

## **ANÁLISIS DE LOS VECTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN LA CALIDAD DEL MEDIO EN LA BAHÍA DEL FANGAR (DELTA DEL EBRO) MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG**

GENNI ARCHETTI<sup>1</sup>, SARA BERNIA<sup>2</sup> y MONTSERRAT SALVÀ-CATARINEU<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Tecnoambiente, S.L. C/ Industria, 550-552 Badalona (Barcelona), España.

<sup>2</sup> OFITECO, S.A. C/ Guzmán el Bueno, 133 Pral. 1 Madrid, España.

<sup>3</sup>Dep. de Geografía Física i AGR, Universitat de Barcelona, España.

### **RESUMEN**

La bahía del Fangar constituye un sistema ecológico complejo, influenciado por numerosos vectores ambientales, los cuales pueden regular a diferentes niveles los procesos productivos y la calidad ecológica de la bahía. Este trabajo pretende identificar los vectores ambientales que más influencia tienen sobre las componentes del medio de la bahía para definir las bases sobre las cuales se tendrán que fundar las futuras propuestas de gestión focalizadas hacia una mejora del estado ecológico del medio y de los niveles de producción del mejillón. Para ello, a partir de los resultados obtenidos en la campaña oceanográfica llevada a cabo en el verano de 2009, se ha realizado un estudio geoestadístico mediante herramientas SIG y se ha analizado el patrón de distribución de los principales contaminantes en la bahía en relación a algunos de los vectores ambientales que más influencias tienen sobre el estado ecológico de este entorno natural. Los resultados de este estudio muestran, como las bases sobre las cuales tendrán que fundarse las futuras propuestas de gestión de la bahía del Fangar para garantizar una general mejora de su estado ecológico y de su capacidad productiva, se tendrán que centrar en la modificación de la dinámica morfosedimentaria de la bahía, la cual, actualmente, genera una acumulación de sedimento rico en materia orgánica y otros compuestos en el interior del sistema, reduciendo la tasa de renovación de la misma y limitando su capacidad productiva y por tanto su capacidad ecológica.

Palabras clave: bahía del Fangar, SIG, dinámica morfosedimentaria, producción de mejillón, capacidad de carga.

### **GIS ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL VECTORS AFFECTING THE ENVIRONMENTAL QUALITY IN THE FANGAR BAY (EBRO RIVER DELTA)**

#### **ABSTRACT**

The Fangar bay is a complex ecosystem influenced by numerous environmental vectors that regulate the productivity and the ecological quality of the bay. The aim of the present study was to

identify the key environmental vectors that show the main influence on the different components of the ecosystem. The objective was to define the basis for the future management tasks towards a better ecological quality and mussel production in the bay. The oceanographic campaigns were carried out in the summer of 2009. Subsequently, the collected data was analyzed geo-statistically by means of a GIS- tool in order to determine the distribution pattern of the main pollutants in the bay. The distribution of the pollutants was then related the key environmental vectors that showed the major influence on the ecosystem. The results of this study show that the future management project will have to base on the modification of the sediment dynamic to guarantee a general improvement of the ecological condition and the productive capacity of the bay.

Keywords: Fangar bay, GIS, sediment dynamics, mussel's production, carrying capacity.

## 1. Introducción

La bahía del Fangar, ubicada en el hemidelta norte del río Ebro, constituye un sistema semicerrado y comunicado con el mar a través de un canal de aproximadamente 1,5 km de amplitud entre la *Gola de la Bassa de les Olles* y la *Punta del Fangar*. Se trata de un sistema ecológico complejo, influenciado por numerosos vectores ambientales, los cuales pueden regular a diferentes niveles los procesos productivos y la calidad ecológica de la bahía.

A lo largo de este trabajo se analizará el efecto que algunos vectores ambientales como los desagües, la dinámica morfosedimentaria de la zona y los cultivos de mejillón, tienen sobre el estado ecológico de la bahía y la calidad de sus principales componentes ambientales (agua, sedimento y comunidades bentónicas).

En cuanto a los efectos de los aportes de aguas dulces, Delgado y Camp (1987) constataron la influencia de este vector ambiental sobre el estado trófico y el nivel de productividad primaria de esta área, observando concentraciones más elevadas de nutrientes inorgánicos en asociación a valores de salinidad más bajos. En este trabajo se comprobará la importancia del aporte de agua dulce procedente de los desagües localizados a lo largo de la bahía sobre la calidad del agua superficial del ámbito de estudio y se identificará la zona concreta de su influencia.

En referencia a la dinámica morfosedimentaria, los procesos implicados son ampliamente conocidos a causa de la densidad de trabajos de índole geológica realizados en esta zona en las últimas tres décadas. A partir de la primera monografía geológica y sedimentológica del Delta, realizada por Maldonado en 1972, se desarrollaron numerosos trabajos, estudios e informes del mismo Maldonado y colaboradores, profundizando estas temáticas, hasta las investigaciones más recientes que focalizaron sobre aspectos aplicados de la dinámica fluvial (Serra *et al.*, 1990, Guillén *et al.*, 1992) y evolución costera (Jiménez *et al.*, 1991, Serra & Riera, 1993) entre otros. En este trabajo se analizarán por un lado los resultados procedentes de la modelización de las corrientes obtenidos a partir del sistema de modelado tridimensional MOHID y por otro lado los valores de las tasas de sedimentación calculadas a través de las trampas de sedimento fondeadas en la zona de estudio. Además, los resultados obtenidos se compararán con el patrón de distribución de las concentraciones de algunos metales pesados, porcentaje de materia orgánica y finos presentes en los

Archetti, G., Bernia, S., Salvà-Catarineu, M. (2010): "Análisis de los vectores ambientales que afectan la calidad del medio en la bahía del Fangar mediante herramientas SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 252-279. ISSN: 1578-5157

sedimentos que componen los fondos marinos de este ámbito costero para comprobar cómo la dinámica morfosedimentaria afecta a los componentes del medio y en particular a los sedimentos.

Por último, se considerará el efecto de la actividad acuícola sobre la calidad del medio, en particular el cultivo del mejillón (*Mytilus galloprovincialis*) mediante bateas fijas o mejilloneras, que viene desarrollándose desde hace tiempo en la bahía del Fangar y que consta de una producción media de 700 t/año. Para cuantificar este efecto, se evaluará la capacidad de carga productiva y ecológica de la bahía sobre la base de los datos adquiridos en la campaña oceanográfica llevada a cabo en los meses de julio y agosto de 2009. Esta línea de análisis difiere de los numerosos trabajos anteriores, los cuales se centraron sobre todo en los procesos de crecimiento de *Mytilus galloprovincialis* en esta área, como en el caso de Lleti y Riera (1992) o de Ramón *et al.* (2003).

La exhaustiva información actual permite tener un conocimiento preciso de las características principales de este entorno natural, sin embargo, a través de este trabajo se pretende llevar a cabo un análisis de los componentes del medio y de los vectores ambientales que lo afectan para identificar las relaciones existentes entre todos los factores considerados en este ámbito.

## 2. Objetivos

El objetivo principal del estudio es identificar, a través de las herramientas SIG, los vectores ambientales (todos aquellos factores presentes en el medio que pueden generar una alteración de sus componentes) que más influencia tienen sobre las componentes del medio de la bahía del Fangar para definir las bases sobre las cuales se tendrán que fundar las futuras propuestas de gestión focalizadas hacia una mejora del estado ecológico del medio y de los niveles de producción del mejillón.

Para alcanzar este objetivo se han llevado a cabo una toma de datos dirigidos hacia la obtención de la información necesaria para describir el estado actual tanto de las componentes del medio estudiado, a través del estudio batimétrico, de la calidad de las agua y de los sedimentos, como de los vectores ambientales que lo afectan de forma directa, mediante el inventario de los vertidos procedentes de los canales de riego, el análisis de la dinámica morfosedimentaria y la definición de la carga productiva y ecológica de la bahía.

## 3. Ámbito de estudio

La zona de estudio se ubica a la izquierda hidrográfica del río Ebro y concretamente en la bahía del Fangar localizada en el hemidelta norte del río. Esta área está delimitada externamente por la punta del Fangar, la cual se origina a partir del siglo XVIII, momento en el que el lóbulo septentrional ya no era funcional y era remodelado por los agentes marinos ([figura 1](#)).

La superficie de investigación ocupa un área de aproximadamente 120 ha y un volumen de  $16 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . El perfil batimétrico de los fondos submarinos de esta zona se caracteriza por pendientes muy suaves y una profundidad máxima de 4,2 m.

#### 4. Metodología

Los datos utilizados tanto para la descripción de las componentes del medio (aguas, sedimentos y estudio batimétrico) como para la caracterización de los vectores ambientales que afectan el estado ecológico de la bahía del Fangar proceden de la campaña marina llevada a cabo por la empresa Tecnoambiente, S.L. sobre encargo de la Dirección General de Costas en los meses de julio y agosto de 2009.

