





**DISPERSIÓN DE MATERIA
ORGÁNICA EN GRANJAS
DE ACUICULTURA:
DESARROLLO DE UN MODELO
MATEMÁTICO PARA GARANTIZAR
SU SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL**

AUTORES

Jefe de fila

Universidad de Las Palmas de G.C.

Dr. Fernando Tuya Cortés (Dirección/Coordinación)

Dr. José J. Castro Hernández

Dr. Ricardo Haroun Tabraue

Dr. María A. Viera Rodríguez

Socios del proyecto

Universidade das Açores (Portugal)

Dr. Ana Cristina Matos Ricardo da Costa

Instituto Nacional das Pescas (Cabo Verde)

Dr. Alciany Nascimento da Luz

Centro de Investigaciones Medioambientales del Atlántico S.L. (CIMA)

Lcdo. Óscar Monterroso Hoyos

Lcda. Myriam Rodríguez García del Castillo

Dr. Rodrigo Riera Elena

Dr. Óscar Pérez Martínez

Lcda. Eva Ramos Rodríguez

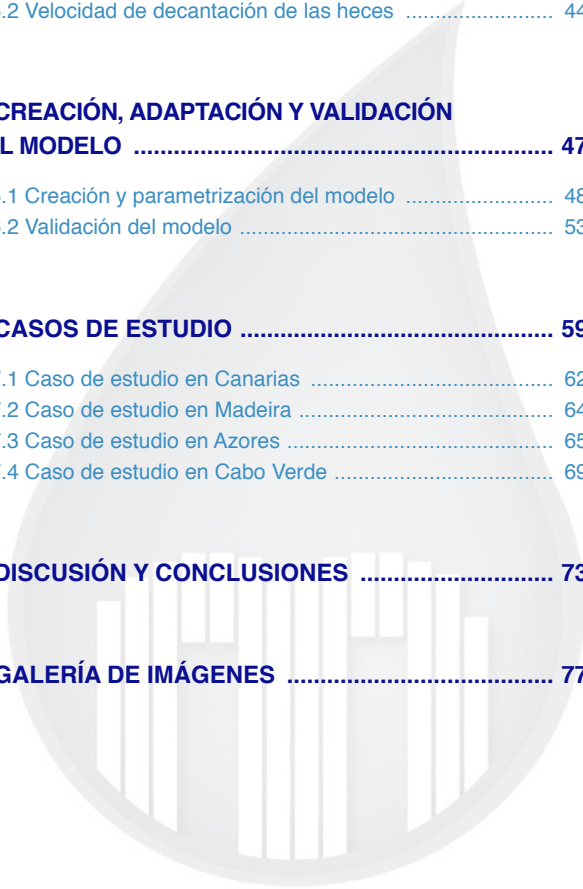
Dra. Janina Zuleica de García e Costa

Entidades colaboradoras

Fundación Universitaria de Las Palmas

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	07
2. INTRODUCCION	09
2.1 Antecedentes y justificación	10
2.2 Plan de Trabajo	12
3. DISEÑO Y DESARROLLO DE LA ETAPA DE MUESTREO	15
3.1 Diseño	16
3.2 Caracterización de las condiciones ambientales	18
Corrientes	18
Coeficientes de dispersión	21
Batimetría	22
3.3 Caracterización de las condiciones del sedimento	23
Parámetros físico-químicos	25
Comunidades faunísticas	26
3.4 Caracterización de las comunidades ícticas	28
4. ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE MATERIA PERDIDA AL MEDIO	31
4.1 Estimación de la cantidad de pienso y heces que se pierde al medio en operaciones normales de alimentación	32
4.2 Estimación de la cantidad de pienso y heces consumido por peces asociados a las jaulas	35
Peces pelágicos	35
Peces bentónicos	37
Conclusiones	38
4.3 Estimación de la cantidad de pienso y heces proveniente de instalaciones acuícolas que se deposita en el fondo marino	39



5. ESTIMACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE DECANTACIÓN DE PELLETS Y HECES DE CORVINA ...	41
5.1 Velocidad de decantación de las partículas de pienso ...	42
5.2 Velocidad de decantación de las heces	44
6. CREACIÓN, ADAPTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO	47
6.1 Creación y parametrización del modelo	48
6.2 Validación del modelo	53
7. CASOS DE ESTUDIO	59
7.1 Caso de estudio en Canarias	62
7.2 Caso de estudio en Madeira	64
7.3 Caso de estudio en Azores	65
7.4 Caso de estudio en Cabo Verde	69
8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	73
9. GALERÍA DE IMÁGENES	77



1. RESUMEN

El objetivo del proyecto “**Dispersión de materia orgánica en granjas de acuicultura: Desarrollo de un modelo matemático para garantizar su sostenibilidad ambiental, MACAROMOD (MAC/3/C136)**”¹ (en adelante MACAROMOD), es el desarrollo de un modelo estructurado y validado para las condiciones ambientales y especies cultivadas en la región de la macaronesia (Canarias-Madeira-Azores-Cabo Verde), que pueda ser utilizado como herramienta de gestión en la predicción de la dispersión del material de desecho proveniente de jaulas de cultivo de dorada, lubina y corvina, y sus posibles impactos en el medio.

Las tareas de creación/adaptación del modelo a las condiciones de la Macaronesia, incluyeron un intenso programa de muestreo para la recopilación de datos ambientales (corrientes, fauna, sedimento, calidad de agua, etc.) y de cultivo (pienso, producción, etc.). Se incluyó una campaña general para la obtención de los datos necesarios para la parametrización del modelo (4 concesiones) y una campaña específica y mucho más detallada, para la obtención de los datos necesarios para la validación del modelo (4 concesiones). También, se realizaron diferentes experimentos para la estimación de la cantidad de materia perdida al medio en las jaulas de cultivo y las velocidades de decantación de los pellets y heces.

El modelo consta de cuatro módulos independientes (submodelos), que se estructuran secuencialmente. En el primero, se genera la malla batimétrica de la zona de interés. El segundo calcula la posición inicial de las partículas de pienso y heces. El tercero recalcula esta posición y la cantidad de material depositado en el fondo en función de los procesos de resuspensión y degradación. El cuarto predice la respuesta ambiental del material depositado a través del índice biótico AMBI. La validación del modelo indica que las predicciones del modelo tienen un muy buen ajuste con la realidad, siendo éste una herramienta de predicción con garantías.

1 Proyecto correspondiente al Programa de Cooperación Transnacional MAC, periodo 2007/2013, cofinanciado con fondos Feder



2. INTRODUCCIÓN

2.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

La acuicultura en la región de la macaronesia es una actividad económica relativamente reciente y de ámbito territorial principalmente marino. Los últimos años han sido testigos de un desarrollo sostenido de la acuicultura, por lo que se encuentra en el momento propicio y crítico para dar el “*gran salto*” que consolide su posición tanto en el panorama nacional (en el caso de Canarias), como internacional. Para ello, se dan las condiciones naturales (temperaturas uniformes, aguas oxigenadas y limpias) y en Canarias, además, se disponen de técnicas (experiencia y conocimiento científico) y empresariales propicias (madurez empresarial, proyectos de aumento de valor añadido mediante la transformación y creación de empresas paralelas de servicios y apoyo). Sin embargo, el sector se enfrenta a crecientes inconvenientes que están, en mayor o menor medida, frenando su desarrollo, entre los que destacan los conflictos ambientales, que a su vez están derivando en condicionantes sociales y administrativos. La alta sensibilización social acerca de temas ambientales, unido al uso frecuentemente arbitrario de este tipo de argumentos por otros sectores o intereses, conllevan una serie de implicaciones negativas para el desarrollo de este nuevo sector de producción de alimentos.

Como cualquier otra actividad que hace uso de recursos naturales, la acuicultura provoca un incremento en la presencia de sustancias en el medio como resultado de sus actuaciones. Los posibles impactos ambientales de éstas se relacionan tanto con el tipo y cantidad de material que se pierde al medio, como de la ubicación de las instalaciones. Del material de desecho proveniente de las jaulas de cultivo, la fracción más significativa es la de materia particulada (pienso no consumido y material fecal). Ésta tiende a depositarse en los fondos cercanos a la fuente de emisión, pudiendo alterar la composición y estructura de las comunidades bentónicas. Sus posibles efectos se resumen en cambios físicos y químicos en el sedimento, que alteran las comunidades bentónicas y el oxígeno disponible en los lugares próximos a las instalaciones de cultivo.

En este contexto, se llevan varios años investigando y aplicando modelos numéricos en la predicción de la dispersión del material particulado proveniente de las jaulas de acuicultura en Canarias. Los primeros modelos fueron desarrollados sobre plataformas SIG en trabajos de investigación¹ y posteriormente aplicados a esta región². Estos modelos predecían la tasa de sedimentación de carbono orgánico desde jaulas de cultivo, basándose en los valores de corrientes y de producción. Sin embargo, la información que proporcionaban era limitada e incluían pocos parámetros físicos y biológicos y, además, no tenían en cuenta las estrategias de alimentación de los peces.

Posteriormente, en estudios ambientales de acuicultura para Canarias, se comenzó a utilizar modelos de dispersión genéricos, tipo MIKE y COHERENS. Estos modelos, aunque son capaces de incluir más procesos físicos y biológicos que sus predecesores, fueron rápidamente descartados ya que no son modelos propiamente desarrollados para su uso en la acuicultura, por lo que omiten información crítica a la hora de modelar y predecir la dispersión de este material y, por tanto, de sus posibles impactos ambientales. Además, no han sido validados para esta región. La importancia de utilizar modelos específicos y validados en acuicultura ha sido posteriormente reconocida, a nivel europeo, a través del proyecto ECASA³.

Desde entonces, diferentes estudios ambientales han incorporado este tipo de modelos, comenzando con DEPOMOD (desarrollado por el SAMS, Escocia), que permite predecir la acumulación de sólidos y el efecto sobre la macrofauna del cultivo de salmónidos. Éste es un modelo validado que está siendo utilizado desde hace años por la Oficina de Medioambiente Escocesa (SEPA) para conceder nuevas licencias y ampliación de concesiones ya autorizadas. También, se utiliza de forma muy extendida en Chile y Canadá. Con posterioridad, el proyecto europeo MERAMED⁴ se centró en el desarrollo de un modelo para predecir los posibles impactos de la acuicultura en jaulas marinas en el área del Mediterráneo. Este proyecto hizo una adaptación y validación del modelo DEPOMOD a las condiciones ambientales y a los cultivos (dorada y lubina) que se dan en el Mediterráneo. El resultado de este proyecto fue el modelo MERAMOD, el cual ha sido muy utilizado en los últimos años.

1 Pérez O M, Telfer T C, Beveridge M C M y Ross L G. (2002). Geographical Information Systems (GIS) as a simple tool for modelling waste distribution under marine fish cages. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54, 761-768.

2 Pérez Martínez, O. 2002. GIS-based models for optimisation of marine cage aquaculture in Tenerife, Canary Islands. Ph.D. Thesis. University of Stirling.

3 Proyecto europeo ECASA (<http://www.ecasa.org.uk/index.htm>)

4 Proyecto europeo MERAMED (<http://meramed.akvaplan.com/default.htm>)

Sin embargo, aunque estos modelos están diseñados para su uso en acuicultura marina en jaulas offshore, no están parametrizados para las condiciones de cultivo y ambientales propias de la región macaronésica. Éstos tampoco han sido validados para esta región en general, ni para Canarias en particular, por lo que se desconoce el grado de exactitud entre los resultados proporcionados por los modelos y la realidad. Por tanto, se hace necesario el desarrollo de una herramienta predictiva de estas características, que pueda ser utilizado como herramienta de gestión en la predicción de la dispersión del material de desecho proveniente de jaulas de cultivo de dorada, lubina y corvina, y sus posibles impactos ambientales asociados en la región macaronésica.

2.2 PLAN DE TRABAJO

La ejecución del proyecto se dividió en las siguientes fases:

Fase 1: *Diseño y desarrollo de la etapa de muestreo*

Fase 2: *Estimación de la cantidad de materia perdida al medio (pellets y heces)*

Fase 3: *Estimación de las velocidades de decantación de pellets y heces*

Fase 4: *Creación, adaptación y validación del modelo*

En la **Fase 1**, se diseñó y posteriormente se ejecutó un programa de muestreo para la recopilación de datos reales, tanto de las condiciones ambientales (corrientes, fauna, sedimento, calidad de agua, etc.) como de las de cultivo (pienso, producción, etc.), para realizar las tareas de parametrización (adaptación del modelo a las condiciones de la Macaronesia). Este programa incluyó dos campañas de muestreo, primero una campaña general para la obtención de los datos necesarios para la parametrización del modelo y, posteriormente, una campaña específica y mucho más detallada, para la obtención de los datos necesarios para la validación del modelo.

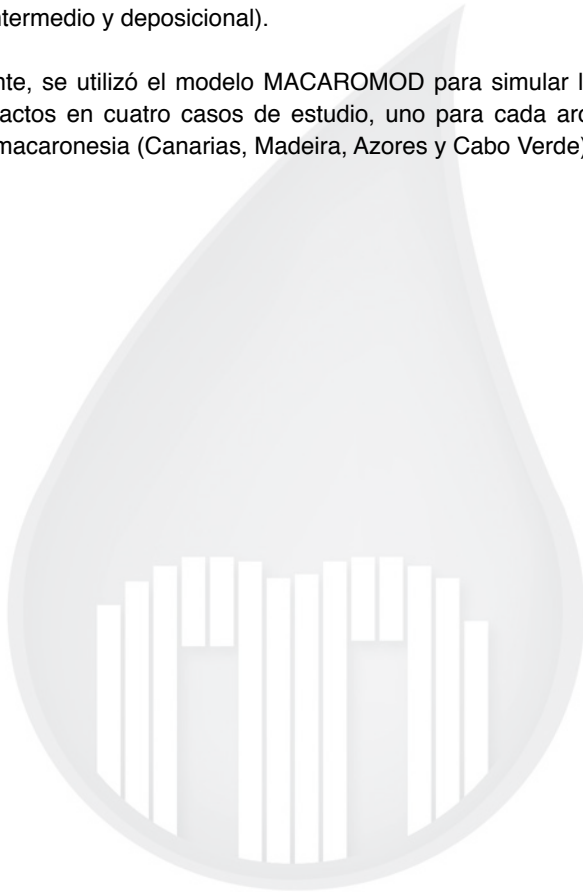
Seguidamente, en la **Fase 2**, se realizó una estimación de la cantidad de material (pienso y material fecal) que se pierde al medio en las operaciones diarias de alimentación y se cuantificó su consumo por la fauna íctica asociada a las jaulas.

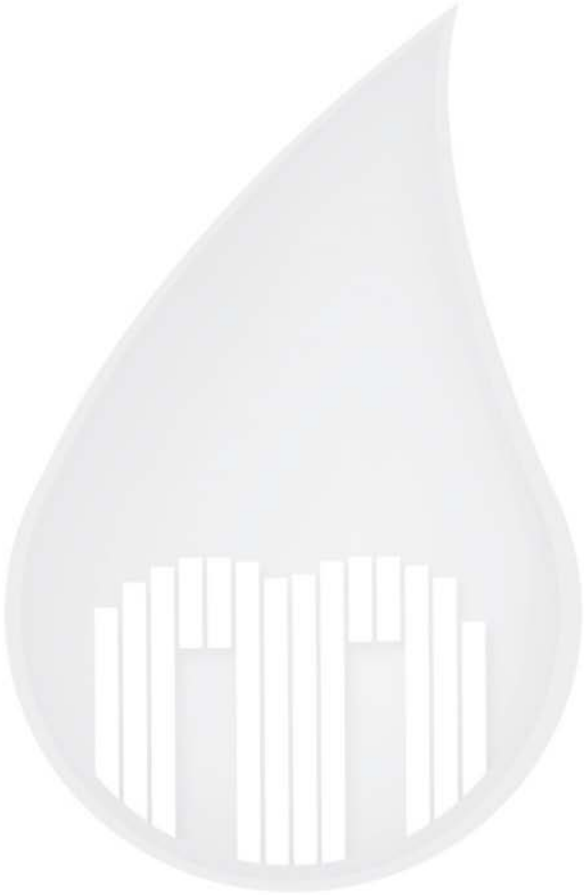
En la **Fase 3**, se realizaron diferentes experimentos para la estimación de las velocidades de decantación de los pellets y heces de corvina, debido a la

inexistencia de esta información en la literatura, a diferencia de especies, como la dorada y lubina, cuyas velocidades han sido previamente determinadas en el marco de distintos proyectos de investigación.

En la **Fase 4**, se realizaron las tareas de creación/adaptación del modelo (códigos fuente) a las condiciones de cultivo y ambientales de la macaronesia. Posteriormente, se validó el modelo para diferentes condiciones (ambiente dispersivo, intermedio y deposicional).

Finalmente, se utilizó el modelo MACAROMOD para simular la dispersión y posibles impactos en cuatro casos de estudio, uno para cada archipiélago que compone la macaronesia (Canarias, Madeira, Azores y Cabo Verde).







3. DISEÑO Y DESARROLLO DE LA ETAPA DE MUESTREO

3.1 DISEÑO

La finalidad de esta fase consistió en establecer los parámetros más significativos y descriptivos de las condiciones ambientales y de cultivo en la Macaronesia, que sirvan en la parametrización del modelo y su validación.

