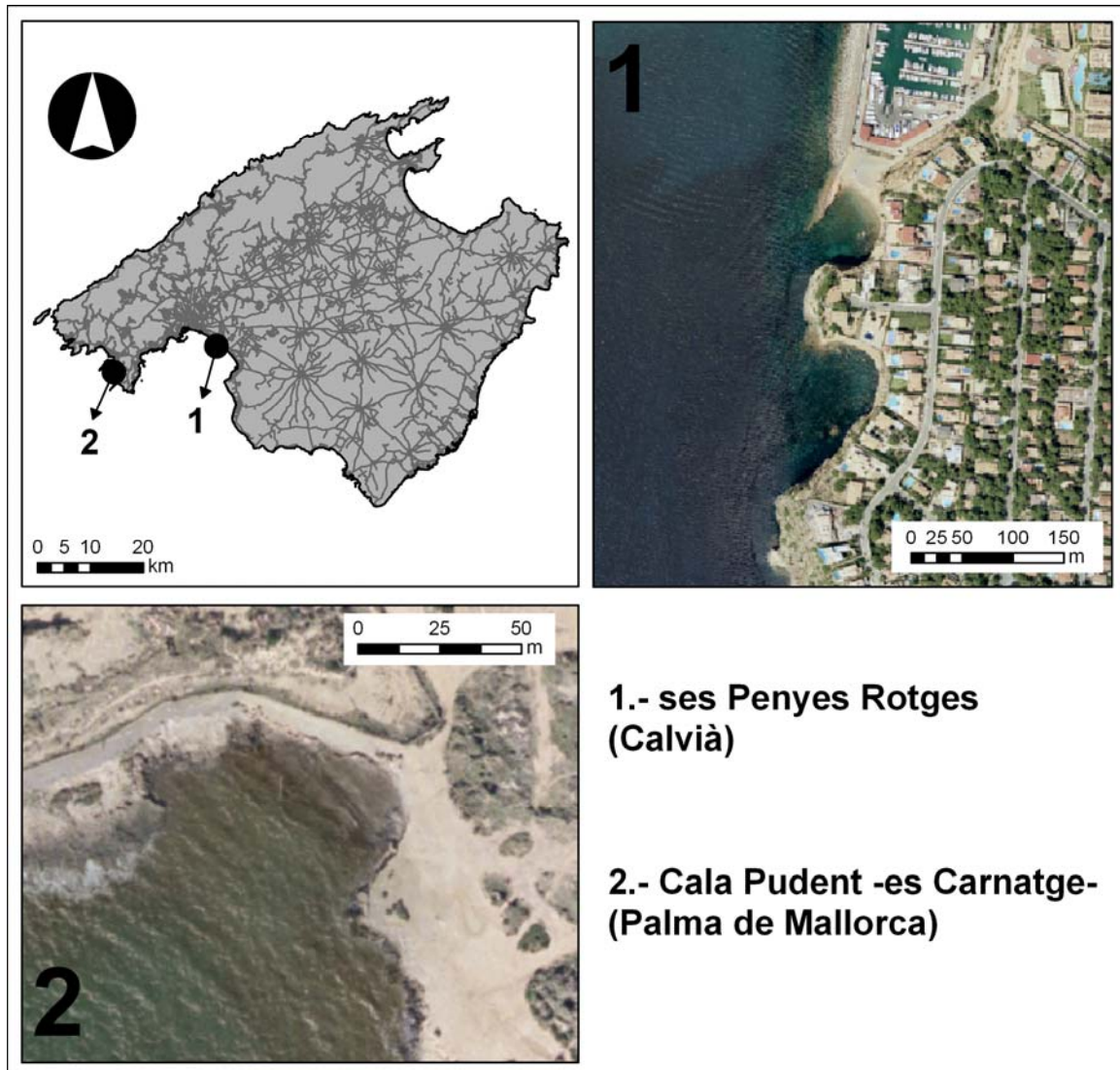




**Figura 2:** Localización de las zonas de estudio de Colònia de Sant Pere – Betlem (Artá), Penya des Migdia – Bonaire (Alcudia) y es Faralló de Alcanada (Alcudia).

alturas (> 30m), así como las zonas entorno a los cabos que encierran las bahías, están formados principalmente por materiales correspondientes al Jurásico, se trata de litologías calcáreas y dolomíticas afectadas por una estructura compresiva derivada de la Orogenia Alpina. Ambas bahías comprenden 125 km lineales costa, de los cuales, un 21, 6% corresponden a costas bajas formadas por materiales no consolidados (arenas), el 30% a costas constituidas por depósitos de

calcarenitas (eolianitas) del cuaternario y un 30% están formadas por materiales jurásicos que suelen constituir las costas con las mayores alturas. El resto del litoral está formado por costas artificiales construidas de nueva planta (diques y pantalanés) o bien a trazados de líneas de costa modificados por la acción del hombre.



**Figura 3:** Localización de las zonas de estudio de ses Penyes Rotges (Calvià) y de Cala Pudent (Palma de Mallorca).

La característica común de los acantilados formados por materiales cuaternarios de las tres zonas de estudio localizadas en el interior de las bahías de Alcudia y Pollença, es la de presentar columnas estratigráficas con materiales de naturaleza diferente aunque los procesos genéticos son análogos o prácticamente calcados el uno del otro (depósitos de ladera, transporte fluvial, episodios de avenidas con elevada fuerza, deposición de sistemas dunares, depósitos de playa y desprendimientos rocosos). Son acantilados formados por la sucesión e interferencia de depósitos eólicos (dunas adosadas a las paredes de paleo-acantilados y de acantilados actuales,

dunas ascendentes, así como dunas ascendentes de origen eólico), con depósitos de abanico aluvial (formación de canales, barras, etc...), depósitos coluviales y paleo-suelos (Gómez-Pujol, 1999; Rodríguez-Perea, 1998; Fornós et al., 2005). Esta configuración del marco físico litoral tiene diferentes tipos de respuestas respecto a la acción del oleaje que incide en mayor proporción sobre los materiales menos consolidados de la columna estratigráfica ocasionando continuos descalces de los acantilados y su posterior colapso (**Figura 1**).

En cuanto a las zonas de estudio localizadas en el flanco Sur de la isla de Mallorca (Cala Pudent - es Carnatge y Ses Penyes Rotges), también se caracterizan por presentar columnas estratigráficas en las que los materiales del Cuaternario adquieren el mayor protagonismo. En la zona de Cala Pudent

## **Método**

El método utilizado se ha basado en la georeferenciación de fotografías aéreas de los años 1956 y 1983 respecto de la fotografía aérea digital del Govern de les Illes Balears del año 2002. La georeferenciación se ha realizado de manera cuidadosa con la intención de obtener el menor error posible (RMS -Root Mean Square-) y así poder interpretar los cambios en la posición de la línea de costa de la forma más fiable posible.

La línea de trabajo consta de 8 fases:

- 1.- identificación mediante fotografías oblicuas de la costa de las Illes Balears, las zonas en las que durante la historia reciente (durante los últimos 20 -50 años) se observa que ha habido grandes desplazamientos de material. (Una primera identificación de estas zonas puede observarse en el anexo de este informe).
- 2.- Identificación de zonas en las que sin observarse movimientos manifiestos de masas en el litoral, por sus características litológicas y/o por las características de la columna estratigráfica (zonas en las que se observan materiales duros y blandos, presencia de voladizos o procesos patentes de erosión diferencial) constituyen zonas con un riesgo potencial evidente de que se produzcan numerosos colapsos. Por tanto se presupone que durante la historia reciente ya habrán ocurrido, de modo que el análisis de foto aérea de diferentes fechas nos podrá dar la pauta.
- 3.- Selección de las zonas iniciales objeto de estudio. En este caso se han seleccionado las zonas piloto de las que se ofrecerán resultados en las próximas líneas.

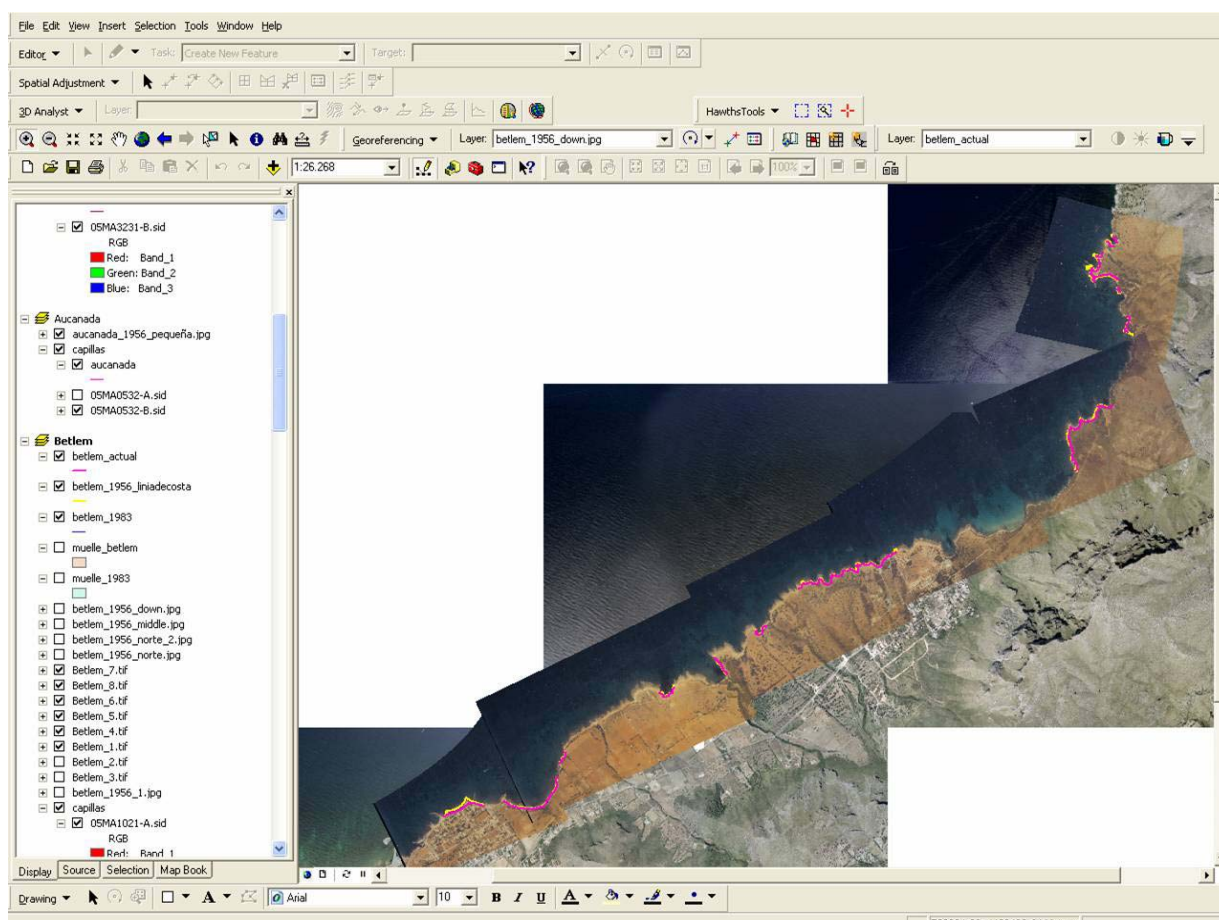
4.- Selección y escaneo de las fotografías aéreas en formato analógico (papel) para su posterior georeferenciación con el programa ArcGis de Esri. El escaneo de las fotografías aéreas en formato de papel se ha realizado con una alta resolución, puesto que la elevada escala cartográfica de las mismas (entre 1/12.000 y 1/33.000 aproximadamente) obliga a escanear las fotografías por encima de los 600 y 800 ppp.

5.- Selección, en las fotografías aéreas en formato papel, de las subzonas a escanear. Las experiencias previas en el escaneo de fotografía aérea han demostrado que el escaneo de las fotografías analógicas enteras supone un tamaño de memoria excesivo, además la georeferenciación simple, consistente en la identificación de puntos en ambas imágenes (en la analógica -antigua- y en la digital -reciente-), implica elevadas distorsiones de la fotografía a georeferenciar y en consecuencia, elevados valores de error (RMS). Por estos motivos, en las zonas de estudio con grandes longitudes de costa se han escaneado pequeñas porciones de las fotografías aéreas analógicas (Figura 4).