Durante esta campaña se realizaron varios trabajos: se recogieron muestras de agua y de sedimento superficial para la caracterización de la calidad fisicoquímica y de las comunidades bentónicas del medio, se fondearon y posteriormente se recuperaron unas trampas de sedimento para la valoración de la tasa de sedimentación de la zona y finalmente se registraron los datos batimétricos de los fondos submarinos<sup>1</sup>.

##### 4.1. Descripción de las componentes del medio

En primer lugar, para obtener una descripción exhaustiva del la zona de investigación, se llevó a cabo un estudio geoestadístico de los resultados procedentes de los análisis realizados en laboratorio y de los datos batimétricos adquiridos en campo mediante la ecosonda Sonarmite HPR de OHMEX para determinar la direccionalidad espacial de los fenómenos a examinar y poder representar su distribución en el ámbito de estudio, minimizando el error en las ecuaciones de interpolación. A través del *Geostatistical Analyst* de ArcGIS 9.3 se ha analizado el variograma experimental de cada uno de los parámetros considerados y se ha observado la variación de sus propiedades con respecto a la distancia y a la dirección, pudiendo de esta manera determinar las características anisotrópicas de los datos y definir el variograma experimental que mejor se ajusta a las condiciones reales presentes en el medio.

En concreto, para la representación de los datos procedentes del estudio batimétrico de los fondos de la bahía se ha aplicado un kriging universal con variograma direccional y modelo lineal. En cuanto a la calidad de las aguas marinas, la distribución espacial de las concentraciones de los parámetros considerados se ha realizado mediante kriging universal con variograma direccional y modelo esférico. Por último, en el caso de los sedimentos, se ha implementado un kriging universal con variograma direccional y modelo esférico para interpolar los resultados obtenidos en laboratorio a partir del análisis de las muestras recogidas en campo.

La evaluación de la calidad de los variogramas experimentales se ha realizado mediante la validación cruzada comparando los valores medidos en los puntos de muestreo y los valores equivalentes estimados por el modelo geoestadístico aplicado para los mismos puntos.

Una vez obtenidos los mapas de las distribuciones de la concentración de los parámetros considerados para la caracterización de la calidad de las aguas y de los sedimentos de la bahía, se ha llevado a cabo la selección de aquellas áreas de discontinuidad en relación a los valores obtenidos en el análisis de laboratorio mediante la herramienta *Raster Calculator*.

#### 4.2. Descripción de los vectores ambientales

A diferencia de la metodología seguida para llevar a cabo la descripción de las componentes del medio, en el caso de los vectores ambientales los procedimientos metodológicos han sido específicos para cada vector en análisis (desagües de agua dulce, dinámica morfosedimentaria y producción de mejillón).

En primer lugar, el inventario de los puntos de vertido procedentes de los canales de desagüe y de los humedales naturales presentes a lo largo de la bahía se ha llevado a cabo mediante la digitalización de estos puntos a partir de las ortofotografías a escala 1:5000 del *Institut Cartogràfic de Catalunya*.

En segundo lugar, para desarrollar una descripción lo más exacta posible de la dinámica morfosedimentaria de la bahía del Fangar, se han implementado los datos batimétricos, de corrientes y de mareas, en un sistema de modelado, MOHID<sup>2</sup>. Con el objetivo de completar la descripción de la dinámica morfosedimentaria de la bahía del Fangar se ha calculado la tasa de sedimentación y el porcentaje de materia orgánica acumulada a lo largo de 10 estaciones en las cuales se fondearon durante 58 días unas trampas de sedimento.

Por último, para definir el efecto de la actividad de producción de mejillones sobre la calidad ecológica de la bahía del Fangar se llevó a cabo el estudio de la capacidad de carga tanto desde el punto de vista productivo, focalizado a obtener el máximo rendimiento económico con las condiciones fisicoquímicas de la zona del emplazamiento del cultivo, como desde el punto de vista ecológico, cuyo fin es maximizar la producción minimizando los cambios ecológicos debidos al cultivo.

Para el estudio de la capacidad de carga, desde el punto de vista productivo, se utilizó el modelo FARM (Farm Aquaculture Resource Management, Ferreira *et al.*, 2007; Ferreira *et al.*, 2009). Este modelo simula procesos productivos, integrando una serie de parámetros físicos y químicos, como la temperatura media anual del agua, velocidad de las corrientes, dimensiones de los cultivos, concentración de la clorofila, materias en suspensión con su fracción orgánica y el oxígeno disuelto. Todos estos parámetros se calcularon experimentalmente en las campañas realizadas en la bahía del Fangar entre agosto y septiembre de 2009. Sin embargo además de estos datos, se utilizaron datos bibliográficos, para contrastar o complementar los resultados experimentales de corrientes, temperatura y clorofila (López & Arté, 1973; Delgado & Camp, 1987).

Por otro lado, el estudio de la capacidad de carga ecológica se realizó mediante el análisis de los resultados de la caracterización macrobentónica de la bahía del Fangar. El desarrollo de esta parte del estudio resulta necesario para asegurar el mantenimiento de la biodiversidad y la productividad del ecosistema, que por otro lado repercute en la viabilidad económica del cultivo.

Uno de los efectos más evidentes de los cultivos de bivalvos es el aumento de la cantidad de materia orgánica en el sedimento procedente de la biodeposición. Las consecuencias de este aumento son varias y dependientes de la localización del emplazamiento. En general el aumento de

materia orgánica en el sedimento determina un aumento de la mineralización con un elevado consumo del oxígeno disuelto en el sedimento. Si estas condiciones permanecen durante mucho tiempo, la cantidad de oxígeno experimentará una notable disminución y los fondos irán hacia una condición de hipoxia. La condición de hipoxia, que determina cambios importantes en los procesos que regulan el funcionamiento de la comunidad macrobentónica, lleva hacia una simplificación de las relaciones ecológicas con una sustitución de las especies normalmente presentes, con especies oportunistas y con ciclos de vida breves.

Contrariamente a la capacidad de carga productiva, hoy en día no existen modelos capaces de evaluar y predecir la capacidad de carga ecológica de una determinada zona donde se haya desarrollado el cultivo de mejillones. Actualmente la mayoría de estudios tienen como objetivo analizar los procesos biogeoquímicos que se ven alterados por la bio-deposición procedente de los cultivos de mejillones, a pesar de que estos procesos tienen como principal consecuencia una alteración de la macrofauna bentónica. Siguiendo la propuesta de McKindsey *et al.* (2006), la capacidad de carga ecológica se evaluó como la capacidad de carga productiva que genera cambios aceptables en los vectores ambientales considerados ([figura 2](#)), que en este análisis fue la macrofauna bentónica. Por ello en el presente estudio se definieron "aceptables" aquellos cambios que no determinan variaciones estructurales en la comunidad macrobentónica. Para cuantificar estos cambios estructurales se utilizó el índice AMBI<sup>3</sup> convertido a un grado de aceptabilidad que utiliza la misma escala ([tabla 1](#)). El umbral de aceptabilidad se ha establecido con la detección de especies indicadoras de contaminación en la comunidad macrobentónica, que reflejan cambios regresivos en la comunidad estudiada.

## 5. Resultados

### 5.1. Descripción de las componentes del medio

En este apartado se presentan los resultados procedentes de la caracterización de las componentes del medio. En primer lugar se describe la orografía de los fondos de la bahía, en segundo lugar se detalla la calidad de las aguas superficiales y por último se define la calidad de sedimentos superficiales que conforman los fondos submarinos de la zona de estudio.

#### 5.1.1. Estudio batimétrico

A partir del estudio geoestadístico de los datos obtenidos *in situ*, desde la embarcación y desde tierra, ha sido posible determinar la conformación de los fondos marinos de la bahía del Fangar.

Esta información resulta imprescindible para llevar a cabo una descripción completa y exhaustiva de la zona en estudio. Por otro lado, el conocimiento detallado de la conformación actual del lecho marino ha sido fundamental para el desarrollo del modelado tridimensional MOHID y para el estudio del régimen de propagación del oleaje. De hecho, la dirección de propagación y la

velocidad de las corrientes son el producto tanto de la intensidad de los vientos dominantes y de la mareas como de la conformación de los fondos submarinos estudiados (presencia de un talud, posibles obstáculos, pendientes que caracterizan los fondos, etc.).

