



**Universitat de les
Illes Balears**

Facultat de Ciències

Memòria del Treball de Fi de Grau

Estudio de los foraminíferos como bioindicadores del Puerto de Sóller

Enrique Vaquer Talavera

Grau de Biologia

Any acadèmic 2015-16

DNI de l'alumne: 41541999C

Treball tutelat per Guillem Mateu Vicens





















Departament de Biologia

S'autoritza la Universitat a incloure aquest treball en el Repositori Institucional per a la seva consulta en accés obert i difusió en línia, amb finalitats exclusivament acadèmiques i d'investigació	Autor		Tutor	
	Sí	No	Sí	No
	X		X	

Paraules clau del treball:

Foraminíferos, Análisis ecológico, Puerto de Sóller, Morfotipos, Índices bioindicadores

ÍNDICE

 RESUMEN	4
 ABSTRACT	5
 INTRODUCCIÓN	6
 Características generales de la biología de los foraminíferos bentónicos	
 Taxonomía y sistemática de foraminíferos bentónicos	
 Aplicaciones y ecología de foraminíferos	
 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	10
 ZONA DE ESTUDIO	11
 METODOLOGÍA	14
 Método de recolección	
 Análisis cualitativo y cuantitativo	
 Análisis ecológico e índices bioindicadores	
 RESULTADOS	17
 Análisis cuantitativo y cualitativo de foraminíferos	
 Análisis de foraminíferos epífitos	
 DISCUSIÓN	20
 Descripción del estado actual	
 Análisis de datos desde los años 60 hasta la actualidad	
 CONCLUSIONES	22
 REFERENCIAS	23

RESUMEN

El estudio de los foraminíferos como indicadores ecológicos llegó a España en la década de los 70 (Mateu, 1974) siendo estudiados por su estrecha relación con la fanerógama endémica *Posidonia oceanica* (L.) Delile. Los foraminíferos bentónicos son usados como bioindicadores ya que reaccionan rápidamente a las condiciones ambientales a escala local y global debido a que presentan un ciclo vital corto. Además son muy abundantes y presentan una amplia variedad de respuestas al medio. Los estudios anteriores de foraminíferos epífitos han permitido desarrollar índices bioindicadores adaptados a las comunidades de foraminíferos de la pradera de Posidonia (Mateu-Vicens et al. 2014) que permiten conocer el estado ecológico del ecosistema de una forma rápida y sencilla.

En este estudio se usarán dichos foraminíferos para conocer el estado en el que se encuentra el litoral del Puerto de Sóller, uno de los puertos más antropizados de la isla de Mallorca, usando dos índices bioindicadores: el Foram Index y el Long vs. Short Index. Además, se analizarán los índices en un registro de foraminíferos de más de 40 años del Puerto de Sóller, por lo que se ha obtenido una serie cronológica del estado ecológico del puerto. Así, se ha podido observar el impacto antrópico que ha repercutido sobre el litoral del Puerto de Sóller desde finales de los 60 hasta finales de los 90, y la recuperación del litoral gracias a la instalación del emisario submarino y a las ampliaciones de la depuradora de Sóller ya que los vertidos son más limpios y favorecen el estado ecológico del ecosistema.

ABSTRACT

The study of foraminifera as ecological indicators came to Spain in the 70s (Mateu, 1974) being studied for their close relationship with the endemic seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile. The benthic foraminifera are used as bioindicators because they react quickly to environmental conditions at local and global scale because they have a short life cycle. They are very abundant and have a wide variety of responses to the environment. Previous studies of epiphytic foraminifera rates have helped to develop bioindicators indexes adapted to the communities of foraminifera prairie *P. oceanica* (Mateu 2014) that provide insight into the ecological state of the ecosystem quickly and easily.

In this study benthic foraminifera will be used to determine the conditions of the coast of Puerto de Sóller, one of the most anthropized ports on the island of Mallorca, using two bioindicators indexes: the Foram Index' and Long vs. Short Index. In addition, the indices will be analyzed in a register of foraminifera over 40 years of Puerto de Sóller, which has obtained a time series of ecological status of the port. Thus, it has been observed the anthropic impact on the coast of Puerto de Sóller from late 60s to late 90s, and recovery of the coast thanks to the installation of the outfall and expansion of the Soller's sewage treatment since discharges are cleaner and promote the ecological state of the ecosystem.

INTRODUCCIÓN

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA BIOLOGÍA DE LOS FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS

Los foraminíferos son protozoos unicelulares pertenecientes al filo Foraminifera englobado en el reino Chromista (Hayward 2001) compuestos por un citoplasma incoloro, aunque pueden contener material lipídico, pequeñas cantidades de pigmentos orgánicos, compuestos de hierro o presentar simbiontes que le dan color (Calonge et al. 2001). El citoplasma alberga diferentes orgánulos: mitocondrias, ribosomas, lisosomas, vacuolas digestivas, peroxisomas, aparato de Golgi y núcleo (Lee et al. 1991). La célula está protegida por un esqueleto externo denominado testa o concha, formada por el propio organismo a través de vesículas citoplasmáticas segregadas por el aparato de Golgi (Hansen 1999). Según el proceso y el material empleado para la creación de la concha distinguimos 3 tipos de foraminíferos diferentes (Bellier et al. 2010):

- Los más primitivos (Orden: Allogromiida) presentan la concha de materia orgánica.
- *Aglutinados*: Organismos que producen una matriz orgánica que gracias a los pseudópodos será recubierta por sedimento, espículas de esponja, diatomeas, etc. (Órdenes: Asthrorhizida, Lituolida, Trochamminida y Textulariida). Los foraminíferos de elevadas profundidades, zonas frías o con un contenido alto en materia orgánica construyen su concha con material silíceo debido al nivel bajo de calcita y un bajo pH (Orden: Silicoloculinida).
- *Porcelanoides*: A través de espículas calcáreas segregadas por el aparato de Golgi que forman directamente la concha o sirven de cemento para adherir partículas externas, la testa de estos organismos presenta un contenido elevado de magnesio. Su aspecto es uniforme, sin perforaciones y brillante (Orden: Miliolida). Como excepción, los órdenes Involutinida y Robertinida construyen sus conchas con aragonito.
- *Hialinos*: Construyen la concha calcárea in situ a partir de un proceso de biomineralización en el exterior del cuerpo citoplasmático a partir de una plantilla orgánica, la concha es perforada, con un contenido bajo en magnesio y tiene un aspecto translucido (Orden: Carterinida, Spirillinida, Lagenida, Buliminida, Rotaliida y Globigerinida).

El tamaño y la morfología del organismo depende de varios factores: las modificaciones durante la ontogenia, la forma y dimensiones de la cámara embrionaria y la disposición de las cámaras (Calonge et al. 2001). La concha está compuesta por una cámara, en las formas más simples y primitivas, o por diversas cámaras interconectadas entre sí. Éstas están separadas por septos y comunican con el exterior gracias a uno "foramen" o varios orificios. A través de estos orificios extienden los pseudópodos con los que interacciona con el entorno (Goldstein 1999). Los pseudópodos son prolongaciones del citoplasma encargados de diversos procesos vitales: alimentación, construcción de la concha, reproducción, movimiento y fijación en el sustrato (Murray 2006). Éstos cambian de forma dividiendo y juntándose formando una red reticulosa (reticulopodios) a través de los cuales el organismo segrega mucopolisacáridos usados para alimentarse, adherirse y protegerse.

Las estrategias tróficas son muy diversas, los foraminíferos capturan directamente partículas en suspensión de la columna de agua, se alimentan de otros organismos como copépodos (*Peneroplis pertusus* (Forskål, 1775) y caprélidos (*Astrorhiza limicola* Sandahl, 1858) o utilizan los mucopolisacáridos como sustrato para el crecimiento de bacterias y zooplancton de los que se alimentan (Murray 2006), proceso conocido como "farming". En la zona fótica y aguas oligotróficas, algunos foraminíferos como *Sorites Ehrenberg*, 1839, *Peneroplis pertusus* (Forskål, 1775) o *Amphistegina d'Orbigny*, 1826 son capaces de establecer simbiosis con algas unicelulares, como dinoflagelados, rodófitas, clorófitas y diatomeas, que se alojan en el aparato de Golgi y les suministran azúcares a partir de la fotosíntesis (Hallock 1999; J. Pawlowski et al. 2001a; J. Pawlowski et al. 2001b). Otros foraminíferos no simbióticos como *Elphidium crispum* (Linnaeus, 1758) pueden cultivar sobre los reticulopodios algas unicelulares como diatomeas para poder alimentarse (Goldstein 1999).

El ciclo de vida se ciñe a un modelo estándar de alternancia de generaciones sexual y asexual, aunque predomina una fase más que la otra dependiendo de la especie (Figura 1). La fase sexual se inicia con el organismo en estadio agamonte (multinucleada, microsférica y diploide) que a través de una meiosis produce juveniles, los cuales crecerán y formarán el estadio gamonte (uninucleado, macrosférico y haploide) que por gametogénesis producirá los gametos, éstos formarán el cigoto que dará lugar al nuevo estadio agamonte. La fase asexual consiste en varias fisiones binarias de los juveniles formando el estadio esquizonte (multinucleado, microsférico y diploide) que puede generar a su vez más esquizontes por fisión binaria (como ocurre en *Ammonia tepida* (Cushman, 1926)) o crecer y formar directamente un gamonte (Murray 2006).