El programa de muestreo incluyó dos tipos de campañas de muestreo, una **general** y una **específica**. En la campaña general, se realizó el esfuerzo de muestreo mínimo para obtener las variables necesarias que describan el comportamiento ambiental de cada ubicación. Por el contrario, en la campaña específica el esfuerzo de muestreo fue muy intenso, con el fin de obtener una información muy detallada del comportamiento ambiental y, así, poder validar el modelo.

Para ello, en primer lugar fue necesario seleccionar las concesiones acuícolas a estudiar y posteriormente, diseñar las campañas de muestreo con los parámetros a medir, el número y distribución de las estaciones de muestreo y el número de muestras necesarias en cada caso. Para cubrir todos los posibles tipos de concesiones acuícolas (diferentes condiciones ambientales y de producción), se seleccionó un conjunto de factores que potencialmente tienen un efecto directo en el impacto ambiental de la actividad en el medio (Tabla 1). Posteriormente, se realizó un listado de la totalidad de las concesiones acuícolas en la Macaronesia y se asignó un valor a cada uno de estos factores por concesión.

Tabla 1. Criterios de selección de las concesiones acuícolas para los muestreos			
Criterios	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Exposición (oleaje y viento)	Protegido	Medio	Expuesto
Corrientes	Fuerte	Media	Leve
Profundidad	Somera (<25m)	Media (25-35m)	Profunda (>35m)
Tipo de fondo	Fango	Arena media	Arena
Producción (T/año)	Baja (< 500)	Media (500-1000)	Alta (> 1000)
Tipo de Jaulas	Pequeña (<15 m)	Media (15-20 m)	Grande (> 20 m)
Alimentación	Manual	Manual-Automática	Automática

La Tabla 2 muestra las concesiones acuícolas seleccionadas para el muestreo general y específico. Como se puede apreciar, todas las concesiones acuícolas integrantes del muestreo general se ubican en Tenerife, ya que reúnen el abanico más amplio de condiciones de cultivo a nivel ambiental. Por otro lado, las concesiones incluidas en el muestreo específico se localizan en Tenerife, Gran Canaria y Madeira (en Azores y en Cabo verde no hay acuicultura), para así darle mayor consistencia a la validación del modelo en su aplicación en diferentes zonas.

Tabla 2. Concesiones acuícolas seleccionadas para los muestreos				
Tipo de muestreo	Localización	Isla	Producción Anual (Tn)	Especies
General	Iguste de San Andrés 1	Tenerife	120	Dorada y Lubina
	Iguste de San Andrés 2	Tenerife	298	Dorada y Lubina
	Los Gigantes 1	Tenerife	141	Dorada y Lubina
	Los Gigantes 2	Tenerife	238	Dorada y Lubina
Específico	Los Cristianos	Tenerife	381	Dorada, Lubina y Corvina
	Caletillas	Tenerife	217	Dorada
	Melenara	Gran Canaria	350	Dorada y Lubina
	Ensenada Da Abra	Madeira	200	Dorada

En las concesiones acuícolas seleccionadas se estudiaron diferentes parámetros, que varían en función del tipo de muestreo (general o específico), según se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de muestreo incluidos en la campaña general y específica		
Parámetros	General	Específica
EMPLAZAMIENTO		
Nombre del área y código de la concesión	X	X
Coordenadas de los vértices de la concesión y las jaulas	X	X
Número y tamaño de jaulas de la concesión	X	X
PRODUCCIÓN		
Especies cultivadas	X	X
Datos de producción (t/año/especie/jaula)	X	X
Tipo de alimentación (manual y/o automática) y pienso consumido (t/año/especie/jaula)	X	X
AMBIENTE MARÍTIMO		
Corriente (intensidad y dirección)	X	X
Coefficientes de dispersión	-	X
Batimetría	X	X
SEDIMENTO		
Materia orgánica	X	X
Granulometría	X	X
Comunidades de infauna (macrofauna)	-	X
COMUNIDADES ÍCTICAS	X	X

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES

Corrientes

Se utilizó un perfilador de corrientes acústico doppler (Acoustic Doppler Current Profilers - ADCP) FlowQuest 600 de la empresa LinkQuest Inc (Foto 1), ubicado en el fondo marino en posición vertical, con los transductores orientados hacia la superficie del mar. El equipo se fijó al fondo mediante una estructura y un fondeo específicos, que aseguraron la estabilidad del aparato y su resistencia ante las inclemencias del mar (Foto 2).

El perfilador se configuró para que cada 15 minutos realizara 100 mediciones de velocidad y dirección de la corriente, y guardara un dato promediado para cada una de las capas en que se seccionó la columna de agua (1 m). La utilización de un número tan elevado de mediciones para calcular los valores medios reduce enormemente la desviación sobre los valores reales. Por otro lado, utilizar períodos de muestreo tan pequeños y tantas capas, permite obtener un enorme detalle del comportamiento vertical de la corriente, siendo posible identificar las características particulares de la masa de agua como, por ejemplo, la existencia de contracorrientes o zonas y/o períodos de poco hidrodinamismo, que son de gran importancia a la hora de aplicar los modelos de dispersión.

De la totalidad de las capas en las que el perfilador de corriente dividió la columna de agua, sólo se analizaron los resultados de las mediciones realizadas en las 5 capas que se utilizarán en el modelo MACAROMOD, ésto es: superficie, mitad de copo, fondo del copo, mitad de la columna de agua y fondo (Figura 1).

En general, los valores de intensidad de la corriente fueron altos, típicos de los ambientes costeros de la macaronesia. Los valores medios oscilaron entre los 10 cm/s para las capas profundas y los 22 cm/s para las superficiales. En Canarias, éstos fueron más altos que los medidos en Madeira; sin embargo, esta apreciación es poco significativa, ya que la concesión de Madeira se ubica en una bahía cerrada y protegida, caso poco habitual en esta región.



Foto 1. Perfilador de corrientes FlowQuest 600

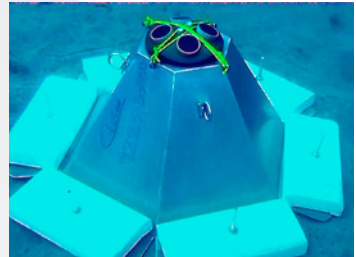


Foto 2. Fondeo del perfilador de corriente

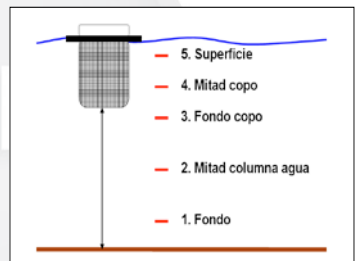


Figura 1. Posición de las 5 capas que se utilizarán en MACAROMOD

Tabla 4. Estadística descriptiva de los valores de velocidad de la corriente (cm/s) de cada una de las capas					
	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5
Los Gigantes	6,3	6,7	6,9	7,6	13,5
Igüste de San Andrés	7,9	9,2	9,8	13,0	34,8
Los Cristianos	6,4	6,9	7,1	7,4	11,8
Caletillas	18,4	19,3	21,4	17,3	34,0
Melenara	10,2	10,6	11,0	18,4	16,4
Ensenada Da Abra	5,9	7,2	6,1	5,5	5,8
Todos	9,2	10,0	10,4	11,5	19,4
CANARIAS	9,8	10,5	11,2	12,7	22,1

En todas las concesiones, los datos de corriente se ajustaron a un patrón característico de una marea semidiurna, con dos pleamares y dos bajamares cada día (direcciones opuestas según sea marea baja o alta). El efecto de la marea se notó de forma muy clara en las capas intermedias e incluso en las inferiores, aunque en éstas disminuye su intensidad debido al rozamiento con el fondo (Figura 2 y Figura 3). En la capa superficial, el efecto de marea se enmascara debido a la acción del viento y oleaje sobre el flujo de agua, siendo la intensidad de la corriente mayor que en el resto de capas y en una única dirección (Figura 4).

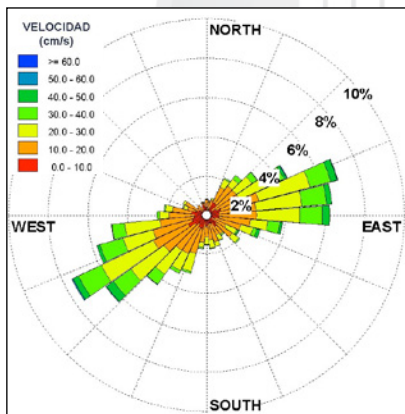


Figura 2. Ejemplo de rosa de dirección e intensidad de la corriente de la capa profunda

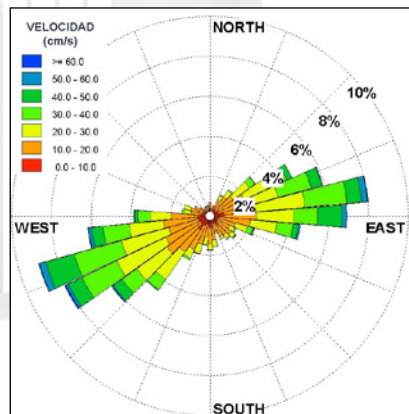


Figura 3. Ejemplo de rosa de dirección e intensidad de la corriente de la capa intermedia

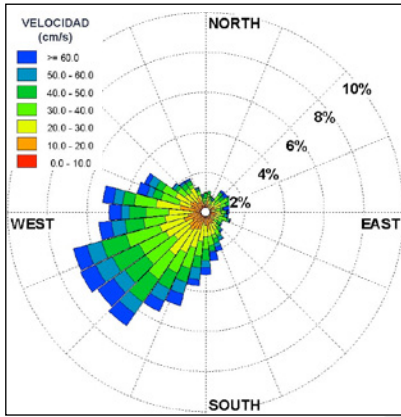


Figura 4. Ejemplo de rosa de dirección e intensidad de la corriente de la capa superficial

Coeficientes de dispersión

Los coeficientes de dispersión se estimaron mediante el uso de boyas de deriva. Las boyas de deriva consisten en unos dispositivos de medición de la corriente que están formados por un flotador y una vela sumergida, que son impulsados por la velocidad y dirección de la corriente (Foto 3).

Durante medio ciclo de marea (6 horas), coincidiendo con las 3 últimas horas de bajada de marea y las tres primeras horas de subida o viceversa, para así tener en cuenta los posibles cambios de dirección e intensidad de la corriente en función de la marea, se soltaron 6 boyas de deriva. Cada 15 minutos se anotó la posición y la hora de cada una de ellas.

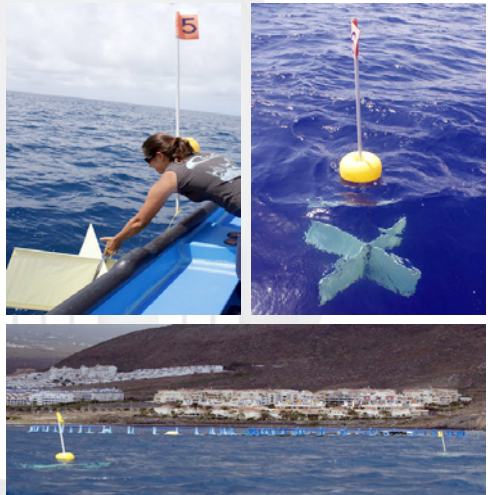


Foto 3. Boyas de deriva

Mediante las fórmulas propuestas por Yanagi *et al.* (1982)¹, se calcularon los valores de los coeficientes de dispersión particulares para cada zona. La Tabla 5 muestra los resultados, donde se aprecia que el mayor patrón dispersivo se encuentra en la zona de Melenara. En el otro extremo, está la zona de Los Cristianos, con el menor patrón dispersivo. Los valores medios que se utilizarán por defecto en el modelo, son muy superiores a los comúnmente utilizados y provenientes de otras regiones, Mediterráneo y Escocia (K_x y $K_y \approx 0,01$), poniendo de manifiesto el alto hidrodinamismo de la región Macaronésica.

Tabla 5. Valor de los coeficientes de dispersión.					
Coeficientes de dispersión	Los Cristianos	Las Caletillas	Melenara	Ensenada Da Abra	Media
kx	0,04	0,16	0,82	0,65	0,42
ky	0,18	0,31	0,89	0,72	0,52

Batimetría

Para las concesiones acuícolas de Canarias se utilizó la batimetría digital existente. En base a esta información, se obtuvieron las líneas batimétricas (curvado) (Figura 5). Posteriormente, se procedió a la creación de un modelo cuantitativo digital de la superficie topográfica, conocido como modelo digital de terreno (TIN-Triangulated Irregular Network) (Figura 6). Finalmente, el TIN se exportó a un fichero de texto formato TXT, el cual puede ser fácilmente utilizado

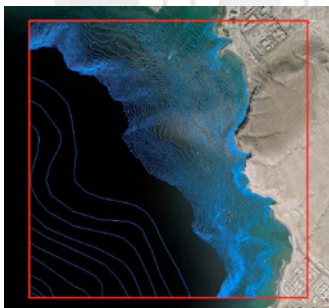


Figura 5. Ejemplo de curvado batimétrico

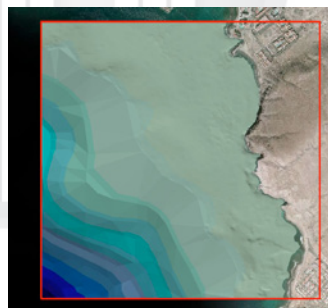


Figura 6. Ejemplo de modelo digital de terreno (TIN)

1 Yanagi, T., Murashita, K. and Higuchi, H. (1982). Horizontal turbulent diffusivity in the sea. Deep Sea Research, 29, 2A, 217 – 226.

Para la campaña de muestreo específico, el diseño fue el mismo para todas concesiones (Figura 9). En la jaula más próxima a la costa y a partir de su perímetro, se trazó un transecto paralelo de 60 m de longitud y otro perpendicular de 40 m. Estos transectos se subdividieron cada 20 m, de forma que se obtienen 6 puntos de muestreo. Además, siguiendo la dirección del transecto paralelo, a una distancia aproximada de 500 m y situado fuera del área de influencia de la concesión, se seleccionaron tres estaciones de control. En total y para cada concesión, en el muestreo específico se establecieron 9 estaciones, donde para cada una de ellas se tomaron muestras por triplicado, para así garantizar la representabilidad de los resultados (Figura 10).

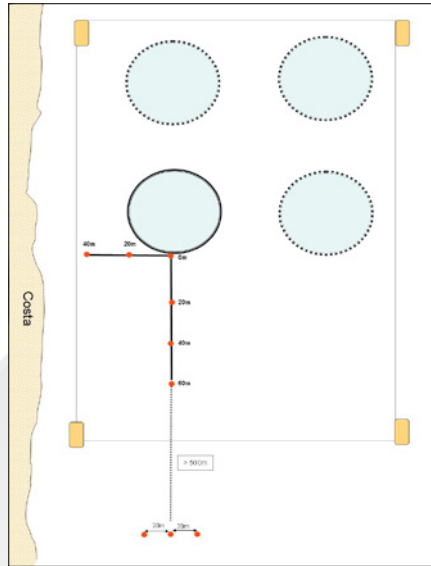


Figura 9. Esquema de situación de las estaciones en los muestreos específicos

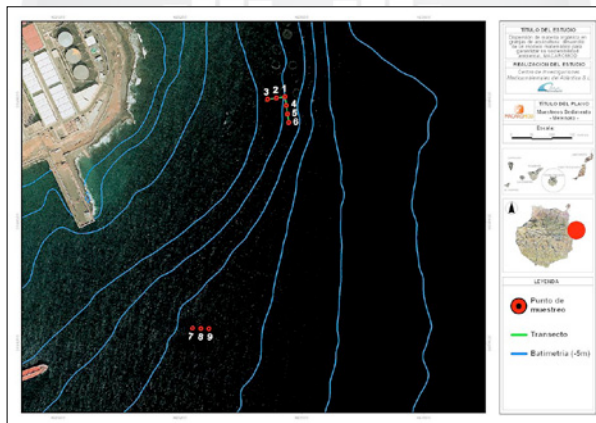


Figura 10. Ejemplo de distribución de las estaciones para el muestreo específico en Melenara (Gran Canaria)

Parámetros físico-químicos

Las muestras para los análisis físico-químicos del sedimento se recogieron a mano con equipos de escafandra autónoma. Se utilizó un tubo de PVC de 4,5 cm de diámetro, que se introdujo 20 cm en el sedimento (Foto 4). Las muestras se transfirieron a bolsas con cierre hermético, fueron codificadas y se transportaron al laboratorio de forma inmediata en recipientes isotermos y refrigerados.