En general, a partir de la conformación de los fondos submarinos, la bahía del Fangar se puede subdividir en tres áreas:

1. La zona más somera, entre la línea de costa y la curva batimétrica de -1 metro, caracterizada por pendientes muy suaves. En este tramo costero interior a la bahía se destaca la presencia de áreas parcialmente inundadas, debido a la dinámica costera que favorece la acumulación de sedimentos en zonas concretas, como en la *Punta del Fangar*, o en la franja marina ubicada frente a *Lo Goleró* o en el *Racó del Fangar*, donde las condiciones hidrodinámicas favorecen el crecimiento de vegetación halófila.
2. El área comprendida entre -1 y -3 metros de profundidad, que representa una zona de transición entre el área más somera y la más profunda de la bahía. Por un lado, se destaca la presencia de un área de mayor pendiente, ubicada frente a la *Punta del Fangar*, donde a causa de las características batimétricas de los fondos submarinos se conforma un canal de conexión e intercambio de agua entre el interior y el exterior de la bahía. Y por otro lado, se observa como la mayor parte de las bateas se distribuyen a lo largo de esta zona, en particular en su extremo más meridional entre las batimétricas de -1 y -3 metros.
3. La zona más profunda, entre las curvas batimétricas de -3 y -4 metros, ubicada en el centro de la bahía. También en esta área las pendientes son muy suaves y es en esta área donde se registra la profundidad máxima de - 4,2 metros.

#### 5.1.2. Caracterización de la calidad de las aguas superficiales

En referencia a la calidad de las aguas marinas, en los párrafos a continuación se detallan los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros considerados y el patrón de distribución de las concentraciones detectadas a lo largo de la zona de estudio.

En primer lugar se ha determinado la conductividad de las muestras. En general el agua de mar presenta una elevada conductividad eléctrica (alrededor de 50.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), a la que contribuyen la polaridad del agua y la abundancia de iones inorgánicos disueltos. La conductividad varía sobre todo con la temperatura y la salinidad (a mayor salinidad, mayor conductividad), y su medición permite, una vez controlada la temperatura, conocer la salinidad. El resultado de la interpolación obtenida con el modelo geoestadístico aplicado ([figura 3](#)) muestra valores de conductividad a 25°C que varían entre 30.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 48.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con mínimos localizados en proximidad de la línea de costa entre el puerto del Fangar y el canal de desagüe de *Lo Goleró*.

En segundo lugar, en laboratorio se ha llevado a cabo la determinación de la concentración de cloruros. El cloro, juntamente con el sodio, es uno de los constituyentes fundamentales del agua del mar y se encuentra mayoritariamente en forma de cloruro de sodio que se conoce como la sal

común, representando el 80% de las sales en solución en las aguas marinas. Por este motivo, como en el caso de la conductividad, la concentración de cloruros está estrechamente relacionada con su salinidad, siendo los valores normales de este ión en aguas marinas alrededor de 20.000 mg/l. En las aguas superficiales de la bahía del Fangar se han detectado concentraciones de cloruros ligeramente inferiores a este valor de referencia ([figura 3](#)) que, de todas maneras, corresponden a valores normales para aguas estuáricas (entre 10.000 y 18.000 mg/l). Por otro lado, tal y como se ha observado en el caso de la conductividad, las concentraciones de cloruros crecen de forma progresiva alejándose de la zona costera ubicada en las proximidades del puerto del Fangar, donde se registran los valores más bajos para este parámetro.

En tercer lugar, sobre las muestras recogidas en la campaña marina se llevó a cabo el análisis de los sulfatos. La concentración de los iones sulfato en el agua de mar suele ser elevada y se encuentra generalmente alrededor de los 2.700 mg/l, mientras que en las aguas continentales este valor es sensiblemente inferior, variando entre 2 y 500 mg/l. En la zona de estudio, las concentraciones de sulfatos son propias de un área de estuario, con influencias procedentes de las aguas continentales, variando entre un mínimo de 1.400 mg/l y un máximo de 2.000 mg/l ([figura 3](#)). Además, el patrón de distribución de la concentración de este parámetro a lo largo de la bahía del Fangar presenta una configuración similar a la obtenida en el caso de la conductividad y de los cloruros, con la identificación de una zona con características más próximas a aguas dulces que marinas, la cual se ubica en las proximidades del puerto del Fangar.

Por último, se determinó la concentración de silicatos presentes en las muestras de agua marina. La concentración de silicatos en agua de mar superficial es generalmente baja, aunque aumenta con la profundidad llegando a valores de 1-5 mg/l. La presencia de este elemento en las aguas marinas deriva mayoritariamente de los aportes procedentes de los ríos, donde se llevan a cabo los procesos de meteorización de las rocas, por acción combinada del agua y del CO<sub>2</sub> atmosférico, seguido del arrastre por la lluvia hasta los ríos y el mar. En la bahía del Fangar ([figura 3](#)), en la zona compresa entre el puerto del Fangar y el desagüe de *Lo Golero* y en frente al punto de vertido del canal procedente de la *Bassa de les Olles* se registran concentraciones de silicatos más elevadas (alrededor de 2,5 mg/l) respecto al resto de la bahía, donde se observan valores alrededor de 0,3 mg/l.

A partir de los mapas procedentes de las interpolaciones realizadas con los resultados de laboratorio, se puede constatar una tendencia muy parecida en el patrón de distribución de las concentraciones en todos los parámetros considerados. En general se observan valores muy homogéneos a lo largo de toda la bahía y se destaca la presencia de una zona de discontinuidad que, en todos los casos examinados, se encuentra ubicada entre el puerto del Fangar y el desagüe de *Lo Golero*. En este ámbito las características de las aguas superficiales son más próximas a aguas continentales que a aguas marinas. A través del "Raster Calculator" ha sido posible la identificación espacial de esta zona de discontinuidad, la cual cumple contemporáneamente las siguientes características:

- Conductividad < 38.000 µS/cm
- Cloruros < 15.000 mg/l

- Sulfatos < 18.00 mg/l
- Silicatos > 1 mg/l

De esta manera, se ha definido un área de discontinuidad de 76,8 ha de superficie que presenta características más propias de aguas continentales que de aguas marinas ([figura 4](#)) y que se ubica entre el puerto del Fangar y el canal de *Lo Golero*.

### 5.1.3. Caracterización fisicoquímica de los sedimentos superficiales

Sobre las muestras de sedimentos superficiales recolectadas a lo largo de la zona de investigación se ha llevado a cabo una batería analítica específica para definir su estado ecológico. En primer lugar se ha procedido a la clasificación de los sedimentos que conforman el lecho marino de la bahía del Fangar a partir del tamaño de las partículas (análisis granulométrico). De los resultados obtenidos se puede considerar que los fondos submarinos de la zona de estudio están compuestos mayoritariamente por materiales de granulometría fina (partículas de diámetro inferior a 0,063 mm). En general, aquellos sedimentos caracterizados por modas más ricas en porcentajes finos son los que presentan mayor contenido en materia orgánica y otros contaminantes inorgánicos como los metales pesados, debido a que la fracción de los finos es la que mayor facilidad ofrece a los mecanismos de adsorción de estos compuestos (por disposición de las cargas, morfología de las moléculas, etc.). El porcentaje de finos contenidos en los sedimentos de la bahía del Fangar es bastante elevado, en particular se observa un área ubicada en la bocana de la bahía donde los sedimentos superficiales que conforman el lecho marino de la zona de estudio presenta unas modas más ricas en finos, con valores mayores al 50% ([figura 5](#)).

En segundo lugar, para determinar la calidad de los sedimentos de la zona de estudio, se ha cuantificado su contenido de materia orgánica, que en los sistemas marinos, puede tener un origen exógeno o endógeno. Por un lado la concentración de materia orgánica en los sedimentos puede proceder de aportes continentales como por ejemplo la descarga de canales, la lixiviación de los ríos, el vertido de emisarios submarinos existente a lo largo de la franja costera, etc. Por otro lado, existe una componente interna que genera materia orgánica en el mismo sistema, como por ejemplo el exceso de producción fitoplanctónica o de comunidades vegetales bentónicas, excreciones animales y vegetales, descomposición de organismos, etc. En el caso de la bahía del Fangar, la materia orgánica proviene de ambas fuentes (internas y externas al sistema) y además procede de la actividad de producción de mitílidos: un aporte de materia orgánica que tiene características comunes a las dos fuentes descritas, siendo una fuente externa al sistema originario aunque actualmente forme parte de él. Este aporte adicional genera materia orgánica a partir de las excreciones y descomposición de los individuos muertos que se desprenden bajo los entramados del cultivo o en operaciones de laboreo.

En cuanto a los sedimentos que conforman la bahía del Fangar, las concentraciones de materia orgánica registradas varían entre un mínimo de 1,1% y un máximo de 11%, hecho que excluye la posibilidad de condiciones anóxicas en los sedimentos estudiados. Por otro lado, en referencia al patrón de distribución, tal y como se ha comentado anteriormente, la materia orgánica se adsorbe a las partículas más finas de sedimento y, de hecho, la distribución de este parámetro

sigue la misma tendencia observada por el porcentaje de finos contenidos en los sedimentos de la bahía (figura 5), de manera que se identifica una zona de acumulación de este elemento en la bocana de la bahía.