6.- Georeferenciación de las fotografías antiguas (de 1956 y 1983) respecto a la fotografía aérea digital del año 2002. Uno de los mayores problemas ha sido la falta de enclaves o puntos de georeferenciación fiables (que no se hayan modificado con el paso de los años). Unos de los casos más relevantes es el de la zona de ses Penyes Rotges (Calvià) en el que la fotografía aérea del año 1956 no presenta ningún camino, vial o construcción para poder compararlo con la fotografía digital del año 2002. En estos casos se ha optado por la localización de puntos de georeferenciación sobre enclaves del propio medio natural como por ejemplo el extremo de un cabo que se sepa que está constituido por materiales resistentes a la erosión y que en la fotografía del año 2002 permanece igual. No se ha procedido en ningún momento a tomar como referencia ningún elemento vegetal puesto que éstos presentan una gran variación espacial (para el propósito requerido) a lo largo de los años, de modo que en estos casos siempre se ha optado por la elección de elementos del medio físico.

7.- Una vez georeferenciadas las fotografías aéreas “antiguas” se ha procedido a la digitalización, mediante trabajos de capas temáticas de poli-líneas, de las rupturas de pendiente o puntos de inflexión de los acantilados / escarpes objeto de estudio. Este paso se ha efectuado una vez comprobado que la digitalización de la foto aérea “antigua” es aceptable, con un bajo error y sin distorsiones que nos pudieran modificar el resultado o los propósitos perseguidos en este trabajo.

8.- Una vez digitalizadas las posiciones de los escarpes, rupturas de pendiente o frentes de acantilados tanto para la fotografía de los años 1956, 1983 y 2002, se procede a la medición de la distancia existente entre la posición actual (2002) y la posición de los acantilados durante 1956 y/o 1983. Debe tenerse en cuenta que a los valores lineales de retroceso (en este trabajo expresados en metros) deben restarse los valores del error alcanzado durante el proceso de la georeferenciación (RMS).



**Figura 4:** Captura de pantalla del programa ArcMap (ArcGis de Esri) en la que se puede observar el proyecto creado para la caracterización del retroceso de la línea de costa mediante la georeferenciación “simple” de fotografías de diferente fecha. En la imagen puede observarse la zona de Betlem - Colònia de Sant Pere i el detalle de la sucesión de imágenes de 1983 para calcular el grado de retroceso. Todas estas imágenes provienen de una misma fotografía aérea que se ha fragmentado para obtener menores valores de error durante el proceso de georeferenciación.

Se ha analizado el retroceso de las zonas de es Faralló d’Alcanada, Penya d’es Migdia - Malpas (Alcudia), Betlem - Colònia de Sant Pere (Artà), ses Penyes Rotges (Calvià) y Cala Pudent en es Carnatge (Palma de Mallorca). En las tres primeras zonas se ha analizado la posición de la línea de costa de 1956, 1983 y la actual, que nosotros hemos considerado en 2002

(fotografía aérea digital más reciente). En las otras dos (ses Penyes Rotges y es Carnatge) se ha analizado la posición de la línea de costa de 1956 respecto de la actual (2002).

Respecto a los trabajos de digitalización de las fotografías analógicas (formato papel) se ha procedido de diferente manera según la longitud de la línea de costa a analizar para cada zona de estudio. De modo que en la zona de es Faralló de Alcanada (Alcudia), una zona muy puntual, en la que el análisis del retroceso abarca un segmento de la línea de costa de alrededor de los 200 m, por este motivo ha valido el escaneo de una sola fotografía correspondiente a cada año (1956 y 1983), al ser una zona puntual que abarca un pequeño segmento de la línea de costa, la georeferenciación de una fotografía aérea con un tamaño ajustado a la zona de estudio, no ha supuesto la distorsión de la fotografía en sus extremos, de modo que el error conseguido (RMS) ha sido aceptable. El error conseguido para la fotografía de 1956 ha sido de  $\pm 2,1$  m, este error se considera aceptable, puesto que la fotografía de 1956 tiene una elevada escala geográfica y aunque el proceso de escaneo haya sido de alta resolución, la georeferenciación de detalle ha supuesto una tarea complicada debido a la pixelación de la imagen. La fotografía de 1983, con una escala geográfica menor (1/12.000) y al ser en color la georeferenciación ha sido un proceso algo más sencillo respecto a la de 1956, obteniendo como resultado un error (RMS) menor, en este caso de  $\pm 0,5$  m. La zona de Penya d'es Migdia - Malpas (Alcudia) se ha procedido a la georeferenciación de fotografías de los años 1956 y 1983. Respecto a las fotografías aéreas de 1956, se han digitalizado un total de dos fotografías que han cubierto el total del segmento costero a analizar, el error de georeferenciación ha sido de  $\pm 1,3$  m y  $\pm 1,2$  m, en cuanto a las imágenes verticales georeferenciadas de 1983, también han sido dos, con un error de  $\pm 1,1$  m y  $\pm 0,8$  m. En cuanto a la zona de Betlem - Colònia de Sant Pere (Artà), ha sido la zona con la mayor longitud de línea de costa a analizar (Figura 4), por este motivo se han georeferenciado hasta un total de 4 imágenes aéreas del año 1956 con errores comprendidos entre  $\pm 1,1$  m y  $\pm 1,8$  m. En cuanto a las imágenes verticales georeferenciadas correspondientes a 1983, han sido un total de 6 (Figura 4) las imágenes utilizadas para establecer el retroceso de la línea de costa en este tramo litoral, los errores de éstas están comprendidos entre los  $\pm -0,5$  m y los  $\pm -1,4$  m. La zona de Cala Pudent (Palma de Mallorca) comprende un pequeño segmento litoral en los que se ha observado un cierto retroceso de la línea de costa, este tramo costero tiene una longitud aproximada de un centenar de metros. Los análisis de retroceso solamente han comparado (de momento) la posición de la línea de costa de 1956 respecto de la de 2002, de acuerdo con todo ello, solamente se ha procedido a la georeferenciación de una imagen aérea de la zona y el error obtenido ha sido de  $\pm -1$  m. La zona de estudio de ses Penyes Rotges (Calvià) es la que presenta, junto a la de es Faralló de Alcanada, los valores de retroceso más espectaculares, en esta zona, de nuevo se ha vuelto a comparar la posición de la línea de costa (frente de acantilado o escarpe) del año 1956 con la del 2002, el área objeto de estudio tiene es un segmento de la línea de costa de apenas 200 m, de modo que solamente se ha procedido al

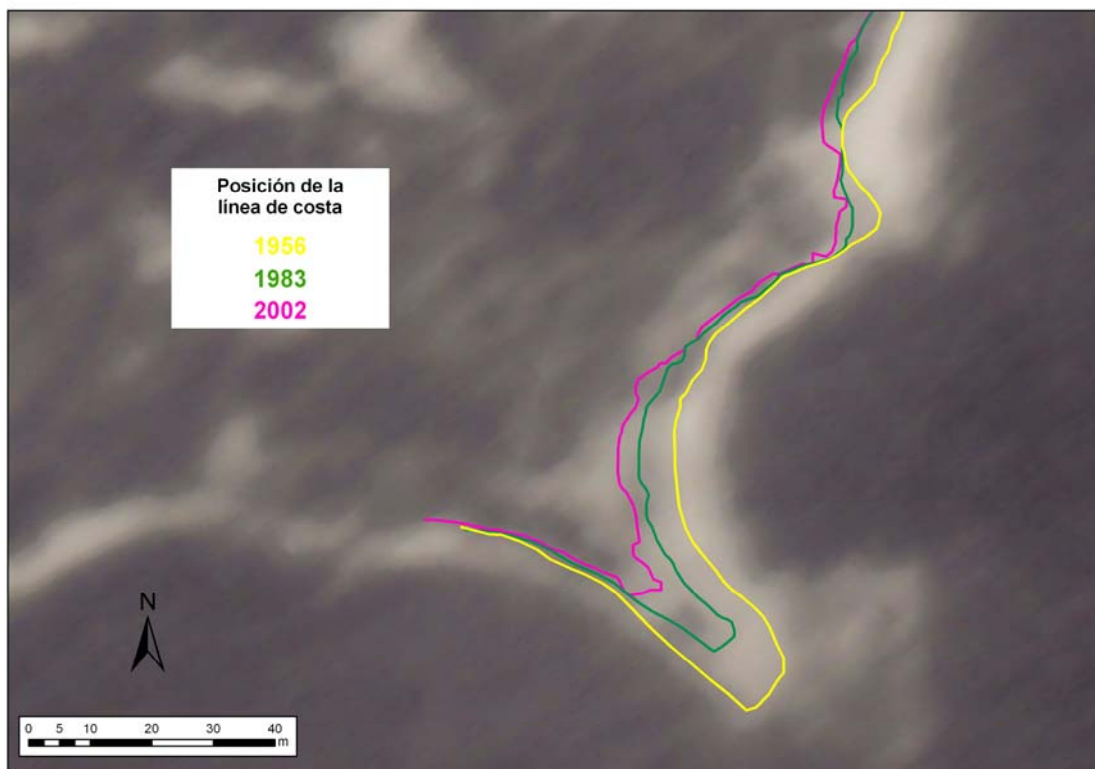
escaneo y posterior georeferenciación de un sola imagen aérea con las dimensiones aproximadas del área de estudio y el error obtenido se ha establecido en  $\pm -2,25$  m.

## **Resultados Obtenidos**

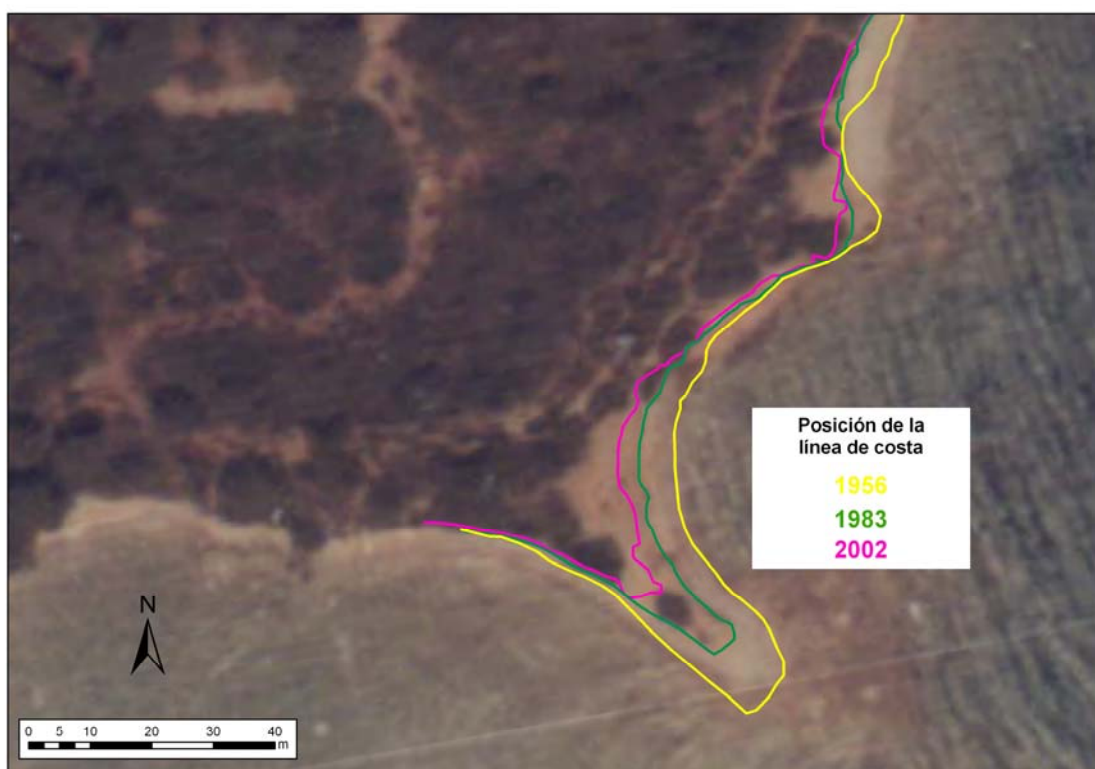
En este apartado se exponen las tasas de retroceso obtenidas relacionándolas con algunas particularidades de las zonas de estudio derivadas de su condición litológica, presencia de sistemas de fracturación, presencia de posibles cavidades y voladizos derivadas de una erosión diferencial y la posible influencia en los colapsos acontecidos de la acción directa del oleaje sobre la línea de costa.