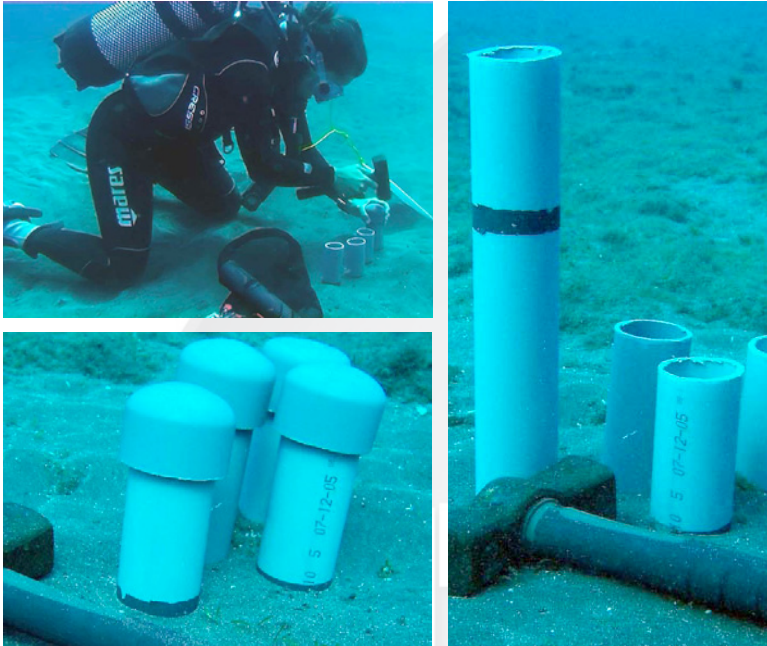


Foto 4. Recogida de muestras para análisis en fondos blandos

La mayoría de las estaciones cercanas a las concesiones presentan un perfil granulométrico de arenas finas, resultado de la actividad acuícola. Como era de esperar, los mayores valores de materia orgánica también se encuentran en estas estaciones, aunque son todos muy bajos (típicos de ecosistemas oligotróficos), presentando un valor medio del 0,7% ($\sigma = 0,5$). Existen diferencias entre las concesiones de Canarias, que muestran un valor medio de materia orgánica del 0,6 % ($\sigma = 0,2$) y la de Madeira, que presenta valores mayores, un 1,5% ($\sigma = 0,6$). Entre las concesiones de Tenerife y Gran Canaria no se detectaron diferencias, siendo su valor medio del 0,6% y su desviación estándar del 0,3 y 0,2, respectivamente.

Comunidades faunísticas

La caracterización y valoración de las comunidades faunísticas del sedimento se realizó en base a la composición específica y estructura de la fauna intersticial o infauna. Las muestras se tomaron a mano por buceadores equipados con escafandra autónoma. En cada una de las estaciones se obtuvieron 3 réplicas con cores de 20 cm de diámetro interno, que se introdujeron 25 cm en el sedimento (Foto 5).



Para la extracción de infauna se utilizó un tamiz metálico de 0,5 mm de luz de malla. Posteriormente, se llevó a cabo el triado de los diferentes grupos taxonómicos en bandejas de plástico, separando los organismos “*in vivo*” en diferentes botes convenientemente identificados, portadores de diluciones de formol o alcohol para su conservación (Foto 6).



Foto 5. Recogida de muestras de macrofauna en fondos blandos



Foto 6. Tamizado y triado del sedimento

En el laboratorio, se procedió a la identificación de todos los ejemplares bajo una lupa binocular de gran potencia, cuantificándose el número de ejemplares para cada especie. Con posterioridad, se realizaron diversos análisis estadísticos, de diversidad y del índice biótico AMBI (Azti Marine Biotic Index)¹. Este índice establece el estado de salud ambiental del medio marino y ha sido utilizado con éxito en el Archipiélago Canario en estudios anteriores². El valor del índice AMBI (0-7) determina el grupo ecológico dominante, el estado general de la comunidad, la existencia o no de perturbación ambiental y el estatus ecológico del ecosistema. Valores bajos (>3) indican un buen estatus ecológico y valores altos (>5) indican un mal estatus ecológico.

En base a los resultados obtenidos, se aprecia que, en general, los fondos de arena en la macaronesia son bastante “pobres” en lo que a infauna se refiere. La Tabla 6 muestra los valores medios para cada una de las concesiones estudiadas, donde se aprecia el bajo número de grupos taxonómicos (13), especies (107) y ejemplares (10.510). Por tanto, es normal encontrar valores bajos de diversidad de Shannon (1,6) y de equitatividad de Pielou (0,6). Las comunidades faunísticas siguen el mismo patrón espacial que el descrito anteriormente para la granulometría, mostrando peores valores en las estaciones más cercanas a las jaulas. También, se encontraron diferencias entre las concesiones de Canarias, valores inferiores de todos los parámetros descriptores de infauna, y la de Madeira.

El valor del índice AMBI es bajo para todas las concesiones y estaciones de muestreo, lo que implica que el estatus ecológico (E.Ec.) de las concesiones es bueno y corresponde a un ecosistema ligeramente empobrecido. La única estación donde los valores de AMBI fueron altos (5,3), se encontraba situada debajo de las jaulas de la concesión de Ensenada Da Abra en Madeira, mostrando un estatus ecológico malo que corresponde a un ecosistema muy perturbado.

1 Borja, A., Franco, J, Pérez 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: 1100-1114.

2 Riera, R., Monterroso, O, Rodríguez, M, Ramos, E. 2011. Biotic indexes reveal the impact of harbour enlargement on benthic fauna. *Chemistry and Ecology* 27(4): 311-326.

Tabla 6. Datos descriptivos de infauna de las estaciones de las concesiones.

Concesión	Nº G. Tax.	Nº Esp.	Abud.	H´	J´	Medio		Máximo	
						AMBI	E. Ec.	AMBI	E. Ec.
Los Cristianos	14	83	5.045	1,6	0,6	2,1	Bueno	2,7	Bueno
Caletillas	14	110	3.469	1,9	0,7	1,4	Bueno	2,3	Bueno
Melenara	11	98	10.754	1,2	0,4	2,5	Bueno	2,6	Bueno
Ensenada Da Abra	12	139	22.772	1,8	0,5	0,9	Alto	5,3	Malo
Canarias	13	97	6.423	1,6	0,6	2,0	Bueno	2,5	Bueno
Total	13	107	10.510	1,6	0,6	1,7	Bueno	3,2	Bueno

3.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS COMUNIDADES ÍCTICAS

La caracterización de las comunidades ícticas, tanto las pelágicas como las bentónicas, se estudió en la estación de muestreo más próxima a la concesión acuícola. Dicho estudio se realizó *in situ* mediante censos visuales estacionarios de “punto fijo”^{1, 2}. El buceador se sitúa en el centro de un círculo imaginario de 5,6 m de radio (100 m² de superficie) y luego va girando sobre sí mismo, tomando como referencia el otro extremo de la cuerda (Foto 7). El tiempo empleado en esta operación es de 5 minutos, y una vez transcurridos, el buceador se desplaza por el área de muestreo buscando especies crípticas o de pequeño tamaño que pudieran haber pasado desapercibidas anteriormente. En cada concesión se realizaron 5 réplicas.



Foto 7. Censo visual de peces realizado por un buceador

1 Bortone, SA, Kimmel, JJ, Bundrick, CM. 1989. A comparison of three methods of visually assessing reef fish communities: time and area compensated. *Northeast Gulf Science* 10(2): 85-96.

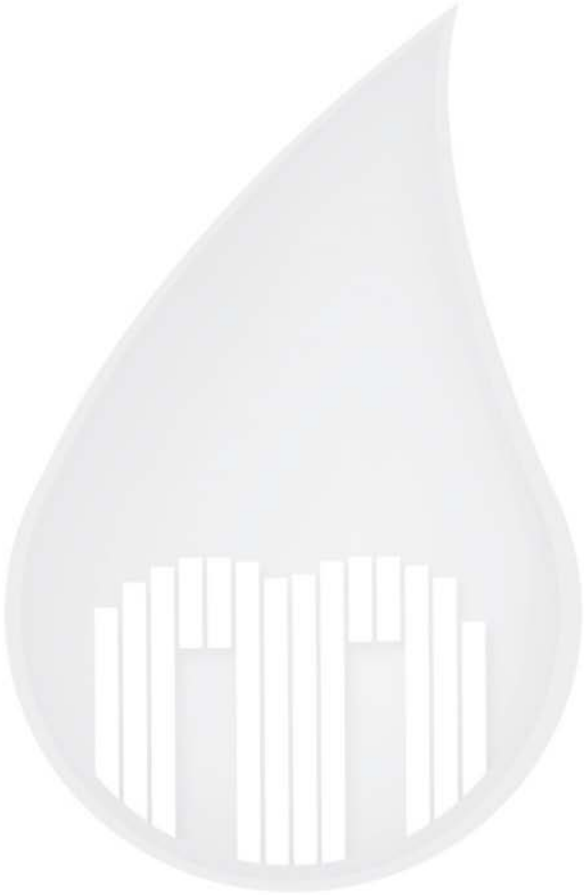
2 Falcón, J., Mena, J, Brito, A, Rodríguez FM, Mata, M. 1993. Ictiofauna de los fondos infralitorales rocosos de las islas Canarias. Observaciones mediante muestreos visuales *in situ*. *Publicaciones Especiales del Instituto Español de Oceanografía*, 11: 205-215.

Los resultados obtenidos indican que los peces salvajes presentan un comportamiento de atracción hacia las jaulas flotantes, debido a la facilidad de obtener alimento y a la presencia de una estructura que proporciona protección frente a los depredadores. En los 40 muestreos de peces realizados (8 concesiones x 5 réplicas), se contabilizaron un total de 35.974 ejemplares, pertenecientes a 27 especies diferentes (Tabla 7).

El taxón más abundante fue la boga (*Boops boops*) con 33.510 individuos, representando un 93% del total de peces. Éstas se concentran en forma de grandes cardúmenes alrededor de las jaulas; sin embargo, su presencia es testimonial o nula fuera del área de influencia de las jaulas. Las doradas (*Sparus aurata*) escapadas en operaciones normales de manejo (despesques, cambios de redes, etc.) y que se agrupan alrededor de las jaulas, son la segunda especie en importancia representando aproximadamente el 4%.

Tabla 7. Especies y abundancias del total de los muestreos

Especie	Abundancia total (n°)	Frecuencia (%)	Especie	Abundancia total (n°)	Frecuencia (%)
<i>Boops boops</i>	33.510	93,2	<i>Abudefduf luridus</i>	12	0,0
<i>Sparus aurata</i>	1.338	3,7	<i>Sparisoma cretense</i>	11	0,0
<i>Scomber colias</i>	700	1,9	<i>Xyrichthys novacula</i>	9	0,0
<i>Atherina presbyter</i>	100	0,3	<i>Mullus surmuletus</i>	7	0,0
<i>Canthigaster capistratus</i>	43	0,1	<i>Pagellus erythrinus</i>	7	0,0
<i>Bothus podas</i>	37	0,1	<i>Seriola dumerilii</i>	6	0,0
<i>Sphyræna viridensis</i>	33	0,1	<i>Serranus atricauda</i>	5	0,0
<i>Sphoeroides marmoratus</i>	28	0,1	<i>Squatina squatina</i>	5	0,0
<i>Pseudocaranx dentex</i>	22	0,1	<i>Thalassoma pavo</i>	5	0,0
<i>Spondyliosoma cantharus</i>	21	0,1	<i>Gymnura altavela</i>	4	0,0
<i>Dasyatis pastinaca</i>	17	0,0	<i>Pagrus pagrus</i>	4	0,0
<i>Taeniura grabata</i>	17	0,0	<i>Dasyatis centroura</i>	3	0,0
<i>Myliobatis aquila</i>	15	0,0	<i>Synodus saurus</i>	1	0,0
<i>Trachinus draco</i>	14	0,0	TOTAL	35.974	100





4. ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE MATERIA PERDIDA AL MEDIO

4.1 ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE PIENSO Y HECES QUE SE PIERDE AL MEDIO EN LAS OPERACIONES NORMALES DE ALIMENTACIÓN

Se construyeron y colocaron 6 trampas de sedimentos colgadas por pares en el lado exterior del copo de la jaula, a diferentes alturas: fondo del copo, mitad de copo y próxima a superficie. De esta forma, se recogió el material que no fue ingerido por los peces de cultivo antes de que éste fuera consumido por la fauna íctica asociada a las jaulas o depositado en el fondo (Figura 11 y Foto 8).

Inicialmente, todas las trampas se colocaron tapadas y al comienzo del experimento se destapó una trampa por profundidad (un total de 3 trampas), que permanecieron abiertas durante 24 horas, período que duró este experimento y que corresponde a un ciclo de alimentación. De esta forma, se calcula la cantidad total de materia particulada que se pierde al medio (pienso + heces), pero no distingue entre el porcentaje que corresponde al pienso y a las heces.

Para poder hacer esta distinción, se usaron las otras tres trampas de sedimento, que se abrieron justo después de terminar de alimentar, evitando así que entrara materia correspondiente al pienso y recogiendo únicamente la materia perteneciente a las heces. Por diferencia de masa entre las trampas abiertas durante todo el experimento y las abiertas después de alimentar, se pudo estimar la cantidad de materia orgánica perteneciente al pienso no consumido y a las heces.

Para este experimento, fue indispensable conocer de forma precisa los kilos de alimento suministrados y las toneladas de peces en la jaula.

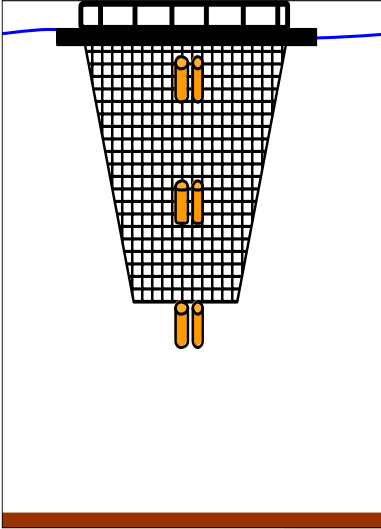


Figura 11. Esquema de disposición de las trampas

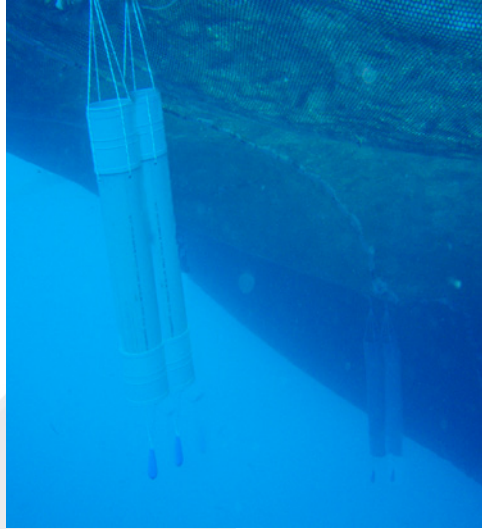


Foto 8. Ejemplo de posicionamiento de las trampas

La Tabla 8 muestra los valores y porcentajes de material recogido en las trampas de sedimento. El resultado general de este experimento indica que el 71% pertenece a las heces y el 29% al pienso. Por lo tanto, se puede concluir que casi $\frac{2}{3}$ del material particulado que se pierde al medio pertenece a las heces de los peces cultivados, siendo éste el mayor vector de entrada de material particulado al medio.

En la zona superficial los valores de heces son los menores, con un 26%, mientras que en la zona central y del fondo de la red, estos valores son mayores, un 36% y 39% respectivamente. Por el contrario, la cantidad de material recogido perteneciente al pienso disminuye con la profundidad. En las trampas de superficie y mitad de copo, los porcentajes de pienso recogidos son del 39% y 46% respectivamente, mientras que en la trampa más profunda (fondo), se obtuvieron valores del 15%.

Tabla 8. Porcentajes medios de material recogido en las trampas de sedimento de las concesiones				
Trampas de Sedimento	%		% ponderado	
	Heces	Pienso	Heces	Pienso
Superficie	61,5	38,5	25,8	38,5
Mitad	64,5	35,5	35,5	46,2
Fondo	87,5	12,5	38,7	15,4
PROMEDIO	71,2	28,8		

Estos resultados muestra un patrón dispersivo diferente para las partículas de pienso y heces, que debe incluirse en el modelo. La mayor parte del pienso se pierde en las zonas más superficiales de la jaula, mientras que las heces muestran una distribución parecida en la totalidad de la red. Por lo tanto, MACAROMOD incluirá una subrutina para incorporar estas peculiaridades en la distribución inicial de las partículas, donde se establecerán como valores por defecto los encontrados en estos experimentos, pero que además permita modelizar otras opciones.

La distribución inicial de las partículas de pienso y heces dentro de la jaula incluye las siguientes opciones en la vertical (Figura 12) y en la horizontal (Figura 13). En la vertical, las opciones por defecto del modelo son superficie para el pienso y aleatoria en la totalidad de la jaula para las heces. En la horizontal, las opciones por defecto son aleatorias, excepto a una distancia determinada del borde de la jaula (-2m) para el pienso y aleatoria en la totalidad de la jaula para las heces.