Por último, se ha determinado la concentración de algunos metales pesados (cadmio, cromo, níquel y zinc) en las muestras de sedimentos recogidas durante los muestreos de julio y agosto de 2009. Las principales fuentes de metales pesados en ámbito marino pueden tener un origen natural, como los derivados de la lixiviación de los minerales, o pueden proceder de aportes contaminantes de origen continental, siendo este último motivo el que constituye sin duda la causa principal. En las aguas con renovación reducida, como es el caso estudiado, las concentraciones pueden incrementarse en relación a las condiciones naturales. Al igual que el resto de sustancias contaminantes, los metales se diluyen fácilmente en el mar y son dispersados por las corrientes y los procesos de mezcla, a la vez que pueden sufrir transformaciones químicas y biológicas. Sus sales presentan en general baja solubilidad, también son proclives a la adsorción de materia orgánica e inorgánica. Lo que hace que tengan tendencia a la sedimentación, acumulándose en los fondos, sobre todo por procesos de adsorción de las partículas finas que conforman los sedimentos.

Para evaluar los resultados obtenidos a partir del análisis de la concentración de los metales pesados en los sedimentos que conforman la bahía del Fangar se han tomado como referencias principales los límites recomendados por el CEDEX en la "Guía metodológica para la elaboración de estudios de impacto ambiental de las extracciones de arenas para la regeneración de playas" (2004) y en las "Recomendaciones para la gestión del material de dragado en los puertos españoles" (1994), así como la información bibliográfica acerca las concentraciones máximas y mínimas de metales pesados halladas en los sedimentos del Delta del Ebro en 1998. A la vista de los resultados obtenidos, se puede afirmar que en todos los casos las concentraciones de metales pesados (cadmio, cromo, níquel y zinc) registradas en las muestras analizadas en laboratorio se encuentran muy por debajo de los valores límites recomendados por el CEDEX.

En cuanto al patrón de distribución de la concentración de los metales pesados analizados se puede observar una tendencia muy parecida para todos los parámetros y de acuerdo a la distribución del contenido en finos y materia orgánica de los mismos sedimentos. De hecho, observando los mapas obtenidos a partir de los análisis geoestadísticos llevados a cabo con los valores detectados en laboratorio, se aprecia como en las proximidades de la bocana de la bahía los sedimentos presentan unas concentraciones más elevadas en cadmio, cromo, níquel y zinc, con máximos de 0,25 mg/kg, 20 mg/kg, 13 mg/kg y 60 mg/kg respectivamente.

De forma general, a partir de los mapas de distribución de las concentraciones de los parámetros analizados, se puede observar un patrón de distribución muy parecido, con valores más elevados en la zona próxima a la bocana de la bahía. Por este motivo, tal y como se ha procedido para la caracterización de las aguas, también en este caso se ha llevado a cabo la selección de un área de discontinuidad con respecto a las características fisicoquímicas de los sedimentos que conforman el lecho marino de la bahía del Fangar a través de la herramienta *Raster Calculator*. En particular, se ha seleccionado aquella zona en la cual la concentración de cada uno de los parámetros considerados es superior a la media de los resultados obtenidos en todas las muestras

*Archetti, G., Bernia, S., Salvà-Catarineu, M. (2010): "Análisis de los vectores ambientales que afectan la calidad del medio en la bahía del Fangar mediante herramientas SIG", GeoFocus (Artículos), n° 10, p. 252-279. ISSN: 1578-5157*

analizadas ([figura 6](#)), o sea aquella zona donde los sedimentos cumplen al mismo tiempo los siguientes parámetros:

- Finos > 21,19 %
- Materia orgánica > 3,24 %
- Zinc > 29,53 mg/kg
- Níquel > 8,78 mg/kg
- Cromo > 10,42 mg/kg
- Cadmio > 0,15 mg/kg

Mediante esta operación ha sido posible identificar una zona de 21,4 ha de superficie, en la cual se acumulan partículas de diámetro inferior a 0,063 mm y a las cuales se asocian tanto porcentajes más elevados de materia orgánica como concentraciones superiores de metales pesados.

## 5.2. Descripción de los vectores ambientales

En este apartado se describen los principales vectores ambientales que determinan el estado ecológico actual de la bahía. En particular se han considerado los vertidos procedentes de los canales de riego, la dinámica morfosedimentaria de la zona de estudio y la producción de mejillones que se realiza desde hace años en esta zona.

### 5.2.1. Canales de riego

En el interior de la bahía del Fangar existen un total de 15 desagües o puntos de vertido de aguas dulces que proceden tanto de actividades relacionadas con la importante actividad agrícola que se desarrolla en el hemidelta norte del Delta del Ebro, como de los múltiples humedales naturales que se encuentran en el Delta. Estos puntos son muy importantes ya que condicionan e influyen en la dinámica física, química y biológica de la bahía (Delgado & Camps, 1987).

A pesar de que no existe un control del volumen de agua dulce que los distintos canales y aliviaderos vierten al interior de la bahía del Fangar, los técnicos de la Comunidad de Regantes de la Margen Izquierda del Delta del Ebro estiman que de forma natural se vierten anualmente entre 155 y 315 hm<sup>3</sup>/año. A estos hay que añadirles los que se vierten de forma artificial, mediante bombeo, unos 315 hm<sup>3</sup>/año, entre los meses de mayo y octubre (durante el cultivo del arroz). En consecuencia aproximadamente se vierten alrededor de 785 hm<sup>3</sup>/año entre mayo y octubre.

En la [figura 7](#) se puede observar la distribución de los 15 desagües a lo largo de la bahía, los cuales se han catalogado a partir de la amplitud de cada uno de ellos en su punto de vertido en la bahía. A partir de los resultados de esta digitalización destacan principalmente dos canales de mayor amplitud: por un lado aquel procedente del humedal natural de *Lo Golero* y por otro lado el canal de riego ubicado en la zona del puerto del Fangar.

### 5.2.2. Dinámica morfosedimentaria

La descripción de la dinámica morfosedimentaria se ha realizado mediante el sistema de modelado tridimensional MOHID para un ciclo completo y a un año vista y también a través de los resultados procedentes de las trampas de sedimentos fondeadas en el área de estudio.

El principal objetivo de la simulación mediante el modelo MOHID ha sido definir una zona de acumulación de sedimento en la bahía, que corresponde con aquella área en la cual la intensidad y velocidad de las corrientes es menor respecto al conjunto del sistema. Por este motivo se han considerado las simulaciones llevadas a cabo por los vientos más frecuentes que, como se puede observar en la rosa de vientos obtenida ([figura 8](#)), son aquellos de componente ENE. A partir de las simulaciones de las corrientes con vientos de esta componente se ha detectado una zona en la bocana de la bahía donde la corriente presenta intensidad muy reducida y se ha procedido a la digitalización de la misma ([figura 9](#)). Como se ha comentado anteriormente se trata de una zona ubicada en el centro de la bocana de la bahía, que una superficie de aproximadamente 67,5 ha.

En cuanto al estudio de la tasa de sedimentación, éste se ha llevado a cabo mediante el fondeo de 10 trampas de sedimento por un periodo de 58 días. A partir de las muestras obtenidas ha sido posible por un lado calcular la tasa de sedimentación en cada uno de los puntos considerados y por otro lado determinar el porcentaje de materia orgánica en cada una de las muestras obtenidas. En referencia a las tasas de sedimentación, en general se han detectado valores más elevados en el exterior respecto al interior de la bahía ([figura 10](#)), siendo la media de los valores observados en el exterior (320 g/m<sup>2</sup>/día) mayor respecto a la media obtenida en el interior de la bahía (250 g/m<sup>2</sup>/día). Además se ha observado un gradiente positivo en la tasa de sedimentación desde el interior hacia el exterior de la bahía ([figura 11](#)), concentrándose los valores más elevados (460-570 g/m<sup>2</sup>/día) en la zona de la bocana. Por último, el contenido de materia orgánica de las partículas sedimentadas a lo largo de los 58 días es mayor en la zona interior de la bahía (9%) que en el exterior (7%), tal y como se puede observar en la [figura 10](#) donde se ha representado la media de los porcentajes de materia orgánica detectados en las trampas.

### 5.2.3. Producción de mejillones

Para determinar el efecto de la producción de mejillones sobre la calidad de la bahía se ha calculado la capacidad de carga productiva y ecológica de este sistema costero.

El estudio de la capacidad de carga productiva, realizado con el objetivo de obtener el potencial productivo de la bahía del Fangar, se ha llevado a cabo implementando la información obtenida de la caracterización fisicoquímica de la columna de agua y con los datos procedentes del estudio de corrientes. Estos datos se han integrado con la información disponible en la bibliografía científica, para obtener una aproximación lo más cercana posible a las condiciones reales de la bahía del Fangar.