La zona en la que se han observado mayores tasas de retroceso con un mayor cambio en la fisionomía en la articulación de la línea de costa es la localizada en es Faralló d'Alcanada, con retrocesos, para el periodo comprendido entre 1956 y 2002, entre -5,9m y -6,8 m ( $\pm 2,1$  m) en la zona localizada al Norte del área de estudio y retrocesos comprendidos entre -8 m y -23,9 m ( $\pm 2,1$  m) en la zona más meridional, exactamente donde se localiza la pequeña península que en las figuras 5, 6 y 7 se puede observar como ha ido menguando, hasta casi desaparecer, con el transcurso de los años. La disposición del tramo costero, localizado en la parte meridional del área de estudio (Figuras 5, 6 y 7), como una pequeña península provoca que el oleaje recibido con rumbos comprendidos entre el NNE y NE ataque por ambos lados a los materiales del cuaternario formados por depósitos de coluviales y algunos parches de dunas fosilizadas. Hasta el punto de que el nido de ametralladoras localizado sobre dicha península ha acabado descalzándose de los materiales dispuestos en la base debido a los procesos de erosión diferencial, y colapsando (obsérvese la posición del nido de ametralladoras en las figuras 5 y 6 y su posición, completamente aislada, en la figura 7).

El área de estudio de Betlem – Colònia de Sant Pere es la zona en la que se ha analizado la mayor longitud de línea de costa (unos 10 km). La gran extensión de línea de costa ha sido el motivo por el cual se han tenido que digitalizar y georeferenciar varias imágenes verticales correspondientes a los años 1956 y 1983 (Figura 4). Los valores de retroceso para el periodo comprendido entre 1956 y 2002 varían entre -4,5 m ( $\pm 1,1$  m) y -11 m ( $\pm 1,4$  m). En la imagen superior izquierda de las figuras 8, 9 y 10 se puede observar un retroceso notable en la zona cercana al Club Náutico de la Colònia de Sant Jordi, en este caso el retroceso corresponde a la inundación de una plataforma supra-mareal de baja altura, que probablemente ha ido perdiendo altura con el paso de los años a partir de sucesivos procesos de denudación derivado de la unión del efecto de los temporales marinos con la relativa poca cohesión que presentan los materiales en todo este tramo litoral. Prueba de ello es que en la imagen superior izquierda de la figura 9



**Figura 5:** Es Faralló d'Alcanada (Alcúdia). Imagen escaneada y georeferenciada de 1956. Posición de la línea de costa de acuerdo con las fotografías aéreas de 1956, 1983 y 2002.



**Figura 6:** Es Faralló d'Alcanada (Alcúdia). Imagen escaneada y georeferenciada de 1983. Posición de la línea de costa de acuerdo con las fotografías aéreas de 1956, 1983 y 2002.

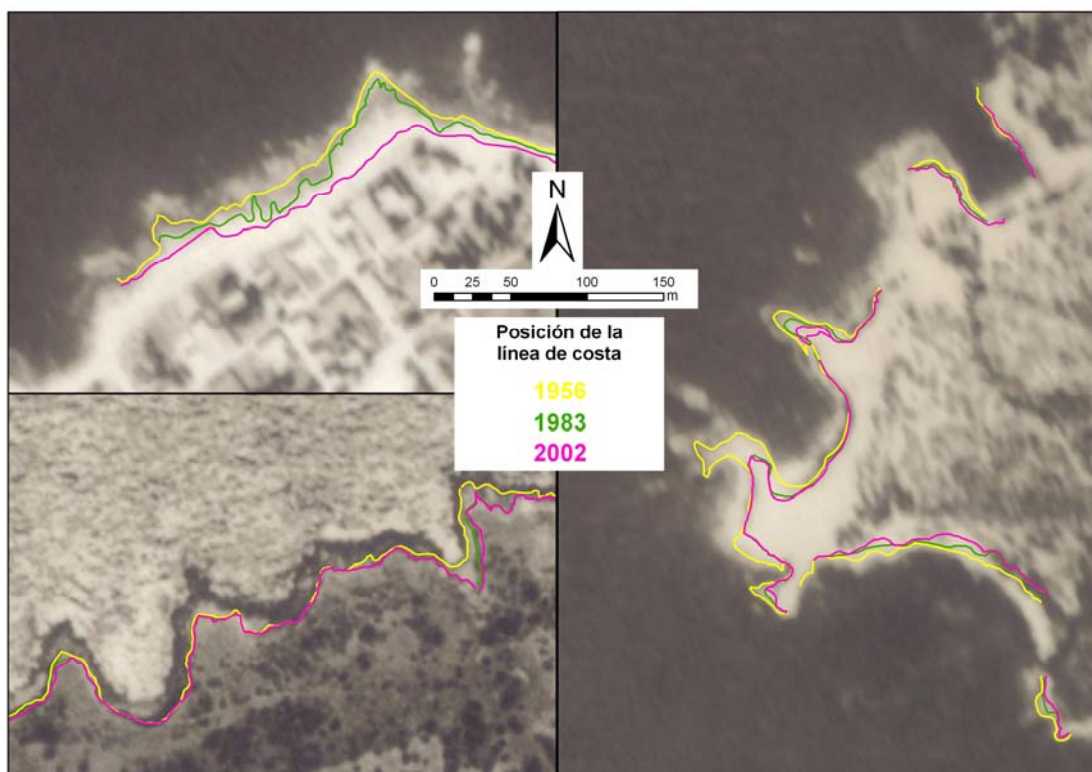




**Figura 7:** Es Faralló d'Alcanada (Alcúdia). Imagen escaneada y georeferenciada de 2002 (considerada como línea de costa actual). Posición de la línea de costa de acuerdo con las fotografías aéreas de 1956, 1983 y 2002.

(correspondiente a las imágenes georeferenciadas del año 1983) sobre esta plataforma puede observarse una construcción (caseta) que ya no aparece en la correspondiente imagen del año 2002 (Figura 10). En la imagen inferior izquierda de las figuras 8, 9 y 10 se corresponde con la zona de ses Pedreres Altes y de la Punta de ses Saupes, en la imágenes correspondientes a los diferentes años en los que se ha llevado a cabo el análisis, la zona visiblemente más afectada ha sido la cala de la Pesquera de ses Dues Dones con un retroceso de  $-10\text{ m} (\pm 1,1\text{ m})$  durante el periodo 1956 - 2002 y de  $-4,8\text{ m} (\pm 1,1\text{ m})$  durante el periodo 1983 - 2002. En la imagen se puede apreciar que en el lugar donde se localizaba la ruptura de pendiente del frente del acantilado (en torno a los 3 m de altura en esta zona) en el año 1956, en la actualidad conforma el límite exterior de la ruptura de pendiente de la actual plataforma litoral sumergida (imagen inferior izquierda, Figuras 8, 9 y 10). Otras zonas en las que el retroceso es manifiesto a simple vista con la observación directa es el área más septentrional correspondiente con es Caló d'es Cans y la Punta d'es Caló (imagen derecha, Figuras 8, 9 y 10). En este sector del litoral de la zona de Artà los retrocesos para el periodo 1956 – 2002 son de entorno a  $-15\text{ m} (\pm 1,4)$ , en el cabo “es Saltador”, de más de  $-20\text{ m} (\pm 1,4)$  en la Punta des Caló i de unos  $-10\text{ m} (\pm 1,4)$  en las inmediaciones del muelle de la zona d'es Caló. En este mismo sector el retroceso durante el periodo 1983 – 2002 ha sido más discreto, siendo de  $-8\text{ m} (\pm 0,7\text{ m})$  en la zona de es Saltador,

prácticamente sin cambios,  $-2,6 \text{ m} (\pm 0,7 \text{ m})$  en la zona de la Punta d'es Caló y de la misma manera que la zona localizada en las inmediaciones del muelle del Caló ( $-4 \text{ m}, \pm 0,7 \text{ m}$ ).

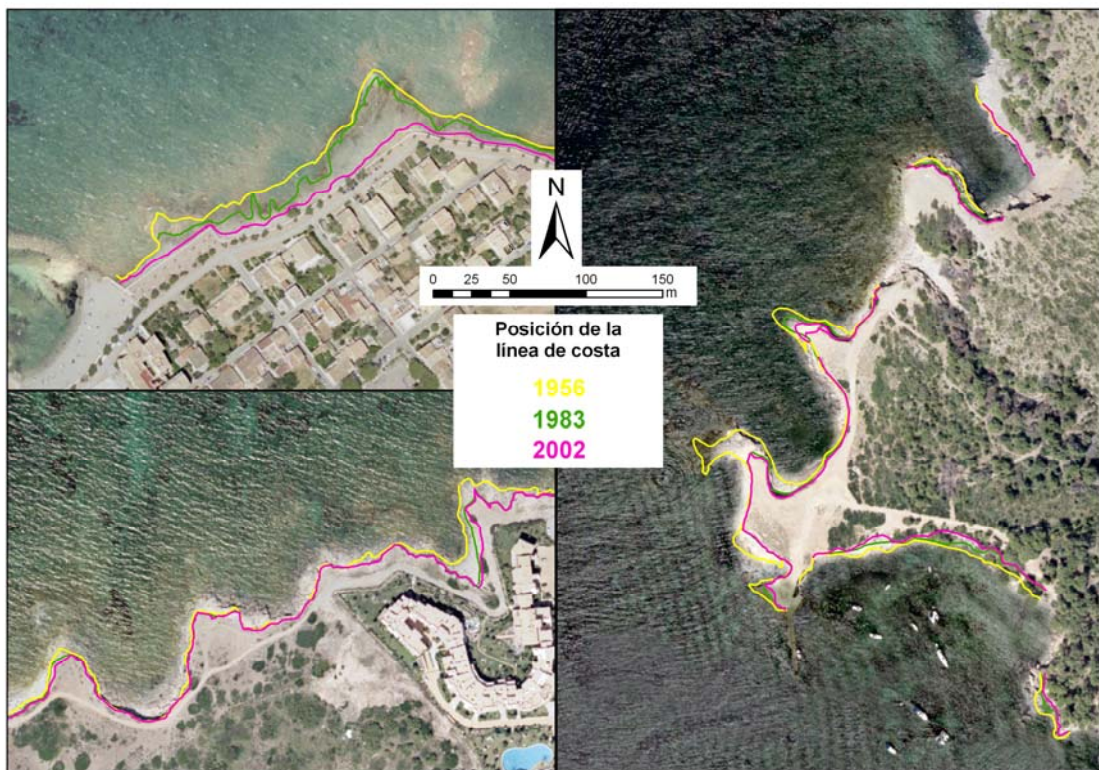


**Figura 8:** Betlem – Colònia de Sant Pere (Artà). Imagen escaneada y georeferenciada de 1956. Posición de la línea de costa de acuerdo con las fotografías aéreas de 1956, 1983 y 2002.

En la zona de estudio de es Penyal d'es Migdia – Bonaire los retrocesos notables se han producido en la costa de las inmediaciones del islote con el nombre “s’Illot” (Figura 1). En los frentes de acantilados o escarpes de esta área analizada han tenido lugar episodios de retroceso, aunque los valores obtenidos han sido más discretos que en la mayor parte de los casos anteriores acabados de describir. Tal y como puede observarse en las figuras 11,12 y 13, los dibujos de las líneas de costa correspondientes a 1956, 1983 y 2002 (esta última considerada como línea de costa actual). Los valores de retroceso calculados para el periodo 1956 – 2002, comprenden entre los  $-2,6 \text{ m} (\pm 1,2 \text{ m})$  y los  $-9,2 \text{ m} (\pm 1,2)$ . Los mayores valores de retroceso se producen en el segmento litoral localizado frente del islote “s’Illot” (Figuras 1, 11, 12 y 13). En cuanto a los valores de retroceso calculados para el periodo 1983 – 2002 las tasas son más discretas. Una característica común de esta zona de estudio es que los mayores valores de retroceso se manifiestan en el período 1956 – 2002 y para el periodo 1983 – 2002 la posición de la línea de costa se mantiene muy parecida a la actual, para este periodo (1983 – 2002) los valores de retroceso oscilan entre  $-3,6 \text{ m} (\pm 0,8 \text{ m})$  y  $-4,4 \text{ m} (\pm 0,8 \text{ m})$ , los mayores valores de retroceso se localizan de nuevo frente a s’Illot (Figuras 1, 11, 12 y 13).