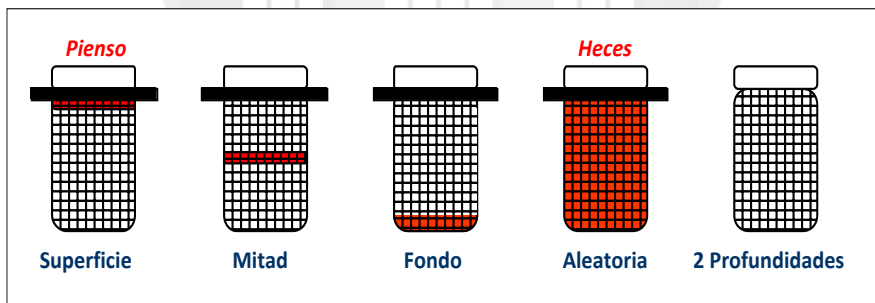


Figura 12. Opciones incluidas en MACAROMOD para la distribución inicial de las partículas en la vertical y las opciones recomendadas para el pienso y heces



Figura 13. Opciones incluidas en MACAROMOD para la distribución inicial de las partículas en la horizontal y las opciones recomendadas para el pienso y heces

En base a los valores obtenidos en las trampas de sedimento, la cantidad de pienso suministrado, la cantidad de peces existente en la jaula y los datos de corriente durante las 24 h que duró el experimento, se estimó que el valor medio de pienso que se pierde es del **3,5 %** ($\sigma=0,3$) del pienso total suministrado.

4.2 ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE PIENSO Y HECES QUE ES CONSUMIDO POR LOS PECES ASOCIADOS A LAS JAULAS

Peces pelágicos

Se instalaron 6 trampas de sedimento de fondo, colocadas por pares debajo las jaulas y coincidiendo con el centro, mitad y borde del copo (Figura 14 y Foto 9). Fue imprescindible que esta experiencia se realizara en la misma jaula que la descrita en el apartado anterior y de forma simultánea, ya que se recoge el material que no fue consumido por los peces pelágicos y que quedaría para el consumo de los peces bentónicos y la fauna invertebrada bentónica.

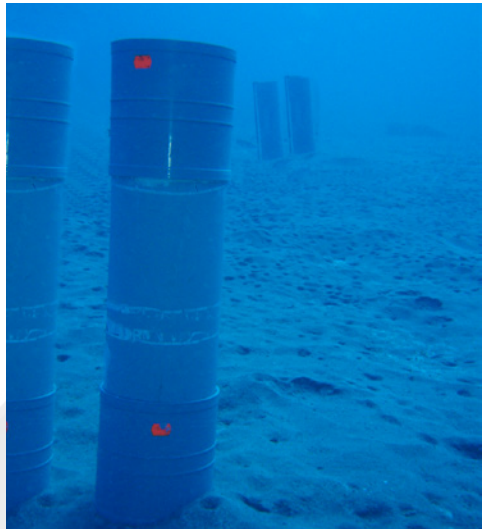
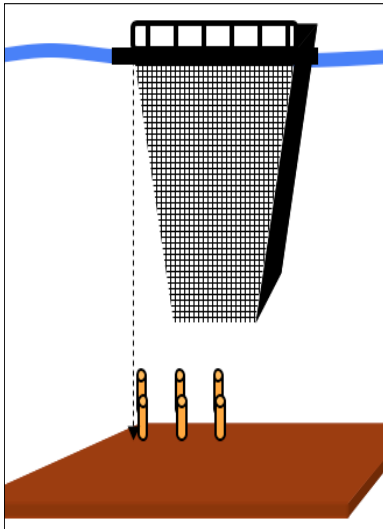


Figura 14. Esquema de disposición de las trampas **Foto 9.** Trampas de sedimento

La metodología es igual que la explicada en el experimento anterior, es decir, todas las trampas se colocaron tapadas y al comienzo del experimento se destaparon 3 trampas, que permanecieron abiertas durante las 24 horas que duró este experimento, cubriendo un ciclo de alimentación. Esto permitió conocer la cantidad total de materia orgánica que se pierde al medio (pienso + heces). Las tres trampas restantes se abrieron después de terminar de alimentar, recogiendo únicamente la materia perteneciente a las heces con el fin de calcular su porcentaje. Por diferencia de masa entre las trampas abiertas durante todo el experimento y las abiertas después de alimentar, se estimó la cantidad de materia orgánica perteneciente al pienso no consumido y las heces.

Los resultados obtenidos no permiten estimar la cantidad de pienso y heces consumido por los peces pelágicos asociados a las jaulas, ya que las posibles aportaciones de las jaulas vecinas, probablemente tuvieron más contribución que la propia jaula donde se realizó el experimento. Este hecho se debe a la gran profundidad existente en las granjas donde se realizaron los experimentos (≈ 30 m), que hace que las partículas provenientes de otras jaulas entren en las trampas y las propias de las jaulas se dispersen a zonas más alejadas.

Peces bentónicos

La cuantificación de la cantidad de pienso consumido por las comunidades ícticas bentónicas se realizó mediante la colocación de una cantidad constante de pienso en el lecho marino, en una superficie de 30 x 20 cm. Se colocaron simultáneamente 3 parcelas de estas características, una directamente bajo el copo, otra a la mitad y otra en el borde. El consumo de las partículas en el tiempo se observó, durante una hora, mediante el uso de cámaras de vídeo submarino que permite grabar el consumo de pienso de forma continuada, además de observaciones directas de los buceadores (Foto 10 y Foto 11).



Foto 10. Filmación submarina



Foto 11. Observación por buzos

Los resultados obtenidos para los experimentos de peces bentónicos fueron sorprendentes, no sólo por la cantidad de pienso que fue consumido, un 95%-100%, sino por las especies que intervinieron.

La fauna bentónica involucrada en el consumo del pienso es la considerada típica para este tipo de hábitats, donde se ubican las concesiones acuícolas (fondos arenosos submareales desprovistos de vegetación); por un lado la fauna invertebrada mayoritariamente constituida por gusanos de fuego (*Hermodice carunculata* - Foto 12) y por otro la fauna íctica, mayoritariamente constituida por tapaculos (*Bothus podas* - Foto 13), tamboril (*Sphoeroides marmoratus*) y gallinita (*Canthigaster capistratus* - Foto 14), además de las propias especies acuícolas (doradas y lubinas) que se han escapado accidentalmente de las jaulas y que se quedan en la zona.

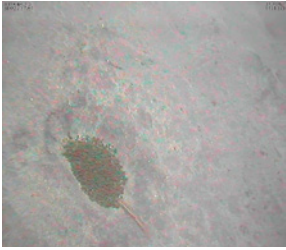


Foto 12. Gusano de fuego

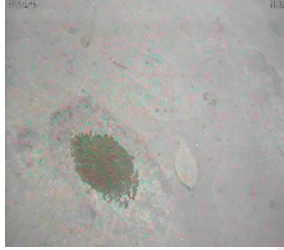


Foto 13. Tapaculo

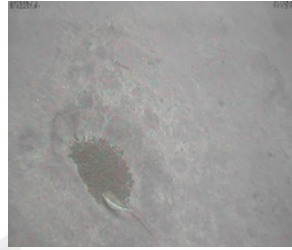


Foto 14. Gallinista

Sin embargo, se detectó que el mayor consumo bentónico se produce por especies que de forma natural no se asocian a este tipo de hábitat, como son los peces pelágicos. La fauna íctica pelágica es capaz de descender hasta el fondo y alimentarse del pienso que se encuentra depositado en el lecho marino y hacerlo de forma voraz (Foto 15). Las especies ícticas pelágicas que se identificaron alimentándose de pienso en el fondo fueron bogas (*Boops boops*) y caballas (*Scomber japonicus*). No se detectaron diferencias en la preferencia de la fauna íctica por el pienso en función de la posición de las parcelas (bajo el copo, mitad y borde).

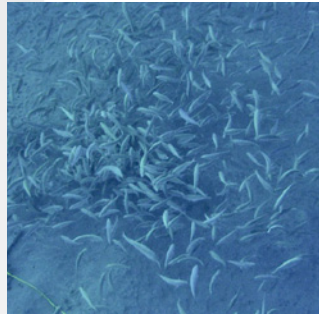


Foto 15. Fauna íctica pelágica alimentándose en el fondo

Conclusiones

A efectos de la modelización, es indiferente que los porcentajes de consumo de pienso y heces se separen en pelágicos y bentónicos, mientras que se tenga conocimiento del valor total de material que es consumido (retirado) del medio. Por lo tanto, se puede concluir que el consumo del pienso asociado a la fauna íctica (pelágica y bentónica) está en el rango de 95 - 100%. El valor por defecto que se incluirá en el modelo MACAROMOD será del 97%. En lo que respecta al material fecal, no se apreció el consumo de éste por la fauna íctica.

4.3 ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE PIENSO Y HECES PROVENIENTE DE LAS INSTALACIONES ACUÍCOLAS QUE SE DEPOSITA EN EL FONDO MARINO

La validación del modelo consistió en la comparación de las predicciones del modelo con las mediciones reales de material sedimentado (kg/m^2). Por lo tanto, fue necesario realizar una estimación de la cantidad de materia sedimentable y proveniente de las instalaciones acuícolas. Esta estimación se realizó mediante el uso de trampas de sedimento de fondo (Foto 16), siguiendo el mismo diseño de muestreo que se representa en la Figura 9.

Las trampas de sedimento se dejaron fondeadas durante un periodo mínimo de 7 días, para así recoger suficiente cantidad de material y no superiores a 15 días, para sí evitar la posible degradación antes de su análisis. Durante este tiempo, fue necesario disponer de datos sobre las especies, toneladas y tamaño de los peces presentes en cada una de las jaulas que componen la concesión de muestreo, además de las horas, cantidades y tamaños del pienso que se suministra diariamente a cada una de las jaulas que componen la concesión de muestreo.

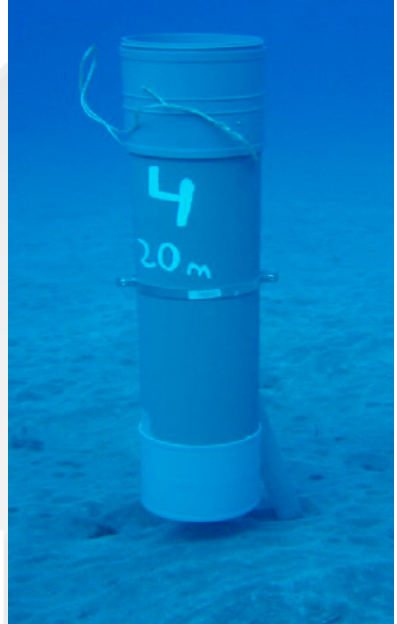
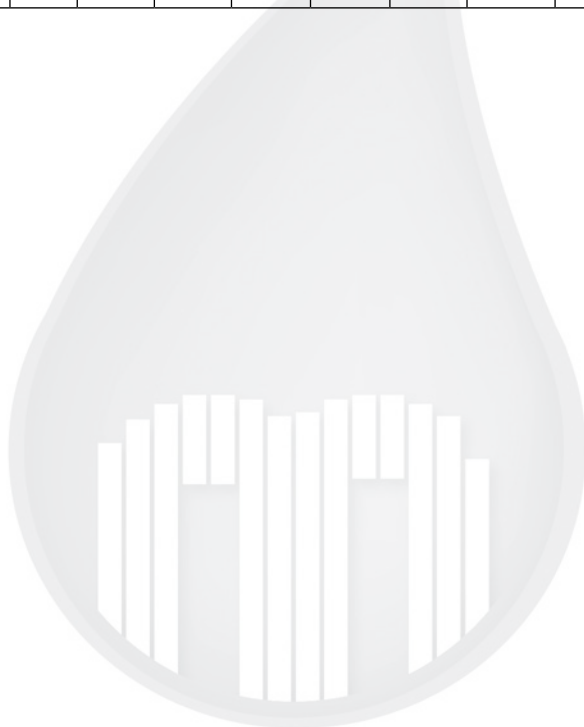


Foto 16. Trampa de sedimento

Los resultados se utilizaron en la validación del modelo (Fase 4), pero se puede extraer de ellos información importante acerca de la magnitud de la afección de este tipo de instalaciones en ambientes oceánicos de alto hidrodinamismo, como los de los archipiélagos de la macaronesia. Como es normal, los valores medidos indican que la mayor cantidad de sólidos se sedimentan debajo de las jaulas (trampa 1) y disminuyen al alejarse de ésta (Tabla 9). Sin embargo, es destacable que la trampa nº 6, tan sólo alejada de las jaulas 60 m, presenta valores de sedimentación muy próximos a los valores naturales del medio (trampas 7, 8 y 9).

Tabla 9. Valores de sólidos (g m^{-2}) recogidos en las trampas de sedimento

Concesión	Jaula	Transecto transversal		Transecto longitudinal			Referencia		
	1 (0 m)	2 (20 m)	3 (40 m)	4 (20 m)	5 (40 m)	6 (60 m)	7 (500 m)	8 (500 m)	9 (500 m)
Los Cristianos	236	192	116	188	67	50	50	29	51
Caletillas	56	38	19	45	44	29	29	23	22
Melenara	102	58	28	36	61	111	67	56	62
Ensenada Da Abra	30	28	31	27	27	6	31	25	19





5. ESTIMACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE DECANTACIÓN DE PELLETS Y HECES DE CORVINA

En la literatura científica hay datos de velocidades de sedimentación para diferentes tamaños de pienso y heces de dorada y lubina¹, incorporándose directamente en el modelo. Sin embargo, no existen datos disponibles para la corvina (*Argyrosomus regius*); por tanto, fue necesario obtener esta información mediante experimentos de laboratorio.

5.1 VELOCIDAD DE DECANTACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE PIENSO

El pienso utilizado fue EFICO Sigma 578 de la casa Biomar y de los tamaños 9 y 12 mm. Para cada tamaño de pienso, se midieron (longitud y diámetro) y pesaron 100 partículas de pienso. De forma individual, se introdujeron en una columna de decantación (se anotó la temperatura y la salinidad del agua). Para mantener los valores constantes de salinidad y temperatura durante el experimento, el volumen de agua se cambió en cada experimento.

La columna de decantación consta de un tubo de metacrilato de 2 m de alto y de 30 cm de diámetro, que se llenó con agua de mar sin filtrar. Se marcó una zona de 10 cm de anchura que se utilizó para señalar el punto de entrada y de salida de las partículas, la cual se filmó con una cámara de vídeo de alta resolución, para posteriormente calcular la velocidad de decantación de cada partícula (tiempo que tarda en recorrer la partícula esos 10 cm). Esta zona de filmación se ubicó 40 cm sobre la base del cilindro, para que las partículas tuvieran suficiente tiempo para alcanzar su velocidad de sedimentación o decantación y además evitar interferencias en las velocidades cuando las partículas se aproximen al fondo de la columna de decantación.

¹ Magill, S., Thetmeyer, H., Cromey, C. 2006. Settling velocity of faecal pellets of gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) and sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) and sensitivity analysis using measured data in a deposition model. *Aquaculture* 251: 295-305.

Una vez realizadas las filmaciones de vídeo, éstas fueron visualizadas en un PC anotando para cada partícula el tiempo de entrada a la zona de filmación (Foto 17) y el tiempo de salida (Foto 18), lo que permitió estimar el tiempo de tránsito (minutos, segundos y milisegundos) y a su vez calcular la velocidad de sedimentación (cm/s) para cada partícula.

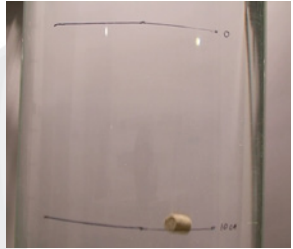
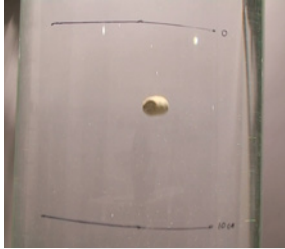
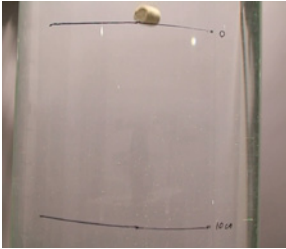


Foto 17. Pienso Biomar 12 **Foto 18.** Pienso Biomar 12 **Foto 19.** Pienso Biomar 12 entrando en la zona de medición atravesando la zona de medición saliendo la zona de medición (t_{fin}) (t_{inicio})

Los resultados de los análisis estadísticos para los datos de velocidad de decantación de los piensos Biomar 9 y Biomar 12 se muestran en la Figura 15 y Figura 16. Ambas se ajustaron a una distribución normal, siendo sus valores medios de **9,829 cm/s** y **9,674 cm/s** respectivamente.

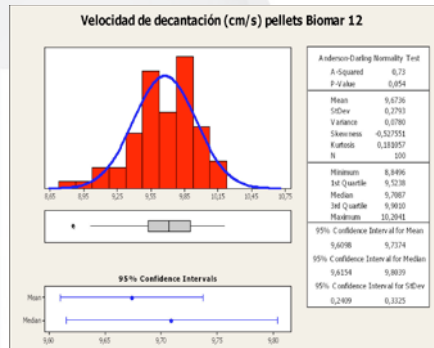
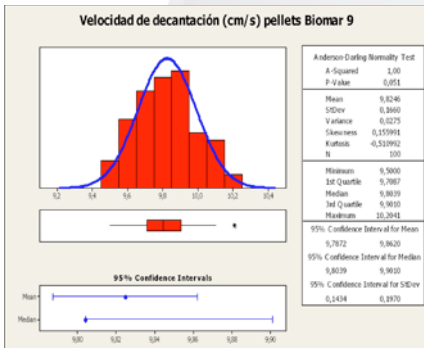


Figura 15. Análisis estadístico de los datos de velocidad de decantación (cm/s) del pienso Biomar 9

Figura 16. Análisis estadístico de los datos de velocidad de decantación (cm/s) del pienso Biomar 12

5.2 VELOCIDAD DE DECANTACIÓN DE LAS HECES

Se determinó la velocidad de decantación de las heces para 2 grupos de peces alimentados con pienso de corvina: pequeñas (<1.0 Kg) y grandes (>1.0 Kg). Para cada grupo se obtuvieron un mínimo de 10 individuos, que se mantuvieron en tanques rectangulares de 1.000 m³ en circuito abierto de agua. Los peces se aclimataron a los tanques durante 2 semanas, alimentándolos una vez al día.