En la [tabla 2](#) se detallan los valores implementados en el modelo FARM. Cabe destacar que todos los valores proceden de datos obtenidos en las diferentes campañas de muestreo, con la excepción de la temperatura que se han obtenido de diferentes autores (Delgado & Camp, 1987), dado que el modelo requiere la temperatura media anual.

Los resultados del proceso de modelización llevado a cabo para la bahía del Fangar, indican una carga máxima productiva anual de entre 1.050 y 1.310 toneladas de mejillones. Dichos valores se han confrontado con los valores reales de producción, facilitados por el *Departament d'Agricultura Ramaderia i Pesca* (DARP) de la *Generalitat de Catalunya* y que muestran en la [tabla 3](#). Como se puede observar, en general las producciones reales de los últimos 4 años son inferiores a la carga máxima productiva calculada. En particular, se destaca una caída de casi el 50% en la producción del mejillón *Mytilus galloprovincialis* en 2006, debida básicamente a las altas temperaturas y a un aumento del alga *Girodinium corsicum* (DARP). Por otro lado, se puede apreciar como la producción de 1.177 toneladas registrada en 2008 se aproxima a la carga máxima productiva calculada mediante el modelo FARM.

En cuanto al estudio de la capacidad de carga ecológica, éste se ha realizado con el objetivo de relacionar el nivel productivo con las actuales condiciones ecológicas de la bahía del Fangar que en parte, se ven afectadas por la presencia del cultivo de mejillones.

El estudio de la capacidad de carga ecológica se ha llevado a cabo mediante el análisis de los resultados de la caracterización macrobentónica de la bahía del Fangar siguiendo la propuesta de McKindsey *et al.* (2006) y se ha evaluado como el nivel productivo que genera cambios aceptables en el vector ambiental considerado, que en este caso ha sido el índice AMBI convertido a un índice de aceptabilidad ([tabla 1](#)). Los resultados de la modelización de la carga ecológica, obtenidos utilizando el modelo propuesto por McKindsey *et al.* (2006), indican que la producción del año 2008 determina un grado de aceptabilidad en el interior de la bahía de 4,6, valor próximo al umbral. Sin embargo, un análisis más detallado de los resultados, considerando las diferentes zonas de la bahía donde se ha realizado el muestreo de la macrofauna bentónica ([figura 12](#)), indica que en la proximidad de la bocana y en aquellas zonas afectadas por la salida de los canales de riego, se registra un grado de aceptabilidad igual o inferior a 4, encontrándose por debajo del umbral propuesto.

Los resultados del estudio de la carga ecológica indican que las condiciones ecológicas en el interior de la bahía se encuentran cercanas o por debajo del umbral propuesto. Esta situación refleja la presencia de una comunidad macrobentónica desequilibrada (baja abundancia, baja diversidad específica, escasa diversificación trófica) y con presencia de especies indicadoras de degradación. Cabe destacar que el grado más bajo de aceptabilidad se ha encontrado en proximidad de la bocana ([figura 12](#)), en la zona de mayor deposición de las partículas en suspensión donde se ha observado una notable abundancia de especies oportunistas.

## 6. Discusión y conclusiones

A partir del análisis mediante herramientas SIG de las relaciones existentes entre las componentes del medio y los principales vectores ambientales que afectan el estado ecológico de la bahía del Fangar, se pueden apreciar algunas relaciones significativas entre ambos elementos, como en el caso de la calidad de las aguas superficiales y los vertidos procedentes de los canales de riego presentes a lo largo de la bahía. De hecho, tal y como se ha comentado en el apartado anterior de "Descripción de las componentes del medio", en la bahía se identifica una zona en la cual las aguas superficiales presentan características más próximas de aguas continentales que marinas, en concreto entre el puerto del Fangar y *Lo Golero*. Por otro lado, en el mapa generado a partir de la digitalización de los canales de riego ([figura 7](#)) ha sido posible identificar dos canales con mayor amplitud y probablemente mayor caudal, uno procedente de los humedales naturales de *Lo Golero* y el segundo procedente de los canales de riego que desembocan a la bahía en la zona próxima al puerto del Fangar. Uniendo estas dos capas ([figura 13](#)) se puede apreciar como efectivamente los dos canales de mayor amplitud se ubican en la zona identificada como área de discontinuidad para sus particulares características fisicoquímicas. Por este motivo se puede afirmar que las características de las aguas superficiales de la bahía del Fangar están afectadas por los aportes de aguas dulces por parte de los canales de riego distribuidos a lo largo de toda la bahía y, en especial manera, en el área ubicada entre el puerto del Fangar y el canal de *Lo Golero*.

Por otro lado, en referencia a la calidad de los sedimentos superficiales que conforman los fondos de la zona de estudio, se ha observado la presencia de un área ubicada en la bocana de la bahía en la cual se detectan concentraciones de metales pesados, materia orgánica y finos superiores a la media registrada para cada uno de estos parámetros en el resto del área de investigación ([figura 6](#)). Además, a partir del modelo MOHID, la bocana de la bahía también se ha identificado como una zona caracterizada por corrientes de baja intensidad. Y, tal y como se ha demostrado con el cálculo de las tasas de sedimentación, en esta misma zona se registran valores de sedimentación mayores respecto a las áreas más interiores de la bahía. Representando estos tres resultados en un mapa ([figura 14](#)) se puede identificar una zona caracterizada por corrientes de baja intensidad en la cual se acumulan sedimentos de granulometría más fina asociados a concentraciones superiores de metales pesados. Por este motivo se puede afirmar que la dinámica morfosedimentaria de la bahía regula el patrón de distribución de los sedimentos, acumulando las partículas más finas, a las cuales se asocian concentraciones más elevadas de metales pesados y materia orgánica en la bocana, donde las corrientes presentan una intensidad más reducida respecto al resto de la bahía.

Por último, en cuanto a los efectos de la producción de mejillones sobre la calidad del medio de la bahía del Fangar, a partir de la definición de la capacidad de carga productiva se puede afirmar que la explotación que se está llevando a cabo en la actualidad es muy próxima a los valores de máxima productividad calculados con el modelo FARM y que, por consiguiente, un ulterior incremento de la producción podría llevar a cabo a un impacto negativo sobre las componentes del medio. Por otro lado, el grado de aceptabilidad del estado ecológico evidencia que el nivel de producción global de la bahía se acerca al umbral propuesto, mientras que el análisis detallado pone de manifiesto un grado de aceptabilidad de las condiciones ecológicas inferior a dicho umbral en una parte importante de la bahía. De hecho, una tercera parte de la bahía (400 ha aproximadamente)

Archetti, G., Bernia, S., Salvà-Catarineu, M. (2010): "Análisis de los vectores ambientales que afectan la calidad del medio en la bahía del Fangar mediante herramientas SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 252-279. ISSN: 1578-5157

---

tiene más del 70% de probabilidad de no alcanzar el grado mínimo de aceptabilidad ecológica establecido en 4 ([figura 15](#)).

En conclusión, a partir de las observaciones realizadas mediante la aplicación de las herramientas SIG disponibles en ArcGIS 9.3, se puede afirmar que la capacidad de carga ecológica en una tercera parte de la bahía se acerca al umbral de aceptabilidad para este tipo de aguas y ecosistemas. Esta situación se debe a la deposición constante de materia orgánica en el interior de la bahía así como en la boca de entrada, hecho que provoca un desplazamiento y una modificación en el equilibrio de los ecosistemas característicos de la zona. Por este motivo se puede afirmar que las bases sobre las cuales tendrán que fundarse las futuras propuestas de gestión de la bahía del Fangar para garantizar una mejora de su estado ecológico y de su capacidad productiva, se tendrán que centrar en la modificación de la dinámica morfosedimentaria de la bahía, la cual actualmente genera una acumulación de sedimento rico en materia orgánica y otros compuestos en el interior del sistema, hechos que reducen la tasa de renovación de la misma y limita su capacidad productiva y por tanto su capacidad ecológica.