**Figura 9:** Betlem – Colònia de Sant Pere (Artà). Imagen escaneada y georeferenciada de 1983. Posición de la línea de costa de acuerdo con las fotografías aéreas de 1956, 1983 y 2002.



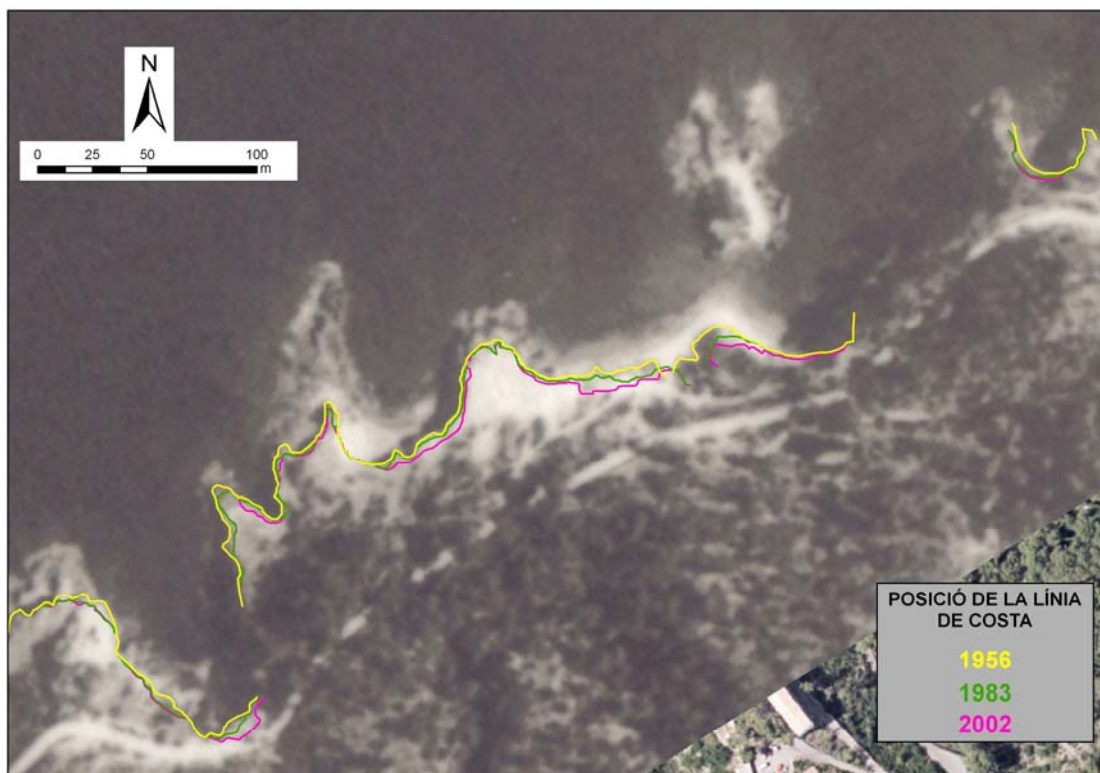
**Figura 10:** Betlem – Colònia de Sant Pere (Artà). Imagen escaneada y georeferenciada de 2002 (considerada como línea de costa actual). Posición de la línea de costa de acuerdo con las fotografías aéreas de 1956, 1983 y 2002.

Las dos zonas de estudio restantes se localizan en la vertiente SW de Mallorca, se trata de las zonas de ses Penyes Rotges y de es Carnatge (Figura 2). En la primera de las zonas es Carnatge (Palma de Mallorca) se trata de una zona muy localizada con un retroceso significativo pero muy puntual (Figuras 2, 14 y 15). Los retrocesos calculados se han realizado a partir de la comparación de la imagen aérea de 1956 respecto con la fotografía aérea digital del año 2002 (considerada como la línea de costa “actual”). Los valores de retroceso observados fluctúan entre los -2,5 m ( $\pm 1$  m) y los -14,7 m ( $\pm 1$  m). Es preciso resaltar la precisión con la cual se ha georeferenciado la imagen de 1956 con un error de  $\pm 1$  m. Concretando un poco más en las características principales de los valores de retroceso, en la zona más al W del área de estudio, se han obtenido valores que oscilan entre los -2,5 m ( $\pm 1$  m) y -6,5 m ( $\pm 1$  m). en la zona central es donde se observan los mayores valores que alcanzan los -13,9 m y los -14,7 m ( $\pm 1$  m) y ya en la zona levante (E de la imagen) los valores de retroceso presentan máximos de entorno a los -7 m ( $\pm 1$  m) (Figuras 14 y 15).

En la zona de ses Penyes Rotges se observa un retroceso espectacular en el pequeño entrante más al Sur (Figuras 2, 16 y 17). Se trata de una zona, como puede observarse en la figura 16, que el proceso de urbanización no alcanzó su máxima expresión hasta bien entrados los años 70 del siglo XX, precisamente la falta de edificaciones ha sido uno de los principales inconvenientes para el proceso de georeferenciación de la imagen de 1956, se trata de uno de los pocos casos antitéticos en los que la presencia de un paisaje costero sin modificar resulta un problema. Los retrocesos más manifiestos se producen en el interior de los dos pequeños entrantes costeros que se pueden observar en las figuras 16 y 17. En el entrante costero más septentrional los valores son más discretos que el más meridional, los valores de retroceso más significativos de este entrante (de Norte a Sur) son de -15,4 m ( $\pm 2,25$  m), -13,7 m ( $\pm 2,25$  m) y -6,2 m ( $\pm 2,25$ ) (Figuras 16 y 17). En el entrante más meridional los valores de retroceso más significativos (de Norte a Sur) del orden de -8,5 m, -25,7 m, 21,3 m y -4,7 m (todos ellos con un error -RMS- de  $\pm 2,25$  m).

En cuanto a los aspectos litológicos de las zonas objeto de estudio cabe mencionar que todas las zonas están compuestas por materiales del Cuaternario, preferentemente niveles de coluviales y depósitos de dunas fósiles que poseen una menor cohesión buena parte de los materiales rocosos que conforman alrededor del 80% de las costas rocosas de Mallorca (Balaguer, 2005). Esta característica implica que estas costas tienen una cierta “predisposición” a presentar valores de retroceso más elevados que la mayor parte de las costas rocosas que conforman la mayor parte del litoral de Mallorca. Las costas altas o acantiladas en las que se disponen materiales cuaternarios suelen presentar alternancias de niveles con diferente grado de cohesión, favoreciendo de este modo los procesos de erosión diferencial con la formación de voladizos y cuevas marinas debido a la acción intermitente del oleaje sobre la base del acantilado.

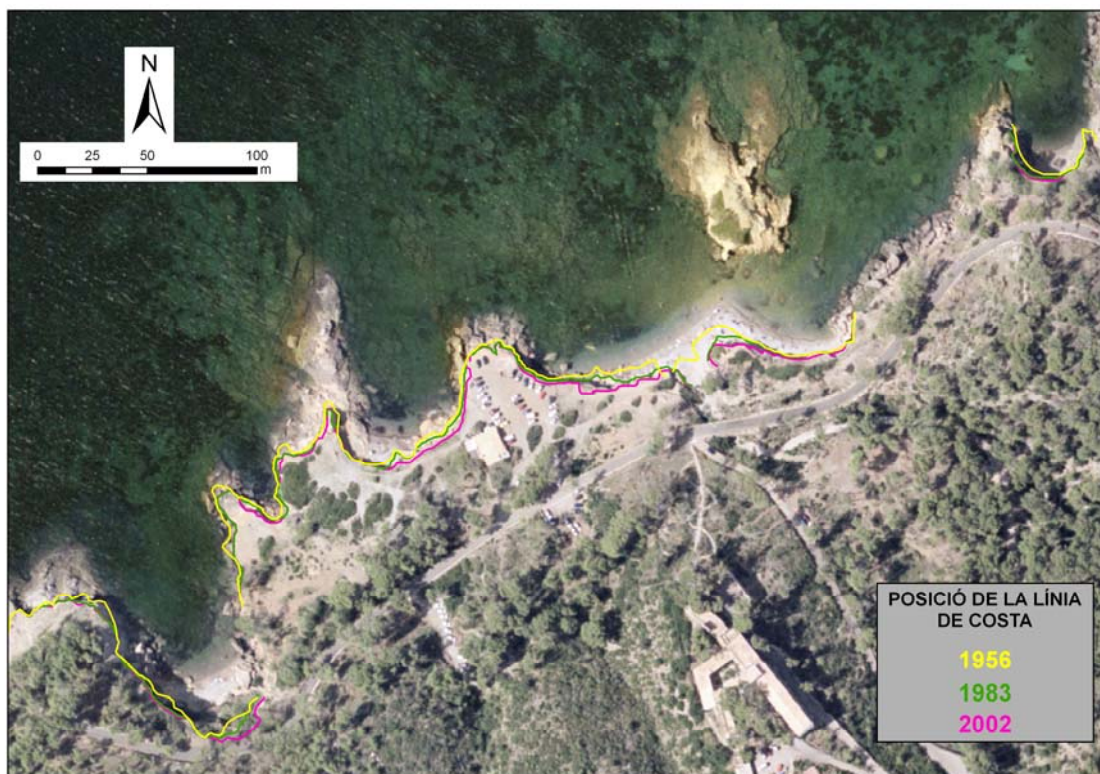
Este hecho se puede observar perfectamente en la zona de estudio de ses Penyes Rotges donde se observa una columna estratigráfica compuesta por materiales correspondientes al Complejo Terminal (calcáreas y calcarenitas del Mioceno Superior) (Barón, 1977; Barón & Pomar, 1978), y sobre estos se disponen unos niveles de dunas fósiles y paleosuelos cuaternarios favoreciendo la formación de voladizos con una elevada continuidad horizontal. En las figuras 16 y 17 se puede observar un elevado retroceso de la zona de ses Penyes Rotges (Calvià), en estas figuras verticales se puede observar la presencia de un voladizo de grandes dimensiones (casi bien se corresponde con toda la zona colapsada y que ha provocado el elevado retroceso), en algunos casos debido a motivos de inclinación de la cámara, en algunas fotografías verticales puede parecer que existen voladizos cuando en realidad son sombras, en este caso no parece así, puesto que si observamos la figura 18, que es un detalle del entrante sur de la zona de ses Penyes Rotges, la disposición del relieve, la elevada presencia de voladizos a lo largo de todo el cantil y la presencia de la cueva marina en la base del acantilado, nos indican que los procesos de erosión diferencial y sobre-excavación son constantes y comunes.