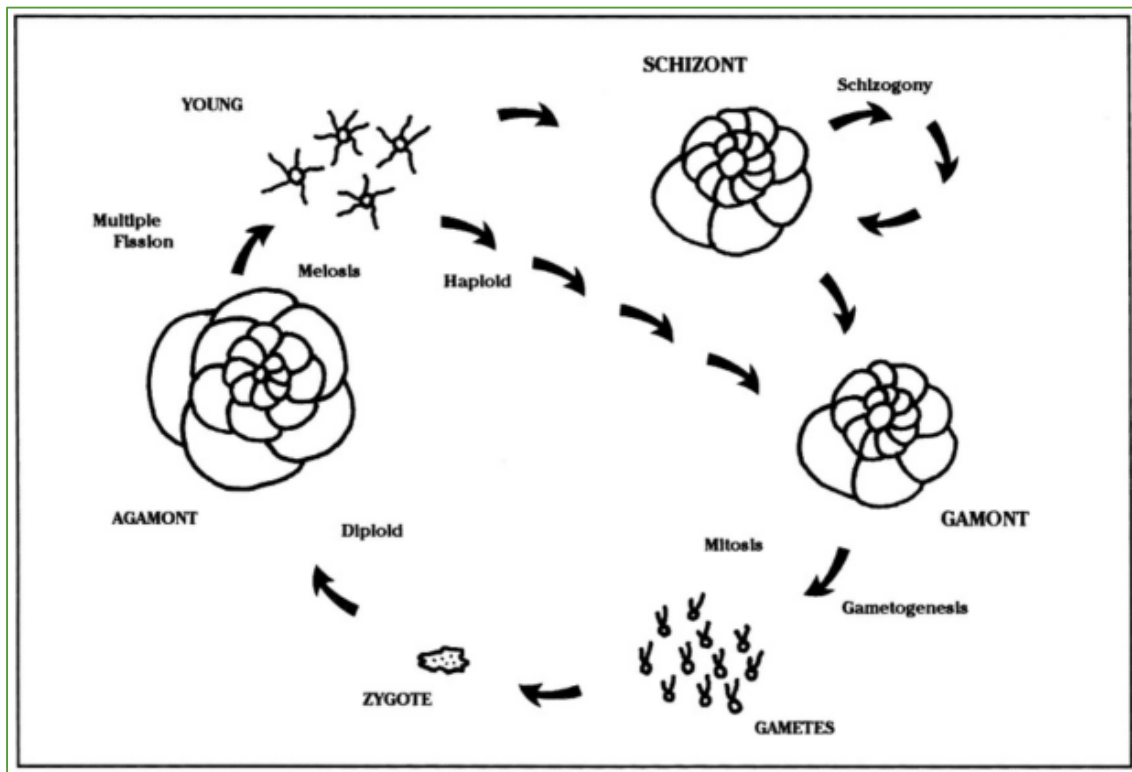


Figura 1 Esquema del ciclo de vida de un foraminífero epífito con alternancia de generaciones con una fase haploide y otra diploide. (Goldstein 1999)

TAXONOMÍA Y SISTEMÁTICA DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS

Los foraminíferos constituyen el grupo más diverso de organismos con esqueleto calcáreo. Se distinguen dos tipos de foraminíferos en base a su modo de vida:

- ☞ *Plantónicos*: Éstos habitan en la columna de agua y se desplazan pasivamente por las corrientes aunque pueden realizar migraciones verticales.
- ☞ *Bentónicos*: Se encuentran en el lecho marino ya sea como epifauna o endofauna y pueden ser sésiles o vágiles.

El número estimado de foraminíferos actuales es de 10000 especies (Vickerman, 1992). El número de foraminíferos bentónicos es alrededor de 3210 – 3531 especies vivientes y un registro fósil aproximado de 1573 especies (Murray 2007). Sobre el número de especies conocidas se restó el porcentaje de sinonimia entre especies (González-Regalado 1989; Murray 2007) ya que dependiendo del estadio de vida, el desarrollo de las cámaras y la ontogenia el mismo individuo puede ser morfológicamente diferente.

Los foraminíferos han sido clasificados tradicionalmente según la disposición de las cámaras y su morfología externa. La identificación y separación de especies en géneros y órdenes comenzó a mediados del siglo XVIII.

D'Orbigny reconoció en 1852 un total de 72 géneros de foraminíferos. Brady en 1884 los agrupó en 10 familias diferentes incluyendo algunos foraminíferos fósiles del Paleoceno. Dos décadas después (1903) Lister elevó las familias a 10 superfamilias y 29 familias. A mediados del siglo XX, influenciado por la taxonomía de Brady en 1884, apareció Cushman en 1948, cuya clasificación fue considerada standard para el trabajo con foraminíferos. Sin embargo, esta clasificación estaba enfocada más hacia la industria petrolífera (foraminíferos fósiles) que a la biología, fue entonces cuando apareció la sistemática de Loblich and Tappan en 1964 centrada en las características ópticas de la calcita de los foraminíferos (Sen Gupta 1999). Recientemente, los avances moleculares con secuencias de ADN han permitido conocer de forma exacta las variaciones genéticas de los foraminíferos por lo que toda la taxonomía clásica se está revisando desde el 2000 (Pawłowski & Holzmann 2002; Gooday et al. 2003; Pawłowski & Holzmann 2008). Estos avances en el estudio de los foraminíferos han corroborado la taxonomía clásica tradicional.

APLICACIONES Y ECOLOGÍA DE LOS FORAMINÍFEROS

En sus inicios, el estudio de foraminíferos se centraba en estudios geológicos y micropaleontológicos usando el registro fósil de foraminíferos para caracterizar bioestratigráficamente yacimientos petrolíferos. Sin embargo, entre la década de los 30 y 50 comenzaron a incorporar aspectos de la biología de los foraminíferos. Se definieron algunas tinciones de citoplasma, técnicas de muestreo y fijación, etc. que permitió conocer la dinámica de las poblaciones. A partir del siglo XX en la década de los 60 con la invención del microscopio eléctrico de barrido, se facilitó la observación y el estudio de los foraminíferos, aplicando los criterios biológicos a los conceptos más paleontológicos (Murray 2006). El estudio de la ecología de los foraminíferos surgió a partir de las variaciones morfológicas, estudiadas por Colom (1974) y Langer (1993) del que se hablará más adelante. También se estudiaron los foraminíferos y su relación con los parámetros del medio, las diferencias de foraminíferos según la profundidad (Phleger 1960), la temperatura, salinidad y sustrato (Murray 1991) y la concentración de oxígeno (Sen Gupta & Machain-Castillo 1993).

El estudio de los foraminíferos como indicadores ecológicos llegó a España en la década de los 70 (Mateu, 1974), siendo estudiados por su estrecha relación con la fanerógama endémica *Posidonia oceanica* (L.) Delile. En Baleares, diferentes autores han estudiado la microfauna posidonícola (Colom, 1946; Colom, 1974; Mateu et al., 1984; Gazá, 1988; Loeblich & Tappan, 1988; Abril, 1993; Moreiro, 1993). Aunque, son pocos los estudios ecológicos sobre las comunidades de foraminíferos epífitos de hojas (Blanc-Vernet, 1969; Blanc-Vernet et al., 1979; Langer, 1993; Mateu-Vicens et al., 2010; Mateu-Vicens et al., 2014). Los foraminíferos bentónicos son buenos bioindicadores. Reaccionan rápidamente a las condiciones ambientales a escala local y global debido a que presentan un ciclo vital relativamente corto. Además son muy abundantes y presentan una amplia variedad de respuestas a diferentes contaminantes marinos (Yanko et al. 1999).

Langer (1993) estudió la distribución vertical de los foraminíferos sobre diferentes puntos de *P. oceánica* (L.) Delile (desde la base hasta las hojas) y algas marinas (*Flabellia petiolata* Nizamuddin, 1987 y *Ectocarpus* Lyngbye, 1819) observando: el tiempo de fijación, el movimiento, su forma de alimentarse y la preferencia de los epífitos por cada punto, influyendo en la forma de la testa y el tiempo de fijación. A partir de esta observación separó a los foraminíferos epífitos en 4 grupos según su tiempo de vida y su morfología, llamados morfotipos (A-D). Los diferentes sustratos en la planta mostraron una fuerte influencia en la composición y la diversidad de epífitos fijados (Langer 1993). El morfotipo A corresponde a aquellos que se encuentran permanentemente sujetos al sustrato y tienen un tiempo de vida largo, semejante al de *P. oceanica* (>10 meses). El morfotipo B es el predominante en la comunidad de epífitos pues puede encontrarse en diferentes sustratos y su tiempo de vida es de 3 a 5 meses. En cuanto al morfotipo C el tiempo de vida es inferior (3-4 meses) y se caracteriza por la especie *Elphidium crispum* (Linnaeus, 1758). Por último, el morfotipo D presenta las especies más oportunistas, con una vida muy corta y siempre en movimiento. Con lo cual esta última categoría es la más adaptada a condiciones de estrés. Mateu-Vicens et al. (2014) revisó dichas categorías y añadió una más, el morfotipo SB, que separaba la porción de foraminíferos simbiotes donde Langer los agrupaba en el morfotipo A y algunos en

el morfotipo D como *P.pertusus* (Forskål, 1775). De esta forma, el porcentaje de cada morfotipo nos refleja las condiciones ambientales a las que se ve sometida la comunidad de epífitos. Un porcentaje elevado del morfotipo D nos indicará unas condiciones de estrés, por ejemplo, debido a una mala calidad del agua. Por otro lado, el morfotipo A nos indicará unas condiciones más estables y un buen estado ecológico.