## Referencias bibliográficas

- Borja, A., Franco, J. y Perez, V. (2000): "A marine biotic index to establish the ecological quality of soft bottom benthos within European estuarine and coastal environments", *Marine Pollution Bulletin*, 40 (2), pp. 1100-1114.
- Camp, J. y Delgado, M. (1987): "Hidrografía de las bahías del Delta del Ebro", *Investigación Pesquera*, 51, pp. 351-369.
- Delgado, M. y Camp, J. (1987): "Abundancia y distribución de nutrientes inorgánicos disueltos en las bahías del Delta del Ebro", *Investigación Pesquera*, 51 (3), pp. 427-441.
- Diaz, R. J. y Rosenberg, R. (1995): "Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna", *Oceanographic and Marine Biology Annual Review*, 33, pp. 245-303.
- Fauchald, K. y Jumars, P.A. (1979): "The diet of worms: a study of polychaete feeding guild", *Oceanographic and Marine Biology Annual Review*, 17, pp. 193-284.
- Ferreira, J.G., Hawkins, A.J.S. y Bricker, S.B. (2007): "Management of productivity, environmental effects and profitability of shellfish aquaculture - the Farm Aquaculture Resource Management (FARM) model", *Aquaculture*, 264, pp. 160-174.
- Ferreira, J.G., Sequeira, A., Hawkins, A.J.S., Newton, A., Nickell, T.D., Pastres, R., Forte, J., Bodoy, A. y Bricker, S.B. (2009): "Analysis of coastal and offshore aquaculture: Application of the FARM model to multiple systems and shellfish species", *Aquaculture*, 289, pp. 32-41.
- Gaston, G.R. (1987): "Benthic Polychaeta of the Middle Atlantic Bight: feeding and distribution", *Marine ecology progress series*, 36, pp. 251-262.
- Gaston, C. y Nasci, J. (1988): "Trophic Structure of Macrobenthic Communities in the Calcasieu Estuary, Louisiana", *Estuaries*, 11 (3), pp. 201-211.
- Gomez-Gesteira, J. L., Dauvin, J.C. y Salvande-Fraga, M. (2003): "Taxonomic level for assessing oil spill effects on soft-bottom sublittoral benthic communities", *Marine Pollution Bulletin*, 46, pp. 562-572.

Archetti, G., Bernia, S., Salvà-Catarineu, M. (2010): "Análisis de los vectores ambientales que afectan la calidad del medio en la bahía del Fangar mediante herramientas SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 252-279. ISSN: 1578-5157

---

- Gray, J.S. (2000): "The measurement of marine species diversity, with an application to the benthic fauna of the Norwegian continental shelf", *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 250, pp. 23-49.
- Guillén, J. y Palanques, A. (1992): "Sediment dynamics and hydrodynamics en the lower course of a river regulated by dams: the Ebro River", *Sedimentology*, 39, pp. 567-579.
- Hill, M.O. (1973): "Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences", *Ecology*, 54, pp. 427-432.
- Jiménez, J., Sanchez, A. A., Garcia, M., Van Overeem, J. y Maldonado, A. (1991): "The Ebro Project: a first sediment budget", *Coastal Sediments*, Seattle, Publ. Am. Soc. Civil Eng., pp. 6-91.
- Krebs, C.J. (1985): *Ecological methodology*. New York, Harper and Row Publishers, 654 pp.
- Kruskal, J.B. (1964): "Non-metric multidimensional scaling: a numerical method", *Psychometrika* 29, pp. 115-129.
- Ibanez, F. y Dauvin, J. C. (1988): "Long term changes (1977 to 1987) in a muddy fine sand Abra alba - Melinna palmata community from the western English Channel", *Marine Ecology Progress Series*, 49, pp. 65-81.
- Lleti, C. y Riera, V. (1992): "Study of mussel growth in "Delta del Ebro" bays", *Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts*.
- Lloris, D. y Messeguer, S. (2008): *Recursos Marins del Mediterrani. Fauna i Flora del Mar Català*. Generalitat de Catalunya. Departament d'Agricultura Ramaderia i Pesca, 239 pp.
- López, J. y Arté, P. (1973): "Hidrografía y fitoplancton del Fangar", *Investigación Pesquera*, 37, pp. 17-56.
- Maldonado, A. (1972): *El delta del Ebro. Estudio sedimentológico y estratigráfico*. Tesis Doct., Universidad de Barcelona, 486 pp.
- McKindsey, C.W., Thetmeyer, H., Landry, T. y Silvert, W. (2006): "Review of recent carrying capacity models for bivalve culture and recommendations for research and management", *Aquaculture*, 261, pp. 541-462.
- Pearson, T.H. y Rosenberg, R. (1978): "Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment", *Oceanographic and Marine Biology Annual Review*, 16, pp. 229-311.
- Pielou, E.C. (1976): *Population and Community Ecology: Principles and methods*. New York, Gordon & Breach.
- Ramón, M., Fernández, M. y Galimany, E. (2003): "Desarrollo del cultivo del mejillón (*Mytilus galloprovincialis*) en la bahía del Fangar (delta del Ebro) a partir de semilla captada en zonas distintas", en IX Congreso Nacional de Acuicultura: *La acuicultura como actividad económica en las zonas costeras: Libro de Resúmenes*, pp. 257-258. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Sevilla, España.
- Serra, J., Colombo, F., Canals, M. y Guillén, J. (1990): "Comportamiento hidráulico y sedimentario del río Ebro entre Tortosa y Amposta", *Geogaceta*, 8, pp. 107-109.
- Serra, J. y Riera, G. (1993): "La desembocadura del río Ebro: variabilidad y cambio recientes", *Geogaceta*, 14, pp. 27-28.
- Tirado, C. y Macías, J.C. (2007): *Cultivo de mejillón. Aspectos generales y experiencias en Andalucía*. Consejería de Agricultura y Pesca, 177 pp.
- Webster, R. y Oliver, M. A. (2001): *Geostatistics for enviromental scientists*. Chichester, U.K., John Wiley & Sons, 255 pp.

## TABLAS

**Tabla 1. Tabla de conversión del índice AMBI**

Clasificación	Índice AMBI	Estado comunidad macrobentónica	Grado acept.
No contaminado	0	Normal	7
No contaminado	1	Empobrecido	6
Ligeramente contaminado	2	Desequilibrado	5
<b>Contaminado</b>	<b>3</b>	<b>Presencia de especies indicadoras de contaminación</b>	<b>4</b>
Contaminado	4	Sustitución parcial de las especies típicas	3
Muy contaminado	5	Sustitución total de las especies típicas	2
Muy contaminado	6	Sustitución total de las especies típicas y baja abundancia	1
Extremadamente contaminado	7	Azoico	0

**Tabla 2. Valores implementados en el modelo FARM**

Parámetro	Unidades	Valor ( $\pm$ Error estándar)
Temperatura media	°C	19,25 $\pm$ 1,37
Velocidad de corrientes	cm/s	4,39 $\pm$ 0,4
Concentración clorofila	$\mu$ g/l	2,6 $\pm$ 0,99
Materias en suspensión	mg/l	9,8 $\pm$ 1,05
Carbono orgánico total	mg/l	7,98 $\pm$ 0,34
Oxígeno disuelto	mg/l	7,75 $\pm$ 0,75

**Tabla 3. Evolución de la producción de mejillón procedente de la bahía del Fangar**

Año	T producidas
<b>2005</b>	790,9
<b>2006</b>	285,0
<b>2007</b>	746,2
<b>2008</b>	1177,4

Fte. Departament d'Agricultura Ramaderia i Pesca de la Generalitat de Catalunya.

Archetti, G., Bernia, S., Salvà-Catarineu, M. (2010): "Análisis de los vectores ambientales que afectan la calidad del medio en la bahía del Fangar mediante herramientas SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 252-279. ISSN: 1578-5157

## FIGURAS



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

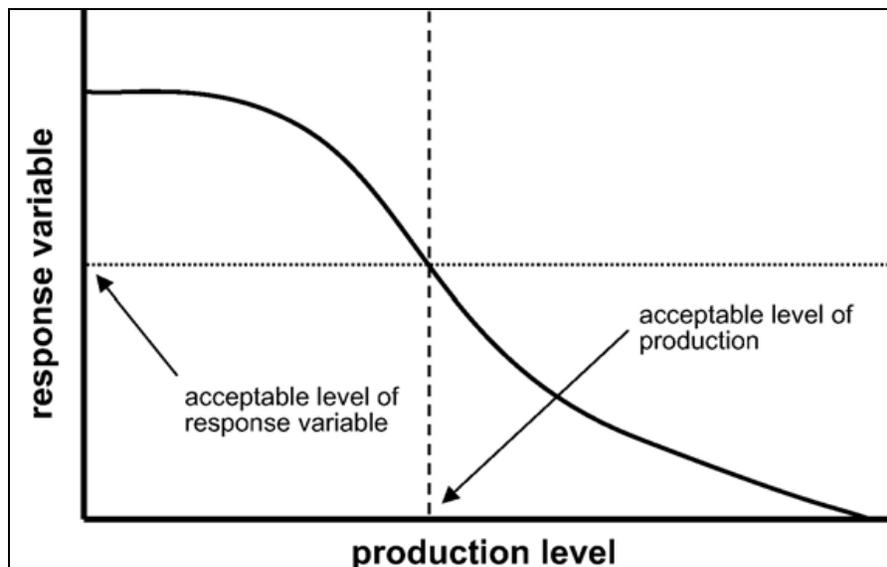


Figura 2. Respuesta de un determinado vector ambiental bajo la influencia de varios niveles de producción.

Fte. McKindsey *et al.*, 2006.

Archetti, G., Bernia, S., Salvà-Catarineu, M. (2010): "Análisis de los vectores ambientales que afectan la calidad del medio en la bahía del Fangar mediante herramientas SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 252-279. ISSN: 1578-5157

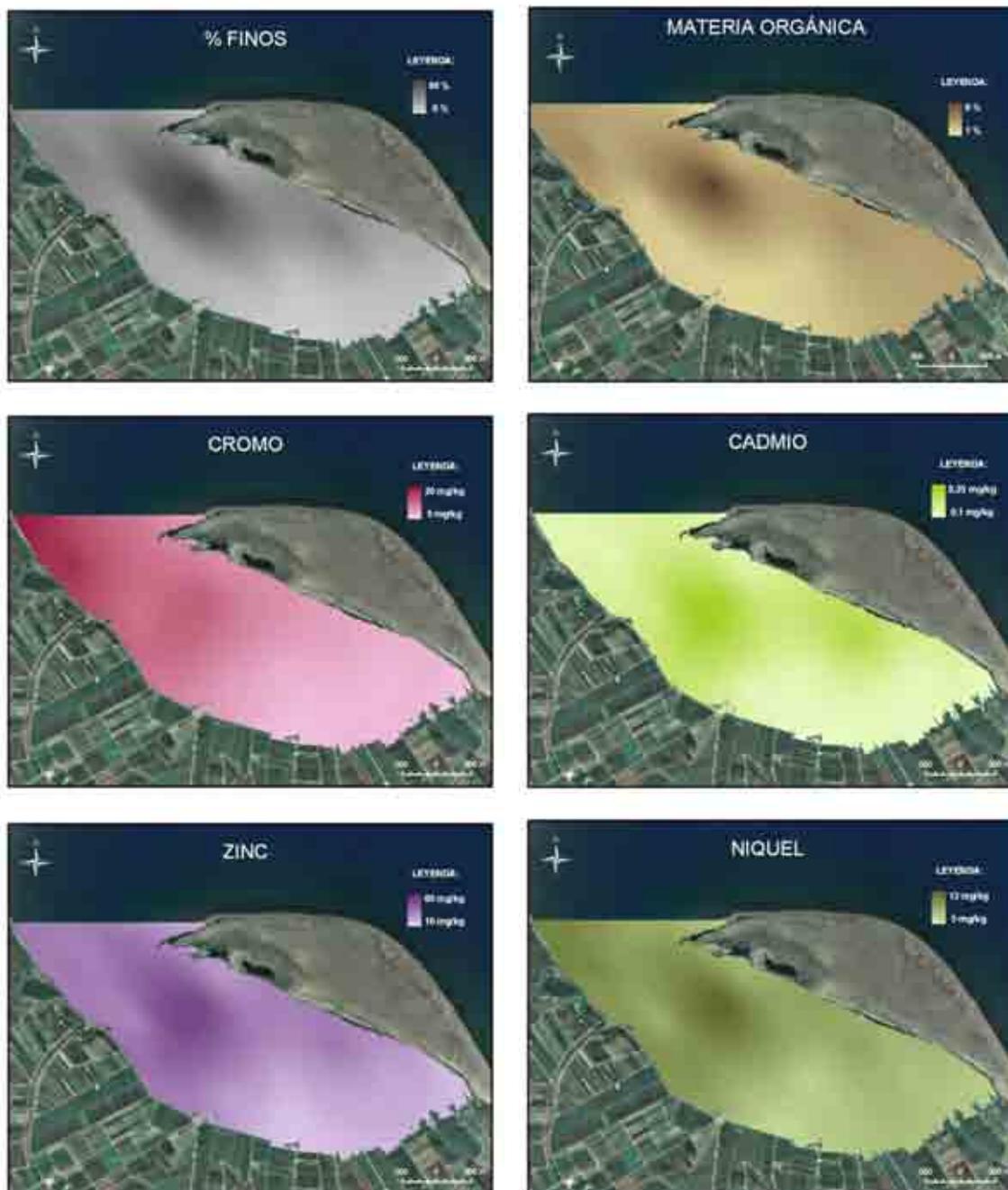


Figura 3. Distribución de las concentraciones de los parámetros analizados en las muestras de agua recogidas a lo largo de la zona de estudio.



Figura 4. Identificación de aquella área en dónde las aguas superficiales presentan características más próximas a aguas continentales que marinas.

Archetti, G., Bernia, S., Salvà-Catarineu, M. (2010): "Análisis de los vectores ambientales que afectan la calidad del medio en la bahía del Fangar mediante herramientas SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 252-279. ISSN: 1578-5157



**Figura 5. Distribución de las concentraciones de los parámetros analizados en las muestras de sedimento de la zona de estudio.**

Archetti, G., Bernia, S., Salvà-Catarineu, M. (2010): "Análisis de los vectores ambientales que afectan la calidad del medio en la bahía del Fangar mediante herramientas SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 252-279. ISSN: 1578-5157

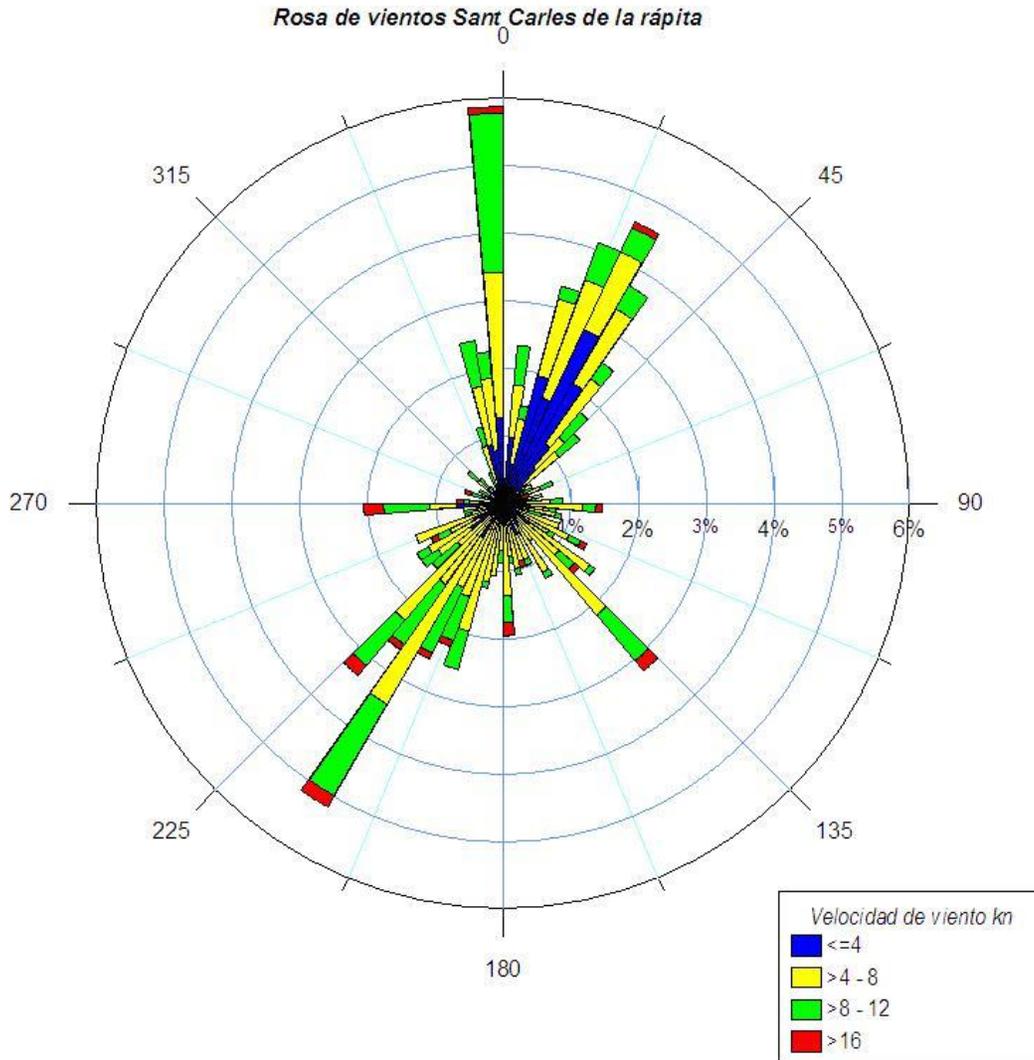


Figura 6. Área (en amarillo) donde los sedimentos superficiales presentan concentraciones de los parámetros analizados superiores a la media de los resultados obtenidos.



Figura 7. Inventario de los puntos de desagüe de agua dulce.