Una vez terminado este período de aclimatación, comenzó la fase de recogida de las heces para su filmación en la columna de decantación. Para la recogida diaria de las heces, a primera hora de la mañana se limpiaban los tanques y posteriormente se procedía a la alimentación *ad libitum* (los peces son saciados). Durante las siguientes 3 horas, se recogían las heces mediante el pipeteado de éstas y se transferían a un contenedor para su posterior traslado a la columna de decantación. Las heces recolectadas se depositaron lentamente en la columna de decantación, dejando suficiente tiempo para realizar las grabaciones de vídeo, sin que se acumularan muchas partículas en la zona de filmación.

Una vez realizadas las filmaciones de vídeo, éstas fueron visualizadas en un PC, anotando de forma individual para cada una de las partículas el tiempo de entrada (Foto 20) y salida (Foto 22) a la zona de filmación, lo que permitió estimar la velocidad de sedimentación (cm/s) para cada partícula. El límite de detección de las partículas fue de 0.4 mm, tamaño mínimo que el operario que visualizó los vídeos pudo identificar de forma continua. Mediante el uso del software ImageJ 1.44 (National Institute of Health, USA), para cada una de las partículas identificadas se midió su longitud y anchura.



Foto 20. Heces de corvina entrando en la zona de medición **Foto 21.** Heces de corvina atravesando la zona de medición **Foto 22.** Heces de corvina saliendo la zona de medición (fin) (inicio)

Se observó que las heces estaban disgregadas en una multitud de trozos de diversos tamaños (Foto 23). La rotura de las heces se debió al aleteo de los peces en el tanque, proceso similar al que ocurre en las jaulas de cultivo. Debido a esta variedad en tamaño, la velocidad de decantación del conjunto de partículas no siguió una distribución normal, siendo su valor medio de 0,53 cm/s y 0,49 cm/s para la corvinas pequeñas (<1.0 Kg) y grandes (>1.0 Kg) respectivamente.

Estos valores de velocidad de decantación no son representativos del conjunto de partículas excretadas por las corvinas, por lo que no se recomienda su utilización. Por lo tanto, para la inclusión de los valores de velocidad de sedimentación de las heces de corvina en el modelo MACAROMOD, se dividió el conjunto de partículas de heces en intervalos de velocidades de 0.5 cm/s, calculando para cada uno de estos grupos la frecuencia de aparición y valor medio de velocidad. Por último y mediante la Ley de Stokes¹, se estimó el valor medio de masa correspondiente a las partículas de cada rango.

Como se puede apreciar en la Tabla 10, la distribución de partículas no coincide con el porcentaje de masa asociado a cada grupo. Este resultado es normal, ya que aunque existen unos porcentajes de frecuencia de partículas pequeñas muy altos, éstas son las de menor masa y viceversa; los porcentajes de presencia de partículas altas es muy bajo, pero éstas son las de mayor masa.

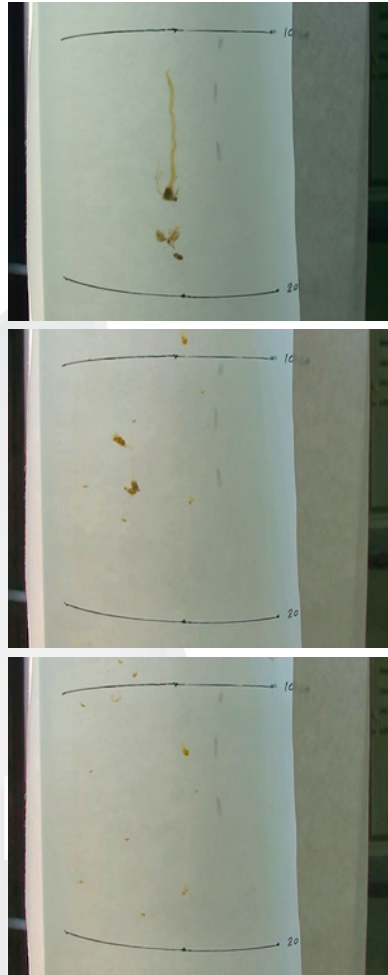


Foto 23. Ejemplos de diferentes tamaños de fragmentos de heces de corvina

1 Happel, J. and Brenner, H., 1983. Low Reynolds Number Hydrodynamics: With Special Applications to Particulate Media (Mechanics of Fluids and Transport Processes). Springer Netherlands, 553p.

Tabla 10. Frecuencia de partículas y distribución de la masa de las heces perteneciente a cada uno de los grupos de velocidades de decantación de las heces de corvina							
RANGO DE VELOCIDAD (cm/s)		0 - 0,5	0,5 - 1,0	1,0 - 1,5	1,5 - 2,0	2,0 - 2,5	2,5 - 3,0
FRECUENCIA DE PARTÍCULAS (%)	PEQUEÑA	61,3	24,1	9,2	3,7	0,9	0,9
	GRANDE	63,9	24,9	7,7	3,2	0,3	-
	TODAS	62,5	24,5	8,4	3,4	0,7	0,4
DISTRIBUCIÓN DE LA MASA ENTRE PARTÍCULAS (%)	PEQUEÑA	31,2	3,6	13,2	42,6	0,6	8,8
	GRANDE	33,3	7,0	16,5	29,5	13,8	-
	TODAS	32,3	5,3	14,9	35,9	7,4	4,3

Los resultados del test no paramétrico de Mann-Whitney para dos muestras independientes, indicaron que no existen diferencias significativas entre las velocidades de sedimentación de las corvinas pequeñas y grandes ($P=0.37$). Sin embargo, los resultados del análisis de la varianza no paramétrico Kruskal-Wallis detectaron diferencias significativas entre todos los grupos de velocidades de decantación ($P < 0.001$). Por lo tanto, en el modelo MACAROMOD no se harán distinciones en base al tamaño de las corvinas (pequeñas y grandes) y los datos de distribución de velocidades de decantación que se utilizarán serán los genéricos para los dos tamaños según muestra la Tabla 11.

Tabla 11. Velocidad media y distribución de masa de las partículas perteneciente a cada uno de los grupos de velocidades de decantación de las heces de corvinas pequeñas y grandes juntas							
VELOCIDAD DECANTACIÓN (cm/s)		0,25	0,70	1,21	1,69	2,24	2,54
DISTRIBUCIÓN DE LA MASA ENTRE PARTÍCULAS (%)		32,3	5,3	14,9	35,9	7,4	4,3



6. CREACIÓN, ADAPTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Los trabajos comprendidos en esta fase incluyen la estructuración del modelo, su parametrización para adaptarlo a las condiciones de la Macaronesia, la escritura de los códigos fuente (arquitectura binaria mediante una versión beta del modelo) y la validación. Por último y una vez validado el modelo, se terminó su construcción y diseño de interfaz, redactándose un manual de usuario.

6.1 CREACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO

La estructura conceptual del modelo incluye aquellos procesos que inciden directamente en la dispersión del material particulado proveniente de las jaulas de cultivo y sus posibles impactos en el medio bentónico. Una vez estructurado en su forma más general, se procedió a la parametrización del modelo mediante la utilización de la información obtenida en los diferentes muestreos y experimentos realizados, por ejemplo: coeficientes de dispersión, fauna bentónica, etc.

La estructura general del modelo se basa en cuatro módulos (submodelos), que incluyen los diferentes procesos involucrados en la generación y dispersión del material de desecho proveniente de las jaulas y su impacto asociado. Estos submodelos se integran secuencialmente de tal forma que, los resultados generados por un módulo, se utilizan en el subsiguiente módulo como parte de los datos de entrada de éste (Figura 17).

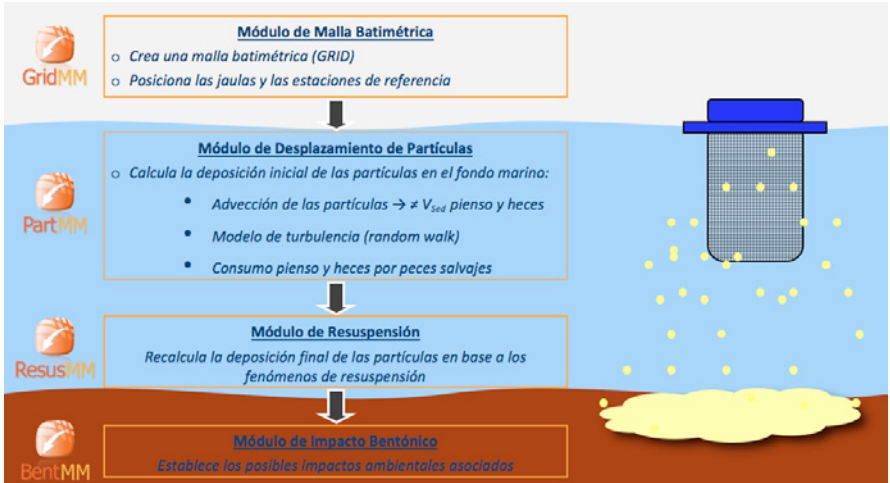


Figura 17. Esquema del modelo MACAROMOD

1. Módulo de Malla Batimétrica

Genera la malla batimétrica de la zona de interés (con la posición individual de cada una de las jaulas), a partir de la cual los demás módulos basarán sus cálculos. El tamaño máximo de la malla batimétrica que se puede generar es de 999 x 999 celdas. La resolución espacial de cada celda (tamaño), puede ajustarse a cualquier valor que el usuario estime conveniente para el propósito de su estudio.

Este módulo puede trabajar con ficheros georreferenciados en coordenadas UTM o con ficheros planos sin georreferenciación. Se recomienda utilizar la opción de ficheros georreferenciados, ya que los resultados obtenidos del modelo también estarán georreferenciados, permitiendo un cartografiado inmediato de la dispersión en la zona de estudio.

2. Módulo de Desplazamiento de Partículas

Se simulan distintas velocidades de sedimentación y advección de las partículas para calcular la deposición inicial en el fondo marino de sólidos (escenario más común), carbono, medicamentos asociados al pienso u otros compuestos. Este módulo permite estimar el desplazamiento de las partículas de vertidos continuos de pienso y heces (escenario más común) o un vertido esporádico de un

compuesto asociado al pienso, como es el caso de los piensos medicamentosos. Para su funcionamiento, el usuario debe proporcionar/confirmar información y datos que a continuación se detallan.

- **Características de las jaulas:** esta subrutina permite al usuario ajustar las especificaciones de las jaulas de cultivo (forma, tamaño, profundidad y nombre) y de producción (especies cultivadas y pienso suministrado) de cada una de las jaulas que componen una concesión.
- **Balance de masas:** en base a los experimentos realizados y a la literatura científica, el programa propone valores por defecto para estimar la cantidad de pienso y heces que se pierden al medio.
- **Velocidad de sedimentación:** el usuario debe seleccionar los diferentes tipos y tamaños de pienso utilizados y las velocidades de sedimentación asociadas a cada especie (dorada, lubina y corvina). El programa propone valores por defecto tanto para el pienso como para las heces.
- **Posición inicial de las partículas:** el usuario debe seleccionar la distribución inicial de las partículas de pienso y heces dentro de las jaulas, tanto en el eje horizontal como en el vertical. El programa, en base a los experimentos realizados en este proyecto, propone las opciones por defecto.
- **Velocidad de corrientes:** el usuario debe seleccionar el número de correntímetros utilizados (hasta 5) y su profundidad de fondeo. Se recomienda tener medidas de velocidad e intensidad de la corriente a un mínimo de 3 profundidades; superficie (1 m), mitad de la columna de agua y fondo (1 m sobre el lecho marino).
- **Peces salvajes:** el usuario ajusta los datos de pienso y heces que son consumidos por los peces salvajes asociados a las jaulas de cultivo, tanto los pelágicos como los bentónicos. En base a los experimentos y los muestreos realizados, el modelo propone un **97% para Canarias** y **75% para Madeira**.
- **Modelo de turbulencia:** el usuario debe incluir los valores de los coeficientes de dispersión ($m^2 s^{-1}$). En base a los experimentos realizados, el modelo propone los siguientes valores: **$k_x=0.4$, $k_y=0.5$ y $k_z=0.01$**
- **Trayectoria de las partículas:** el usuario puede elegir el número de partículas (NP) a utilizar (hasta 9.999) y tiempo de evaluación de cada partícula (TEP), es decir, los incrementos de tiempo en que la trayectoria de cada partícula es recalculada en función de la dispersión, turbulencia y profundidad a la que se encuentra. El programa propone como valores

por defecto un $NP=10$ y un $TEP= 6s$ (precisión muy alta), ya que en un modelo por capas (hasta cinco correntímetros) y con partículas tan gruesas como el pienso, es aconsejable modelar con la máxima precisión.

- **Altura media de la marea:** el usuario debe incluir un valor de altura media de la marea, para corregir las profundidades de la malla batimétrica en función de estas variaciones con el tiempo. El programa propondrá por defecto un valor de 1.25 m.

3. Módulo de Resuspensión

Recalcula la posición y cantidad de material depositado en el fondo en función de los procesos de resuspensión (erosión, transporte, deposición y consolidación) y degradación (G-Model). Este módulo aplica a las partículas un campo de velocidad de corriente medida cerca del fondo. La cantidad de material a incluir en los procesos de resuspensión, es determinada por la deposición inicial obtenida sobre la malla, en tanto la proporción de material a resuspender se obtiene de una relación entre la velocidad de corriente de fondo y una “función de erosión”, con lo que se redepositan las partículas sobre el modelo de malla.

4. Módulo de Impacto Bentónico

El propósito de este módulo es dotar al modelo de una capacidad predictiva del impacto ambiental asociado a una cantidad de materia orgánica determinada. Hasta el momento, los esfuerzos se han centrado en la creación de una herramienta lo más precisa posible para cuantificar, por un lado, la cantidad de materia orgánica que se pierde al medio (pienso + heces), y por otro, su dispersión en el lecho marino. Sin embargo, por muy precisas que lleguen a ser estas predicciones, no proporcionan información sobre los posibles impactos ambientales asociados.

Para ello y en base a los resultados de los trabajos de campo realizados en este proyecto, se correlacionaron las predicciones del modelo (masa m^{-2} fondo año $^{-1}$) con la respuesta ambiental a través del índice bentónico AMBI (Figura 18). El ajuste es de tipo polinomial de tercer orden y con un valor de R^2 de 0.7, lo que indica un buen ajuste.

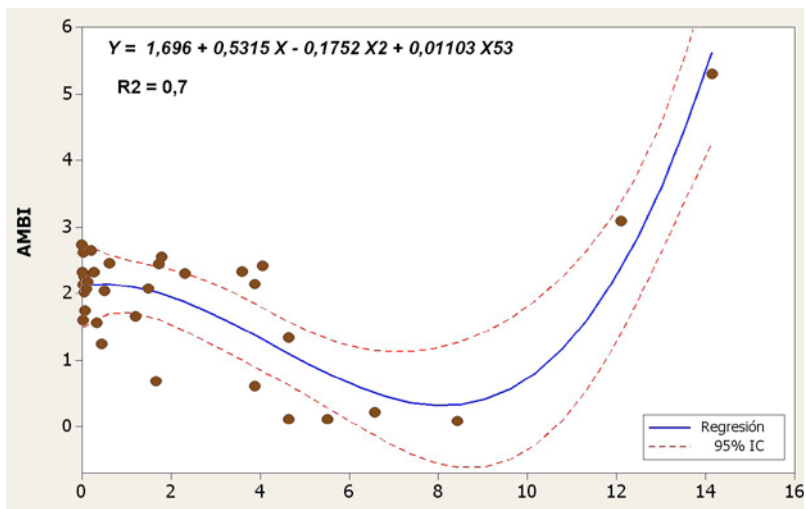


Figura 18. Relación entre sólidos sedimentados e índice AMBI MACAROMOD

Se aprecia que aumentos moderados de sólidos sedimentados mejoran el estatus ecológico, hasta alcanzar valores de 10 kg/m²/año donde el estatus ecológico comienza a empeorar. Este comportamiento es normal en fondos oligotróficos como los encontrados en la Macaronesia, donde pequeños aportes de alimento favorecen el desarrollo de las comunidades presentes. Cuando el aporte de material sobrepasa la capacidad de asimilación del medio, el estatus ecológico comienza a empeorar. **Es importante destacar que esta relación es sólo válida para el modelo MACAROMOD y no puede ser aplicada al resultado de otros modelos numéricos ni regiones.**

La Tabla 12, extraída de los trabajos realizados por el grupo científico de AZTI-TECNALIA¹, muestra la relación que el modelo MACAROMOD utilizará entre el valor del índice AMBI y el grupo ecológico dominante, el estado general de la comunidad, la existencia o no de perturbación ambiental y el estatus ecológico del ecosistema.