A partir de estos morfotipos se obtuvieron diversos índices bioindicadores mediante los cuales se puede estudiar el estado ambiental de una zona marina determinada. El FORAM índice (FI) permite obtener un valor de la calidad ambiental de la zona de estudio (Hallock et al. 2003), en concreto el índice valora la calidad ambiental de los arrecifes de corales. Mateu-Vicens et al. (2014) modificó el FI para utilizarlo evaluar la calidad ambiental de *P. oceanica* (FI'). Además, usando como referencia el FORAM Index' (FI') se creó un índice similar para latitudes bajas como el Mediterráneo Occidental (Mateu-Vicens et al. 2014) que permite caracterizar de forma más precisa la calidad de vida de la pradera de posidonia, conocido como "long vs. short" Index (Ils). Mide la presencia de formas incrustantes (A*) y de formas simbiotes (SB), con un tiempo de vida mayor, comparando con las formas oportunistas (D*), con un tiempo de vida más corto. El umbral del índice es de 2, cuando la tasa de simbiotes y formas incrustantes aumenta, el índice es superior. Al contrario, cuando predominan las formas oportunistas el índice disminuye.

Con el uso de estos índices bioindicadores podemos conocer el estado general en el que se encuentra la pradera de posidonia a partir de las muestras de foraminíferos obtenidas del sedimento en el Puerto de Sóller. Además, en estudios previos del Puerto de Sóller se ha encontrado un registro de especies de foraminíferos epífitos en diferentes años (Mateu 1970; Abril Duro 1993; Mateu et al. 2001). Este registro de más de 40 años permite realizar un estudio cronológico acerca de los cambios producidos en la comunidad de organismos epífitos del Puerto de Sóller.

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Las aguas costeras del Puerto de Sóller están sometidas durante todo el año a las presiones antrópicas, ya que es el único puerto de la Sierra de Tramuntana. Además es una zona altamente turística con una entrada masiva de barcos en temporada alta. Teniendo en cuenta los antecedentes expuestos, cabe esperar que la comunidad de organismos presentes en la Bahía del puerto de Sóller disminuya con el tiempo, debido a la presión antrópica ejercida desde el “boom turístico” en los años 60.

Los estudios anteriores basados en índices a partir de foraminíferos bioindicadores del medio han permitido desarrollar una herramienta de determinación del estado ambiental rápida y sencilla. Este estudio analizará los índices en un registro de foraminíferos de más de 40 años del Puerto de Sóller. La hipótesis es que la proporción de morfotipos D irá incrementándose cada año, por lo que el “long vs. short” Index será inferior a 2 en 2014, al igual que el “FORAM” Index. Esto indicaría que hay un cambio en la comunidad de organismos de la pradera hacia una predominancia de foraminíferos tolerantes a condiciones de estrés debido a la acción humana.

OBJETIVOS

- 🌐 Evaluar los cambios en la comunidad de organismos de la pradera del puerto de Sóller desde finales de la década de los 60 hasta la actualidad. A partir de la clasificación de morfotipos y la aplicación de los índices FI' y IIs.
- 🌐 Analizar las posibles causas de dichos cambios y relacionarla con las actividades humanas del puerto de Sóller.

ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio está situada en la isla de Mallorca del Archipiélago Balear, en concreto se trata del puerto de Sóller ubicado en la Sierra de Tramuntana, entre el cap Gros y la punta de Sa Creu (39°47'43.4"N, 2°41'53.1"E). La bahía de Sóller presenta una longitud de 6 Km, una profundidad máxima y media de -53 m y -28 m, respectivamente, con 602 Hm³ de volumen.

El clima del puerto de Sóller es mediterráneo y se ve influenciado por la acción del mar, ocasionando un efecto moderador, disminuyendo las temperaturas en comparación con el interior de la isla. Las precipitaciones son de 881 mm de media, irregularmente repartidas durante el año, aunque predominan en otoño hacia los meses de septiembre y noviembre. En verano se produce una fuerte sequía estival que dura entre tres y cinco meses. Las temperaturas son suaves durante todo el año, la media anual de temperatura es de 16.6°C, siendo la más fría en Febrero 7.7°C (Temperatura media). El verano es la época más calurosa con un máximo el mes de Julio de 25.5°C (Temperatura media) (Consell de Mallorca 2007; Bash 2015). Los vientos predominantes son los de WNW que suelen ser vientos de poniente y de Mistral (Puig 2009).

La bahía del puerto de Sóller se divide en cinco zonas o sectores representados en el mapa de siguiente (Figura 2).



Figura 2 Bahía del puerto de Sóller. El puerto deportivo comprende la zona pesquera tradicional, la zona recreativa y la zona de embarcaciones de transporte tanto de lujo como privadas. (Google (s.f.) 2016)

Las muestras se tomaron en la playa de Can Repic de 300 metros de largo y 30 metros de ancho. En dicha playa desemboca el torrente Mayor que drena la mayor parte de la demarcación y recoge agua de otros municipios próximos (Fornalutx, Escorca, Bunyola y Deia).

En cuanto a las características fisicoquímicas, el agua que llega al puerto a través de un emisario submarino ha sido tratada previamente por la depuradora de Son Puça (Sóller), así como el agua vertida en el torrente. Actualmente, estudios previos de evaluación ambiental señalan que el agua del puerto de Sóller se encuentra en buen estado ecológico (Marbà et al. 2007; CSIC & Direcció General Recursos Hídrics 2007; Conselleria de Medi Ambient 2008). En 2008, la Directiva Marco del Agua (DMA) utilizó como indicadores ecológicos organismos bentónicos presentes en el fondo blando del puerto de Sóller, usando el índice MEDOCC (Índice del Mediterráneo Occidental) desarrollado por el equipo del CEAB-CSIC. Éste mide las respuestas de las comunidades de organismos a las variaciones inducidas por el hombre en el medio, concretamente en los sedimentos finos (0,1mm), mediante la riqueza de especies y su tolerancia a las perturbaciones del medio. El estudio se centró en

la frecuencia relativa de 4 grupos ecológicos de invertebrados bentónicos, en función del valor del índice MEDOCC definiendo los límites que separan las categorías ecológicas (Figura 3).

- ☉ Grupo I. Especies muy sensibles al enriquecimiento orgánico y solo presente en condiciones no perturbantes. P.e.: *Glans* Megerle von Mühlfeld, 1811, *Glycera oxycephala* Ehlers, 1887
- ☉ Grupo II. Especies indiferentes al enriquecimiento orgánico que siempre se encuentran en densidades bajas. P.e.: *Tellina pulchella* Lamarck, 1818 , *Magelona mirabilis* (Johnston, 1865)
- ☉ Grupo III. Especies tolerantes al enriquecimiento de materia orgánica, aumentan la densidad con el enriquecimiento de materia orgánica. P.e.: *Loripes lacteus* (Linnaeus, 1758) , *Corbula gibba* (Olivi, 1792)
- ☉ Grupo IV. Especies oportunistas. P.e.: *Fabriciella tonnerella* Banse, 1956.

El puerto de Sóller se caracterizó con un estado ecológico bueno-mediocre con un porcentaje de entre 20-50% de especies tolerantes y un 2.65 de índice MEDOCC dentro del umbral bueno (1.6-3.2) cercano a mediocre,

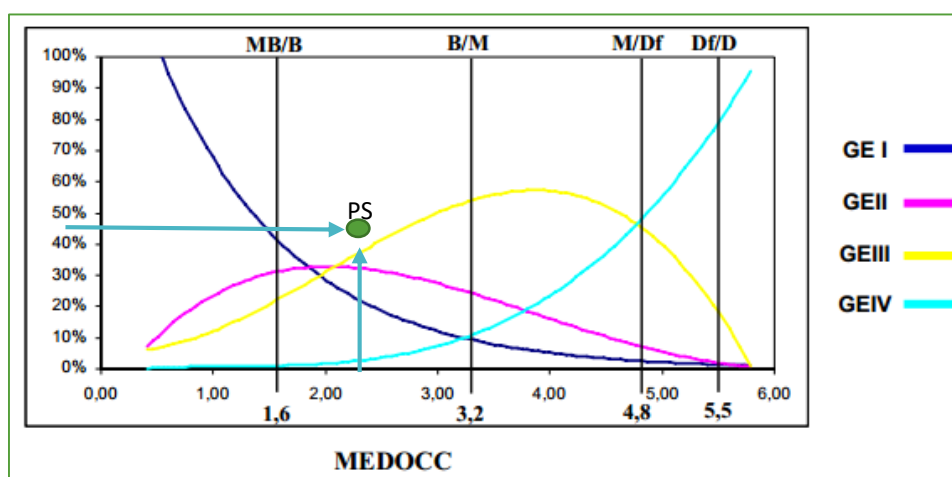


Figura 3 Distribución de la frecuencia relativa de los 4 grupos ecológicos en función del valor del índice MEDOCC a partir de los datos de las estaciones de Cataluña y Baleares. Se representan los límites que separan cada categoría ecológica: Muy bueno y Bueno (M/B), Bueno y Mediocre (B/M), Mediocre y Deficiente (M/Df) y Deficiente y Malo (Df/D). (CSIC & Direcció General Recursos Hídrics 2007)

Por otra parte, las aguas costeras del puerto de Sóller están sometidas durante todo el año a las presiones antrópicas: alteraciones en la costa litoral, fuentes de contaminación puntual, fuentes de contaminación difusa y otras, ya que es el único puerto de la Sierra de Tramuntana. La DMA demostró que el número de presiones antrópicas en el puerto es de 7 sobre 14 elementos de presión estudiados (Tabla 1) (Centro Balear de Biología Aplicada SL 2008). A parte de estas perturbaciones, en el puerto deportivo no existen sistemas adecuados de recogida de agua de sentinas (agua residual de los buques y barcos pesqueros) que son liberadas en la bahía y ocasionalmente se producen fallos en los sistemas de conductos de depuración y del emisario submarino (Auditoria ambiental de Sóller 2010).