Archetti, G., Bernia, S., Salvà-Catarineu, M. (2010): "Análisis de los vectores ambientales que afectan la calidad del medio en la bahía del Fangar mediante herramientas SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 252-279. ISSN: 1578-5157



**Figura 8. Rosa de viento. Estación meteorológica de Sant Carles de la Ràpita.**

Archetti, G., Bernia, S., Salvà-Catarineu, M. (2010): "Análisis de los vectores ambientales que afectan la calidad del medio en la bahía del Fangar mediante herramientas SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 252-279. ISSN: 1578-5157



Figura 9. Zona de corrientes de baja intensidad.

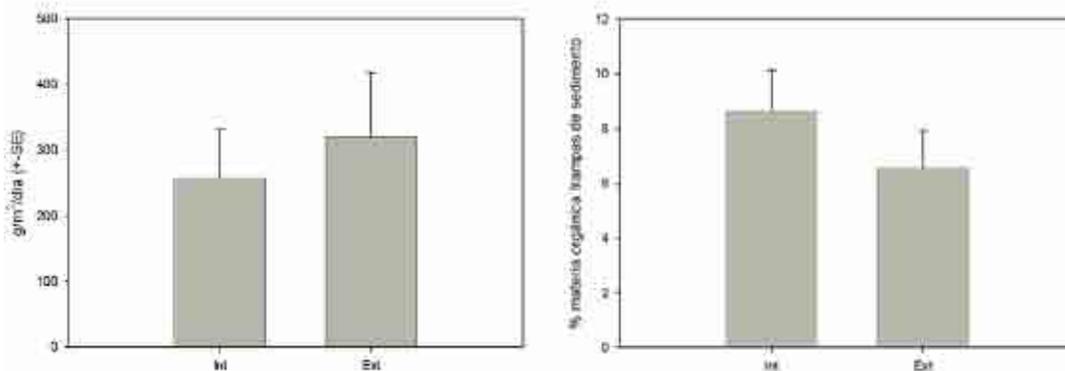


Figura 10. Comparación entre la tasa de sedimentación y el porcentaje de materia orgánica del sedimento retenido en las trampas ubicadas en el interior y en el exterior de la bahía.

Archetti, G., Bernia, S., Salvà-Catarineu, M. (2010): "Análisis de los vectores ambientales que afectan la calidad del medio en la bahía del Fangar mediante herramientas SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 252-279. ISSN: 1578-5157



Figura 11. Resultados de las tasas de sedimentación calculadas.



Figura 12. Grado de aceptabilidad de cada punto de muestreo de la comunidades bentónica.

Archetti, G., Bernia, S., Salvà-Catarineu, M. (2010): "Análisis de los vectores ambientales que afectan la calidad del medio en la bahía del Fangar mediante herramientas SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 252-279. ISSN: 1578-5157



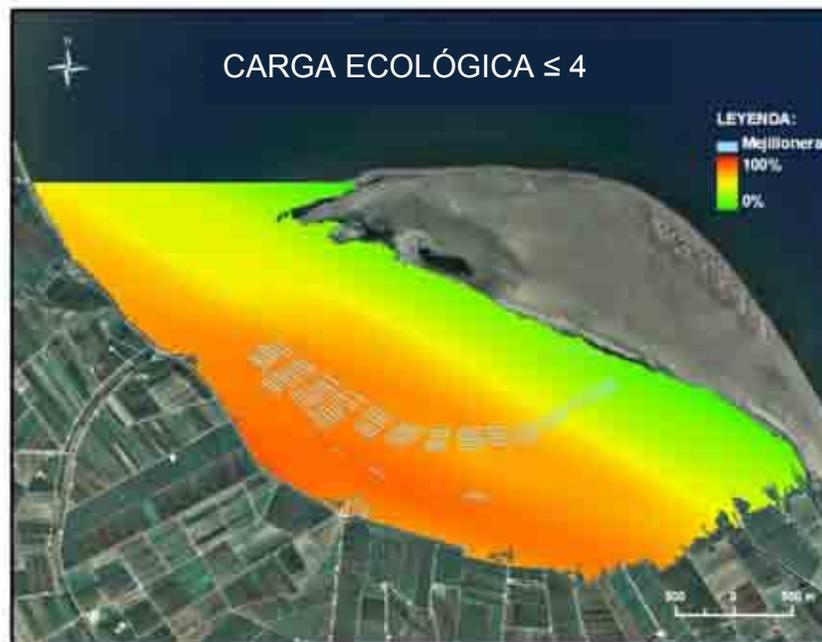
Figura 13. Mapa que muestra la discontinuidad entre la calidad de las aguas superficiales (amarillo) y la desembocadura de canales de riego.

Archetti, G., Bernia, S., Salvà-Catarineu, M. (2010): "Análisis de los vectores ambientales que afectan la calidad del medio en la bahía del Fangar mediante herramientas SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 252-279. ISSN: 1578-5157



**Figura 14.** Mapa resultado de la unión de los tres mapas obtenidos de la identificación de la zona de acumulación de finos, de la zona de corrientes de baja intensidad y de las tasas de sedimentación.

Archetti, G., Bernia, S., Salvà-Catarineu, M. (2010): "Análisis de los vectores ambientales que afectan la calidad del medio en la bahía del Fangar mediante herramientas SIG", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 252-279. ISSN: 1578-5157



**Figura 15. Probabilidad de que el nivel de aceptabilidad ecológica sea inferior o igual a 4.**

<sup>1</sup> Las muestras de agua se recogieron directamente desde la superficie de la embarcación, mientras que el muestreo de los sedimentos superficiales, tanto para su caracterización fisicoquímica como para la identificación de las comunidades bentónicas, se llevó a cabo mediante una draga Van Veen. En ambos casos las muestras, debidamente identificadas, se mantuvieron refrigeradas hasta su llegada a los laboratorios donde realizaron los análisis correspondientes siguiendo las metodologías estándar.

<sup>2</sup> El Sistema MOHID es un modelo tridimensional del medio acuático que incluye un módulo hidrodinámico baroclínico para la columna de agua y un 3D para los módulos de transporte lagrangiano y euleriano de sedimentos. Consta de módulos específicos para la evaluación de parámetros y procesos no-conservativos como la turbulencia (modelo GOTM). El modelo ha sido desarrollado por MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center) del Instituto Superior Técnico (ITS) de la Universidad Técnica de Lisboa. El sistema MOHID permite la utilización integrada de los distintos módulos, cada uno de ellos encargado de analizar procesos distintos (físicos o bioquímicos), con diferentes escalas (uso de anidamientos) y sistemas acuosos (estuarios, zonas costeras). La programación orientada a objetos de cada uno de los módulos, permite la modelización integral de los procesos litorales.

<sup>3</sup> La clasificación de las muestras mediante el índice AMBI (Borja *et al.*, 2000), que se relaciona con el grado de sensibilidad o tolerancia de las especies respecto a un gradiente de estrés. Este índice se basa en el principio que las comunidades macrobentónicas responden a estrés medioambientales con diferentes estrategias adaptativas que permiten dividir los organismos que la componen en cinco grupos:

Archetti, G., Bernia, S., Salvà-Catarineu, M. (2010): "Análisis de los vectores ambientales que afectan la calidad del medio en la bahía del Fangar mediante herramientas SIG", *GeoFocus (Artículos)*, n° 10, p. 252-279. ISSN: 1578-5157

---

*Grupo I:* Especies muy sensibles al enriquecimiento en materia orgánica, en general presentes en baja densidad en condiciones de baja concentración de materia orgánica. Se trata en general de carnívoros muy selectivos.

*Grupo II:* Especies que son indiferentes al enriquecimiento en materia orgánica y que están siempre presentes aunque en baja densidad, con variaciones no muy significativas durante el año. Se trata de especies que pertenecen al grupo trófico de suspensívoros de superficie y carnívoros no muy selectivos.

*Grupo III:* Especies, presentes en baja densidad en condiciones normales, que son estimuladas por un exceso leve de materia orgánica. En este caso se trata de especies que pertenecen al grupo trófico de los detritívoros de superficie, como los espionidos (poliquetos de la familia *Spionidae*) que forman tubos.

*Grupo IV:* Especies oportunistas que toleran condiciones entre moderadamente y pronunciadamente alteradas. Se trata de especies detritívoras de pequeño tamaño, básicamente cirratúlidos (poliquetos de la familia *Cirratulidae*).

*Grupo V:* Especies oportunistas básicamente detritívoras, que toleran condiciones muy alteradas con altos porcentajes de materia orgánica. Se trata de especies que proliferan en sedimentos muy reducidos (con una baja concentración de oxígeno) y son representados por los poliquetos de la familia *Capitellidae* y concretamente por la especie *Capitella capitata*.

El índice biótico que varía entre 0 y 7 se calcula según la fórmula:

$$BI = \{(0x\%GI) + (1,5x\%GII) + (3x\%GIII) + (4,5x\%GIV) + (6x\%GV)\} / 100$$