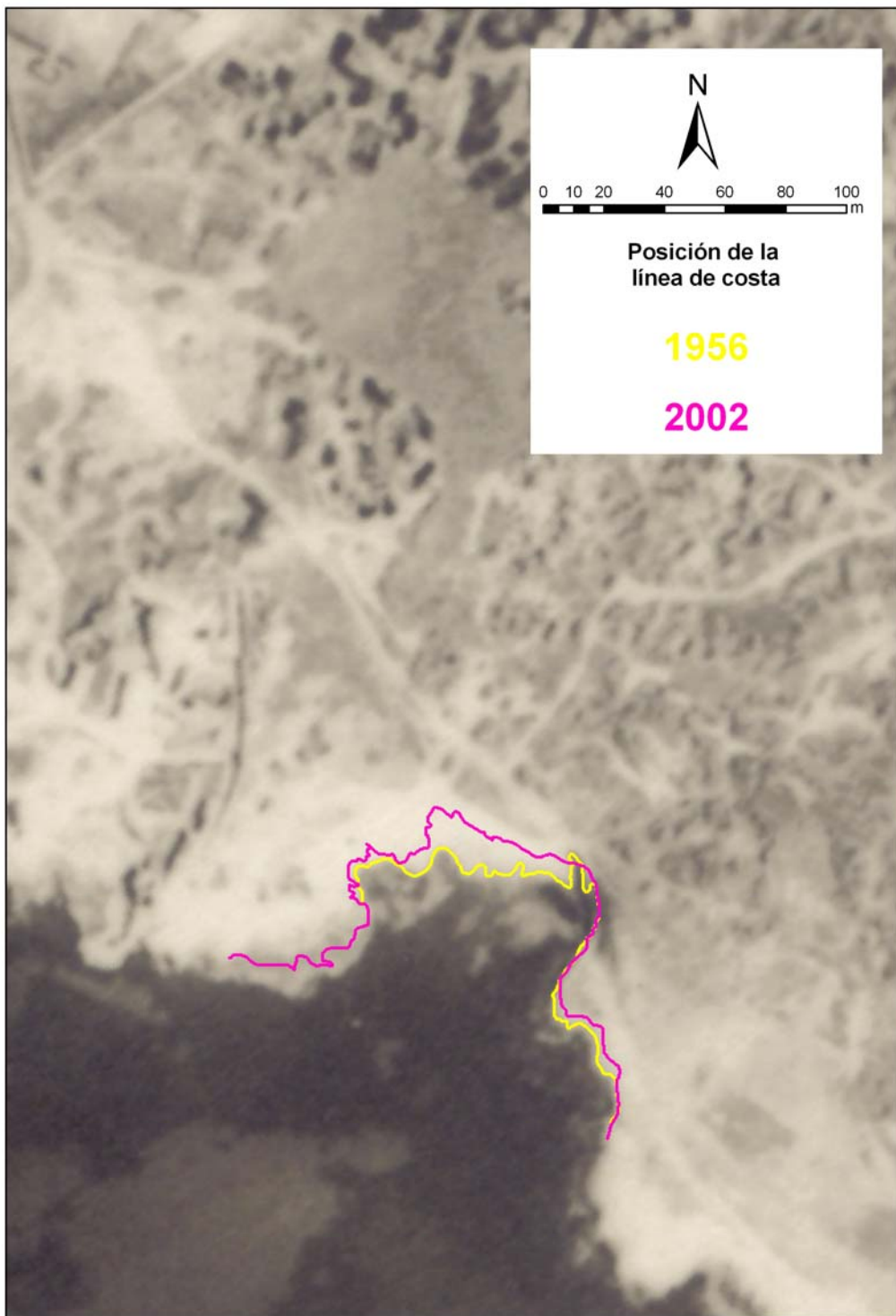
**Figura 11:** Penyà d'es Migdia - Bonaire (Alcúdia). Imagen escaneada y georeferenciada de 1956. Posición de la línea de costa de acuerdo con las fotografías aéreas de 1956, 1983 y 2002.



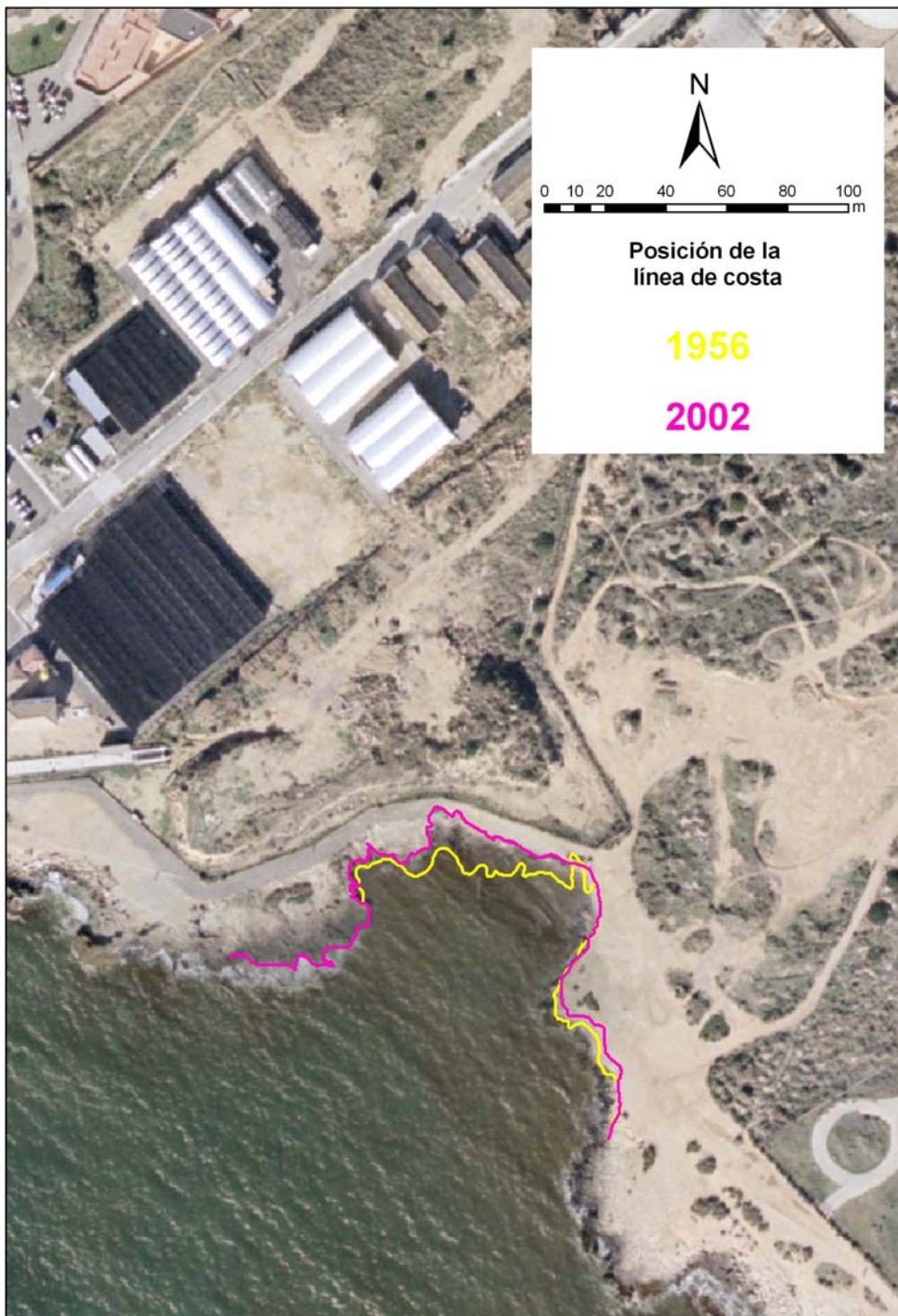
**Figura 12:** Peña d'es Migdia - Bonaire (Alcúdia). Imagen escaneada y georeferenciada de 1983. Posición de la línea de costa de acuerdo con las fotografías aéreas de 1956, 1983 y 2002.



**Figura 13:** Peña d'es Migdia - Bonaire (Alcúdia). Imagen escaneada y georeferenciada de 2002 (considerada como posición de la línea de costa actual). Posición de la línea de costa de acuerdo con las fotografías aéreas de 1956, 1983 y 2002.

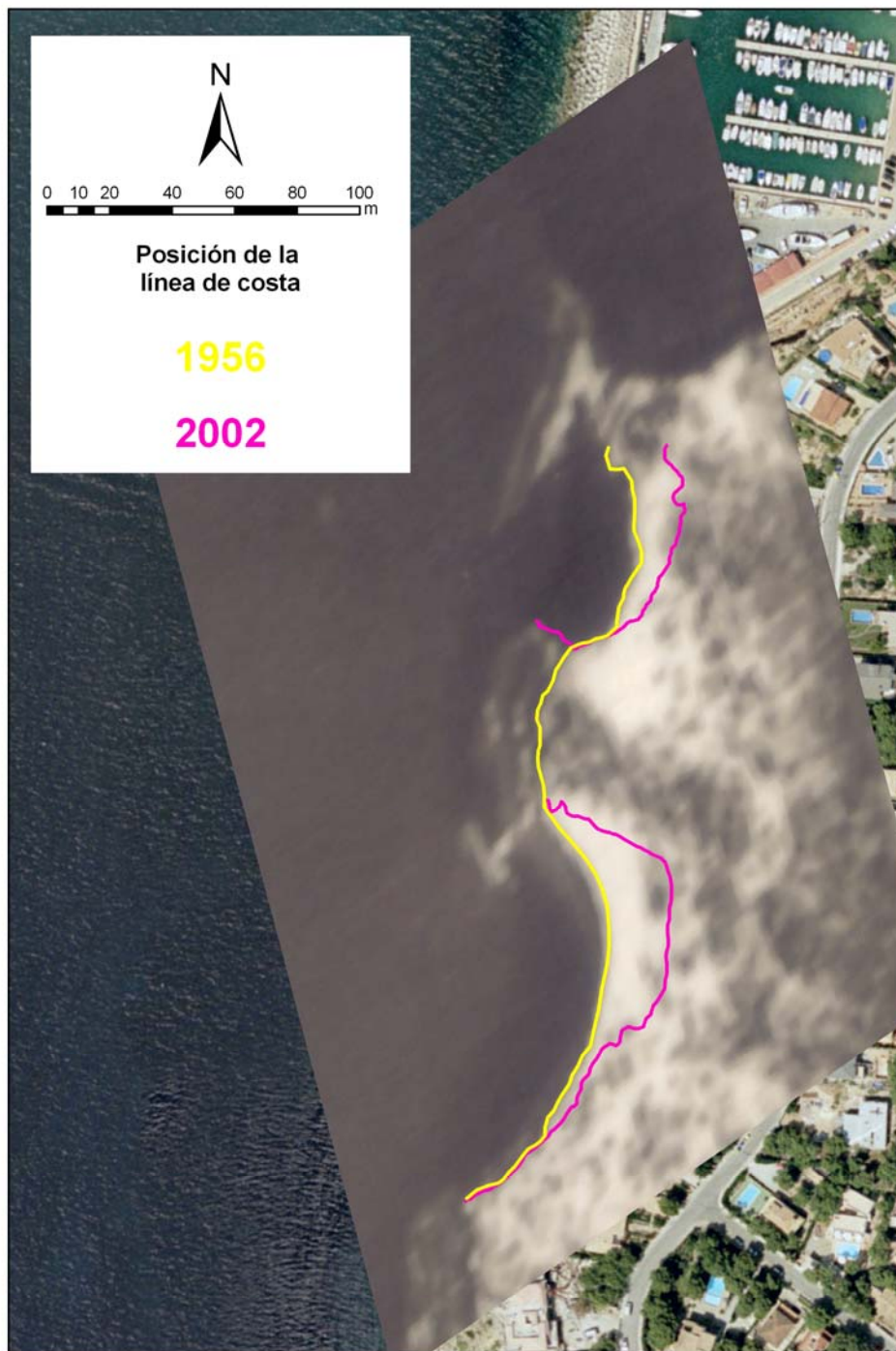


**Figura 14:** Cala Pudent -es Carnatge- (Palma de Mallorca). Imagen escaneada y georeferenciada de 1956. Posición de la línea de costa de acuerdo con las fotografías aéreas de 1956 y 2002.



**Figura 15:** Cala Pudent -es Carnatge- (Palma de Mallorca). Imagen escaneada y georeferenciada de 2002 (considerada como posición de la línea de costa actual). Posición de la línea de costa de acuerdo con las fotografías aéreas de 1956 y 2002.





**Figura 16:** Ses Penyes Rotges (Calvià). Imagen escaneada y georeferenciada de 1956. Posición de la línea de costa de acuerdo con las fotografías aéreas de 1956 y 2002.



**Figura 17:** Ses Penyes Rotges (Calvià). Imagen escaneada y georeferenciada de 2002 (considerada como posición de la línea de costa actual). Posición de la línea de costa de acuerdo con las fotografías aéreas de 1956 y 2002.