Tabla 1 Rigidificación de la costa (PRC), Regeneración de playas (PRP), Arrecifes artificiales (PAA), Puntos de vertido (PPV), Vertido de aguas residuales depuradas (PVRD), Vertido de salmuera (PVS), Vertido térmico (PVT), Uso urbano del suelo (PUUS), Uso agropecuario del suelo (PUAS), Pesca (PP), Puertos pesqueros (PPP), Puertos deportivos (PPD), Tráfico marítimo (PTM). Se han destacado en **negrita** las presiones que superan el umbral por encima del cuál la presión es significativa. (CSIC & Direcció General Recursos Hídrics 2007)

Tipo	Presión	Unidades	Umbral	Índice PS
Alteraciones morfológicas	PRC	%	20	81,3
	PRP	m3/Km	2000	29119
	PAA	%	1	0
Contaminación puntual	PPV	PPV/Km	3	2,1
	PVRD	Kg/año/Hm3	500	738
	PVS	m3/Hm3/año	5000	0
Contaminación difusa	PVT		presencia	-
	PUUS		20000	54004
	PUAS		0,5	0,5
Otras presiones	PP	Kg/año/Km	15000	953
	PPP	embarcac./Km	2	3
	PPD	amarres/Km	25	72
	PTM	trayectos/Km/año	25	0

La pradera de *Posidonia oceánica* estudiada se encuentra al sur de la franja litoral y la zona central de la bahía, enfrente de la playa d'en Repic. Esta especie crece entre los 0 y 35 metros de profundidad en la franja litoral y presenta un crecimiento lento (1 - 6 cm por año) (Marbà y Duarte 1998). En el puerto de Sóller, está situada a una profundidad de 3 a 12 metros de profundidad sobre un fondo blando de sedimento fino, siendo más abundante en las zonas de 2.7 a 3.5 metros y menos abundante entre los 10 y 12 metros de profundidad (Figura 4).



Figura 4 Mapa de los límites de la pradera de *P.oceanica* del Puerto de Sóller (Google (s.f.) 2016).

METODOLOGÍA

MÉTODO DE RECOLECCIÓN

En Octubre del 2014, se recogieron 3 muestras de sedimento bajo la pradera de posidonia mediante buceo autónomo a una profundidad de 4 metros (muestra 1), 7 metros (muestra 2), 5 metros (muestra 3). Aproximadamente se obtuvieron unos 60 gramos de sedimento, suficientes para una recolección significativa de individuos.

Los puntos de muestreo estaban situados delante de la playa de Can Repic (Figura 5). Estas se guardaron en botes de plástico a temperatura ambiente.

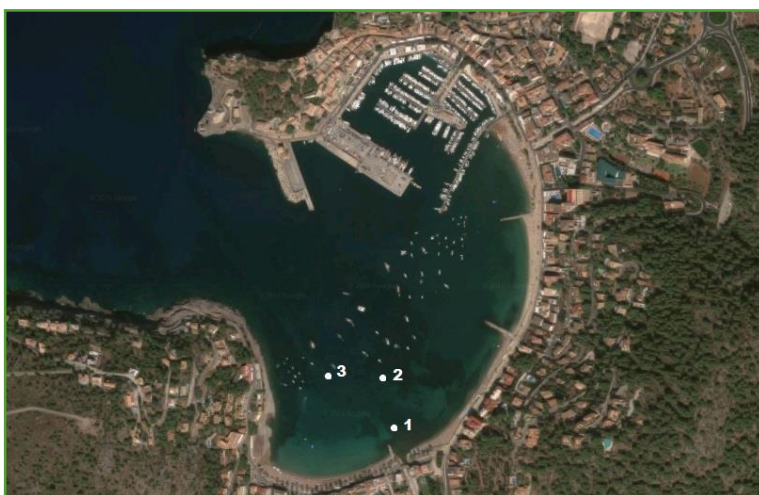


Figura 5 Situación de los puntos de muestreo en el Puerto de Sóller. Las muestras 2 y 3 se encuentran alejadas de la orilla. La muestra 1 está más próxima a la orilla, cerca de la desembocadura del torrente. (Google (s.f.) 2016)

ANÁLISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO

A la hora de preparar las muestras para su observación a la lupa, se ha de realizar en primer lugar un tamizado. Se trataron por tamizado en húmedo para separar las muestras por tamaño y eliminar el limo y la arcilla (Ángel et al. 2011), obteniendo una fracción de grano de 125-500 μm para su análisis. El sedimento se dejó secar durante 24 horas a una temperatura de 24°C. A continuación, se colocan unos 3 gramos de muestra de sedimento sobre una placa con fondo negro, con separaciones para ir eliminando la muestra observada y se observa con una lupa estereoscópica binocular. Se recogen mediante un pincel de punta fina un poco humedecido los foraminíferos no erosionados ni dañados, indicativo de que no han sufrido un transporte desde otra zona y representantes de la biocenosis ubicada en la pradera de posidonia (Murray 2006). Éstos se van colocando en cartones perforados con fondo negro sobre los que se colocan 10 individuos fijados con goma arábica. Este tipo de goma proporciona contraste, elimina el brillo y permite que se vuelvan a despegar de nuevo humedeciéndolos para poder observarlos en distintas posiciones.





En el análisis cualitativo y cuantitativo de las muestras se identificaron taxonómicamente los foraminíferos y se calculó la abundancia relativa de cada especie ($Abundancia\ relativa = n^{\circ}\ de\ sp / total\ foraminiferos$) para determinar las especies dominantes, a partir de la tanatocenosis. La tanatocenosis nos refleja la comunidad de foraminíferos vivos asociados a *Posidonia oceanica*, resumiendo las condiciones ecológicas de un determinado periodo (Murray 2000). La identificación de los organismos se realizó usando las claves de determinación (Le Calvez & Le Calvez 1958; Colom 1974; Cimerman & R. Langer 1991; Sgarrella & Moncharmont Zei 1993). Las citas de cada especie y las sinonimias halladas en la bibliografía anterior se han revisado con la plataforma web WORMS que actualiza frecuentemente la nomenclatura y taxonomía de las especies marinas. Con el fin de homogeneizar la nomenclatura taxonómica de las especies determinadas.






ANÁLISIS ECOLÓGICO E ÍNDICES BIOINDICADORES

El análisis ecológico comenzó con una clasificación de morfotipos que se realizó de acuerdo con la clasificación de Langer (1993) y la posterior modificación de Mateu-Vicens et al. (2014). También se clasificaron los foraminíferos de los estudios anteriores realizados en el Puerto de Sóller (Mateu 1970; Abril Duro 1993; Mateu et al. 2001). Según Langer (1993) los foraminíferos epífitos presentan preferencias a la hora de asentarse sobre el sustrato. La diversidad de epífitos está fuertemente influenciada por la estructura de los microhábitats en plantas y algas marinas, así como la disponibilidad temporal del sustrato (Langer 1993; Mateu-Vicens et al. 2010). Esto permite agrupar a las comunidades de foraminíferos según la distribución de las especies dominantes con distinta morfología (morfotipos) (Tabla 2). Debido a que dicha morfología afecta al movimiento de los pseudópodos y a las estrategias tróficas del organismo.

En el morfotipo A* se encuentran las especies incrustantes con un tiempo de vida largo (>10 meses), el movimiento de los pseudópodos es limitado y adoptan una estrategia de alimentación suspesívora. Las especies clasificadas en el morfotipo B* predominantemente son móviles aunque pueden incrustarse, presentan un tiempo de vida temporal de 2 a 5 meses y su alimentación es también suspesívora. El morfotipo C* engloba las especies móviles suspesívoras (Género: *Elphidium* “especialmente con contorno aquillado”) capaces de realizar una red de pseudópodos para alimentarse, con una vida de 3 a 4 meses. En el morfotipo D* los epífitos (mayormente Miliólidos) son móviles permanentemente con un tiempo de vida corto y basan su alimentación en cultivar bacterias “farming” (Langer 1993). Por último el morfotipo SB creado por Mateu-Vicens et al. (2014) que incluye los foraminíferos simbiosntes con un tiempo de vida largo (>10meses), ya que Langer (1993) agrupaba a estos foraminíferos en el morfotipo A junto con algunos *Peneroplis* sp. incluidos en el morfotipo D.