1 Borja, A. & Muxika, I. 2005. Guidelines for the use of AMBI (AZTI's marine biotic index) in the assessment of the benthic ecological quality. *Marine Pollution Bulletin* 50: 787-789.

Tabla 12. Índice AMBI e implicaciones ambientales (grupo ecológico, comunidad, perturbación y estatus ecológico).

AMBI	Grupo ecológico dominante	Estado de la comunidad	Clasificación de perturbación	Estatus ecológico
$0,0 < \text{AMBI} \leq 0,2$	I-II	Normal	No perturbado	Alto
$0,2 < \text{AMBI} \leq 1,2$		Empobrecido		
$1,2 < \text{AMBI} \leq 3,3$	III	Desequilibrado	Ligeramente perturbado	Bueno
$3,3 < \text{AMBI} \leq 4,3$	IV-V	Transición a contaminado	Moderadamente perturbado	Moderado
$4,3 < \text{AMBI} \leq 5,0$	IV-V	Contaminado	Moderadamente perturbado	Pobre
$5,0 < \text{AMBI} \leq 5,5$	V	Transición a muy contaminado	Muy perturbado	Malo
$5,5 < \text{AMBI} \leq 6,0$		Muy contaminado		
$6,0 < \text{AMBI} \leq 7,0$	Azoico	Azoico	Perturbación extrema	

6.2 VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo MACAROMOD consistió en la comparación de las predicciones del modelo con los datos reales de material sedimentado (Kg/m^2) en cuatro concesiones, dos en Tenerife, una en Gran Canaria y otra en Madeira. El uso de un número tan alto de concesiones para validar el modelo, así como sus diferentes condiciones ambientales (ambientes dispersivos e intermedios), las particularidades de sus cultivos (sistemas, especies, etc.) y su distribución geográfica, proporcionarán gran robustez a los resultados obtenidos.

La parametrización del modelo fue la misma en las cuatro zonas de estudio (valores por defecto), excepto aquellos valores que hacen referencia a las condiciones particulares de cada una de las concesiones, ésto es: (1) batimetría, (2) características de las jaulas, (3) balance de masas, (4) velocidad de la corriente, (5) modelo de turbulencia, (6) altura media de la marea y (7) los valores naturales de sólidos en suspensión.

Los resultados, en forma de mapas de contornos, de la modelización de las concesiones de Los Cristianos, Caletillas, Melenara y Ensenada Da Abra se muestran en la Figura 19, Figura 20, Figura 21 y Figura 22, respectivamente. Como se puede apreciar, la dispersión de los sólidos provenientes de las instalaciones acuícolas coincide con las direcciones predominantes de la corriente en cada una

de las zonas. En Los Cristianos, la dispersión de material se encuentra en las direcciones NNE y SSO, mientras que en Caletillas en la NE y SE. En Melenara, la pluma de dispersión se ubica en las direcciones N-NO y S-SO. En el caso de Ensenada Da Abra, el patrón dispersivo es más complejo, debido a que las corrientes dentro de la bahía donde se ubican las jaulas, tienen un comportamiento diferente a las corrientes en mar abierto. Los datos de corriente, tanto la velocidad como la dirección, se ven localmente modificados, difuminándose el efecto de la marea sobre ésta y por consiguiente no ajustándose a un patrón normal de marea (direcciones predominantes de la corriente en sentido opuesto). En esta concesión, el material particulado proveniente de las instalaciones acuícolas se distribuye en un abanico que va del NO al NE.

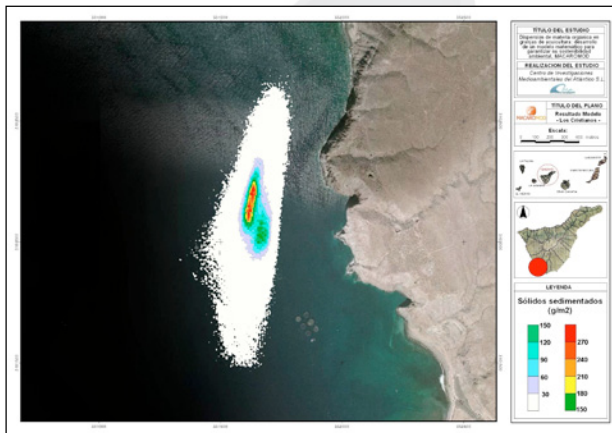


Figura 19. Resultados del modelo MACAROMOD en la concesión de Los Cristianos (Tenerife)

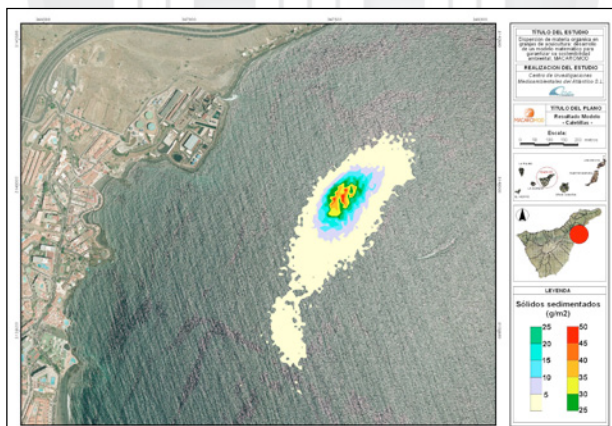


Figura 19. Resultados del modelo MACAROMOD en la concesión de Caletillas (Tenerife)

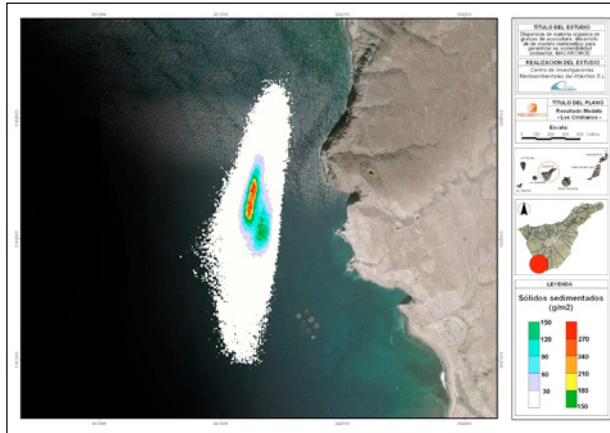


Figura 21. Resultados del modelo MACAROMOD en la concesión de Melenara (Gran Canaria)

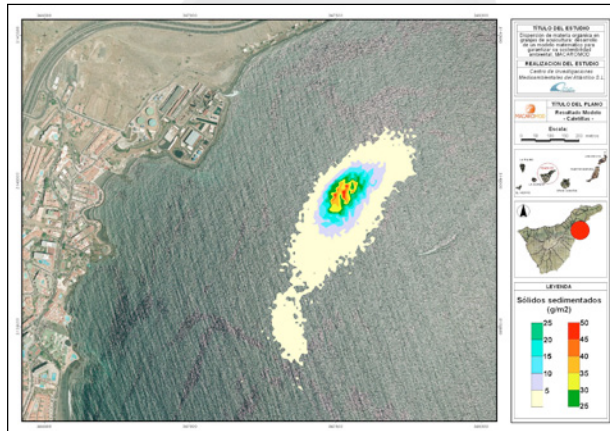


Figura 22. Resultados del modelo MACAROMOD en la concesión de Ensenada Da Abra (Madeira)

Para poder comparar las predicciones del modelo (sumándoles los valores de sólidos sedimentados correspondiente a los valores naturales - trampas de sedimento de referencia), con las mediciones reales de material sedimentado recogido por las trampas de sedimento, los datos ajustaron a una recta de regresión (Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26 y Figura 27).

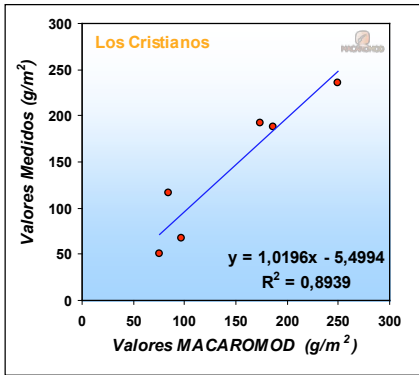


Figura 23. Relación entre los valores de sólidos medidos y los modelizados en la concesión de Los Cristianos (Tenerife)

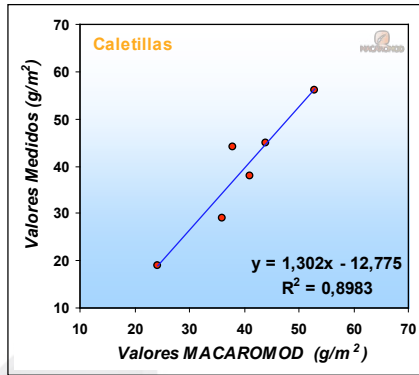


Figura 24. Relación entre los valores de sólidos medidos y los modelizados en la concesión de Caletillas (Tenerife)

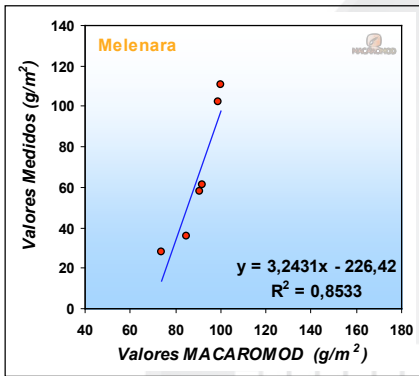


Figura 24. Relación entre los valores de sólidos medidos y los modelizados en la concesión de Melenara (Gran Canaria)

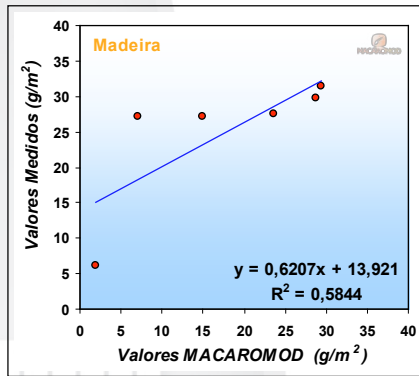


Figura 25. Relación entre los valores de sólidos medidos y los modelizados en la concesión de Ensenada Da Abra (Madeira)

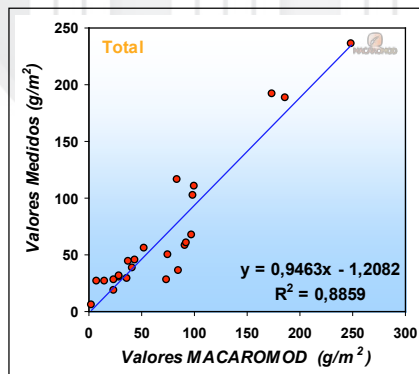


Figura 24. Relación entre los valores de sólidos medidos y los modelizados en la concesión de las cuatro concesiones juntas

Posteriormente, se estimó la bondad de dicho ajuste cuantificando en qué medida la línea de regresión muestral se ajusta a los datos, de la siguiente forma:

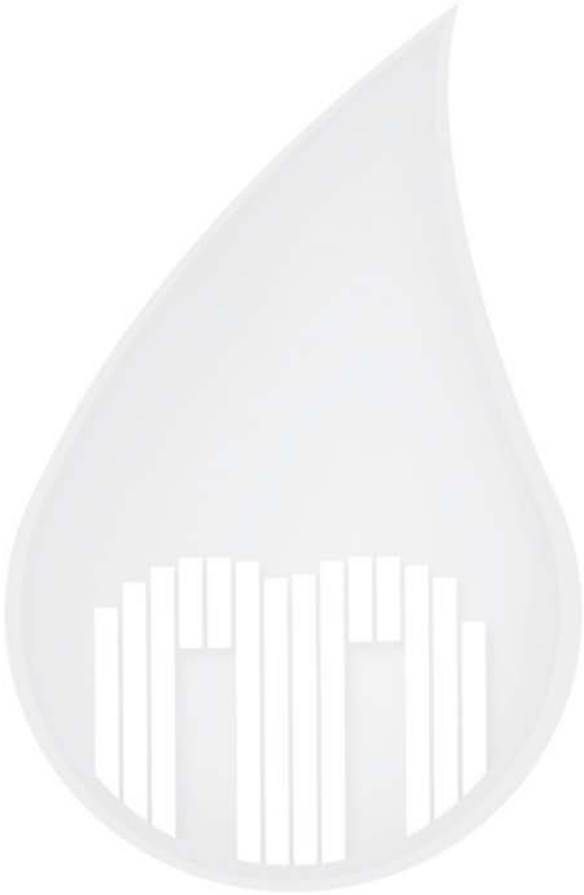
- **Estadístico F:** probar si el uso de una recta es adecuado para describir la relación entre las variables de estudio.
- **Prueba de hipótesis para el coeficiente de regresión β_1 (pendiente):** evaluar si la variable independiente está explicando algo sobre el comportamiento de la variable de respuesta.
- **Coefficiente de determinación (R^2):** mide la proporción de la variabilidad de la variable dependiente explicada por su relación lineal con la variable independiente.

Las predicciones del modelo, tanto para las concesiones individuales como para el conjunto de datos globales, se ajustan bien a los valores de sólidos sedimentados medidos (Tabla 13). Los valores del coeficiente de determinación (R^2) están cercanos al 0.9 y los valores del estadístico F y la prueba de hipótesis para el coeficiente de regresión β_1 son significativos ($p < 0.05$). Sin embargo, éste no es el caso para la concesión de Ensenada Da Abra, donde los resultados del modelo no son capaces de reproducir la situación natural de dispersión y sedimentación del material particulado proveniente de las jaulas de cultivo. Probablemente, las singulares características hidrográficas de la zona, debidas al encajonamiento de la concesión acuícola en una bahía, sean la causa de este comportamiento anómalo y puntual del modelo.

Se puede concluir que las predicciones del modelo **MACAROMOD tienen un MUY BUEN ajuste con la realidad** (valores medidos a través de las trampas de sedimento), siendo éste una herramienta de predicción con garantías.

Tabla 13. Estadístico F, prueba de hipótesis para β_1 (pendiente) y coeficiente de determinación (R^2), para las concesiones acuícolas de forma individual y para el conjunto de datos

Concesión	F		B1 (pendiente)		R^2
	F	p	t	p	
Los Cristianos	33,7	0,004	5,8	0,004	0,89
Caletillas	35,3	0,004	5,9	0,004	0,90
Melenara	23,3	0,008	4,8	0,008	0,85
Ensenada Da Abra	5,6	0,077	2,3	0,077	0,58
Total	170,7	<0,001	13,07	<0,001	0,89





7. CASOS DE ESTUDIO

En este apartado se exponen cuatro casos de estudio hipotéticos, uno por archipiélago de la Macaronesia (Canarias, Madeira, Azores y Cabo Verde).

En el caso de estudio de Canarias, se usará el modelo MACAROMOD para asesorar la viabilidad ambiental de una nueva instalación, en una zona de la Tenerife que presenta un alto potencial para el desarrollo de esta actividad. En el caso de estudio de Madeira, el modelo se utilizará para asesorar la viabilidad ambiental de una ampliación de producción de una instalación ya existente. Los casos de estudio de Azores y Cabo Verde, además del uso del modelo MACAROMOD para estimar la zona de afección y predecir los posibles impactos ambientales asociados, será necesario identificar zonas con alto potencial para el desarrollo acuícola, ya que en estos archipiélagos aún no existe actividad acuícola ni estudios de zonificación.

Para todos los casos de estudio se utilizaron los valores por defecto del modelo, excepto aquellos que hacen referencia a las condiciones particulares de la concesión: (1) malla batimétrica, (2) características de las jaulas y (3) y velocidad y dirección de la corriente. Como en las zonas de estudio de Azores y Cabo Verde no existen datos de corrientes, fue necesaria la utilización de modelos hidrodinámicos para obtener un registro de datos utilizables en MACAROMOD.

Para los casos de estudio donde se asesorará la viabilidad ambiental de una nueva concesión, éste es, Canarias, Azores y Cabo Verde, el modelo se utilizará para concesión acuícola tipo. Por lo tanto, en primer lugar será necesario establecer y dimensionar lo que significa una concesión acuícola tipo, en segundo y en base a ésta, estimar su plan de producción (producción anual y pienso suministrado) y en tercero, posicionar la concesión en la zona seleccionada.

1. Definición de la concesión acuícola tipo: el tamaño de una instalación es uno de los puntos críticos del desarrollo de un proyecto de implementación de una empresa acuícola. A nivel europeo, se observa la desaparición de pequeñas empresas y la concentración de las instalaciones acuícolas existentes en grandes empresas multinacionales. En este estudio, se propone una instalación acuícola con 21 jaulas y una capacidad

productiva máxima de 1.995 toneladas al año. Se utilizaron jaulas de 25 m de diámetro y redes de 16 m (12 de dorada y 9 de lubina) y organizadas en trenes de tres filas. Cada una de estas jaulas se encuentra dentro de una celda 40 x 40 m.

2. Estimación del plan de producción: la simulación de la dispersión tiene que efectuarse en base a las estimaciones de pienso aportado y para este cálculo, es necesario establecer un plan de producción para 10 años en intervalos mensuales. Esta simulación se realizó en base a las características de la concesión tipo anteriormente descrita y las siguientes características:

- Las jaulas se siembran con 300.000 alevines de 4 g y el despesque de los peces tiene lugar con un peso medio de los individuos de 350 g.
- El ciclo de producción es de 12 meses para la dorada y 14 meses para la lubina.
- La producción estimada por jaula es de una 95 T año⁻¹.