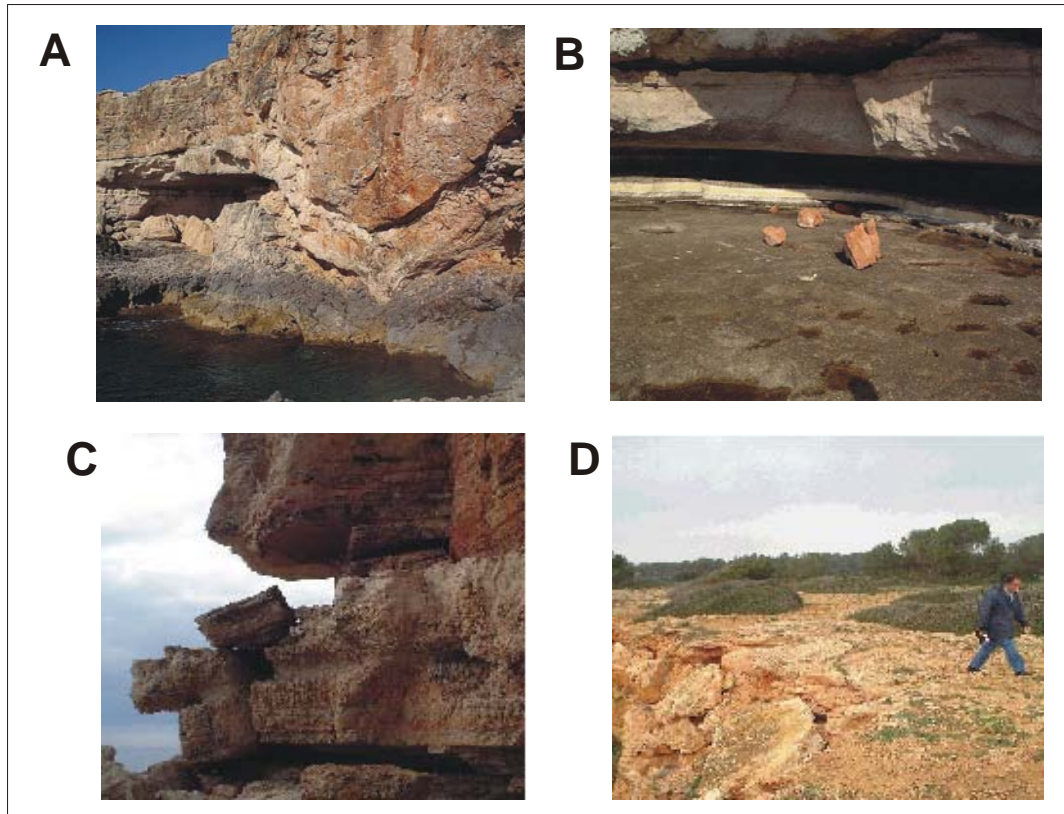
**Figura 18:** Detalle de la secuencia estratigráfica de los materiales que conforman la zona de estudio de ses Penyes Rotges (Calvià).

La presencia de un voladizo en los entrantes costeros de la zona de ses Penyes Rotges, cuyo colapso explicaría el enorme retroceso producido en contraposición a posibles distorsiones de la imagen del año 1956, parece evidente puesto que en la figura 17 se observan una serie de grandes bloques, por debajo del nivel del mar, localizados al pie del actual acantilado.

Los factores que pueden haber causado los diferentes episodios de erosión de la línea de costa han sido caracterizados en trabajos anteriores a partir de estudios de detalle de una serie de zonas afectadas por procesos de colapso actuales y semi-actuales (entre 5 y 10 años) en las costas del Llevant i Migjorn de Mallorca (Balaguer, 2005). Los principales factores que pueden dar lugar a la activación y desencadenamiento de procesos de colapso se consideran que son la presencia de voladizos, la acción de las precipitaciones, el papel de los sistemas de fracturas y diaclasas de las zonas afectadas y la acción del oleaje.

En cuanto a la influencia ejercida por los sistemas de fracturas y diaclasas se observó (Balaguer, 2005) que suelen presentarse con una direccionalidad paralela o bien ortogonal respecto a la línea de costa en la cual se han producido desprendimientos semi-recientes (entre 2001 y 2003).

A lo largo de este trabajo hemos ido haciendo referencia a la presencia de voladizos derivados del efecto producido por la erosión diferencial de los materiales que conforman el acantilado. La presencia de voladizos en la base de los acantilados es un factor de consideración

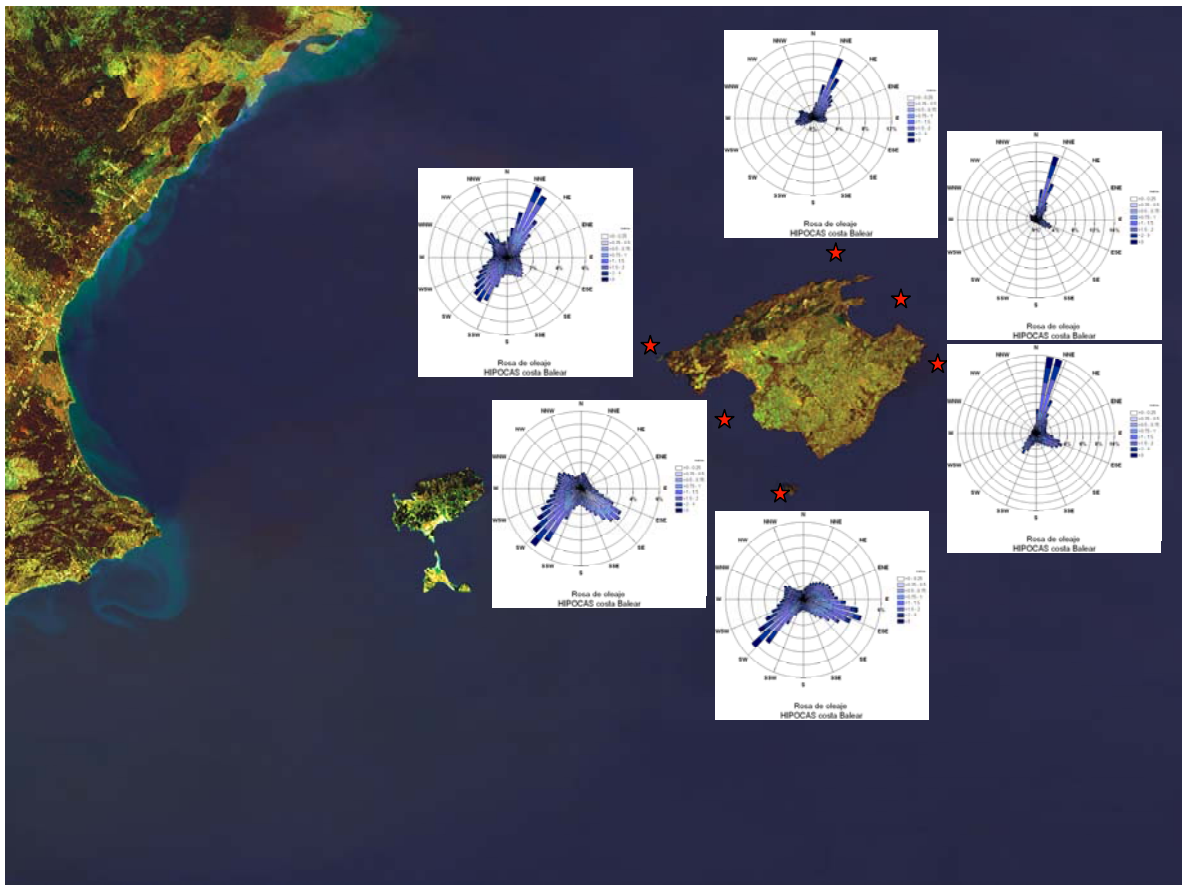


**Figura 19:** Inestabilización de acantilados a partir de la presencia de voladizos. **A):** Caverna formada en el flanco/lateral de un paleocolapso. **B) y C):** Voladizo formado a partir de la erosión diferencial de los niveles de lutitas de la Unidad de Manglar en zonas del litoral del Migjorn y Llevant de Mallorca. **D):** Colapso de niveles de encrostramientos calcáreos a partir del socavamiento de los niveles de paleosuelos subyacentes en la zona de s'Alavern (Llucmajor, litoral del Migjorn de Mallorca).

para poder evaluar la potencialidad de movimientos de masas y caída de rocas. Estos voladizos pueden ser morfologías heredadas de procesos y dinámicas erosivas que actuaron en tiempos geológicos pasados, tales como los paleocolapsos de cavidades (Fornós, 1999) formadas en el interior de las calizas arrecifales que a su vez afectaron a la estructura del Complejo Terminal (Barón & Pomar, 1978; Pomar *et al.*, 1983). Los voladizos suelen formarse en los flancos que rodean a la estructura colapsada formada por brechas muy cementadas más resistentes a la erosión y al desmantelamiento (Ginés, 2000).

La erosión diferencial juega un papel importante en la formación de voladizos, un ejemplo presente en ambas zonas de estudio, es el socavamiento de los niveles lutíticos intercalados entre las margas calizas correspondientes a la Unidad de Manglar (integrada dentro del Complejo Terminal), que se encuentra presente en buena parte de los acantilados marinos de las vertientes costeras del Llevant y Migjorn de Mallorca (Figura 19). Otro ejemplo es el que se puede observar en otros enclaves como en la zona de ses Penyes Rotges (Figuras 18 y 19), donde la desaparición de los niveles de

paleosuelos poco cohesionados da lugar al descalce de los niveles de materiales más cohesionados situados en la parte superior del acantilado.



**Figura 20:** Caracterización del Clima Marítimo de las Baleares. En este caso se reflejan los puntos costeros correspondientes a la isla de Mallorca. Figura realizada por Tomeu Canyelles (IMEDEA, CSIC-UIB).

El régimen de oleaje puede ser, y de hecho es, un factor primordial en la activación del desencadenamiento de movimientos de masas. En la figura 20 se observa un mapa de Mallorca con los puntos costeros de la malla HIPOCAS y las rosas de frecuencia y magnitud de oleaje medio de un periodo de 45 años. Se puede observar que las vertientes costeras más castigadas por los oleajes del N-NE y SW son la vertiente litoral del NE (Bahías de Alcudia y Pollença, zona de Albarca y Cap d'es Freu), la vertiente correspondiente a la Serra de Tramuntana (NW) y la vertiente litoral del SW (Bahía de Palma, Andratx, Bahía de Migjorn y Cabo Salinas). La vertiente de Levante (E) es la que recibe una menor influencia de fuertes oleajes. De este modo queda patente (Figura 20) la importante influencia que el oleaje potencialmente puede ejercer sobre la articulación de la línea de costa, y dicha influencia será mayor cuanto menor grado de cohesión y heterogeneidad en la columna estratigráfica presenten los materiales que

componen las costas rocosas. En los casos estudiados, esta influencia se considera amplificada puesto que las características litológicas y la exposición-disposición de la línea de costa ofrecen unas condiciones propicias al desmantelamiento activo y “constante” del relieve litoral. Estudios de detalle del clima marítimo enmarcados dentro de periodos de tiempo concretos (podrían coincidir con los intervalos de tiempo comprendidos entre las diferentes colecciones de fotografía aérea) podrían desvelar de una manera más explícita el grado de implicación, así como de magnitud, de los procesos de retroceso de la línea de costa rocosa.

## **Recomendaciones UGIZC**

### **Para conseguir los propósitos que persiguen los principios de la Gestión Integrada de la Zona Costera.**

El trabajo realizado y presentado en este informe específico sobre caracterización y diagnóstico del medio físico y estimación del retroceso de la línea de costa de las Illes Balears se ha basado en la utilización de fotografías aéreas de diferente fecha mediante la georeferenciación “simple”. La experiencia de este trabajo se basa en el retroceso de la costa rocosa en una serie de zonas en las que los procesos de erosión son patentes y activos, este mismo método de comparación de fotografías aéreas con la misma fecha ya ha sido utilizado en el entorno de las Illes Balears aunque únicamente para establecer variaciones en la posición de la línea de costa de litorales de playa. La georeferenciación simple utilizada en este trabajo está dando algunos resultados aunque no es una metodología 100% adecuada para extraer tasas de retroceso absolutamente fiables. Las zonas de estudio utilizadas son áreas litorales en las que se observa un retroceso activo mediante las fotografías aéreas oblicuas del año 2001 de la Demarcación de Costas de las Illes Balears. En el anexo de este informe pueden observarse una serie de zonas de estudio potenciales en las que podrían aplicarse técnicas de cálculo de retroceso mediante la georeferenciación simple de fotografías aéreas de diferentes épocas. De este modo como **primera recomendación de futuro** es la de proponer el estudio de la velocidad de retroceso de la costa rocosa de las zonas que se señalan en el anexo, así como contemplar la inclusión de nuevas zonas en el estudio.

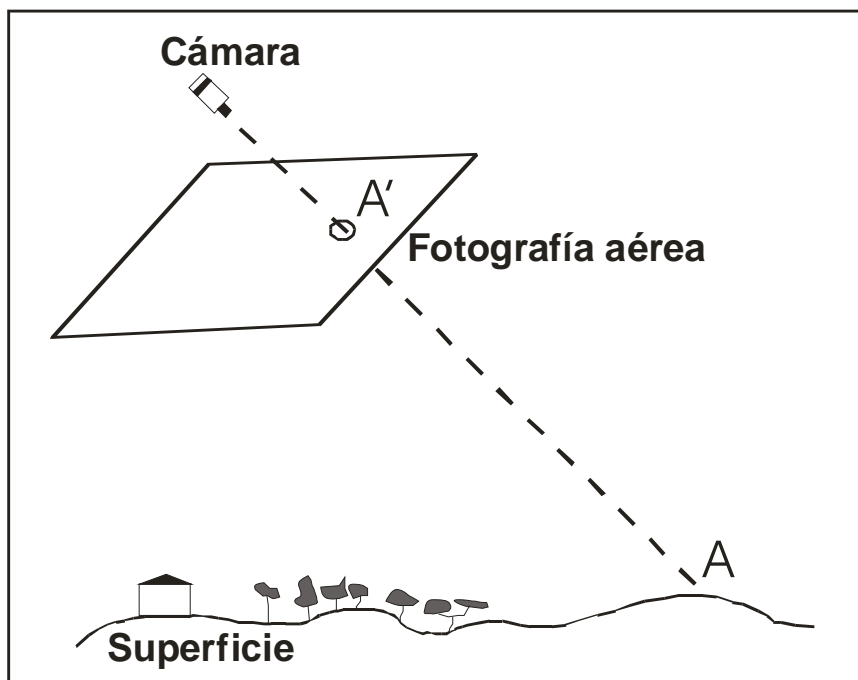
Siguiendo con las recomendaciones de futuro, dado que la georeferenciación simple utilizada no es una garantía de ofrecer retrocesos 100% debido a posibles inclinaciones de las paredes de los acantilados dependiendo de la fotografía aérea utilizada, es una obligación hacer referencia, así como explicar básicamente la metodología basada en los principios de la

fotogrametría. De este modo se propone como **segunda recomendación de futuro** la aplicación de fotogrametría en el estudio del retroceso de las costas rocosas.

#### **- Metodología recomendada**

Este apartado no pretende mostrar de la manera más detallada posible, la metodología ideal a seguir para poder obtener los valores de retroceso de los acantilados mediante el uso de fotografías aéreas. La metodología que a continuación se presenta, pretende ser una recomendación de futuro adicional, intentado especificar al máximo y en la medida de lo posible, los pasos a seguir, para ello nos hemos apoyado en el trabajo de Moore y Griggs (2002) sobre el estudio del retroceso de los acantilados marinos en el Sur de San Francisco (EEUU). Para generar u obtener tasas de retroceso de la línea de costa de una manera eficaz y con el menor error posible en cuanto al proceso de superposición de imágenes, deben combinarse los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con la Fotogrametría digital. La Fotogrametría digital automatiza las funciones desempeñadas por los tradicionales estereoscopios. El primer paso consistiría en obtener las imágenes en formato digital con la mayor resolución posible, para ello es necesario escanear todas las fotografías aéreas en formato papel con un scanner de alta resolución (por lo menos 600 dpi) y los tamaños de píxel es conveniente que sean de entorno a 1 m o inferior. El siguiente paso consiste en la ortorrectificación mediante la utilización de un software especializado (ERDAS Imagine Production®). La ortorrectificación, que consiste en la eliminación de distorsiones de las fotografías aéreas, comienza con el proceso de triangulación y consiste en dos pasos: orientación interior y orientación exterior (Slama, 1980). La orientación interior establece la geometría en el interior de la cámara y requiere que las marcas fiduciales (marcas localizadas en los vértices o esquinas de cada fotografía) estén digitalizadas y sean introducidos en la cámara. Las orientaciones exteriores establecen la relación entre la imagen con el sistema de coordenadas que se resolverá mediante los parámetros de orientación exterior: Latitud, Longitud, y elevación de la cámara. La orientación exterior requiere la introducción de coordenadas geográficas, en cada fotografía, para los puntos de control de la superficie y para los puntos de control digitalizados y para los puntos de solapamiento o de corte (-tie points- puntos comunes entre las imágenes solapadas en los que su posición absoluta a priori es desconocida). El software especializado utiliza los puntos de control de la superficie y la zona solapada de ambas fotografías aéreas para determinar la posición tanto absoluta como relativa de los puntos de solapamiento o de corte respecto del espacio geográfico. De este modo ya puede aplicarse el principio básico de la fotogrametría, el cual postula que en una fotografía no distorsionada, un punto de control sobre la superficie, su correspondiente punto en la fotografía y la cámara, deben estar unidos por una línea recta (Figura 21).

Esta relación entre las coordenadas de control sobre la superficie, los puntos correspondientes en la imagen y los parámetros de orientación exterior son utilizados para conseguir el proceso de triangulación. Una vez conseguido el proceso de triangulación y considerado adecuado, sin errores, se habrán transformado las imágenes y se habrán suprimido las distorsiones y desplazamientos. De este modo se habrán generado los pares estereodigitales para cada zona de solapamiento de cada una de las fotografías aéreas utilizadas. La totalidad del área de estudio tiene que estar necesariamente solapada (es decir, dos imágenes ortorectificadas). A partir de aquí, de cada par estereográfico, se podrá generar una representación tridimensional de la superficie (Modelo Digital de Elevaciones o del Terreno -MDT-).



**Figura 21:** Figura extraída y modificada de Moore & Griggs (2002) en la que se representa gráficamente el *Principio de Colinearidad*. Se trata de aquella condición por la cual una fotografía aérea no distorsionada, un punto sobre la superficie terrestre (A), su representación sobre la fotografía aérea (A') y la cámara, deben permanecer unidos por una línea recta.

El establecimiento de tasas de retroceso tanto de las costas rocosas como costas formadas por materiales no consolidados no debe ser un trabajo aislado en el que los resultados queden sin relacionar con otros factores o procesos y así negar su posible aplicación. Para evitar este hecho y aportar al trabajo realizado otra visión que trascienda más allá del propio interés puramente científico, es preciso contrastarlo con inventarios o trabajos de clasificación de la línea de costa. De este modo conociendo el



retroceso puntual de numerosas zonas de estudio con diferentes tipos de materiales podrán extraerse, a modo de generalizaciones o aproximaciones, tasas de retroceso estimadas para cada tipo de material. Estos datos, además de tener interés científico (esclarecimiento de algunos procesos activos que intervienen en la desmantelación del relieve costero, así como publicaciones en revistas científicas, jornadas, congresos y seminarios,...) también puede tener un gran interés para su aplicación en aspectos de gestión integrada de la línea de costa. Por ejemplo, el establecimiento de una tasa de retroceso fiable sobre un área costera en la que la desmantelación o procesos de retroceso son muy activos, puede ayudar a establecer, de forma coherente, la posición del deslinde marítimo-terrestre. Por tanto, como **tercera recomendación de futuro** se propone la combinación o relación de los estudios de retroceso de la línea de costa con trabajos sobre inventario o clasificación de tipos de costa (según su litología) para fines de gestión.

Del mismo modo que hemos propuesto relacionar los trabajos de establecimiento de tasas de retroceso de la línea de costa a partir del análisis de fotografías aéreas de diferentes fechas, se propone la relación de estos trabajos con estudios de clima marítimo con el fin de poder establecer la influencia de los procesos marinos en el desmantelamiento activo del litoral. El análisis del retroceso propuesto, se basa en la comparación de fotografías de diversas fechas (1956, 1973, 1979, 1983, 1990, ..., y 2002) con lo que podemos establecer tasas de retroceso entre los diversos periodos, es decir, entre 1956 y 1973 y entre 1979 y 1983, entre otras posibles combinaciones. El establecimiento de tasas de retroceso para diferentes periodos seguramente dará valores diferentes, teniendo tasas de retroceso aceleradas durante algunos periodos y tasas ralentizadas durante otros periodos. Si observamos las figuras correspondientes a las zonas de estudio de es Faralló d'Alcanada (Alcudia), Betlem – Colònia de Sant Pere y de Penya d'es Migdia – Bonaire (Figuras 5 a 13), en las que se observa el retroceso mediante la utilización de tres fotografías, se puede observar que la velocidad del retroceso no es lineal y constante, las condiciones adecuadas para que se den procesos de erosión y provoquen un elevado retroceso del litoral son aleatorias (dependiendo de la acción marina -oleaje- y de la precipitación atmosférica, así como de las particularidades que pueda tener la articulación de la línea de costa), por este motivo se propone la combinación de los estudios de retroceso de la línea de costa en diferentes intervalos de tiempo con los valores de altura significativa y dirección del proyecto HIPOCAS (Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe)

el cual, para el Mediterráneo Occidental, cuenta con 45 de datos horarios (1958-2001) de alta resolución espacial. La modificación en la velocidad del retroceso entre diferentes periodos de tiempo puede justificarse en el número de temporales ocurridos gracias a los datos aportados por estudios del clima marítimo del proyecto HIPOCAS. De modo que como **cuarta recomendación de futuro** se propone la relación de los estudios de retroceso de la línea de costa con datos sobre clima marítimo.

### **Recomendaciones de futuro**

- 1.- Estudio del retroceso de las zonas propuestas en el documento anexo a este informe, así como proponer nuevas zonas de estudio que puedan surgir a raíz del reconocimiento exhaustivo de la línea de costa de las Illes Balears.**
  
- 2.- Aplicación de métodos de fotogrametría en el estudio del retroceso de la línea de costa.**
  
- 3.- Combinación de los estudios de erosión y retroceso de la línea de costa conjuntamente con inventarios y clasificaciones de las costas (según los materiales que las componen) de cada una de las islas de las Illes Balears con el fin de poder obtener valores “genéricos” de retroceso para cada tipo de material.**
  
- 4.- Combinación de los estudios de erosión y retroceso de la línea de costa con estudios (tanto actuales como históricos) de clima marítimo, con la finalidad de relacionar periodos con un elevado retroceso de la línea de costa con un posible aumento de temporales marinos durante la misma época.**

## Bibliografia

- Balaguer, P. (2005). Tipus i evolució de les costes rocoses de Mallorca. Tesi Doctoral. Dept. de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Inèdita. 373 pp.
- Balaguer, P.; Fornós, J.J.; Gómez-Pujol, Ll.; Pons, G.X. & Villanueva, G. (2001a) Processos d'erosió mecànica a les costes rocoses de la Mediterrànea Occidental. A: Pons, G.X. (Ed): III Jornades del Medi Ambient de les Illes Balears: 72 - 73. Palma de Mallorca.
- Balaguer, Fornós, J.J. & Gómez-Pujol, Ll. (2001b) Evaluation of erosion rates by granular disintegration in the Upper Miocene calcarenite sea-cliffs of eastern Mallorca (W-Mediterranean). Actes European Rock Coasts 2001. Brighton.
- Barón, A. (1977) *Estudio Estratigráfico y paleontológico del Mioceno Medio y superior post-orogénico de la Isla de Mallorca*. Premio Ciutat de Palma (Inédito). 180 pp.
- Barón, A. & Pomar, L. (1978) Recent distribution of Neogene sedimentation areas of the mediterranean; area 405: Balearic Depression. IGCP project nº 25 (UNESCO, IUGS).
- Fornós, J.J. (1999) Karst collapse phenomena in the Upper Miocene of Mallorca (Balearic Islands, Western Mediterranean). Acta Geologica Hungarica, 42 (2): 237-250. Budapest.
- Fornós, J.J.; Gómez-Pujol, L. & Clemmensen, L.B. (2004). Facies architecture of interbedded aeolianites and alluvial fans deposits: the Late Pleistocene of Pollença Bay (Mallorca Is., Western Mediterranean). International Association of Sedimentology 23rd Meeting, Coimbra. Portugal.
- Ginés, J. (2000) El karst litoral en el levante de Mallorca: una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología. Tesi Doctoral. Universitat de les Illes Balears. Palma de Mallorca.
- Gomez-Pujol, Ll. (1999) Sedimentologia i evolució geomorfològica quaternària des Caló (Betlem, Artà, Mallorca). Boll. Soc. Hist. Nat. Balears, 42: 107 - 124. Palma de Mallorca.
- Gómez-Pujol, Ll. (2006) Patrons, formes i taxes d'erosió a la costa rocosa carbonatada de Mallorca. Tesi Doctoral. Dept. de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Inèdita.

- Moore, L.J. & Criggs, G.B. (2002) Long-term cliff retreat and erosion hotspots along the central shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary. *Marine Geology*, 181: 256 - 283.
- Palmer, M.; Villanueva, G.; Pons, G.X.; Fornós, J.J.; Balaguer P.; Vidal, M. & Gómez-Pujol, Ll. (2001) Primeres estimates a les Balears de la taxa de bioerosió ( $\text{g m}^{-2} \text{any}^{-1}$ ) del litoral rocós: Descripció de l'estratègia general d'anàlisi de dades. A: Pons, G.X. (Ed): III Jornades del Medi Ambient de les Illes Balears: 76. Palma de Mallorca.
- Palmer, M.; Fornós, J.J.; Balaguer, P.; Gómez-Pujol, Ll.; Pons, G.X. & Villanueva, G. (2003) Spatial and seasonal variability of the macro-invertebrate community of a rocky coast in Mallorca (Balearic Islands): implications for bioerosion. *Hydrobiologia* 00. Pp. 1-9.
- Pomar, L; Marzo, M. & Barón, A. (1983) El Terciario de las Baleares. Guía de las excursiones del X Congreso Nacional de Sedimentología. Menorca, 26-30 Septiembre: 21-44. Palma de Mallorca.
- Philpott, K.L. (1984) Comparison of cohesive coasts and beach coasts. *Proc. Coastal Eng. Canada*: 227 - 244.
- Rodríguez-Perea, A. (1998a) Ventalls al·luvials i sistemes dunars a Betlem (Artà, Mallorca). A: Fornós, J.J. (Ed.): Aspectes geomorfològics de les Balears: 169 - 189. Palma de Mallorca.
- Sanjaume, E. (1985) Las costas valencianas. Sedimentología y morfología. Universidad de Valencia. València. 505 pp.
- Slama, C.C. (1980) Manual of Photogrammetry. American Society of Photogrammetry. Falls Church. V.A.
- Vidal, M; Fornós, J.J.; Moyà, G.; Palmer, M.; Palmer, M.; Pons, G.X. (2001a) Relació entre les variacions en biomassa de les comunitats epi- i endolítiques rocoses supralitorals i la distribució del gasteròpodes herbívors costaners de Mallorca. A: Pons, G.X. (Ed): III Jornades del Medi Ambient de les Illes Balears: 77. Palma de Mallorca.
- Vidal, M; Fornós, J.J.; Palmer, M.; Palmer, M.; Pons, G.X. (2001b) Quantificació de la capacitat erosiva de *Melaraphe neritoides* (Linnaeus, 1758). A: Pons, G.X. (Ed): III Jornades del Medi Ambient de les Illes Balears: 78. Palma de Mallorca.

- Vidal, M; Fornós, J.J.; Palmer, M.; Palmer, M.; Pons, G.X. (2001c) Quantificació de la capacitat erosiva i determinació del patró erosiu en un període d'alimentació de 24 hores de *Monodonta turbinata* (Born, 1780) i *Monodonta articulata* (Lamarck, 1822). A: Pons, G.X. (Ed): III Jornades del Medi Ambient de les Illes Balears: 79 - 80. Palma de Mallorca.
- Vidal, M., Fornós, J.J., Palmer, M. i Pons, G.X. (2001d) Role of *Monodonta articulata* (Lamarck, 1822) and *Monodonta turbinata* (Born, 1780) as bioerosive agents on rocky coasts of Mallorca. Determination of their feeding-eroding pattern. European Rock Coast 2001, Brighton, UK, 17-18 December 2001, pp. 42-43.
- Villanueva, G.; Balaguer, P; Baldo, M.; Fornós, J.j.; Gómez-Pujol, Ll.; Pons, G.X. (2000) Importancia de la bioerosión en la evolución del litoral rocoso: efecto de *Melaraphe neritoides* y *Monodonta turbinata* en el litoral de Mallorca y norte de Cataluña. Geotemas, 1 (4): 229 -302.
- Villanueva, G.; Pons, G.X.; Fornós, J.J.; Balaguer, P.; Gómez-Pujol, Ll. (2001) Anàlisi de l'activitat bioerosiva de *Patella rustica* (Linnaeus, 1758), *Monodonta turbinata* (Born, 1780) i *Melaraphe neritoides* (Linnaeus, 1758) (Mollusca; Gastropoda) del litoral rocós de Mallorca (Mediterrània occidental). A: Pons, G.X. (Ed): III Jornades del Medi Ambient de les Illes Balears: 81 - 83. Palma de Mallorca.
- Zencovich, V.P. (1967) Processes of coastal development. Oliver & Boyd. Edinburg. 738 pp.

# **ANEXO**

**ZONAS DE ESTUDIO PROPUESTAS DE LAS ILLES  
BALEARS**

# MALLORCA



Norte de Cala Bona (Son Servera)



Costa d'en Blanes (Calvià)

# MALLORCA



Ses Penyes Rotges (Calvià)



Es Caló de Betlem - Colònia de Sant Pere (Artà)





# MALLORCA



Alcanada (Alcudia)



Necrópolis de Son Real (Santa Margalida)



S'Alavern (Llucmajor)



Es Carnatge (Palma de Mallorca)

# MALLORCA



Costa Norte, entre Estellencs y ses Ortigues (Estellencs)



Costa Norte, Norte de Estellencs(Estellencs)



Costa del Municipio de Sóller



Es Mal Pas - Bonaire (Alcudia)

# MALLORCA



Sa Font Celada (Artà)



Aubarca (Artà)



Es Niu de s'Àguila (Santanyí)



S'Estret des Temps (Santanyí)

# MALLORCA



Sa Font Celada (Artà)



Es Llobards - Rafal des Porcs (Santanyi)

# MALLORCA



S'Estalella (Lluçmajor)



Cala Carril (Lluçmajor)



Cap d'Enterrocat (Lluçmajor)



Illetes - Bendinat (Calvià)

# MENORCA



Zona de Binigaus (Es Migjorn Gran)



W de la Punta de s'Escullar (Ciutadella)



Cala Algairens (Ciutadella)



Racó de Llenyam y zonas próximas (Ciutadella)

# MENORCA



Cala del Pilar (Ciutadella)



E del Cap de Cavalleria (Es Mercadal)



N del Cap de la Mola (Maó)



# EIVISSA



Inmediaciones del Cap Blanc (Sant Josep)



Cala Conta (Sant Josep)



Punta de s'Embarcador (Sant Josep)



Sa Caixota (Sant Josep)



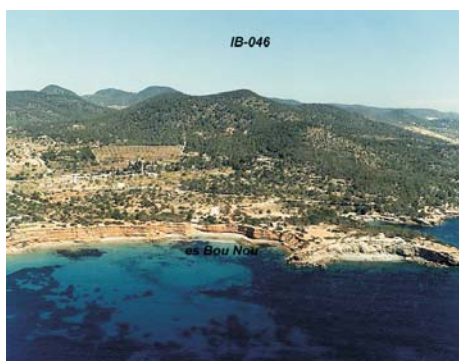
# EIVISSA



Es Cucó (San José)



Punta Porroig (San José)



Es Bou Nou (San José)



N de Punta de n'Andreu - Cap Martinet  
(Santa Eulàlia)

# EIVISSA



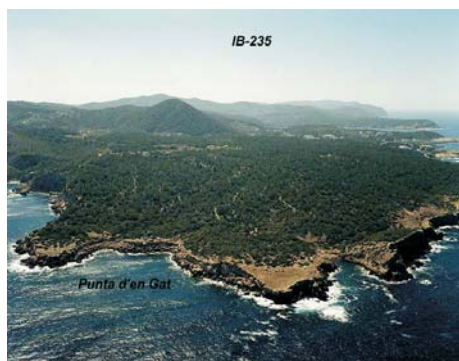
Cala Roja (Santa Eulàlia)



N de la Punta de sa Cala (Santa Eulàlia)



Cap Blanc N. Eivissa (Sant Joan)



Punta d'en Gat (Sant Joan)

# EIVISSA



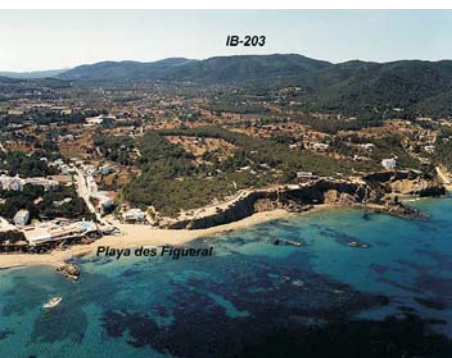
Es Penyal (Sant Joan)



Cala Blanca (Santa Eulàlia)



Punta Arabí (Santa Eulàlia)



Platja des Figueral (Eulàlia)

# EIVISSA



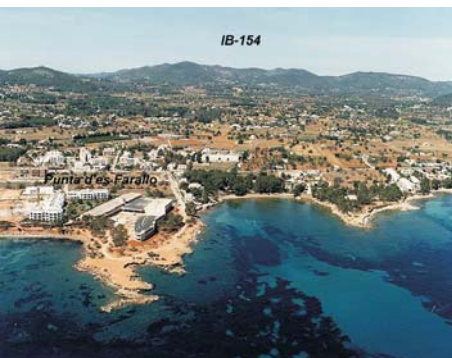
Canal d'en Martí (Santa Eulàlia)



Tagomago (Santa Eulàlia)

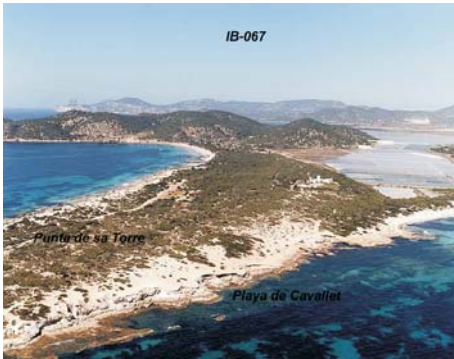


S'Aigua Dolça (Sant Joan)



Santa Eulàlia - Cala Gat  
(Santa Eulàlia)

## EIVISSA



Punta de sa Torre (Sant Josep)

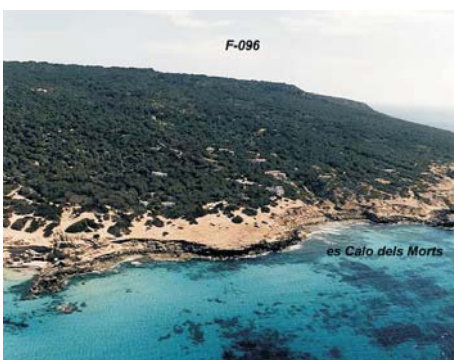
## FORMENTERA



Acantilados W s'Espalmador (Sant Francesc)



Acantilados N Cala Saona (Sant Francesc)



E Platja des Migjorn - Caló des Morts (Sant Francesc)

# CABRERA



Rost d'en Campos (Palma de Mallorca)



Codolar dels Estels (Palma de Mallorca)



Codolar de l'Imperial (Palma de Mallorca)



Es Burrí (Palma de Mallorca)