Tabla 2 . Tabla de morfotipos de Langer (1993) – A. Tabla de morfotipos de Mateu Vicens et. al. (2014) –B. (Mateu-Vicens et al. 2014)

A					
Langer (1993) morphotypes	Motility	Attachment to the substrate	Shepe	Life span	
	A	Sessile	Glycosaminoglycans	Flat concave attachment surface	1 year
	B	Temporary motile	Pseudopodial network	Wide apertures faces, often with papillae	2-5 months
	C	Motile	Extrusion of pseudopodes	Multiple apertural openings for pseudopodes	3-4 months
	D	Permanently motile	Striding on the apertural face in upright position	Bottle-neck apertures	short

B				
Proposed in this work	Motility	Description	Life span	
	A*	Encrusting	Mostly flat forms, permanently attached to the substrate by glycosaminoglycans. Example: <i>Planorbulina</i> , <i>Nubecularia</i> , <i>Miniacina</i>	1 year
	SB	Sessile	Symbiont-bearing taxa. Example: <i>Peneroplis</i> , <i>Sorites</i> , <i>Amphistegina</i> (eastern Mediterranean)	1 year
	B*	Temporary motile	Same as in Langer's (1993) classification	2-5 months
	C*	Motile	Same as in Langer's (1993) classification	3-4 months
	D*	Permanently motile	Single aperture in upright position. Opportunistic forms. Example: <i>Quinqueloculina</i> , <i>Triloculina</i> , <i>Adelosina</i> , <i>Textularia</i>	short

A partir de la clasificación de Mateu-Vicens et al. (2014) se obtuvieron los porcentajes de los distintos morfotipos (Pa*; Pb*; Psb; Pc*; Pd*), para aplicar las fórmulas de los índices bioindicadores. Un bioindicador consiste en una especie, en este caso los foraminíferos epífitos, cuya presencia nos da información sobre la calidad ambiental del medio acuático. Los índices bioindicadores están basados en el porcentaje de morfotipos que se encuentran en

las muestras y nos permiten evaluar el estado ambiental del litoral del Puerto de Sóller. Para este estudio se utilizaran el Foram Index modificado (FI') y el "Long vs. Short Index" por Mateu-Vicens et al. (2014)

El FORAM Index (FI) se realizó a partir de un registro de 30 años de investigación en arrecife de coral mediante el cual podemos determinar la idoneidad de las comunidades bentónicas y del entorno marino (Hallock et al. 2003). El uso de foraminíferos como bioindicadores es ideal ya que el ciclo de vida es corto, son abundantes y de pequeño tamaño, con lo que una pequeña muestra permite un estudio estadísticamente significativo y el impacto sobre el medio es mínimo. El FORAM Index está basado en tres componentes:

- ☉ Po: proporción de foraminíferos tolerantes a condiciones de estrés.
- ☉ Ps: proporción de foraminíferos simbioses.
- ☉ Ph: proporción de foraminíferos heterótrofos.

Y se calcula mediante la fórmula:

$$FI = (10 \times Ps) + (Po) + (2 \times Ph)$$

La premisa principal se basa en que si el Ph=100% el resultado del índice es de 2. Cuando el Ps aumenta el índice aumenta (FI>2) y si supera el 25%, el FI será superior o igual a 4, indicador de una buena calidad ambiental en arrecifes de coral. En cambio, si el FI<2 será debido a que el Po se ha incrementado, por lo que el entorno estará sometido a condiciones de estrés. Mateu Vicens (2014) modificó la fórmula FI aplicando su clasificación de morfotipos (A*, SB, B*, C* y D*) obteniendo la siguiente fórmula:

$$FI' = 10 \times (Pa^* + Psb) + (Pd^*) + 2 \times (Pb^* + Pc^*)$$

Esta ligera modificación del índice se basa en incorporar las categorías ecológicas descritas por Mateu-Vicens et al. (2014) (Tabla 2) a partir del estudio original de morfotipos de foraminíferos epifitos de Langer (1993), con el fin de estudiar la calidad ambiental de la fanerógama endémica *P. oceanica*.

- ☉ Po se sustituyó por Pd* (foraminíferos oportunistas y tolerantes a condiciones de estrés)
- ☉ Ps se sustituyó por Pa* y Psb (foraminíferos sensibles y de ciclo de vida largo)
- ☉ Ph se sustituyó por Pb* y Pc* (foraminíferos heterótrofos)

Un resultado de FI'>4 será indicativo de unas condiciones óptimas en el hábitat, mientras que FI'<2 indicarán unas condiciones de estrés.

En el Mediterráneo Occidental la tasa de simbioses es baja por lo que el FI' puede proporcionar una resolución relativamente baja. Para ello, se modificó el índice FI' obteniendo un nuevo índice que puede distinguir entre praderas de *P. oceanica* en buen estado y praderas en condiciones de estrés (Mateu-Vicens et al. 2014). Se trata del "long vs short life span" Index (Ils), expresado de la siguiente forma:

$$Ils = (3.5 \times (Pa^* + Psb^*) + 0.1) / (Pd^* + 0.1)$$

Posidonia oceanica contiene un abundante contenido en foraminíferos bentónicos de morfotipos B* y C* debido a que no necesitan requerimientos de luz ni sustrato a diferencia de los morfotipos SB y A*. Además estos morfotipos B* y C* no están tan adaptados a las condiciones de estrés como el morfotipo D* exceptuando la especie *Ammonia* sp (Murray 2006). Por ello, se eliminaron del índice FI' y se añadió 0.1 al denominador y numerador de la fórmula FI' para resolver la indeterminación en el caso de que el morfotipo D* fuese 0. Por cada generación del morfotipo A* y SB, hay un promedio de 3.5 de formas D* (Langer 1993). Cuando el Ils está próximo a 0 significa que el morfotipo D* es el dominante y que las formas A* y SB están ausentes. Con este índice, a partir de los porcentajes de las formas incrustantes de larga vida (Morfotipo A*) y las formas simbioses (morfotipo SB) junto con el porcentaje de especies oportunistas (Morfotipo D*), podemos evaluar de forma precisa y rápida la calidad ambiental de la fanerógama endémica *P. oceanica*.

RESULTADOS

ANÁLISIS CUANTITATIVO Y CUALITATIVO DE FORAMINÍFEROS

Fueron aislados y determinados un total de 894 individuos de las tres muestras del puerto de Sóller (PS2014), 285 individuos de la muestra 1, 307 individuos de la muestra 2 y 302 de la muestra 3. Suficientes para unos resultados estadísticamente significativos según la curva de rarefacción (Figura 6). Sin embargo, en estudios similares se ha visto que a partir de un total de 100-150 individuos identificados el porcentaje de especies nuevas es insignificante (Hallock et al. 2003). Esto se observa en el gráfico (Figura 6) a partir de 150-175 individuos.

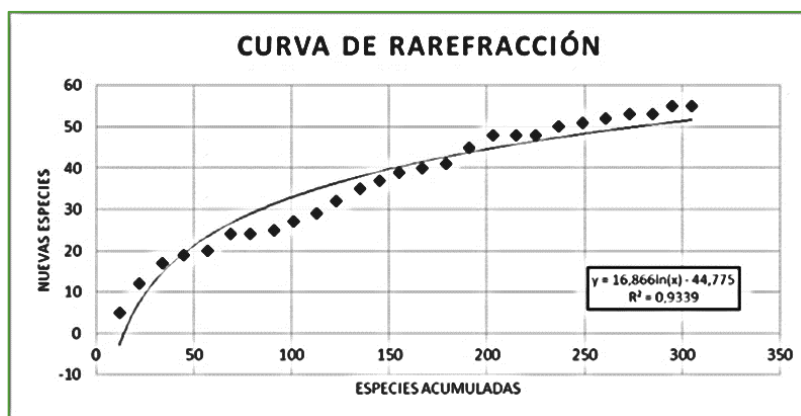


Figura 6 Curva de rarefacción de especies de foraminífero, basada en el número de especies acumuladas y las especies nuevas de la muestra 1 del Puerto de Sóller 2014.

En el muestreo de 2001 (Mateu et al. 2001) los individuos totales (vivos y muertos) estudiados fueron 830, en el 1990 (Abril Duro 1993) 6403 individuos y en 1989 (Abril Duro 1993) un total de 3874. Los resultados de 1960 (Mateu 1970) se publicaron en abundancias relativas.

Las especies dominantes de foraminíferos (>5%) se resumen en la tabla 3. En 2014 fueron *Quinqueloculina disparilis*, *Elphidium crispum*, *Lobatula lobatula*, *Nubecularia lucifuga* y *Nubecularia massutiniana*, destacando los miliólidos *Nubecularia lucifuga* y *Nubecularia massutiniana* con un 16.9% y un 11.1% respectivamente. En 2001 fueron *Lobatula lobatula*, *Rosalina globularis* y *Rosalina mediterraneensis* del orden Rotaliida. En 1990, *Quinqueloculina seminula*, *Triloculina trigonula*, *Textularia agglutinans*, *Lobatula lobatula*, *Rosalina globularis* y *Ammonia beccarii*. En 1989, *Quinqueloculina seminula*, *Triloculina trigonula*, *Lobatula lobatula*, *Ammonia beccarii* y *Nubecularia lucifuga*. Por último, en 1960 las especies dominantes fueron *Peneroplis pertusus*, *Lobatula lobatula* y *Nubecularia lucifuga*. Entre estas, podemos destacar los individuos con potencial bioindicador como *Peneroplis pertusus* (Hallock et al. 2003).

Tabla 3 Abundancia de especies (>5%) de los estudios realizados en el Puerto de Sóller (2014, 2001, 1990, 1989, 1960), clasificadas por morfotipos según (Mateu-Vicens et al. 2014). En negrita las abundancias superiores a un 5%.

MORFOTIPOS	ESPECIE	PS2014	PS2001	PS1990	PS1989	PS1960
SB	<i>Peneroplis planatus</i> (Fichtel & Moll, 1798)	1,0	0,2	0,3	0,2	10,0
D*	<i>Quinqueloculina disparilis</i> d'Orbigny, 1826	5,9	0,4	0,1	0,0	
D*	<i>Quinqueloculina seminula</i> (Linnaeus, 1758)	1,7	1,0	6,0	9,0	
D*	<i>Triloculina trigonula</i> (Lamarck, 1804)	1,2	0,4	18,0	15,6	
D*	<i>Textularia agglutinans</i> d'Orbigny, 1839	0,1	0,0	5,8	2,2	
C*	<i>Elphidium crispum</i> (Linnaeus, 1758)	5,3	0,4	0,3	0,3	1,0
B*	<i>Lobatula lobatula</i> (Walker & Jacob, 1798)	7,7	13,3	10,1	5,7	10,0
B*	<i>Rosalina globularis</i> d'Orbigny, 1826	1,1	32,5	5,4	3,1	1,0
B*	<i>Rosalina mediterraneensis</i> d'Orbigny, 1826	0,1	9,9	1,6	1,9	
B*	<i>Ammonia beccarii</i> (Linnaeus, 1758)	1,9	1,4	16,1	23,4	
A*	<i>Nubecularia lucifuga</i> Defrance, 1825	16,9	0,1	4,9	10,0	10,0
A*	<i>Nubecularia massutiana</i> Colom, 1946	11,1	0,0	0,2	0,1	1,0

ANÁLISIS DE FORAMINÍFEROS EPÍFITOS

La dinámica en cuanto a la distribución de especies cambia cada año, al igual que el porcentaje de morfotipos. Desde los años 60 hasta los 90 el morfotipo D* ha aumentado desde el 32% al 52% y se ha reducido el morfotipo A* de un 48% a un 8%, en cuanto al morfotipo B* aumentó del 9% al 36%. El morfotipo SB ha disminuido desde un 9% a un 2% y el morfotipo C* no superó el 5%. En el 2001, el morfotipo B* destaca sobre el resto con un 77%. Y el morfotipo D* ha disminuido considerablemente de un 52% a un 13%. Del 2001 al 2014 vemos como los porcentajes que han aumentado son el morfotipo A* alcanzando un 36%, el morfotipo D* un 40% y el morfotipo C* alcanzó un 6%. En cambio, el morfotipo B* ha disminuido hasta un 15% y el morfotipo SB a un 3% (Figura 8).

Los resultados obtenidos en los índices estudiados (FI' y ILS) muestran un cambio drástico desde el año 1960 hasta el año 1990, donde el valor del índice ILS ha disminuido desde un 6.15 a un 0.7 y el FI' de un 8.10 hasta un 2.30 (Tabla 8). Desde el año 1990 hacia el 2014 se observa un incremento de los índices hasta aproximadamente la mitad en comparación con los valores del año 1960 (Figura 7), el FI' alcanza un valor de 4.63 y el ILS un 3.33 (Tabla 8).

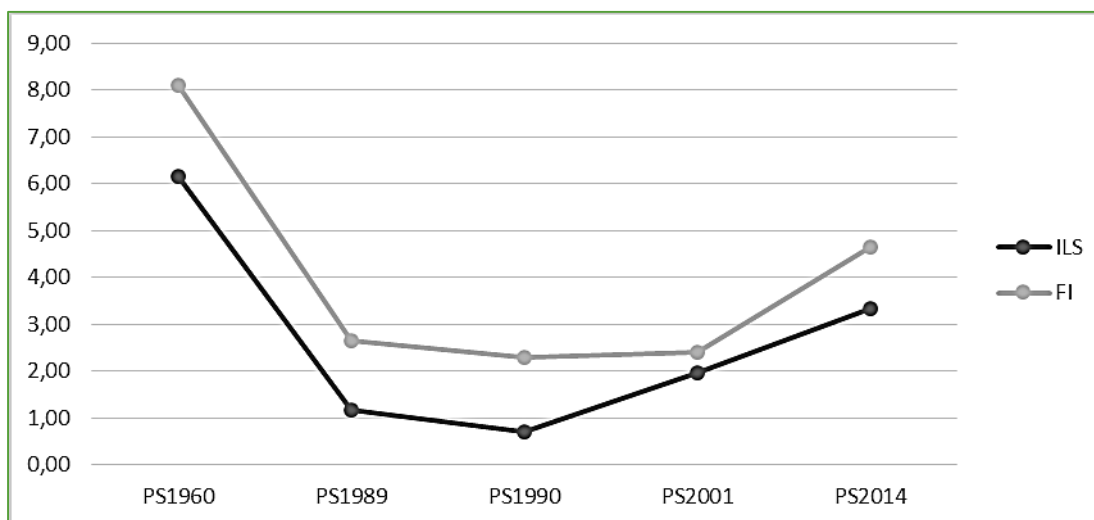


Figura 7 Representación gráfica de los valores ILS y FI'

Tabla 4 Valores de los Índices IIs y FI' en los años 1960, 1989, 1990, 2001 y 2014

Índices	PS1960	PS1989	PS1990	PS2001	PS2014
ILS	6,15	1,17	0,70	1,96	3,33
FI	8,10	2,64	2,30	2,39	4,63

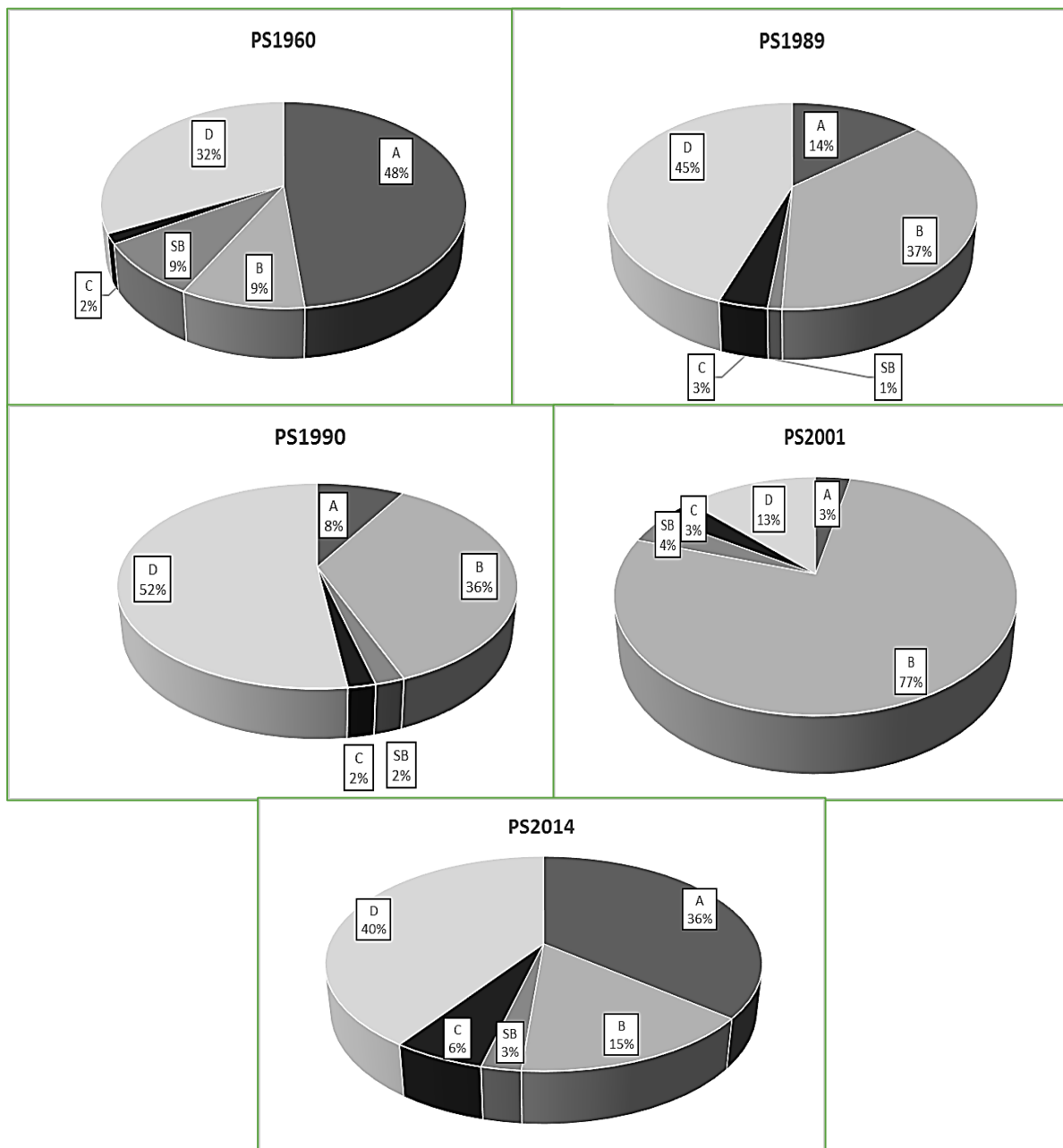


Figura 8 Porcentaje de los morfotipos A*, SB, B*, C* y D* presentes en la tanatocenosis de las muestras de sedimento en el Puerto de Sóller de los años 1960, 1989, 1990, 2001 y 2014.

DISCUSIÓN

El desarrollo económico de las Islas Baleares en las últimas décadas ha tenido un coste ambiental significativo y se manifiesta con una serie de problemas como son la ocupación masiva y generalizada del litoral y la necesidad de recurrir a recursos exógenos (barcos, desaladoras y potabilizadoras) afectando así al medio marino. El turismo de Baleares, su principal industria, ha sido acompañado de una importante degradación de los ecosistemas, sobre todo litorales, presenta una gran demanda de recursos energéticos y hídricos, así como graves problemas para la gestión de los residuos y aguas residuales. En Mallorca, se calcula que llegan unos 12 millones de turistas al año.

En el Puerto de Sóller el sector secundario ha quedado vinculado al turismo a partir de los años 60. Al final del decenio de 1920, se construyeron los primeros hoteles de la zona que fueron el Costa Brava, Terramar y Marina. En los años 50 y 60, se produjo un crecimiento en la actividad turística provocando la construcción de nuevos hoteles. En el año 1994 funcionaban un total de 18 hoteles con un total de 2489 plazas y tres edificios de apartamentos turísticos con 134 plazas. Durante los años 70, junto con el incremento significativo de este sector se instaló la red de alcantarillado definitiva y en 1992 las aguas eran tratadas por la depuradora de Son Puça, sin embargo, la cantidad de turistas era superior a la capacidad de la depuradora (Consell Insular de Mallorca 1991). En este estudio se relacionaran los resultados obtenidos utilizando los foraminíferos epífitos con el impacto antrópico que ha repercutido sobre el litoral del Puerto de Sóller.

DESCRIPCIÓN DEL ESTADO ACTUAL

Estudios previos de evaluación ambiental señalan que el agua del puerto de Sóller se encuentra en buen estado ecológico (Marbà et al. 2007; CSIC & Direcció General Recursos Hídrics 2007; Conselleria de Medi Ambient 2008). Cabe destacar la influencia masiva del hombre en el medio litoral del puerto, el turismo cada año es más elevado provocando deficiencias crecientes en las depuradoras. Durante el verano la depuradora de Son Puça recibe un caudal mucho mayor que el resto del año, debido al turismo, siendo deficiente a la hora de eliminar los nutrientes. Esto repercute negativamente en las aguas costeras, ya que al aumentar la cantidad de nutrientes se favorece la eutrofización del agua, y por lo tanto la alteración en los ecosistemas y disminución de la biodiversidad. La depuradora de Sóller, posee tratamiento terciario y vierte a través de un emisario submarino en el Puerto de Sóller, sin embargo, ésta supera los valores máximos de nitrógeno total y fosfatos (Ecologistas en acción 2009). A pesar de la falta de información oficial de la administración pública sobre el emisario submarino y la depuradora de Sóller la única información que se ha encontrado es la de Ecologistas en acción y artículos de periódico (Diario de Mallorca y La Veu de Sóller).

En este estudio se analizó el estado ecológico actual de la zona litoral del puerto de Sóller. En el 2014 el morfotipo A* (indicador de una buena calidad) y algunos foraminíferos del morfotipo B* y el morfotipo D* (tolerantes a condiciones de estrés) se encuentran en una proporción semejante (36% y 40% respectivamente) por lo que comparando con los porcentajes de años anteriores hay una tendencia a igualarse. Esto nos indica que la zona litoral a 2014 presenta una buena calidad, que se confirma con los índices bioindicadores IIs y Fl' donde el valor de Fl' es de un 4.63 y el valor del IIs (índice más ajustado a la costa balear) es de 3.33, ambos superando el valor correspondiente para unas condiciones óptimas del ecosistema.

Teniendo en cuenta los antecedentes expuestos rechazamos la hipótesis inicial “la proporción de morfotipos D* irá incrementándose cada año, por lo que el IIs será inferior a 2 en el 2014” ya que los índices bioindicadores sobrepasan el valor de condiciones de estrés (>2). Por tanto, la calidad ambiental de la costa está mejor de lo que se esperaba. Aunque no se puede confirmar que es excelente ya que los valores de los índices están en el límite del rango de condiciones óptimas y el porcentaje de especies oportunistas (D*) es predominante, posiblemente debido la acción humana, al turismo y vertidos puntuales de aguas residuales en la costa.

ANÁLISIS DE DATOS DESDE LOS AÑOS 60 HASTA LA ACTUALIDAD

Los resultados analizados en el año 1960 muestran como el porcentaje de morfotipos A* y SB son superiores al 50% del total lo que indica un buen estado del ecosistema costero. Debido a la forma de vida de los foraminíferos incrustantes (A*) y foraminíferos simbioses (SB) en las hojas de *Posidonia oceanica*, indican que en el agua penetraba bien la luz y la contaminación marina era mínima. De hecho, el resultado obtenido del valor de los índices bioindicadores es el doble que el valor actual del índice (Ils=6.15; FI=8.10). En esta época el sector turístico se iniciaba en el Puerto de Sóller.

El boom turístico posterior provocó un incremento en el número de turistas y residentes aumentando la población del puerto de Sóller (Consell Insular de Mallorca 1991). Paralelamente se incrementó el consumo de agua y la producción de aguas residuales domésticas que eran liberadas libremente al mar (Veu de Sóller 1986; Veu de Sóller 1990a), ya que la zona del puerto no contaba con una depuradora de aguas. A causa de esto se produjo una disminución considerable de los índices debido al aumento de la contaminación antrópica litoral. El índice Ils descendió de 6.15 en 1960 hasta un valor de 0.70 en 1990, en cuanto al FI' pasó de un 8.10 a un 2.30. Como se expuso en los resultados, en este periodo de 30 años, el morfotipo A* disminuyó un 40%, el morfotipo D* aumentó un 20% y el morfotipo B* un 30%. Estos cambios se deben al aumento de nutrientes y contaminantes en el agua que producen un aumento de los foraminíferos heterótrofos suspensívoros (B*) y foraminíferos tolerantes a condiciones de estrés con un ciclo de vida corto (D*), cabe destacar la especie *Ammonia beccarii* (Linnaeus, 1758) del morfotipo B* ya que al igual que las especies del morfotipo D* es oportunista e indicadora de unas condiciones de estrés ambiental (Murray 2006). En este periodo de tiempo se puede observar una regresión en el ecosistema.

En 1992 se inició la construcción de la depuradora de Son Puça (Consell Insular de Mallorca 1991; Veu de Sóller 1992; Ecologistas en acción 2009). Al poco tiempo se instaló junto con la reforma de la depuradora el emisario submarino (Veu de Sóller 1990b). Este consiste en un conducto situado a unos 40 metros de profundidad alejado del puerto (Veu de Sóller 1989), mediante el cual se liberan al mar los contaminantes residuales de la depuradora con el fin de que no lleguen a la costa. El agua liberada por el emisario está previamente tratada por la depuradora. Esto se ve reflejado en un aumento del índice Ils de 0.70 a 1.96 en 2001. El porcentaje del morfotipo D* descendió hasta un 13%, al igual que el morfotipo A* que continuó disminuyendo hasta un 3%. En cambio, en este año muestran los resultados que el morfotipo B* aumentó hasta un 77%. Ésta subida en el porcentaje de formas D* en 2001 pueden ser debido a diversas causas:

- ☉ A la disminución de especies oportunistas del morfotipo D* y a un aumento de materia orgánica disuelta, ya que hasta entonces la depuradora solo disponía de un tratamiento primario de aguas.
- ☉ Un sesgo en la observación de especies. La identificación de organismos fue realizada por estudiantes y algunas especies como *Nubecularia lucifuga* DeFrance, 1825 y *Nubecularia massutiniana* Colom 1946 (morfotipo A*) abundantes en *P. oceanica* es fácilmente confundible debido a su morfología.
- ☉ Fase inicial en la recolonización de la pradera. El muestreo se realizó a finales de verano principios de otoño, por lo que la pradera pierde las hojas y disminuye la proporción del morfotipo A* y SB a causa de la pérdida de sustrato para fijarse. Las especies dominantes en este muestreo fueron *Rosalina globularis* d'Orbigny, 1826 y *Rosalina mediterraneensis* d'Orbigny 1826 indicativas de un principio de recuperación del ecosistema (Murray 2006). Además, los resultados del número de especies oportunistas (morfotipo D* y *Ammonia beccarii*) no llegaron al 5% de abundancia por lo que el género Rotaliida pudo ocupar un mayor número de nichos ecológicos y aumentar el número de especies durante este periodo de tiempo.

Del 2001 al 2014 la calidad del agua residual liberada en el puerto de Sóller se mejoró. En 2006 se reformó la depuradora permitiendo que realizase el tratamiento secundario (García 2006), disminuyendo así el contenido de materia orgánica gracias a la oxigenación aeróbica del tratamiento biológico. En 2008 se amplió la depuradora para almacenar un mayor volumen de agua y realizar el tratamiento terciario (Sa veu 2008) que permite

garantizar la vuelta del agua a su ciclo natural en unas condiciones similares a las naturales y generar así el mínimo impacto. Atendiendo a los resultados obtenidos en 2014, parece haber una respuesta positiva en el entorno, tanto el índice IIs como el FORAM index' han doblado su valor desde el 2001 (3.33 y 4.63 respectivamente). El morfotipo B* ha disminuido considerablemente a un valor de 25% y el morfotipo A* se ha incrementado hasta un 36%. Por lo que se observa una recuperación ecológica de la zona del litoral en 25 años gracias al emisario y a las mejoras de saneamiento de las aguas residuales liberadas en el puerto de Sóller.

Para resumir, junto al crecimiento del sector turístico se ha producido un incremento de residuos y vertidos domésticos. En el periodo de los años 60-90 la depuración de las aguas era más bien una función estética hacia el turismo, ya que la liberación de estas aguas residuales al medio marino era directa, afectando a la estética del turismo de sol y playa de Mallorca, por lo que la calidad ambiental del agua descendió considerablemente como muestran los resultados. Actualmente, en el siglo XXI ha tomado fuerza la lucha por la conservación del medio marino pues se ve afectado gravemente por los impactos antrópicos, sobre todo a nivel costero debido a vertidos de aguas contaminadas, construcciones de hoteles, barcos pesqueros y recreativos y la remodelación del litoral entre otros. En este estudio se ha visto como a partir de la instauración de la depuradora y del emisario submarino así como las diversas ampliaciones de la depuradora del Puerto de Sóller, permiten mejorar la calidad ambiental del ecosistema favoreciendo a las comunidades de organismos epífitos y a la pradera de Posidonia hasta un buen estado ambiental.

CONCLUSIONES

- 🌐 Se confirma el uso de los foraminíferos epífitos como bioindicadores mediante los índices IIs y FI'.
- 🌐 El análisis de las comunidades de foraminíferos epífitos, desde la década de los 60 hasta la actualidad, permite distinguir fases de regresión y recuperación en el estado de salud de la pradera de Posidonia.
 - Regresión: Desde 1960 hasta 1990.
 - Recuperación: Desde 1990 hasta la actualidad.
- 🌐 Estas fases coinciden con el boom turístico (regresión) y la construcción del emisario submarino y la instalación de la depuradora de Son Puça (recuperación).
- 🌐 La recuperación de los últimos 25 años parece indicar que el funcionamiento de la depuradora ha sido efectivo.

REFERENCIAS

- Abril Duro, A.M., 1993. *Los foraminíferos bentónicos del litoral balear y su actividad biológica en el ecosistema posidonícola*.
- Ángel, M. et al., 2011. Distribución y abundancia de tanatocenosis de foraminíferos bentónicos submareales en el delta del río Colorado. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(3), pp.445-458.
- Auditoria ambiental de Sóller, 2010. Diagnosi ambiental de Sóller. *Agenda 21 Local de Sóller*, 2, pp.1-74.
- Bash, E., 2015. Clima mediterráneo costero: Palma de Mallorca. *Instituto Geográfico Nacional*, 1, p.1.
- Bellier, J.-P., Mathieu, R. & Granier, B., 2010. *Short Treatise on Foraminiferology (Essential on modern and fossil Foraminifera)* Département. J.-P. Bellier & R. Mathieu, eds., France: Université de Bretagne Occidentale.
- Calonge, A., Caus, E. & García, J., 2001. Los Foraminíferos: Presente Y Pasado. *Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra*, 9(2), pp.144-150.
- Le Calvez, J. & Le Calvez, Y., 1958. Répartition des foraminifères: Sans la Baie de Villefranche. En *Annales de L'institut océanographique*. pp. 156-234.
- Centro Balear de Biología Aplicada SL (CBBA), 2008. Análisis detallado de presiones en aguas costeras de las Islas Baleares. , pp.1-178.
- Cimerman, F. & R. Langer, M., 1991. *Mediterranean foraminifera*,
- Colom, G., 1974. *Introducción al estudio de las especies bentónicas recientes*,
- Consell de Mallorca, 2007. Descripció de l'entorn físic. *Agenda 21 Local de Sóller*, (1).
- Consell Insular de Mallorca, 1991. Port de Sóller. *Gran Enciclopedia de Mallorca*, p.vol. 17 13-21.
- Conselleria de Medi Ambient, 2008. Estudi d'implementació de la Directiva Marc de l'Aigua en Balears: Avaluació de la qualitat ambiental de les masses d'aigua costeres utilitzant indicadors i índexs biològics. , pp.1-148.
- CSIC & Direcció General Recursos Hídrics, 2007. Implementació de la Directiva Marc de l'Aigua a les Illes Balears: Avaluació de la qualitat ambiental de les masses d'aigua costaneres utilitzant les macroalgues i els invertebrats bentònics com a bioindicadors. , pp.1-255.
- Ecologistas en acción, 2009. Banderas Negras 2009 La crisis, una oportunidad para la costa. En *Informe de Ecologistas en Acción*. pp. 1-183.
- García, L., 2006. La nova depuradora ja pot fer el tractament secundari de tota la Vall. *Setmanari d'informació local de Sóller*.
- Goldstein, S.T., 1999. Foraminifera: A biological overview. En Sen Gupta & K. Barun, eds. *Modern Foraminifera*. Kluwer Academic Publishers, pp. 37-55.
- González-Regalado, M.L., 1989. Estudio sistemático de los foraminíferos bentónicos de las arenas fosilíferas del plioceno de huelva: su significado paleológico. *Estudios geológicos*, 45, pp.101-119.
- Gooday, A.J. et al., 2003. The evolution of early Foraminifera. *PNAS*, 100(20), pp.11494-11498.
- Google (s.f.), 2016. Mapa del Puerto de Sóller. Available at: <https://www.google.es/maps/>.
- Sen Gupta, B.K. & Machain-castillo, M.L., 1993. Benthic foraminifera in oxygen-poor habitats. *Marine Micropaleontology*, 20, pp.183-201.

- Sen Gupta & Barun, K., 1999. Systematics of modern Foraminifera. En Sen Gupta & K. Barun, eds. *Modern Foraminifera*. Kluwer Academic Publishers, pp. 7-36.
- Hallock, P. et al., 2003. Foraminifera as bioindicators in coral reef assessment and monitoring: the FORAM Index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 81, pp.221-238.
- Hallock, P., 1999. Symbiont-bearing Foraminifera. En Sen Gupta & K. Barun, eds. *Modern Foraminifera*. Kluwer Academic Publishers, pp. 123-139.
- Hansen, H.J., 1999. Shell construction in modern calcareous Foraminifera. En K. Barun & S. Gupta, eds. *Modern Foraminifera*. Kluwer Academic Publishers, pp. 57-70.
- Hayward, B., 2001. World Register of Marine Species. Available at: <http://www.marinespecies.org> [Accedido marzo 6, 2016].
- Langer, M.R., 1993. Epiphytic foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 20(3-4), pp.235-265. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037783989390035V>.
- Lee, J.J. et al., 1991. Nutritional and related experiments on laboratory maintenance of three species of symbiont-bearing, large foraminifera. *Marine Biology*, 109(3), pp.417-425.
- Marbà, N., Duarte, C. & Tovar, A., 2007. Implementació de la Directiva Marc de l'Aigua a les Illes Balears: Avaluació de la qualitat ambiental de les masses d'aigua costaneres utilitzant indicadors i índex biològics. Element biològic de qualitat: Posidonia oceanica. , pp.1-80.
- Mateu, G., 1970. Estudio sistemático y bioecológico de los foraminíferos vivientes en los litorales de Cataluña y Baleares. *Trabajos del Instituto Español de Oceanografía*, 38, pp.1-85.
- Mateu, G. et al., 2001. Foraminífers posidonícoles com indicadors ambientals del Port de Sóller. *III Jornades del Medi Ambient de les Illes Balears*, pp.194-200.
- Mateu-Vicens, G. et al., 2010. Comparative Analysis of Epiphytic Foraminifera in Sediments Colonized By Seagrass Posidonia Oceanica and Invasive Macroalgae Caulerpa Spp. *The Journal of Foraminiferal Research*, 40(2), pp.134-147.
- Mateu-Vicens, G., Khokhlova, A. & Sebastian-Pastor, T., 2014. Epiphytic Foraminiferal Indices As Bioindicators in Mediterranean Seagrass Meadows. *Journal of Foraminiferal Research*, 44(3), pp.325-339. Available at: <Go to ISI>://WOS:000339932700007.
- Murray, J.W., 2007. Biodiversity of living benthic foraminifera : How many species are there ? *Marine Micropaleontology*, 64, pp.163-176.
- Murray, J.W., 2006. *Ecology and Applications of Benthic Foraminifera*, Cambridge. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84929719744&partnerID=tZOtx3y1>.
- Pawlowski, J. et al., 2001. Molecular Identification of Algal Endosymbionts in Large Miliolid Foraminifera: 2. Dinoflagellates. *Journal Eukaryotic Microbiology*, 48(3), pp.368-373.
- Pawlowski, J. & Holzmann, M., 2008. Diversity and geographic distribution of benthic foraminifera : a molecular perspective. *Biodivers Conserv*, 17, pp.317-328.
- Pawlowski, J. & Holzmann, M., 2002. Molecular phylogeny of Foraminifera – a review. *Europea Journal of Protistology*, 38, pp.1-10.
- Pawlowski, J.A.N. et al., 2001. Molecular Identification of Algal Endosymbionts in Large Miliolid Foraminifera: 1. Chlorophytes. *Journal Eukaryotic Microbiology*, 48(3), pp.362-367.
- Puig, J.L., 2009. Sóller: la platja de Can Repic. *III Jornades d'Estudis Locals a Sóller*, pp.187-208.
- Sa veu, 2008. La Conselleria de Medi Ambient millora a la xarxa de sanejament de Sóller. *Sa veu*.

- Sgarrella, F. & Moncharmont Zei, M., 1993. Benthic foraminifera of the Gulf of Naples (Italy): Systematics and autoecology. *Bolletino della Società Paleontologica Italiana*, 32(2), pp.145-265.
- Veü de Sóller, 1992. IBASAN aporta els 200 milions de la depuradora. *Veü de Sóller*, p.1.
- Veü de Sóller, 1989. L'emissari submarí hauria d'estar a una profunditat major de 40 metres. *Veü de Sóller*, p.7.
- Veü de Sóller, 1990a. La platja de Sóller presenta problemes de contaminació. *Veü de Sóller*, p.1.
- Veü de Sóller, 1990b. La prolongació de l'emissari ja és un fet. *Veü de Sóller*, p.1.
- Veü de Sóller, 1986. Un emisario averiado por el vendaval sigue contaminando el agua del Port. *Veü de Sóller*, p.1.
- Yanko, V., Arnold, A.J. & Parker, W.C., 1999. Effects of marine pollution on benthic Foraminifera. En Sen Gupta & K. Barun, eds. *Modern Foraminifera*. Kluwer Academic Publishers, pp. 217-235.