Para el uso del modelo MACAROMOD, la estimación de la cantidad de pienso consumido debe calcularse para un año tipo. Siguiendo el principio de precaución, se utilizaron los datos del escenario más desfavorable, éste es, el de mayor producción y por ende consumo de pienso, que coincidió con el tercer año. Durante este año se despescan todas las jaulas de la instalación, 12 de dorada y 9 de lubina, con una producción de 1.988 T y un consumo de pienso de 3.633 T.

3. Posicionamiento de las concesiones: para la disposición y ubicación de las concesiones acuícolas, se tuvieron en cuenta los siguientes criterios.

- Las jaulas deben anclarse en zonas donde la profundidad sea suficiente para maximizar el intercambio de agua, mantener las redes suficientemente alejadas del fondo y favorecer la dispersión de los restos de pienso no consumido y material fecal. Por otro lado, los costes y la complejidad del anclaje aumentan con la profundidad, por lo que se debe encontrar un punto óptimo entre los factores anteriormente mencionados. Por lo que se establece que la profundidad mínima de cualquier punto dentro de una

concesión, sea de 25 m, para así garantizar que la profundidad media del fondo marino en la concesión acuícola sea, como mínimo, dos veces la profundidad de la red (la profundidad de la red se mide desde la superficie del agua hasta el vértice del copo). Como batimetría máxima se ha tomado la cota de 50 m.

- Las zonas con mayores batimetrías requieren de sistemas de anclajes más largos y viceversa. Como regla general, la longitud de los anclajes debe ser como mínimo tres veces superior a la profundidad. Por lo tanto, si se plantea la ubicación de una concesión a 30 m de profundidad, la longitud del anclaje debe ser de 90 m. Consecuentemente, los anclajes de la parte interior de la concesión son más cortos que los de la exterior.
- La concesión acuícola debe alinearse paralelamente a las líneas batimétricas, para no comprometer el sistema de anclajes.
- Se deben evitar zonas con cambios batimétricos bruscos, tanto en intensidad como en dirección, que pueden desestabilizar el entramado de anclajes.

7.1 CASO DE ESTUDIO EN CANARIAS

Descripción

- **Petición de una nueva concesión acuícola**
- **Datos de ubicación**
 - Costa oeste de Tenerife
 - 3,8 Km al sur del Puerto de San Juan
 - Batimetría debajo de las jaulas 30-35 m
 - Valores medios de corriente: superficie 15,9 cm/s y fondo 11.7 cm/s
- **Datos de producción**
 - 21 jaulas → 25 m diámetro y 16 m calado de red
 - Especies cultivadas → 12 jaulas de dorada + 9 jaulas de lubina
 - Siembra por jaula → 300.000 alevines
 - Ciclo productivo (≈ 350 g/pez) → 12 meses dorada y 14 meses lubina

- Capacidad productiva máxima → 95 t/año jaula → 1.995 t/año concesión
- Capacidad productiva real → plan de producción 10 años → peor caso → año 3 ≈ 1.610 t

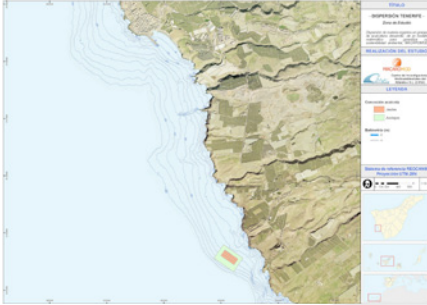


Figura 28. Zona de estudio general

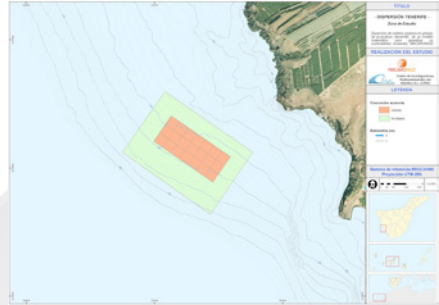


Figura 29. Zona de estudio general

Resultados

- **Sólidos sedimentados (kg/m²/año):**
 - Zona de acumulación a ≈ 100-200 m de las jaulas
 - Mayor acumulación debajo de las jaulas (7-9 kg/m²/año)
- **Estatus ecológico (AMBI):**
 - Valores intermedios debajo de algunas jaulas (3,4) → Estatus ecológico moderado

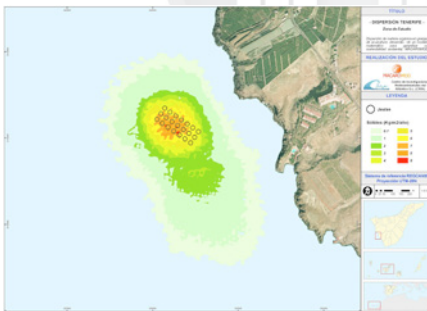


Figura 30. Sólidos sedimentados (kg/m²/año)



Figura 31. Estatus ecológico (AMBI)

Recomendaciones

- **No se espera que la nueva concesión derive en un impacto ambiental significativo.**
- **Por lo tanto, se aprobaría el proyecto propuesto con los condicionantes ambientales normales.**

7.2 CASO DE ESTUDIO EN MADEIRA

Descripción

- **Concesión existente en Madeira:**
 - 8 jaulas de 20 m de diámetro y 15 m calado
 - Producción anual de 200 t de dorada
 - FCR \uparrow \rightarrow \uparrow % pérdida de pienso al medio
 - Batimetría bajo las jaulas 18-22 m
 - Valores medios de corriente: superficie 5,9 cm/s y fondo 5,8 cm/s
- **Aumento de producción:**
 - 8 jaulas \rightarrow 12 jaulas
 - Producción 200 t/año dorada + 100 t/año lubina

Resultados

- **Sólidos sedimentados (kg/m²/año):**
 - Zona de acumulación reducida a \approx 50 m de las jaulas
 - $\uparrow\uparrow$ acumulación debajo de las jaulas (14-15 kg/m²/año)
- **Estatus ecológico (AMBI):**
 - tmoderado-pobre e incluso malo

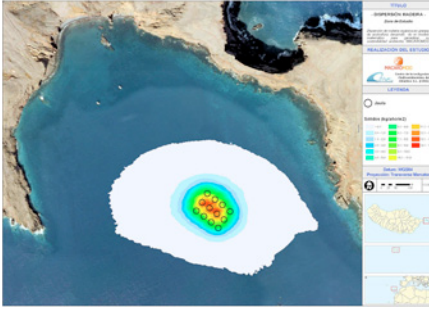


Figura 32. Sólidos sedimentados (kg/m²/año)

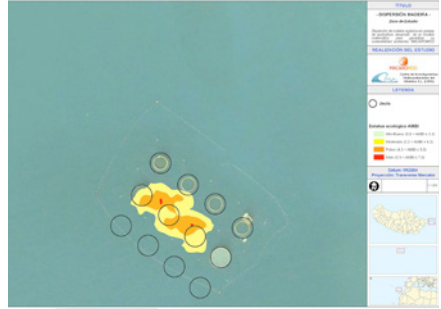


Figura 33. Estatus ecológico (AMBI)

Recomendaciones

- **No se espera que el aumento de producción derive en un impacto ambiental severo, pero sí se prevé una modificación importante de las comunidades bentónicas en algunas zonas localizadas.**
- **Por lo tanto, se podría aprobar el aumento de producción propuesto, pero con condicionantes ambientales más severos (aunque dependerá de la legislación de cada región y del conocimiento que se vaya adquiriendo con el uso del modelo y los PVA asociados):**
 - Diseño inicial del PVA más exigente → más estaciones y mayor frecuencia de muestreo.
 - Autorización condicionada a los resultados del PVA (como ocurre en Canarias).

7.3 CASO DE ESTUDIO EN AZORES

Delimitación de las áreas que presentan la mayor aptitud frente a un uso acuícola

Debido a la falta de información en muchos casos, e inconsistencia de ésta en otros, los trabajos para la delimitación de las áreas que presentan la mayor aptitud frente a un uso acuícola en esta región, se centraron en la isla de São Miguel, donde la cantidad y calidad de los datos permitieron realizar este estudio.

El primer paso fue la identificación de las variables que controlan la idoneidad para ubicar jaulas de acuicultura dedicadas al cultivo de peces. Estas variables se subdividen en dos grupos: restricciones y factores. Las *restricciones* son variables que limitan el desarrollo de las alternativas en estudio. Un *factor* se define como una variable que incrementa o reduce la idoneidad de una alternativa específica de la actividad en consideración. Las variables utilizadas fueron 17, de las cuales 7 corresponden a factores y 10 a restricciones, fueron las siguientes:

- **Factores:** proximidad a puertos, zonas de baño, instalaciones de frío, proximidad a aeropuertos, batimetría, sustrato y oleaje (altura de ola significativa y periodo).
- **Restricciones:** zonas de fondeo, zonas de pesca, zonas de buceo, pecios, zonas de navegación costera, vertidos submarinos, zonas de protección, chimeneas hidrotermales, cables submarinos y boyas meteorológicas.

Dada la variedad de escalas en que son medidos (metros, grados centígrados, etc.), estos valores deben ser transformados a unidades comparables. Este proceso es el que se conoce como *estandarización o clasificación de criterios*. En este estudio se utilizó una escala de clasificación del 1 al 3, siendo 3 el valor más idóneo y 1 el menos indicado para el desarrollo de las actividades acuícolas en las zonas de estudio. A las restricciones se les otorgó un valor de 0.

A continuación, se incorpora la importancia relativa de cada factor, expresada en forma de ponderación. Finalmente, utilizando una *combinación lineal ponderada*, se combinan los factores y pesos para obtener un valor de potencial acuícola.

La estimación global del potencial acuícola para la isla de São Miguel se muestra en la Figura 34, donde las áreas con potencial acuícola se han clasificado de mayor a menor idoneidad (15 opciones). Se seleccionó como zona idónea para ubicar una concesión acuícola tipo la zona clasificada como “1º Opción” y ubicada en la zona sur de la isla. Esta franja es de unos 10 km de larga por 0,2-0,3 km de ancha, ocupando un área de unos 2,5 km².

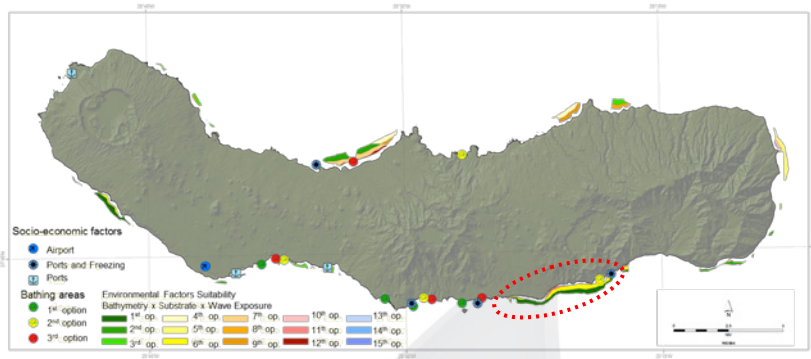


Figura 34. Zonas con aptitud acuícola y su clasificación

La Figura 35 muestra las líneas batimétricas entre -25 y -50 m, profundidad adecuada para anclar las jaulas. Como se puede apreciar, la pendiente es bastante pronunciada en toda la zona, excepto en la parte oriental, donde el fondo muestra pendientes más suavizadas. Por lo que ésta fue la zona elegida para la ubicación de la concesión, que estaría fondeada entre las batimétricas -25 y -30 m.



Figura 35. Ubicación de la concesión acuícola en São Miguel

Descripción

- **Petición de una nueva concesión acuícola**
- **Datos de ubicación**
 - Costa sur de São Miguel
 - 2,4 Km al oeste del Puerto de Ribeira Quente
 - Batimetría debajo de las jaulas 25-30 m
 - Valores medios de corriente: superficie 16,3 cm/s y fondo 12.5 cm/s
- **Datos de producción**
 - 21 jaulas → 25 m diámetro y 16 m calado de red
 - Especies cultivadas → 12 jaulas de dorada + 9 jaulas de lubina

- Siembra por jaula → 300.000 alevines
- Ciclo productivo (≈ 350 g/pez) → 12 meses dorada y 14 meses lubina
- Capacidad productiva máxima → 95 t/año jaula → 1.995 t/año concesión
- Capacidad productiva real → plan de producción 10 años → peor caso → año 3 ≈ 1.610 t

Resultados

- **Sólidos sedimentados (kg/m²/año):**
 - Zona de acumulación a ≈ 150 -250 m de las jaulas
 - Mayor acumulación debajo de las jaulas (5-6 kg/m²/año)
- **Estatus ecológico (AMBI):**
 - Valores bajos debajo de jaulas ($< 2,1$) → Estatus ecológico bueno

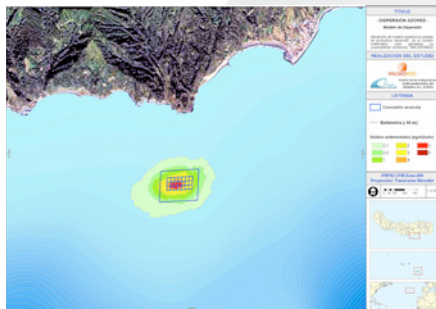


Figura 36. Resultados del modelo MACAROMOD (sólidos sedimentados) en la concesión de São Miguel (Azores)

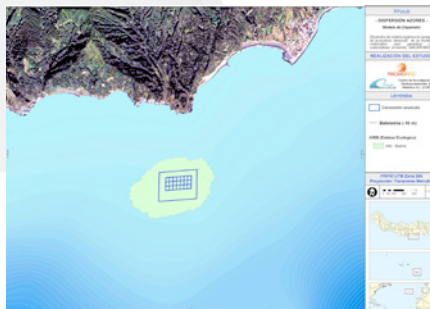


Figura 37. Resultados del modelo MACAROMOD (AMBI) en la concesión de São Miguel (Azores)

Recomendaciones

- **No se espera que la nueva concesión derive en un impacto ambiental significativo.**
- **Por lo tanto, se aprobaría el proyecto propuesto con los condicionantes ambientales normales.**

7.4 CASO DE ESTUDIO EN CABO VERDE

Delimitación de las áreas que presentan la mayor aptitud frente a un uso acuícola

Debido a la falta de información, los trabajos para la delimitación de las áreas que presentan la mayor aptitud frente a un uso acuícola en esta región, se realizaron basándose en criterios genéricos de zonificación, sustentados en la experiencia y conocimientos de la región de los técnicos del Instituto Nacional de Desarrollo Pesquero de Cabo Verde. Los criterios utilizados y las variables incluidas en cada uno fueron las siguientes:

- **Administrativos:** engloban al conjunto de factores que se encuentran sometidos a la jurisdicción de una Administración (local, regional, nacional o internacional) que establecen condicionantes a la actividad acuícola. Incluyen: protección territorial y aguas portuarias.
- **Socioeconómicos:** están constituidos por un grupo de parámetros que pueden influir en la percepción social y económica de forma directa o indirecta en una zona determinada. Incluyen: playas y zonas de baño, actividades náutico-deportivas, pesca, turismo, puertos e instalaciones marítimas y aeropuertos.
- **Ambientales:** engloban al conjunto de parámetros físico-químicos y biológicos que pueden afectar tanto a las concesiones acuícolas como a la calidad medioambiental del medio marino en las inmediaciones de estas instalaciones. Incluyen: exposición, batimetría, pendiente y calidad del agua.

Al sur de la isla de Praia, en las cercanías del Puerto de Praia, se localiza la zona con mayor aptitud acuícola para ubicar una concesión acuícola tipo. Como se puede apreciar, esta zona es bastante reducida, ya que por la zona NE la pendiente es muy pronunciada y por la parte SO, la entrada y bocana del puerto imposibilitan su emplazamiento. Dentro de esta pequeña zona, se ubicó la concesión acuícola lo más alejada de la entrada del puerto que fue posible (Figura 38).

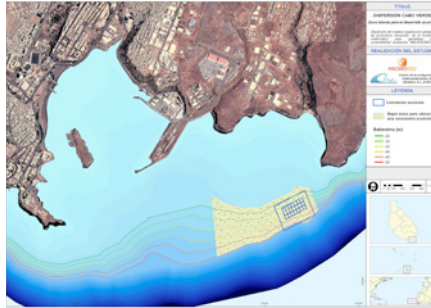


Figura 38. Ubicación de la concesión acuícola en Praia

Descripción

- **Petición de una nueva concesión acuícola**
- **Datos de ubicación**
 - Costa sur de Praia
 - 2,3 Km al sureste del Puerto de Praia
 - Batimetría debajo de las jaulas 30-40 m
 - Valores medios de corriente: superficie 10,5 cm/s y fondo 8,1 cm/s
- **Datos de producción**
 - 21 jaulas → 25 m diámetro y 16 m calado de red
 - Especies cultivadas → 12 jaulas de dorada + 9 jaulas de lubina
 - Siembra por jaula → 300.000 alevines
 - Ciclo productivo (\approx 350 g/pez) → 12 meses dorada y 14 meses lubina
 - Capacidad productiva máxima → 95 t/año jaula → 1.995 t/año concesión
 - Capacidad productiva real → plan de producción 10 años → peor caso → año 3 \approx 1.610 t

Resultados

- **Sólidos sedimentados (kg/m²/año):**
 - Zona de acumulación a \approx 75-150 m de las jaulas
 - Mayor acumulación debajo de las jaulas (9-13 kg/m²/año)
- **Estatus ecológico (AMBI):**
 - Valores medios debajo de jaulas (3,4) → Estatus ecológico moderado

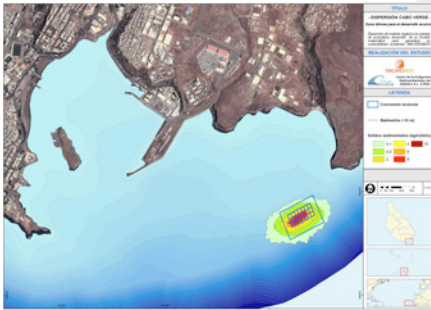


Figura 39. Sólidos sedimentados (kg/m²/año)

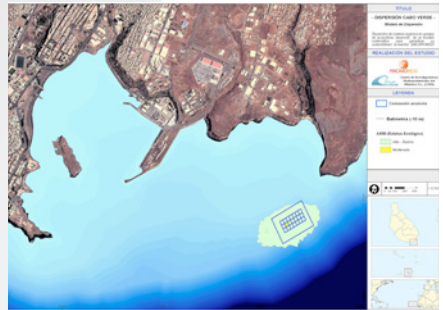
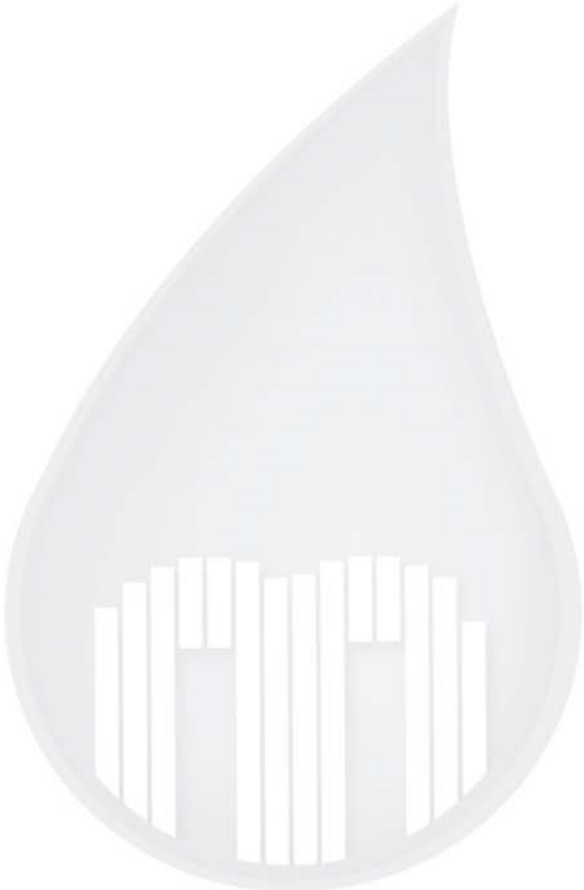


Figura 40. Estatus ecológico (AMBI)

Recomendaciones

- **No se espera que la nueva concesión derive en un impacto ambiental significativo, pero sí se prevé una modificación moderada de las comunidades bentónicas en algunas zonas localizadas.**
- **Por lo tanto, se aprobaría el proyecto propuesto pero con condicionantes ambientales más específicos:**
 - Diseño inicial del PVA un poco más exigente → una estación más bajo las jaulas y mayor frecuencia de muestreo.
 - Autorización condicionada a los resultados del PVA (como ocurre en Canarias).





8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A partir de numerosas pruebas experimentales en laboratorio, muestreos en diversas instalaciones, recopilación y revisión de información científico-técnica y muchas horas de computación, valoración y validación de resultados, surge MACAROMOD como un modelo matemático validado para la región Macaronésica, que permite predecir la dispersión, acumulación y respuesta ambiental del material de desecho proveniente de jaulas de cultivo de peces marinos.

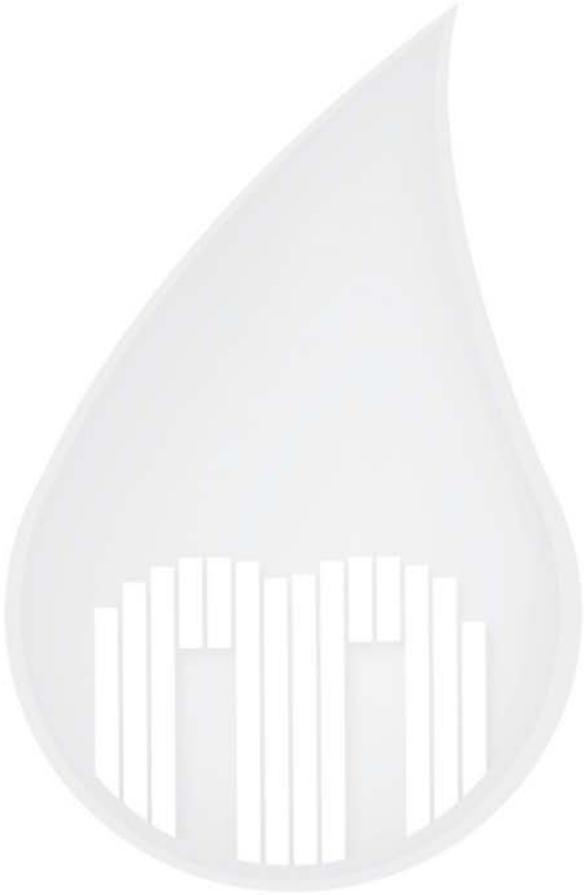
Se ha hecho uso de ecuaciones y algoritmos, que en base al conocimiento actual, representan los procesos de estudio. Éstas están parametrizadas “*a la carta*”, es decir, optimizadas para las condiciones ambientales y de cultivo particulares de la Macaronésica. Finalmente se ha demostrado mediante la validación del modelo, que los procesos que representan dichas ecuaciones y algoritmos se asemejan a los reales.

MACAROMOD es capaz de modelar la emisión de diferentes tipos de compuestos provenientes de las jaulas de cultivo, como sólidos (escenario más común), carbono, medicamentos asociados a un pienso y otros (p. ej. N, P, etc.). Para cada uno de estos compuestos, se pueden realizar dos tipos de modelización; el ***vertido continuo de un compuesto***, escenario más común y normalmente utilizado para estudios de nuevas instalaciones, ampliación o traslado de existentes, búsqueda de emplazamientos, etc., y el ***vertido esporádico de un compuesto asociado a los sólidos***, normalmente utilizado para estudios de tratamientos con productos químicos asociados al pienso (pienso medicamentado). La modelización se puede hacer para diferentes especies, ya sea de forma individual (una sola especie cultivada en una concesión) o conjunta (varias especies cultivadas simultáneamente en una concesión). Se puede modelar la dispersión y respuesta ambiental de una concesión única o un conjunto de concesiones a la vez, si se quiere estudiar el efecto conjunto de una zona o la interacción ambiental entre varias concesiones próximas.

El modelo está concebido como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en el ámbito ambiental, orientando a empresarios, administradores y gestores. Además, se fortalecerá la cooperación entre los archipiélagos europeos que conforman la región Macaronésica (Azores, Madeira, Islas Canarias) así como países terceros, en este caso, Cabo Verde, fomentando la Investigación y el

desarrollo en zonas de la región, e impulsando un espacio común de crecimiento e integración. Los campos donde se espera que el modelo sea utilizado son los siguientes:

- Estudios de impacto ambiental previos a la instalación de una concesión.
- Planes de vigilancia ambiental, ayudaría a dimensionar el número y disposición de las estaciones de muestreo en función de la pluma de dispersión.
- Estudios de capacidad de carga de una concesión. No sólo ayudaría en la selección de un emplazamiento donde se maximice la producción y se minimice el impacto, sino en caso de concesiones con producciones mixtas de dorada, lubina y corvina (caso de Canarias), ayudaría en la distribución de éstas entre las diferentes jaulas que componen la concesión para minimizar el impacto ambiental.
- Estudios de viabilidad ambiental de diferentes propuestas de concesiones (diferente nº de jaulas, producción, ubicación).
- Estudios de interacción ambiental entre una concesión acuícola ya instalada y otra que se quiera instalar próxima a ésta.
- Cuantificación de la huella ecológica cuando se utilicen piensos medicamentados.
- Planes de Ordenación, como el Plan de Ordenación de la Acuicultura de Canarias.
- Estimación de la capacidad de carga de una zona determinada para su planificación y ordenación por parte de las administraciones.
- Herramienta de apoyo para gestionar las actividades marítimas de forma integrada.





9. GALERÍA DE IMÁGENES

9.1 BOYAS DE DERIVA



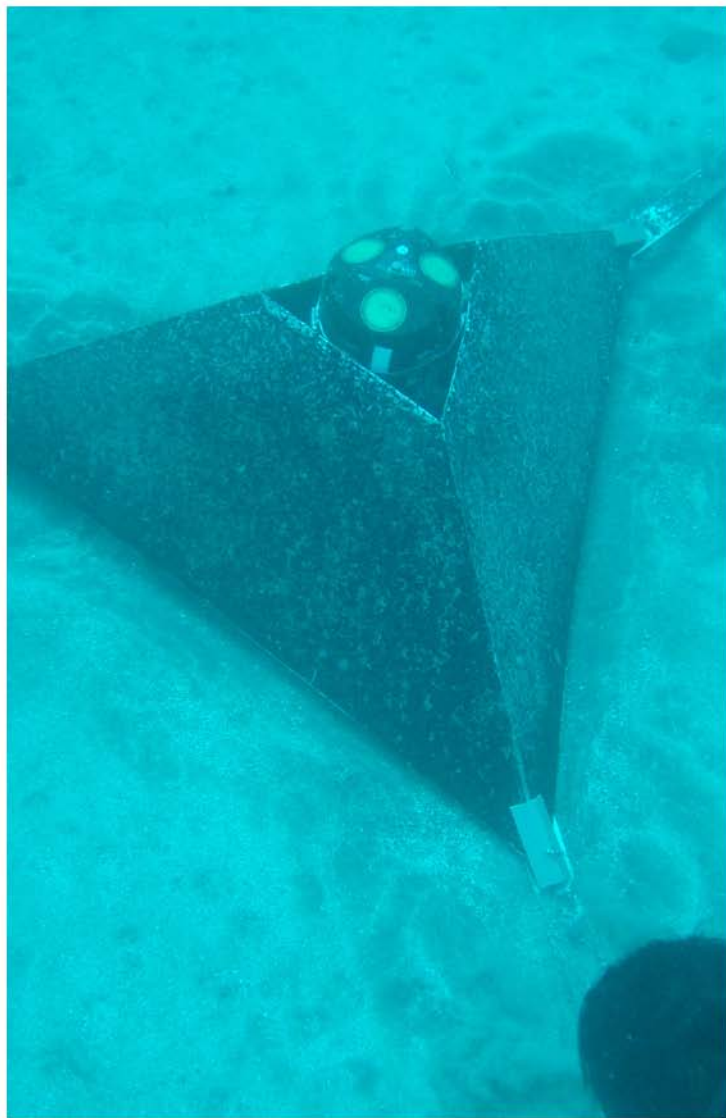






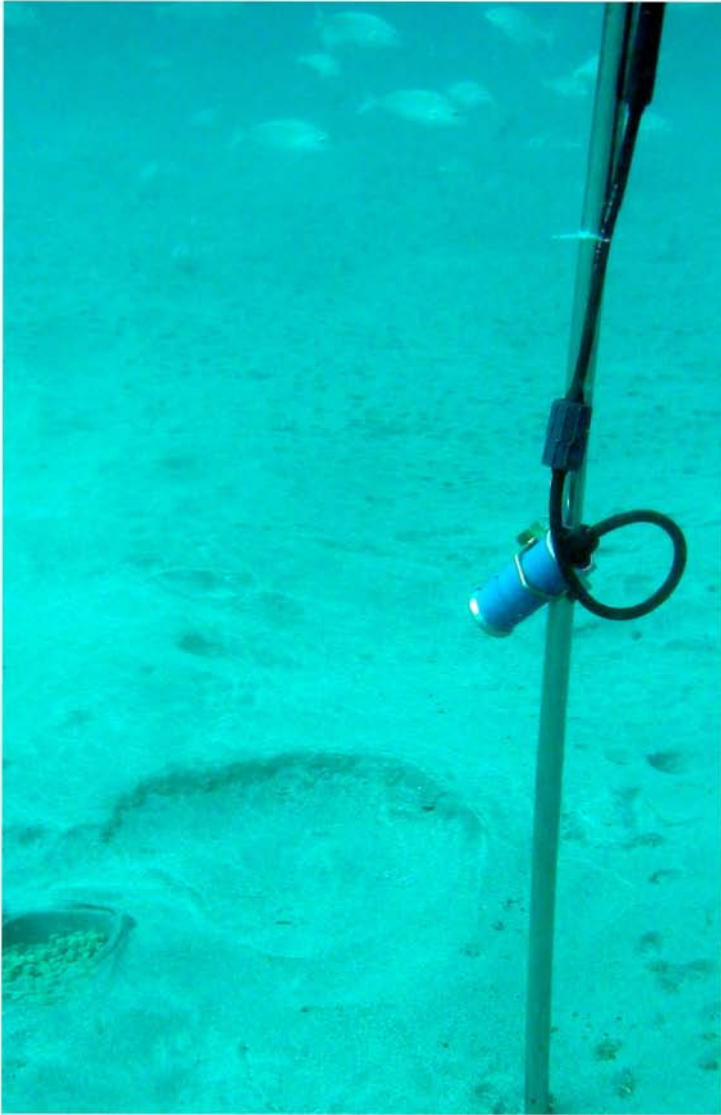
9.2 CORRENTÍMETRO







9.4 EXPERIMENTO DE FILMACIÓN DE ORGANISMOS BENTÓNICOS









9.5 JAULAS DE ACUICULTURA EN MAR ABIERTO







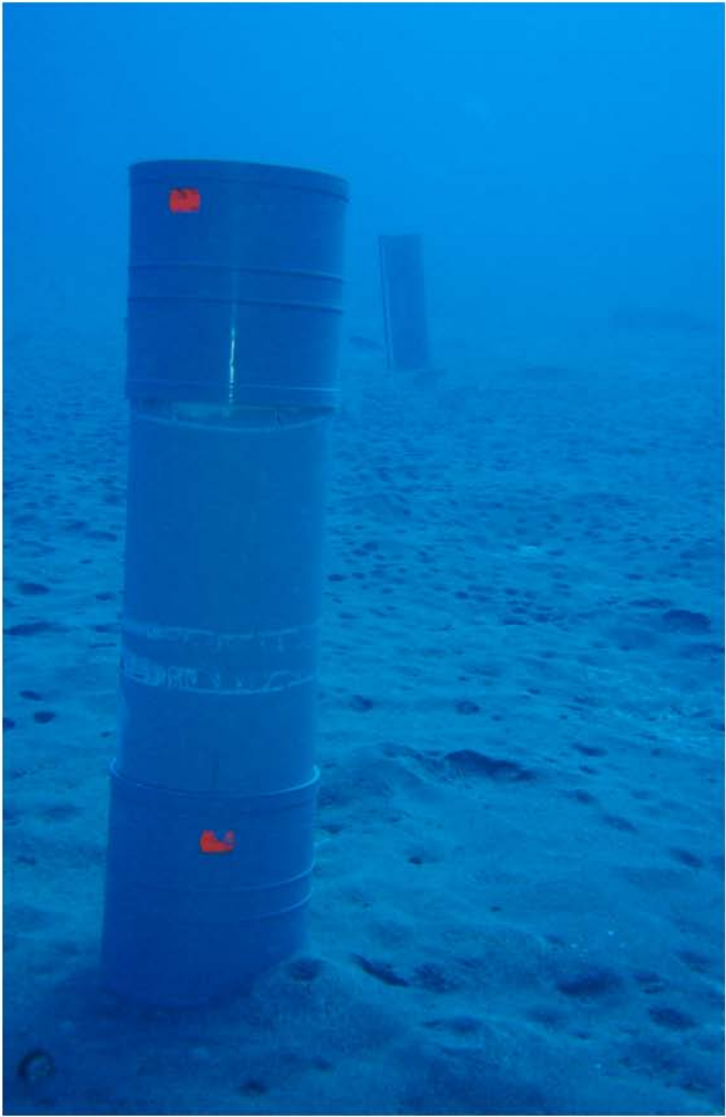


9.6 TRAMPAS DE SEDIMENTO

















**DISPERSIÓN DE MATERIA
ORGÁNICA EN GRANJAS
DE ACUICULTURA:
DESARROLLO DE UN MODELO
MATEMÁTICO PARA GARANTIZAR
SU SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL**

DISPERSIÓN DE MATERIA ORGÁNICA
EN GRANJAS DE ACUICULTURA:
DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO
PARA GARANTIZAR SU SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL



JEFE DE FILA



SOCIOS



ENTIDADES COLABORADORAS



PROYECTO COFINANCIADO POR

Unión Europea
FEDER



Invertimos en su futuro



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA