

MODELO DINÁMICO PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE CARGA DE UNA BAHÍA COSTERA PARA EL CULTIVO DE BIVALVOS



Trabajo de final de máster

Máster en Física de los Sistemas Complejos

Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)

Autora: Joana Ibáñez Solé

Directora: Margarita Fernández-Tejedor

Tutor: Dr. Pedro L. García Ybarra

Centro: Institut de Recerca i Tecnologies

Agroalimentàries (IRTA), Sant Carles de la Ràpita

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Agradecimientos.....	8
Abstract	11
Resumen.....	12
Glosario	13
1. Introducción	15
1.1. Las bahías del Delta del Ebro – Estaciones de muestreo	15
1.2. Actividad acuícola en las bahías.....	16
1.3. Modelos de capacidad de carga.....	17
1.4. Componentes del modelo.....	19
1.4.1. Modelo de oceanografía física	19
1.4.2. Modelo ecofisiológico	20
1.4.3. Modelo biogeoquímico	24
1.5. Salinidad Práctica vs Salinidad Absoluta.....	25
2. Materiales y métodos	28
2.1. Obtención del conjunto de datos. Sonda CTD <i>Seabird 19plus</i> ®	29
2.2. Tratamiento de los datos	30
2.2.1. SBEDataprocesing-Win32®	30
2.2.2. Surfer 7® de Golden Software.....	35
2.2.3. Stella 8® de isee Systems	37
3. Resultados	42
3.1. Perfiles verticales y secciones horizontales de la bahía.....	42
3.2. Cálculo de la picnoclina.....	46
3.3. Cálculo de la depleción del seston y de la clorofila.....	47
3.4. Modelo de depleción	57
3.5. Aplicación del modelo DEB	62
3.6. Aplicación del modelo SFG.....	67
3.7. Capacidad de carga	70
3.7.1. Capacidad de carga del polígono de viveros	71
3.7.2. Capacidad de carga de la bahía de Alfacs	72

4. Discusión	76
5. Conclusiones	82
6. Referencias	84
7. Anexo 1.....	88
8. Anexo 2.....	90
9. Anexo 3.....	91
10. Anexo 4.....	147
11. Anexo 5.....	149

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: ecuaciones diferenciales y parámetros de los modelos SFG y DEB.....	23
Tabla 2: Identificación de las diferentes estaciones de muestreo en la bahía de Alfacs, en las que se obtuvieron los datos para realizar el estudio. Se puede ver el código numérico asociado a cada estación y su situación geográfica (latitud/longitud).....	29
Tabla 3: estaciones que conforman el transecto de la boca. La estación Serramar es la identificada con código 1, la estación Mitad boca Bahía tiene código 2 y la estación Faro está identificada con código3.....	37
Tabla 4: estaciones que conforman el transecto central. La estación Trabucador es la identificada con código 23, la estación Central está identificada con código 15 y la estación Emisario tiene código 25.....	37
Tabla 5: estaciones que conforman el transecto del muelle. La estación Chiringuito es la identificada con código 4, la estación Entre chiringuito y muelle está identificada con código 5 y la estación Muelle tiene código 6.....	37
Tabla 6: situación de la picnoclina según la época del año (canales abiertos – canales cerrados).....	46
Tabla 7: valores del índice de proporción clorofila/seston que varía en función de la situación dentro de la bahía.....	52
Tabla 8: promedio de la depleción del seston [mg/dm^2] para los diferentes conjuntos de viveros y las diferentes épocas del año por encima de la picnoclina.....	53
Tabla 9: promedio de la depleción del seston [mg/dm^2] para los diferentes conjuntos de viveros y las diferentes épocas del año por debajo de la picnoclina.....	53
Tabla 10: promedio de la depleción del seston [mg/dm^2] para los diferentes conjuntos de viveros y las diferentes épocas del año para toda la columna de agua.....	53
Tabla 11: promedio de la depleción del seston [mg/dm^2] para los diferentes conjuntos de viveros y las diferentes épocas del año hasta los 3m de profundidad.....	53
Tabla 12: promedio de la depleción del seston (en %) para los diferentes conjuntos de viveros y las diferentes épocas del año por encima de la picnoclina.....	53
Tabla 13: promedio de la depleción del seston (en %) para los diferentes conjuntos de viveros y las diferentes épocas del año por debajo de la picnoclina.....	53
Tabla 14: promedio de la depleción del seston (en %) para los diferentes conjuntos de viveros y las diferentes épocas del año para toda la columna de agua.....	54
Tabla 15: promedio de la depleción del seston (en %) para los diferentes conjuntos de viveros y las diferentes épocas del año hasta los 3m de profundidad.....	54
Tabla 16: dimensiones de las zonas de viveros donde se ha calculado la depleción del seston y la clorofila. La superficie cultivada se ha obtenido midiendo solo la superficie ocupada por los viveros de cultivo, sin contar la superficie ocupada por agua del mar.....	58
Tabla 17: tiempo que tarda la masa de agua en cruzar las zonas de viveros cultivadas con mejillón.....	58

Tabla 18: depleción del seston por unidad de tiempo [mg/h] en las dos zonas de viveros con cultivo de moluscos bivalvos estudiadas.....	59
Tabla 19: datos del tamaño de los mejillones y el peso de las cuerdas en un punto medio del polígono estudiado (punto B) en los diferentes meses del año a una profundidad de hasta 3m. Los valores para marzo y noviembre (en rojo) no estaban disponibles y para obtenerlos se ha realizado una interpolación con los otros datos.....	60
Tabla 20: número de mejillones en cada una de las zonas de estudio dentro de la bahía de Alfacs.....	60
Tabla 21: Índice de depleción (DR). Indica el consumo de seston por gramo de carne seca de mejillón y por hora, según la época del año y la zona de viveros estudiada.....	61
Tabla 22: promedios de la concentración de seston en mg/L en la bahía de Alfacs según la época del año.....	62
Tabla 23: índice CR del mejillón, <i>Mytilus galloprovincialis</i> , en la bahía de Alfacs para diferentes épocas del año.....	62
Tabla 24: valores de diferentes parámetros usados en los modelos SFG y DEB encontrados en el estudio de Rosland <i>et al.</i> (2009) y que fueron extraídos de diferentes estudios (^{a, b, c, d, e}). ^a van der Veer <i>et al.</i> (2006), ^b Thomas <i>et al.</i> (2011), ^c Dowd (1997), ^d Grant <i>et al.</i> (2008), ^e Brigolin <i>et al.</i> 2009).....	63
Tabla 25: cálculo del coeficiente de saturación media (half-saturation) en diferentes épocas del año, calculado con la expresión deducida en el estudio de Rosland <i>et al.</i> (2009).....	64
Tabla 26: datos de mejillón en la bahía de Alfacs y aplicación de las ecuaciones de la teoría DEB sobre los datos de temperatura y masa del mejillón de la bahía de Alfacs, en función de la concentración de clorofila disponible en el medio.....	65
Tabla 27: datos de temperatura, longitud y peso del mejillón y CR extraídos de los trabajos de Galimany <i>et al.</i> (2009). Cálculo del χ_k y aplicación de estos datos a la ecuaciones del modelo DEB.....	66
Tabla 28: datos de mejillón en la bahía y aplicación de las ecuaciones del modelo SFG sobre los datos de temperatura y masa del mejillón de la bahía de Alfacs, en función de la concentración de clorofila disponible en el medio.....	68
Tabla 29: datos de temperatura, longitud y peso del mejillón de los trabajos de Galimany <i>et al.</i> (2009). Aplicación de estos datos a la ecuaciones del modelo SFG.....	69
Tabla 30: datos estacionales de las características del mejillón y de la bahía necesarios para el cálculo de la capacidad de carga de la bahía.....	73

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: depleción de la clorofila en el conjunto de viveros del extremo centro (código 11-14).....	48
Gráfica 2: depleción de la clorofila en el conjunto de viveros Venecia (código 16-19).....	49
Gráfica 3: depleción de la clorofila en el conjunto de viveros del puerto (código 7-10).....	50
Gráfica 4: depleción de la clorofila en el punto fuera (código 26) externo a los viveros Venecia.....	51
Gráfica 5: depleción de la clorofila en el punto emisario (código 25), externo a los viveros del extremo centro.....	51
Gráfica 6: depleción del seston en los viveros del extremo centro en función de la concentración de seston disponible [mg/dm^2] en el punto central.....	55
Gráfica 7: depleción del seston en los viveros Venecia en función de la concentración de seston disponible [mg/dm^2] en el punto central.....	56
Gráfica 8: depleción del seston en los viveros del puerto en función de la concentración de seston disponible [mg/dm^2] en el punto central.....	56
Gráfica 9: depleción del seston en función de la concentración disponible en el punto central [mg/dm^2] para los tres conjuntos de viveros.....	57
Gráfica 10: depleción del seston en función de la concentración de seston [mg/dm^2] disponible en el punto central para todos los viveros con cultivo de bivalvos.....	57
Gráfica 11: resultados de la aplicación del modelo DEB. En azul, puede verse la concentración de clorofila a en mg/m^2 disponible en el medio a lo largo de los dos años sobre los que se ha realizado este estudio y, en rojo, la energía ingerida por mejillón en $\text{J}\cdot\text{día}^{-1}$, en función de la clorofila presente en el medio, según las ecuaciones de la teoría DEB.....	65
Gráfica 12: resultados de la aplicación del modelo DEB. En azul, puede verse la concentración de clorofila a en mg/m^2 disponible en el medio a lo largo de los dos años sobre los que se ha realizado este estudio y, en rojo, la energía ingerida por mejillón en $\text{J}\cdot\text{día}^{-1}$, en función de la clorofila presente en el medio, según las ecuaciones de la teoría DEB y a partir de los datos del trabajo de Galimany <i>et al.</i> (2009).....	67
Gráfica 13: resultados de la aplicación del modelo SFG. En azul, puede verse la concentración de clorofila a en mg/m^2 disponible en el medio a lo largo de los dos años sobre los que se ha realizado este estudio y, en rojo, el cociente I/C_{mi} , en función de la clorofila presente en el medio, según las ecuaciones del modelo SFG.....	69
Gráfica 14: resultados de la aplicación del modelo SFG. En azul, puede verse la concentración de clorofila a en mg/m^2 disponible en el medio a lo largo de los dos años sobre los que se ha realizado este estudio y, en rojo, el cociente I/C_{mi} , en función de la clorofila presente en el medio, según las ecuaciones del modelo SFG y a partir de los datos extraídos del trabajo de Galimany <i>et al.</i> (2009).....	70
Gráfica 15: resultados obtenidos mediante el <i>software Stella 8</i> [®] después de la aplicación del modelo de capacidad de carga que se presenta en la figura 18. Presenta el cálculo de la depleción en la bahía si ésta albergara la máxima cantidad de viveros que es capaz de soportar (253 viveros), según se ha estimado en este trabajo. En el eje x se presenta el tiempo transcurrido (en días) y en el eje y los miligramos de materia orgánica disponibles (en rojo) y consumidos (en azul).....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1a: Instalaciones de cultivo en el litoral de la Bahía de Alfacs. En verde las instalaciones de acuicultura, en rojo los viveros de mejillón y en gris las zonas de cultivo tipo long-line (mayo de 2011). Fuente: Generalitat de Catalunya, Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, alimentació i Medi Natural.....	17
Figura 1b: zonas de producción de moluscos bivalvos y gasterópodos, equinodermos y tunicados en el litoral de las bahías del Ebro (mayo de 2011). Fuente: Generalitat de Catalunya, Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, alimentació i Medi Natural.....	17
Figura 2: anomalía en la salinidad absoluta, δS_A , a una presión de 2000dbar. Fuente: TEOS-10 Manual, UNESCO/IOC <i>et al.</i> 2010.....	27
Figura 3a: Situación de las diferentes estaciones de muestro dentro de la bahía de Alfacs. El número al lado de cada estación es el código que la identifica (ver tabla 2).....	28
Figura 3b: distribución de los viveros (A, B, C y D) en cada uno de los conjuntos de viveros analizados en la bahía de Alfacs.....	28
Figura 4: Archivo de configuración de la sonda CTD <i>Seabird® 19 plus</i> en la que se pueden identificar los sensores que tiene incorporados, además de otras características de la sonda y de su configuración.....	30
Figura 5: identificación de los transectos seleccionados en la bahía de Alfacs.....	36
Figura 6: circulación del agua en el interior de la bahía de Alfacs. Aunque no se refleja en esta figura, hay que tener en cuenta que la masa menos densa (de agua dulce) circula por la superficie y la más densa (de agua salada) circula por el fondo. (Camp <i>et al.</i> , 1987).....	38
Figura 7: esquema que sintetiza el movimiento de una masa de agua y el devenir de la materia orgánica dentro de la bahía de Alfacs. Consideramos que se trata de un sistema lineal, donde el agua rica en materia orgánica y nutrientes entra por la boca de la bahía, pasa por la zona de viveros, donde se produce el consumo de materia orgánica por parte de los moluscos y luego, esta misma agua sale otra vez por la boca con una concentración de materia orgánica inferior (o nula en el caso más extremo).....	40
Figura 8: ejemplo de sección horizontal de la salinidad [PSU] para toda la bahía (datos del día 25/05/2005). En la figura superior vemos la distribución de salinidad en superficie (profundidad de 0.5m) y en la inferior vemos la distribución de salinidad en el fondo (profundidad del fondo variable para cada estación, rango 2.5 – 6).....	42
Figura 9: ejemplo de sección horizontal de la densidad [kg/m^3] para toda la bahía (datos del día 25/05/2005). En la figura superior vemos la distribución de densidad en superficie (profundidad de 0.5m) y en la inferior vemos la distribución de densidad en el fondo (profundidad del fondo variable para cada estación, rango 2.5 – 6).....	43
Figura 10: ejemplo de sección horizontal de la fluorescencia o concentración de clorofila [mg/m^3] para toda la bahía (datos del día 25/05/2005). En la figura superior vemos la distribución de densidad en superficie (profundidad de 0.5m) y en la inferior vemos la distribución de densidad en el fondo (profundidad del fondo variable para cada estación, rango 2.5 – 6).....	43

Figura 11: ejemplo de perfil vertical de la densidad, salinidad, clorofila y estabilidad de la columna de agua para el transecto de la boca (datos del día 25/05/2005). El eje x representa la distancia entre las estaciones del transecto y en el eje y la profundidad [db].....	44
Figura 12: ejemplo de perfil vertical de la densidad, salinidad, clorofila y estabilidad de la columna de agua para el transecto central (datos del día 25/05/2005). El eje x representa la distancia entre las estaciones del transecto y en el eje y la profundidad [db].....	44
Figura 13: ejemplo de perfil vertical de la densidad, salinidad, clorofila y estabilidad de la columna de agua para el transecto del muelle (datos del día 25/05/2005). El eje x representa la distancia entre las estaciones del transecto y en el eje y la profundidad [db].....	45
Figura 14: esquema de la depleción en la bahía, que traduce los datos recogidos en tablas de la 8 a la 15. El porcentaje %1 es el porcentaje de depleción que se produce en los viveros del extremo centro respecto el punto central, el %2 es el que se produce en los viveros Venecia respecto a los viveros del extremo centro, el %3 se produce en los viveros del puerto respecto a los viveros Venecia, el %4 se produce en los viveros Venecia respecto el punto central y el %5 se produce en los viveros del puerto respecto el punto central.....	55
Figura 15: puntos de muestro con la sonda CTD. En cada uno de los puntos (A, B y C) se realizaron cuatro medidas con la sonda CTD, para cada uno de los viveros (A, B, C y D, donde A es el vivero más próximo a la costa y el D es el más adentrado en el mar).....	58
Figura 16: primer esquema creado con el <i>software Stella 8</i> ® para predecir la densidad de mejillones que es capaz de albergar el polígono de viveros.....	71
Figura 17: segundo esquema creado con el <i>software Stella 8</i> ® para predecir la densidad de mejillones que es capaz de albergar el polígono de viveros. En este esquema se modela el sistema del polígono de viveros teniendo en cuenta que el porcentaje de depleción no es el mismo en la zona de viveros que va del punto A al punto B que en la zona de viveros del punto B al punto C.....	72
Figura 18: esquema creado con el <i>software Stella 8</i> ® para el cálculo de la capacidad de carga de la bahía de Alfacs.....	74

TABLA DE ABREVIACIONES Y SÍMBOLOS

<u>ABREVIACIÓN/SÍMBOLO</u>	<u>SIGNIFICADO</u>
CR	<i>Clearance Rate</i> (Índice de aclaración)
DEB (Modelo)	<i>Dynamic Energy Budget</i> (Modelo)
DGPAM	Direcció General de Pesca, Agricultura i Medi Ambient
DR	<i>Depletion Rate</i> (Índice de depleción)
I	Tasa de ingestión de materia orgánica [mg/día]
IRTA	Institut de Recerca i Tecnologies Agroalimentaries
\dot{p}_x	Tasa de ingestión de energía [J/día]
PAR	<i>Photosynthetically Active Radiation</i>
SFG (Modelo)	<i>Scope for Growth</i> (Modelo)
TR	Tasa de renovación
VEC	Viveros del Extremo Centro - Código 11-14
VP	Viveros del Puerto - Código 7-10
VV	Viveros Venecia - Código 16-19
χ_k	<i>Half-saturation coefficient</i> (Coeficiente de media saturación)

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo de final de máster ha sido posible gracias al apoyo y los medios ofrecido por el *Institut de Recerca i Tecnologies Agroalimentaries* (IRTA) de Sant Carles de la Ràpita y por la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED).

Me gustaría dedicarle este agradecimiento al equipo de *Seguiment del Medi Marí* del IRTA por el tiempo que me han dedicado, los medios y los datos que me han facilitado, los consejos que me han dado y, sobretodo, por los buenos momentos que hemos compartido a lo largo de los meses que he pasado con ellos. Especialmente, quiero darle las gracias a mi tutora en el IRTA, Margarita Fernández Tejedor, ya que sin sus consejos, su apoyo y su tutoría no habría sido posible la realización del trabajo.

También me gustaría darle las gracias al director de este trabajo en la UNED, el Dr. Pedro García Ybarra por su seguimiento y consejos durante los meses que he estado trabajando en este proyecto.

También quiero agradecerle al Sr. Josep Castells su atención y la información que nos facilitó sobre las características de los viveros de moluscos en la bahía de Alfacs y también a la Dra. Montserrat Ramón por la información y los datos facilitados.

Por último, agradecer a mi familia y en especial a David, su cariño y su apoyo incondicional, sean cuales sean las decisiones que yo tome.

ABSTRACT

Alfacs Bay, in the NW Mediterranean Sea, has an important aquaculture activity. This activity has remarkable impacts on the economy of the zone and on the ecosystem where it is developed. In this study we aim to determine the effects of the mussel culture on the seston upload in Alfacs Bay. The principal objective of this work is the creation and implementation of a depletion model, which would explain the changes on the seston concentrations through the year and the application of the Dynamic Energy Budget model (DEB model) and the Scope For Growth model (SFG model). Both models have been applied in Atlantic coasts by Filgueira *et al.* (2011) and the results were favorable. The models are expected to be suitable for Alfacs Bay but with the new parameterization of the half-saturation coefficient χ_k , which has to take into consideration the wide range of temperature that occurs in the bay waters.

The results of this work show that seston depletion inside Alfacs Bay has an important role and has to be considered as a variable to determine the carrying capacity of this bay. The depletion model shows that the most important seston and chlorophyll depletion episodes take place between April and December, when the mussel's activity is most important and when the irrigation canals from the rice paddies liberate their water inside the bay, providing nutrient-rich water.

Originally, the DEB model was applied in an Atlantic ecosystem (e.g. French Coast, Norway Fjords and Galician Rias). In this first approach we demonstrate that the DEB model is also applicable to a coastal bay ecosystem in the Mediterranean (Alfacs Bay), having lower depths and wider temperature ranges than the Atlantic ecosystem. The parameterization of the half-saturation coefficient for Alfacs Bay has shown that it cannot be determined with a constant value valid for the whole year but it has to be determined for the different seasons due to the temperature differences. In this work a value for the half-saturation coefficient in the different seasons has been estimated and used to apply the DEB model, with satisfying results.

The application of the SFG model in this first approximation shows that the results obtained by the SFG model are not in agreement with the observations in the environmental conditions of Mediterranean areas like Alfacs Bay, with a wide range of temperatures. The reason is that the SFG model does not present a correct dependence between ingestion and temperature, because they are only related by an exponential factor.

The results of this study allow us to estimate the values of the parameters involved in the functioning of the ecosystem and to simulate different scenarios by varying the values of these parameters in order to estimate the carrying capacity of Alfacs Bay.

RESUMEN

La bahía de Alfacs, situada en el noroeste del Mar Mediterráneo presenta una importante actividad acuícola. Esta actividad tiene un impacto importante, tanto en la economía de la zona como en el ecosistema donde se desarrolla. En este estudio se pretenden determinar los impactos del cultivo de moluscos en la bahía de Alfacs. El principal objetivo de este trabajo es el cálculo de la capacidad de carga de la bahía de Alfacs, mediante la creación e implementación de un modelo de depleción, que pueda explicar los cambios en la concentración de seston a lo largo del año y la aplicación de los modelos *Dynamic Energy Budget* (DEB) y *Scope For Growth* (SFG). Ambos modelos han sido aplicados en distintas zonas de la costa atlántica por Filgueira *et al.* (2009, 2011) y los resultados fueron favorables. Se espera que los modelos sean adecuados para las aguas de la bahía de Alfacs a través de una nueva estimación del *half-saturation coefficient* χ_k , que debe tener en cuenta el amplio rango de temperaturas que tienen lugar en el interior de la bahía.

Los resultados de este trabajo muestran que la depleción en el interior de la bahía de Alfacs es importante y que debe tomarse en consideración a la hora de determinar la capacidad de carga de esta bahía. El modelo de depleción muestra que los episodios de depleción más importantes tienen lugar entre abril y diciembre, cuando la actividad de los moluscos es más importante y cuando los canales de riego provenientes de los arrozales están abiertos aportando agua dulce, que se espera más rica en nutrientes.

Originalmente, se aplicó el modelo DEB en ecosistemas atlánticos (por ejemplo, la costa francesa, los fiordos Noruegos y las Rías Gallegas). En esta primera aproximación se demuestra que el modelo DEB es también aplicable a una bahía costera del Mediterráneo (Bahía de Alfacs), donde se presentan profundidades inferiores y rangos de temperatura más amplios que en los ecosistemas atlánticos. La estimación del *half-saturation coefficient* para la bahía de Alfacs muestra que este puede estimarse con un valor constante válido para todo el año, sino que debe ser estimado para las diferentes estaciones debido a las diferencias de temperatura. En este trabajo, se ha estimado un valor del *half-saturation coefficient* para las diferentes estaciones del año y se ha usado este valor para la aplicación del modelo DEB, con resultados satisfactorios.

La aplicación del modelo SFG en esta primera aproximación muestra que los resultados obtenidos mediante el modelo SFG no están de acuerdo con las observaciones realizadas en las condiciones ambientales de áreas mediterráneas como la bahía de Alfacs, con amplios rangos de temperatura. La razón es que el modelo SFG no presenta una correcta dependencia entre la ingestión y la temperatura, ya que éstas sólo están relacionadas entre sí mediante un factor exponencial.

Además, los resultados de este estudio permiten estimar los valores de los parámetros que intervienen en el funcionamiento del ecosistema y permiten realizar simulaciones variando los valores de los parámetros para estimar la capacidad de carga de la bahía.

GLOSARIO

Buoyancy o flotabilidad: es la fuerza de Arquímedes, que se opone al peso, en un cuerpo que se encuentra flotando en un fluido. Es un indicador de la estabilidad de la columna de agua.

Canales de riego: canales que tienen la función de conducir el agua desde la captación hasta el campo o huerta donde será aplicado a los cultivos. En nuestro caso, conducen el agua de riego hasta los arrozales y desembocan en el interior de la bahía, aportándole agua dulce.

Capacidad de carga: la capacidad de carga de una especie biológica en un ecosistema es el tamaño máximo de población que el ecosistema puede soportar indefinidamente, teniendo en cuenta el alimento, agua, hábitat y otros elementos necesarios disponibles en ese ambiente; sin detrimento de la calidad ecológica del ecosistema.

Depleción: disminución de la concentración de una sustancia (en este trabajo, seston o clorofila) debido a una absorción por parte de los organismos.

Depleción negativa: indica aquellos episodios en los que el cálculo de la depleción en la bahía toma valores positivos. Esto indica que la depleción de seston o clorofila que se produce no supera los aportes de materia debido a entradas de agua hacia la bahía.

Estrés por temperatura: estrés sufrido por parte de los moluscos al ser sometido a condiciones ambientales de temperatura elevada, que hace que mantengan su valva cerrada durante más tiempo. Tiene como consecuencia una disminución de la asimilación del alimento y de la energía por parte de los moluscos.

Fluorescencia: propiedad de una sustancia de emitir luz cuando es expuesta a radiaciones del tipo ultravioletado, rayos catódicos o rayos X. Es un indicador de la presencia de clorofila y permite conocer su concentración en el medio en mg/m^3 .

Frecuencia de Brünt-Väisälä: frecuencia natural de oscilación que sufre un cuerpo en un fluido con estratificación estable al ser desplazado de su posición de equilibrio. Está asociada a la fuerza de restitución que devuelve al cuerpo a su posición de equilibrio, proporcional a la magnitud del desplazamiento al que se ha sometido el cuerpo.

Half-saturation coefficient (χ_k): es el coeficiente que indica la concentración de comida cuando la ingestión alcanza la mitad del máximo.

Índice de aclaración (Clearance Rate, CR): cantidad de agua filtrada por parte de los moluscos. Las unidades en las que se presenta son L/h.

Índice de depleción (Depletion Rate, DR): cantidad de seston ingerido por parte de los moluscos. Las unidades en las que se presenta son mg/h .

Ingestión: tasa que indica la comida ingerida por parte de los moluscos por unidad de tiempo. Las unidades en las que se presenta son $\text{mg}/\text{día}$.

Materia particulada: conjunto de partículas en suspensión en el mar compuesto por una amplia variedad de materiales, desde materia orgánica hasta excretas o mudas.

PAR (*Photosynthetically Active Radiation*): designa el rango del espectro de radiación solar en el que los organismos son capaces de llevar a cabo la fotosíntesis (400-700nm). La clorofila es más eficiente absorbiendo la luz azul y la roja, por lo que mediante un sensor de PAR somos capaces de medir la actividad fotosintética de la clorofila.

Picnoclina: en la columna de agua, lugar donde se evidencia un cambio súbito en su densidad vinculado con la profundidad y se produce el máximo gradiente en la densidad. En los ecosistemas de agua dulce este cambio en la densidad es causado básicamente por modificaciones en la temperatura, mientras que en los ecosistemas marinos el cambio puede ser causado tanto por cambios en la temperatura como por cambios en la salinidad del agua.

Salinidad: cantidad de sales presentes en una solución. Se expresa en unidades de salinidad práctica (PSU).

Seston: es la materia orgánica (bioeston) o inorgánica (abioeston o tripton) que se encuentra nadando o flotando en una masa de agua.

Tasa de ingestión de energía (\dot{p}_x): cantidad de energía ingerida por parte de los organismos por unidad de tiempo. Las unidades en las que se presenta son J/día.

Tasa de renovación: indica el volumen de agua que circula por la bahía por unidad de tiempo. Se obtiene a partir del cociente entre el volumen de agua en la bahía y el tiempo de residencia de esta agua dentro de la bahía. Se presenta en unidades de $m^3/día$.

Tiempo de residencia: es el tiempo que el agua permanece dentro de la bahía desde el momento en el que entra por la boca hasta que sale por la misma.

Vivero: lugar donde se mantienen o crían dentro del agua peces, moluscos, etc.

1. INTRODUCCIÓN

La comprensión del sistema marino, con sus complejas relaciones, es fundamental, tanto para el mantenimiento de los ecosistemas como para el desarrollo sostenible de la actividad económica asociada a ellos.

Existen numerosos ejemplos que confirman la importancia de este sistema en nuestra economía, así como de su fragilidad cuando no se gestiona de manera adecuada. Problemas como la sobreexplotación de recursos marinos vivos, la erosión o vertidos accidentales de residuos vienen asociados directamente a un uso indebido de los recursos del sistema.

Resulta evidente que el impacto sobre la zona costera, tanto en el medio ambiente como en la economía, es importante y que las soluciones en el campo marítimo son complejas y requieren de especialistas que sepan abordar los problemas que puedan existir desde un punto de vista interdisciplinar.

En general, los ecosistemas son altamente sensibles y potencialmente vulnerables al impacto que pueda tener la acumulación de materia orgánica sobre el fondo, producto de las heces, el alimento no consumido y los desechos metabólicos de las especies en cultivo.

La acuicultura es un sector en crecimiento. En 2010 se produjeron en el mundo 13.610.699T de moluscos bivalvos que se vendieron por un valor de 13.358 millones de USD (FAO, 2011). Para este tipo de cultivo se emplean principalmente sistemas extensivos en los que se aprovecha la capacidad productiva del sistema. Dada la importancia económica y el nivel de crecimiento de la acuicultura en las bahías del delta del Ebro y la costa mediterránea, se requiere la realización de un estudio que pueda determinar la capacidad de carga de este ecosistema, con la intención de predecir el efecto que las actividades acuícolas en la bahía de Alfacs pueden tener sobre las características del ecosistema.

1.1. LAS BAHÍAS DEL DELTA DEL EBRO – ESTACIONES DE MUESTREO

El río Ebro está situado en el NE de España y vierte sus aguas en el Mediterráneo Occidental. Tiene una longitud de 928km y sus últimos 30km transcurren por la llanura deltaica. En su desembocadura, el río Ebro es un estuario estratificado. El bajo rango de mareas en el Mar Mediterráneo favorece la formación de una cuña salina, esto es agua marina que penetra desde el mar hacia el fondo del cauce del río. Su dinámica hidrológica está controlada fundamentalmente por la descarga del río y los vientos locales. Estas descargas del río están fuertemente relacionadas con la gestión de los

embalses aguas arriba y, por lo tanto, estas descargas están reguladas e incluso se pueden prever. Los estudios realizados muestran que existe una fuerte correlación entre la descarga del río y la profundidad de la cuña salina (Ibáñez *et al.*, 1997).

El Delta del Ebro es la zona de mayor importancia para la acuicultura de bivalvos del litoral mediterráneo español. En el delta del Ebro existen dos bahías costeras semicerradas, Fangar es la bahía situada al norte y Alfacs es la situada al sur.

En nuestro estudio, nos hemos centrado en la bahía de Alfacs, al ser esta la zona de mayor producción. No obstante, los resultados obtenidos para la bahía de Alfacs podrían ser aplicados también en Fangar.

La bahía de Alfacs tiene una extensión de 50km², con 4m de profundidad media y 6m de profundidad máxima. La boca de comunicación con el mar es de 3km de ancho. La bahía de Fangar tiene una extensión de 12km² y una profundidad media de unos 2m, aunque se llegan a observar profundidades máximas de 4m.

Las bahías reciben aportes de agua dulce a través de varios canales de desagüe de riego de los arrozales (Camp y Delgado, 1987). La variabilidad en las poblaciones de fitoplancton en relación a la hidrografía de estas bahías ha sido estudiada por Llebot *et al.* (2011), así como la influencia de la meteorología en la hidrografía de la bahía de Alfacs (Solé *et al.*, 2009).

1.2. ACTIVIDAD ACUÍCOLA EN LAS BAHÍAS

La principal actividad acuícola que tiene lugar en las bahías del Ebro es el cultivo del mejillón mediterráneo (*Mytilus galloprovincialis*).

Otras especies de bivalvos cultivadas en la bahía de Alfacs son la ostra rizada u ostrón japonés (*Crassostrea gigas*), la ostra común u ostra europea plana (*Ostrea edulis*), la almeja japonesa (*Ruditapes philippinarum*) y la almeja fina (*Ruditapes Decussatus*).

En la figura 1a podemos ver la situación de las instalaciones productoras y de los viveros dentro de la bahía de Alfacs y en la 1b vemos las zonas de producción en las que se divide el litoral de las bahías del delta del Ebro.



Figura 1a: Instalaciones de cultivo en el litoral de la Bahía de Alfacos. En verde (véase la ampliación en la figura 15) las instalaciones de acuicultura, en naranja los viveros de mejillón y en gris las zonas de cultivo tipo long-line (mayo de 2011). Fuente: Generalitat de Catalunya, DGPAM.

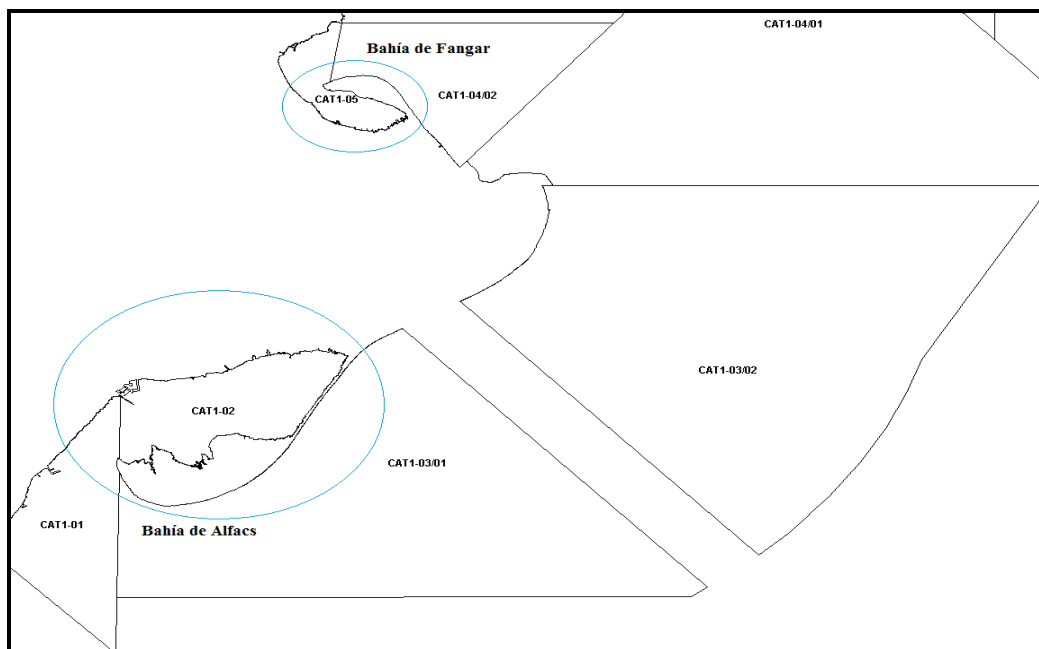


Figura 1b: zonas de producción de moluscos bivalvos y gasterópodos, equinodermos y tunicados en el litoral de las bahías del Ebro (mayo de 2011). Fuente: Generalitat de Catalunya, DGPAM.

1.3. MODELOS DE CAPACIDAD DE CARGA

La capacidad de un sistema para asimilar los ingresos de materia orgánica sin que las condiciones físico-químicas del agua bajen por debajo de un nivel mínimo de calidad,

depende de la variabilidad espacial y temporal en las tasas de renovación del agua y de la composición y capacidad metabólica de la fauna bentónica. De esta manera, los patrones de variabilidad física y biológica actúan conjuntamente para determinar cuál es la “capacidad de carga” o nivel de tolerancia frente a la incorporación de materia orgánica del ecosistema, en función del lugar y de la época del año. Sobrepasar esta capacidad implica que las condiciones físicas y químicas del agua y sedimentos pueden verse alteradas a la escala de toda una cuenca y poner en peligro la supervivencia de la fauna y flora autóctonas, la sustentabilidad de la actividad acuícola y el desarrollo de otras actividades humanas en la región.

Los modelos de capacidad de carga permiten evaluar el rendimiento que puede tener una zona y al mismo tiempo evaluar el impacto de los cultivos sobre el ecosistema. Para establecer estos modelos necesitamos estimaciones precisas de algunos parámetros que puedan describir cómo los procesos de alimentación de los bivalvos interactúan con los cambios ambientales. Los bivalvos pueden reducir el stock de fitoplancton ejerciendo así un control tipo *top-down* sobre la producción primaria. Al mismo tiempo, el crecimiento de bivalvos depende de la calidad y la cantidad del seston (material particulado, orgánico e inorgánico, suspendido en el agua) que incluye el fitoplancton y que contribuye a su mejor calidad. No sólo es importante la calidad y cantidad del fitoplancton sino también su transporte en la masa del agua. Los costes ecológicos causados por el agotamiento del seston en una zona se deben tener en cuenta si es que son persistentes y de una magnitud y escala espacial considerables.

La selección de un modelo o aproximación a desarrollar y aplicar, debe cumplir con dos criterios fundamentales:

- El modelo debería incluir los principales compartimentos y procesos que se registran a la escala de un centro de cultivo y que reflejan el rol de la acuicultura como agente en los flujos químicos y biológicos (carbono orgánico particulado/clorofila/seston, oxígeno disuelto y desechos nitrogenados). En nuestro estudio los desechos de nitrógeno no se han tomado en cuenta debido a que no se dispone de datos.
- Debe permitir el escalamiento y representación de dichos impactos dentro de un modelo hidrodinámico que abarque toda una cuenca. Esto, con el fin de establecer cuáles deberían ser los niveles máximos de producción a la escala de una bahía que permitan mantener la calidad de agua y la condición del bentos por encima de niveles aceptables para la conservación de los ecosistemas naturales, además de identificar potenciales interferencias entre centros de cultivo que puedan afectar la producción.

A escala local, se deben combinar diversos modelos que predigan patrones de deposición en función de las tasas de producción de partículas por las especies de cultivo, la batimetría y el régimen de corrientes, con un modelo que determine los

cambios en el balance de oxígeno bentónico y sus efectos sobre la fauna producidos por la carga de materia orgánica (Brigolin *et al.*, 2009).

Por lo tanto, para que un modelo pueda proporcionar información de valor, tanto para la conservación de los ecosistemas como para la mejora de la actividad productiva, debe proporcionar información a todas las escalas arriba mencionadas. Así, permitirá establecer los efectos que puedan tener los ajustes en las biomásas o tiempos de alimentación y cosecha. Sin embargo, el modelo debe ser lo bastante simple para que sea factible estimar sus parámetros utilizando observaciones oceanográficas y químicas estándar, además de la información productiva disponible, ya que es necesario que las predicciones del modelo puedan ser validadas por observaciones de las condiciones del fondo y de la columna de agua.

1.4. COMPONENTES DEL MODELO

Un modelo dinámico que tenga como objetivo el cálculo de la capacidad de carga de un ecosistema puede estructurarse en tres componentes: (1) modelo de oceanografía física, (2) modelo ecofisiológico y (3) modelo biogeoquímico.

1.4.1. MODELO DE OCEANOGRAFÍA FÍSICA

Los estuarios son zonas de especial interés para el desarrollo de la acuicultura de bivalvos debido principalmente a que son zonas de aguas más productivas que las circundantes. En un estuario, el flujo de agua dulce produce un patrón característico, el agua dulce es menos densa y fluye hacia el exterior del estuario por las capas más superficiales, mientras que por las capas del fondo fluye el agua de mayor salinidad que entra desde el mar abierto. Esta circulación estuarina es la circulación dominante en aquellos estuarios en los que el *run-off* es moderado y la mezcla debida a la marea es débil. El gradiente horizontal de presión creado por las diferencias de densidad entre el agua dulce y la salada es la principal fuerza que mueve la circulación estuarina y el flujo resultante es dependiente de la flotabilidad. Mientras que el agua dulce fluye sobre el agua más densa hacia el mar abierto, la turbulencia generada entre las dos capas promueve su mezcla. En aguas de poca profundidad o bien mezcladas, un modelo bidimensional es suficiente mientras que, en situaciones de estratificación por temperatura o salinidad, es necesario establecer modelos tridimensionales.

El modelo de oceanografía física tiene como objetivo definir las características físicas del ecosistema marino en estudio. Esto es, definir las diferentes masas de agua que lo conforman en base a la densidad o a la salinidad y determinar cuál es el intercambio volumétrico entre las distintas masas de agua existentes.

En nuestro estudio, utilizaremos un modelo cero-dimensional en el que el parámetro es el intercambio volumétrico. Este modelo permitirá establecer un balance localizado entre elementos adyacentes y también un balance de intercambio entre el estuario y el mar abierto.

1.4.2. MODELO ECOFISIOLÓGICO

Este modelo incluye las medidas de ingestión, absorción y tasas de crecimiento de los bivalvos. Existen dos tendencias principales para desarrollar este componente, el *Scope For Growth* (SFG) desarrollado por Grant y Bacher (1998) es el más tradicional aunque, en 2009, Rosland *et al.* propusieron el modelo *Dynamic Energy Budget* (DEB).

En este trabajo, el objetivo es aplicar ambos modelos a la bahía de Alfacs utilizando el conjunto de datos obtenido en proyectos anteriores.

1.4.2.1. MODELO SCOPE FOR GROWTH (SFG)

El modelo SFG combina la evaluación de diversas funciones (filtración, ingestión, absorción y respiración), de manera que se establece un balance energético. Este balance es la diferencia entre la energía absorbida y la perdida en la excreción y la respiración. Si el balance es positivo, el organismo podrá crecer o ganar peso. En cambio, en casos en los que el balance es negativo, el organismo pierde peso y puede llegar a morir.

Este modelo se basa en trabajos anteriores de Grant *et al.* (2007, 2008) y también de Filgueira y Grant (2009). Estos trabajos, a su vez, se basan en las ecuaciones obtenidas por Kremen y Nixon (1978). En estudios anteriores, la función de ingestión dependía de fitoplancton y detrito, aunque en el último trabajo de Filgueira *et al.* (2011) en el que nos basamos, la ingestión se considera solamente función de la concentración de fitoplancton. Los miligramos de carbono ingeridos por día dependen del peso del mejillón:

$$I = I_m f_{mi} \left(\frac{M_w}{M_{wref}} \right)^{b_{mi}} \quad (1)$$

donde I_m es la tasa de ingestión de referencia ($\text{mg}\cdot\text{día}^{-1}$), f_{mi} es la función adimensional de ingestión del mejillón, M_w es la masa del mejillón, M_{wref} es la masa de referencia del mejillón y b_{mi} es el exponente alométrico adimensional para la ingestión del mejillón. La función f_{mi} depende de la temperatura del agua y de la concentración de fitoplancton (χ) a partir de un término de *Michaelis-Menten*:

$$f_{mi} = C_{mi} \exp(Q_{mi} T) \left(\frac{\chi}{\chi + \chi_k} \right) \quad (2)$$

donde C_{mi} es la constante de escalamiento adimensional que asegura un valor de la unidad para la masa de referencia del mejillón, Q_{mi} es el índice constante de temperatura para la ingestión del mejillón ($^{\circ}C^{-1}$), T es la temperatura ($^{\circ}C$) y χ_k es el coeficiente de saturación media o *half-saturation coefficient* ($\mu g/L$) que es la concentración de clorofila cuando el índice de ingestión alcanza la mitad del máximo.

1.4.2.2. MODELO DYNAMIC ENERGY BUDGET (DEB)

La teoría DEB describe al individuo en función de dos variables de estado, el cuerpo estructural y las reservas, describiendo el flujo de energía a través del organismo desde el momento de la asimilación hasta su uso en el crecimiento, la reproducción y el mantenimiento. En esta teoría, la descripción de los procesos energéticos en el organismo es una función de su estado y del medio ambiente que lo rodea. Se supone que una cantidad constante k de la energía disponible se destina al mantenimiento y al crecimiento somático, dando prioridad al mantenimiento, mientras que la sobrante, $1 - k$, es la que el organismo destina a la maduración y a la reproducción (regla *k-rule*).

La versión del modelo que presentamos aquí es idéntico a la presentada por Rosland *et al.* (2009). Se ha adaptado la notación a la de Kooijman (2000), donde los corchetes $\{ \}$ denotan cantidades expresadas por unidad de superficie de volumen estructural y las primeras derivadas temporales se denotan con un punto encima de la magnitud en cuestión.

La tasa de ingestión de energía en el modelo DEB \dot{p}_X ($J \cdot día^{-1}$) es proporcional al área de la superficie del mejillón:

$$\dot{p}_X = \{ \dot{p}_{Xm} \} T_D f V^{2/3} \quad (3)$$

donde $\{ \dot{p}_{Xm} \}$ es la tasa máxima de ingestión por unidad de área ($J \cdot cm^{-2} \cdot día^{-1}$), T_D es la función de temperatura de Arrhenius y $V^{2/3}$ es proporcional a la superficie del mejillón expresado a través del volumen estructural V . f escala la tasa de ingestión a partir de la concentración de comida (χ) en forma de un término de *Michaelis-Menten*:

$$f = \frac{\chi}{\chi + \chi_k} \quad (4)$$

La tasa máxima de asimilación por unidad de superficie de área específica $\{ \dot{p}_{Am} \}$ es igual a la tasa máxima de ingestión por unidad de superficie de área específica multiplicada

por una constante de asimilación a de valor 0.75 (van der Meer, 2006; van der Meer *et al.*, 2006).

1.4.2.3. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LOS MODELOS SFG Y DEB (FILGUEIRA *ET AL.*, 2011)

Filgueira *et al.*, (2011) aplicaron ambos modelos al crecimiento del mejillón en Noruega y la costa atlántica francesa y obtuvieron buenos ajustes para los mejillones cultivados en *long-line*. El conjunto de datos necesario para aplicar ambos modelos consiste en medidas de crecimiento del mejillón (longitud de la concha, peso seco de la carne, etc.) y de parámetros ambientales (concentración de clorofila, turbidimetría, etc.). El objetivo de Filgueira *et al.* (2011), fue calibrar ambos modelos utilizando un mismo parámetro, el coeficiente de saturación media (*half-saturation coefficient*, χ_k). Este parámetro es común en ambos modelos y es importante para la regulación de la respuesta alimentaria de los organismos. Está basado en el término de *Michaelis-Menten* que regula la cantidad de comida ingerida por el organismo dependiendo de la concentración de comida disponible.

EQUACIÓN	TÉRMINOS Y PARÁMETROS
SFG: Scope for Growth (Grant <i>et al.</i>, 1993, 2007; Filgueira & Grant, 2009)	
$\frac{dM_w}{dt} = \varepsilon_m I - f_{mr} \beta_{mr} - \sigma_\gamma \varepsilon_m I$	M_w : Masa del mejillón (mg) ε_m : Eficiencia de asimilación de fitoplancton (adimensional) I : Tasa de ingestión (ver texto) f_{mr} : función estándar de respiración (adimensional) β_{mr} : tasa de respiración estándar (mg/día ⁻¹) σ_γ : coeficiente de coste de crecimiento (adimensional)
$f_{mr} = C_{mr} \exp(Q_{mr} T) \left(\frac{M_w}{M_{wref}} \right)^{b_{mr}}$	C_{mr} : Constante de escalamiento (adimensional) Q_{mr} : Tasa constante de temperatura para respiración estándar (°C ⁻¹) T : temperatura (°C) M_{wref} : Masa de referencia del mejillón (mg) b_{mr} : Exponente alométrico para la respiración (adimensional)
DEB: Dynamic energy Budget (Pouvreau <i>et al.</i>, 2006; Van der Veer <i>et al.</i>, 2006, Rosland <i>et al.</i>, 2009)	
$\frac{dE}{dt} = \dot{p}_A - \dot{p}_C$	E : almacenamiento de energía (J) \dot{p}_A : tasa de asimilación de energía (J·día ⁻¹) \dot{p}_C : tasa de movilización de reservas de energía (J·día ⁻¹)
$\dot{p}_A = \{\dot{p}_{Am}\} T_D f V^{2/3}$	$\{\dot{p}_{Am}\}$: tasa de asimilación máxima de energía en función de la superficie de área específica (J·cm ⁻² ·día ⁻¹) f : Término de Michaelis-Menten (ver texto) V : volumen estructural (ver texto) T_D : función de temperatura de Arrhenius

$T_D = \exp\left(\frac{T_A - T_A}{T_1 - T_k}\right) \cdot \left(1 + \exp\left(\frac{T_{AL} - T_{AL}}{T_k - T_L}\right) + \exp\left(\frac{T_{AH} - T_{AH}}{T_H - T_k}\right)\right)^{-1}$	T_A : temperatura de Arrhenius T_L : rango de tolerancia del límite inferior (K) T_{AL} : temperatura de Arrhenius para la tasa de decrecimiento en el límite inferior (K) T_{AH} : temperatura de Arrhenius para la tasa de decrecimiento en el límite superior (K) T_1 : temperatura de referencia (K) T_k : temperatura ambiente (K) T_H : rango de tolerancia en el límite superior (K)
$\dot{p}_C = \frac{[E]}{[E_G] + \kappa[E]} \left(\frac{[E_G] \{ \dot{p}_{Am} \} V^{2/3}}{[E_m]} + \dot{p}_m \right)$	κ : fracción de energía usada para mantenimiento somático y crecimiento $[E_G]$: Costes energéticos de estructura por volumen específico ($J \cdot cm^{-3}$) $[E_m]$: Densidad máxima de almacenamiento de energía ($J \cdot cm^{-3}$) \dot{p}_m : tasa de energía de mantenimiento ($J \cdot día^{-1}$)
$\dot{p}_m = [\dot{p}_m] V$	$[\dot{p}_m]$: costes energéticos por volumen específico del mantenimiento ($J \cdot cm^{-3} \cdot día^{-1}$)
$\frac{dV}{dt} = (\kappa \dot{p}_C - \dot{p}_m) / [E_G]$ $\frac{dE_R}{dt} = (1 - \kappa) \dot{p}_C - \left(\frac{1 - \kappa}{\kappa} \right) \cdot \min(V_P, V) \cdot [\dot{p}_M]$ <p>Dinámica del amortiguamiento reproductivo cuando el almacenamiento de energía es demasiado bajo:</p> $\frac{dE_R}{dt} = \kappa \dot{p}_C - \dot{p}_M$ $L = \frac{V^{1/3}}{\delta_M}$	E_R : energía destinada a reproducción (J) V_P : volumen estructural en la madurez sexual (cm^3) L : longitud del mejillón (cm) δ_M : coeficiente de forma (adimensional)

Tabla 1: ecuaciones diferenciales y parámetros de los modelos SFG y DEB.

Podemos ver un resumen de las ecuaciones diferenciales y las definiciones de los parámetros usadas en cada uno de los modelos, SFG y DEB, en la tabla 1.

La principal diferencia entre los dos modelos es que el SFG asume que la energía está inmediatamente disponible para el catabolismo y que la restante se almacena en forma de reservas. En cambio, la teoría DEB asume que la energía se almacena primero en forma de reservas que se usan para alimentar otros procesos metabólicos. Las reservas reflejan la historia alimentaria del organismo y, por lo tanto, la dinámica del crecimiento estructural en el modelo DEB será diferente de la obtenida en el modelo SFG, en especial en situaciones en las que haya fluctuaciones en la disponibilidad de alimento.

Además el modelo SFG viola el principio de conservación de la energía ya que presupone que la energía utilizada en los procesos catabólicos se pierde, aunque en realidad se reinvierte en procesos anabólicos. Esto es debido a la simplificación adoptada en el modelo SFG, en el que el estudio del organismo se realiza a través de la medida de procesos que son fáciles de medir y no por el hecho de que su relación con la masa del organismo se puede derivar de primeros principios (van der Meer, 2006). Este defecto no aparece en el modelo DEB, que se basa en principios más genéricos y asume

procesos fisiológicos comunes en la especie en todos sus estadios vitales. Brigolin *et al.* (2009) aplicaron una variación de la norma $k - rule$ al modelo SFG, fraccionando la energía en dos variables de estado: tejido somático estructural y tejido reproductivo. Aun así, el modelo DEB sigue siendo más preciso a la hora de predecir la reproducción de los organismos, que es función de la energía acumulada en los tejidos reproductivos, y, también, la mortalidad, que es función de los déficits en los tejidos de reserva (Duarte *et al.*, 2003; ídem, 2010).

Uno de los retos del modelo DEB es llegar a estimar un conjunto de parámetros básicos para diferentes especies, aunque este objetivo aún no se ha alcanzado.

No obstante, como demuestran Filgueira *et al.* (2011) en su trabajo, ambas aproximaciones, tanto el modelo SFG como la teoría DEB, presentan ventajas y desventajas, pero ambos son aplicables con éxito para predecir el crecimiento del mejillón azul (*Mytilus edulis*) en las costas francesas y noruegas.

1.4.3. MODELO BIOGEOQUÍMICO

El modelo biogeoquímico incluye fitoplancton, zooplancton, bentos y sus interacciones.

Los modelos biogeoquímicos se formulan con un grupo de ecuaciones diferenciales combinadas con algunas ecuaciones algebraicas y una lista de parámetros relacionados con la dinámica del ecosistema (Schnoor, 1996). Los modelos dinámicos son un ejemplo de modelo biogeoquímico, en donde se define un ecosistema como un nivel de organización ecológica de naturaleza dinámica. Para construir un modelo dinámico se requiere una base de datos más amplia que para un modelo estático.

Un gran número de modelos biogeoquímicos de ecosistemas acuáticos han incluido la modelización de los procesos hidrodinámicos. Esto es una combinación de los procesos de transferencia de materiales (nutrientes) y las relaciones ecológicas de varios compartimentos del sistema (Broecker *et al.*, 1984). Además, los modelos biogeoquímicos están basados en el principio de conservación de la masa.

Un caso particular de los modelos biogeoquímicos es el modelo estuarino. En este modelo se considera que un estuario es un sistema donde los procesos hidrodinámicos y ecológicos están sujetos al influjo de las mareas (Warrick *et al.*, 1986).

Esta componente del modelo para el cálculo de la capacidad de carga no se desarrollará en este trabajo. Formará parte de una segunda fase en el desarrollo del modelo de capacidad de carga.

1.5. SALINIDAD PRÁCTICA vs SALINIDAD ABSOLUTA

Existen dos formas de hablar de la salinidad, la salinidad práctica (S_P) y la salinidad absoluta (S_A). Cuando se habla de salinidad, sin especificar salinidad práctica o absoluta, se sobreentiende que se está hablando de la salinidad práctica.

Antes del 1969 se definía la salinidad en términos de la clorinidad Cl , definida como el índice de masa equivalente de cloro para una cantidad de agua, mediante una fórmula ajustada por mínimos cuadrados.

Se obtenía la expresión:

$$S = 0.030 + 1.8050 Cl$$

Durante los años 50, el incremento en el uso de aparatos que medían la conductividad eléctrica con alta precisión, llevó a construir una nueva escala de medida de la salinidad, la escala de salinidad práctica. El paso fundamental en la construcción de la escala de salinidad práctica consistió en definir un punto único en la escala, el de $S = 35$, que debía tener la misma conductividad eléctrica que una solución de cloruro de potasio (KCl) a 15°C de temperatura y presión cero (sobre la atmosférica).

La salinidad práctica se calcula a partir del índice de conductividad R , de la temperatura t y de la presión p , usando la *Practical Salinity Scale* de 1978 (*PSS-78*). El rango de validez de la *PSS-78* es de $2 < S < 42$ para la salinidad y de $0 < p < 10000$ bares para la presión.

El índice de conductividad eléctrica se define como $R = \frac{C(S,t,p)}{C(35,15,0)}$, de manera que

compara la conductividad para la salinidad, la temperatura y la presión in situ con la de referencia ($S = 35$, $t = 15^\circ\text{C}$ y $p = 0$ bars). De esta manera $S = S(R_{15})$, donde R_{15} es el índice de conductividad del KCl estándar a 15°C y presión atmosférica. Las medidas de conductividad se recogen, generalmente, con una sonda CTD, que suele dar la lectura en milisiemens por centímetro (mS/cm). En general, el valor de $C(35,15,0)$ aceptado es de 42.914 mS/cm y la solución de KCl estándar de referencia contiene 32.4356 g de KCl por cada kg de disolución.

En el anexo 1 puede verse el algoritmo creado por Fofonoff & Millard (1983) para el cálculo de la salinidad práctica a partir de la conductividad, que se aplicó para definir la nueva escala de salinidad (Fofonoff, 1985).

La salinidad absoluta o ideal se define simplemente como la fracción de masa de sal en el agua marina.

Como existen variaciones reales en la composición, los efectos del contenido de sal en el agua no pueden describirse completamente usando una sola variable (salinidad) dentro del marco de las ecuaciones hidrodinámicas. El uso de la salinidad absoluta tiene unas limitaciones que requieren discusión:

- No existen técnicas convenientes, que sean baratas y suficientemente precisas para determinar el contenido total de sal en el agua. Las estimaciones de la salinidad a partir de la conductividad, la clorinidad, etc. sólo logran estimar la

salinidad en escalas prácticas (como es el caso de la PSS-78) que precisan de relaciones con la salinidad absoluta que, en muchos casos, son desconocidas.

- No se puede escribir una ecuación de conservación advectiva-difusiva sólo con la salinidad porque la difusión no cambia la distribución de sal frente una composición constante o uniforme de salinidad. El efecto de la difusión es reducir el gradiente de potencial químico (μ) que puede variar dependiendo del soluto. Fofonoff (1962) estimó que el gradiente de salinidad requerido para equilibrar la dependencia en la presión de la diferencia de potencial químico debía de ser de 3-4 unidades por cada 1000db. Como no hay gradiente vertical de esa magnitud en el océano (excepto en escalas verticales muy cortas) los flujos difusivos no juegan un papel relevante en comparación con los transportes advectivos y turbulentos.

En los últimos años existe una discusión entre los partidarios de usar la salinidad práctica y la salinidad absoluta, ya que se observó que en algunos casos el uso de la salinidad práctica llevaba a errores, como por ejemplo, valores de salinidad más bajos en profundidades mayores.

En 2010 un nuevo estándar adoptado por el IOC (*Intergovernmental Oceanographic Commission*), la IAPSO (*International Association for the Physical Sciences of the Ocean*) y el SCOR (*Scientific Committee on Oceanic Research*) y publicado por la UNESCO para calcular las propiedades termodinámicas del agua marina. A este nuevo estándar se le ha llamado TEOS-10 (*Thermodynamics and Equations of State of Seawater of 2010*) y sucede al EOS-80 que ha estado en vigor durante los últimos 30 años.

En el manual del TEOS-10 se recomienda dejar de usar la salinidad práctica S_p (adimensional) definida por la escala de salinidad práctica de 1978 (PSS-78). Esta escala de salinidad de 1978 se recomendó por la UNESCO en 1980 y funcionaba bien con la ecuación de estado del agua marina también recomendada por la UNESCO en aquel momento. En lugar de ésta, a partir de 2010, se recomienda usar la salinidad absoluta S_A que es una fracción de masa y, por tanto, tiene unidades de g/kg. La salinidad absoluta usada en el TEOS-10 es una medida definida de manera precisa a partir de la salinidad práctica.

La problemática es que muchos instrumentos de medida proporcionan datos de conductividad eléctrica que luego son convertidos a salinidad práctica. Como se ha discutido más arriba, es inviable poder recoger medidas de salinidad de manera directa con tal de medir la salinidad absoluta en lugar de la salinidad práctica.

Así que ya en el TEOS-10 se avisa de que esto no va a cambiar, ya que la salinidad práctica es el valor primario de la salinidad y es la mejor manera de pensar en una medida de la conductividad con dependencia con la temperatura y la presión.

Entonces, el TEOS-10 proporciona un método que convierte la salinidad práctica en salinidad absoluta. Este método para obtener la salinidad absoluta consta de tres pasos:

1. Determinar la salinidad práctica de la manera habitual a través de las medidas de conductividad eléctrica.
2. Para aguas dentro del rango “neptuniano” ($2 < S_p < 42$, $-2^\circ\text{C} < t < 35^\circ\text{C}$) se calcula una salinidad de referencia S_R :

$$S_R = \frac{35.16504}{35} \cdot S_p$$

Este paso es necesario para experimentos que necesiten un grado de una precisión mayor que 1g/kg. La S_R es la fracción en masa de soluto en un agua de mar artificial que tenga precisamente la composición de referencia definida. El IAPSO *Standard Seawater* (el estándar actual de calibración) puede pensarse como la mejor realización física de esta definición.

3. Como la composición del agua no siempre es constante, esta S_R no siempre será exactamente la misma que la salinidad absoluta S_A actual. En efecto, difieren por un pequeño factor de corrección δS_A , la anomalía en la salinidad absoluta.

$$S_A = S_R + \delta S_A$$

Este factor de corrección suele ser positivo ya que, la salinidad de referencia, que es la que obtenemos a partir de los datos de conductividad y se obtiene midiendo sólo el aporte de los elementos iónicos, suele ser menor que la salinidad absoluta, porque se ve aumentada al tener también en cuenta la influencia de los elementos no iónicos en la salinidad.

Según se recomienda por parte de la UNESCO en el *TEOS-10 Primer* (octubre 2010), es importante aplicar esta corrección en experimentos que requieran precisión mejor que 0.1g/kg. Podremos asumir que $\delta S_A = 0$ en zonas costeras o en mares marginales de poca profundidad (mar Rojo, mar Mediterráneo o mar Ártico). Para el océano abierto (Atlántico, Pacífico, Índico, mares del Sud o mar Báltico) existe un atlas de valores de δS_A recomendado (figura 2), elaborado a partir de medidas de referencia tomadas en las distintas zonas, que tienen en cuenta la presencia de elementos no iónicos.

Por último, en el TEOS-10 se recomienda usar la notación correcta de la salinidad con tal de evitar confusión, dejándola bien clara en los documentos, y documentar el método exacto para estimar δS_A cuando se utilice un valor para la anomalía en salinidad diferente de cero.

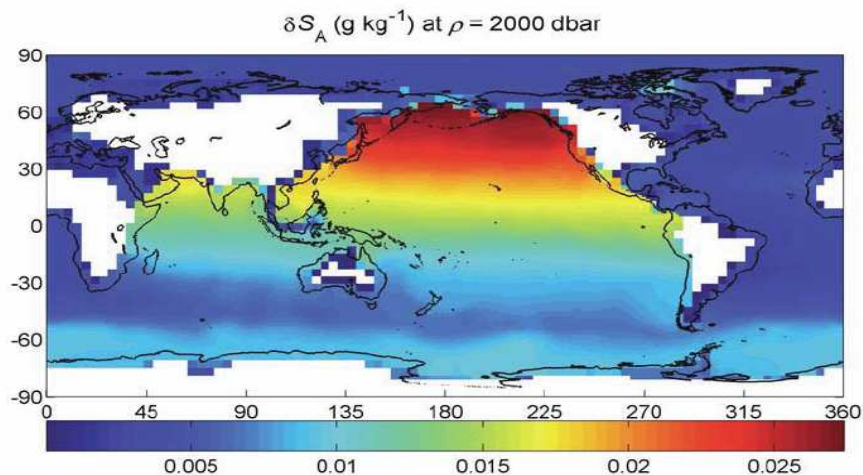


Figura 2: anomalía en la salinidad absoluta, δS_A , a una presión de 2000dbar. Fuente: TEOS-10 Manual, UNESCO/IOC et al. 2010.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio nos disponemos a estudiar el caso particular de la bahía de Alfacs. En esta bahía se han definido diferentes estaciones en las que tienen lugar las mediciones mediante la sonda CTD. En la tabla 2 podemos ver el nombre con el que se identifica cada estación, el número que se le ha asociado y sus coordenadas. La figura 3a nos muestra la situación de cada una de las estaciones dentro de la bahía.

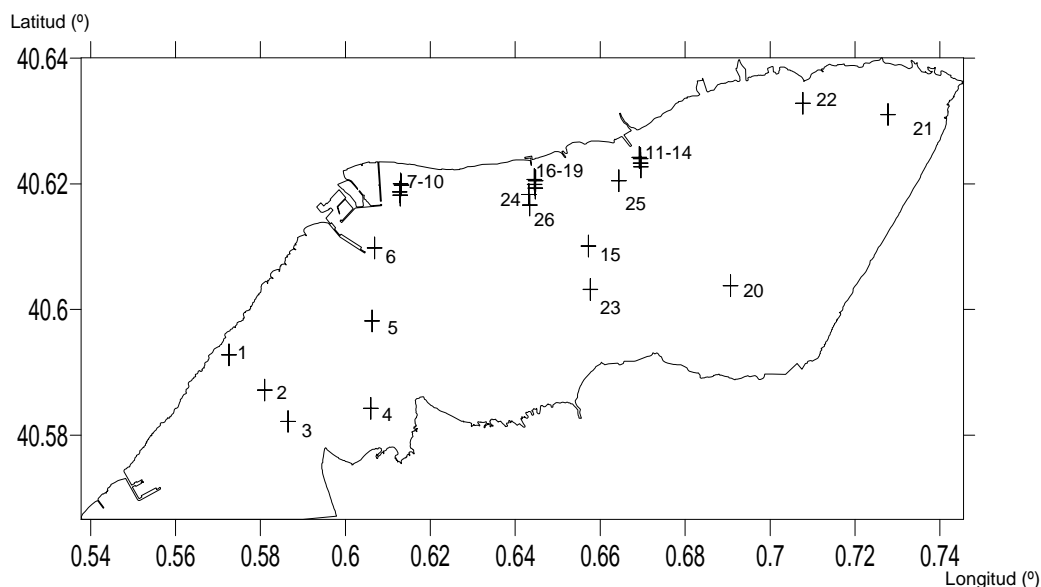


Figura 3a: Situación de las diferentes estaciones de muestro dentro de la bahía de Alfacs. El número al lado de cada estación es el código que la identifica (ver tabla 2).

Los diferentes puntos de muestreo en el conjunto de viveros están clasificados como A, B, C y D de manera que el punto A de cada conjunto es el más cercano a la costa y el punto D de cada conjunto es el situado más hacia el centro de la bahía (figura 3b).

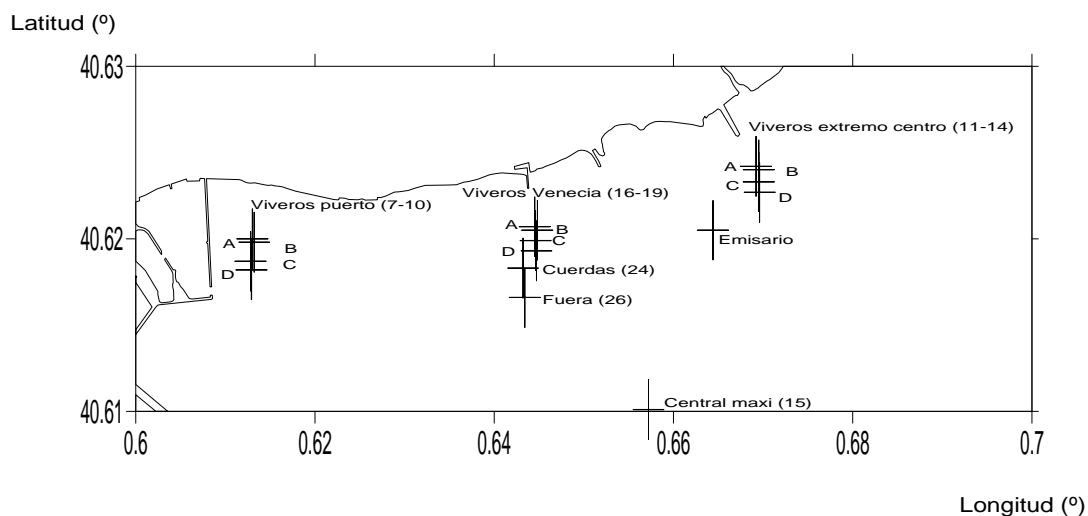


Figura 3b: distribución de los viveros (A, B, C y D) en cada uno de los conjuntos de viveros analizados en la bahía de Alfacs.

El objetivo de definir las estaciones de muestro es obtener perfiles en profundidad de forma regular de un mismo sitio a lo largo de un tiempo, en este caso durante dos años.

CÓDIGO	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD
1	Serramar	40.5928	0.5726
2	Mitad boca Bahía	40.5872	0.5810
3	Faro	40.5822	0.5865
4	Chiringuito	40.5843	0.6060
5	Entre chiringuito y muelle	40.5982	0.6063
6	Muelle	40.6098	0.6069
7	Viveros puerto A	40.6182	0.6129
8	Viveros puerto B	40.6187	0.6128
9	Viveros puerto C	40.6198	0.6132
10	Viveros puerto D	40.6200	0.6130
11	Viveros extremo centro A	40.6227	0.6696
12	Viveros extremo centro B	40.6233	0.6695
13	Viveros extremo centro C	40.6240	0.6695
14	Viveros extremo centro D	40.6242	0.6692
15	Central	40.6101	0.6572
16	Venecia A	40.6193	0.6447
17	Venecia B	40.6199	0.6446
18	Venecia C	40.6205	0.6448
19	Venecia D	40.6207	0.6445
20	Salinas	40.6038	0.6907
21	Aquadelt	40.6310	0.7278
22	Torre de San Juan	40.6328	0.7077
23	Transecto central trabucador	40.6032	0.6577
24	Cuerdas	40.6183	0.6432
25	Emisario	40.6205	0.6644
26	Fuera	40.6166	0.6434

Tabla 2: Identificación de las diferentes estaciones de muestro en la bahía de Alfacs, en las que se obtuvieron los datos para realizar el estudio. Se puede ver el código numérico asociado a cada estación y su situación geográfica (latitud/longitud).

2.1. OBTENCIÓN DEL CONJUNTO DE DATOS. SONDA CTD *SEABIRD 19PLUS*[®]

Para tomar los datos se usó una sonda CTD *19plus modelo v1.6b* de la marca *Seabird Electronics*[®] (en adelante *SBE*[®]), con número de serie (NS) 4278.

Los datos se tomaron durante los años 2004 y 2006, con frecuencia quincenal, en un proyecto anterior que tuvo lugar en el Institut de Recerca y Teconologies Agroalimentàries (Proyecto INIA del mejillón – Ramón *et al.*, 2004-2010).

La sonda poseía sensores de temperatura, oxígeno, presión, conductividad, turbidimetría y fluorimetría. En julio de 2005, se añadió un nuevo sensor a la sonda, de manera que a partir de esta fecha también se mide el PAR (del inglés, *Photosynthetically Active Radiation*).

2.2. TRATAMIENTO DE LOS DATOS

2.2.1. SBEDATAPROCESSING-WIN32®

La sonda, toma los datos y los almacena en lenguaje hexadecimal por eso es necesario convertir los datos para poder tratarlos.

Para convertir los datos usamos el programa *SBEDataprocessing-Win32®*, propio de la sonda. La secuencia recomendada en el tratamiento de datos para este modelo de sonda CTD, según su manual, es el siguiente:

1. Data conversión
2. Filter
3. Align
4. Cell thermal mass
5. Loop edit
6. Derive
7. Section
8. Bin Average
9. Derive
10. Buoyancy
11. Plot

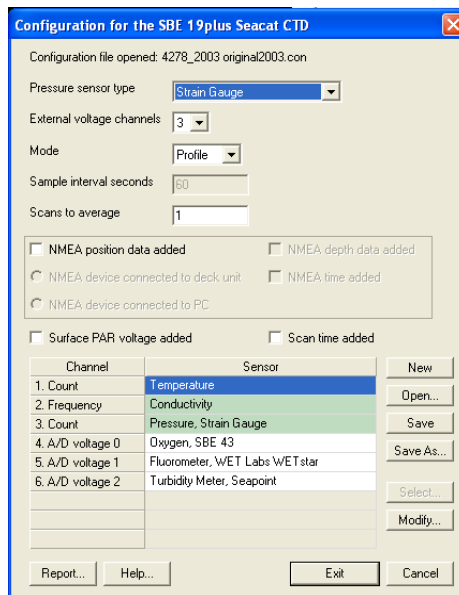


Figura 4: Archivo de configuración de la sonda CTD *Seabird 19plus®* en la que se pueden identificar los sensores que tiene incorporados, además de otras características de la sonda y de su configuración.

La secuencia y las recomendaciones que nos da el fabricante de la sonda para cada caso:

1. Data conversion

Realiza el procesado de los datos almacenados en la sonda para pasarlos del lenguaje de la sonda, en este caso hexadecimal, a lenguaje apto para la ingeniería de los datos.

Cada sonda tiene asociado un archivo de configuración, en el que se especifican los parámetros que configuran el modelo de sonda que estamos usando. En nuestro caso, usamos el archivo de configuración inicial de la sonda CTD *SBE19plus®* con número de serie 4278, ya que los datos que procesaremos son de 2004, cuando todavía no se había añadido ningún sensor nuevo a la sonda ni se había realizado ninguna nueva calibración. El aspecto de este archivo puede verse en la figura 4.

Para el conjunto de datos de 2005 es necesario cambiar el archivo de configuración, debido a que en julio de 2005 se añadió el nuevo sensor de PAR a la sonda.

Cuando están configurados los parámetros para la sonda, ya se puede realizar la conversión.

El siguiente paso es seleccionar qué variables debe presentar el archivo de salida. Para ellos se selecciona la opción *Data setup* en el menú superior del programa y, dentro de este, *Select Output Variables*. Debemos escogerlas de manera ordenada teniendo en cuenta que en el archivo de salida cada columna será una variable. En este caso, las variables necesarias para el estudio y en el orden adecuado de presentación son:

1. *Scan Count*: numera cada una de las series de datos recogidas.
2. *Pressure, Strain Gauge* [dB]: presión en cada momento, en decibelios. Es una manera de conocer la profundidad a la que se encuentra la sonda en cada instante.
3. *Depth, salt water* [m]: profundidad para agua salada en metros. Hace falta indicarle que nuestra latitud es de 40°.
4. *Temperature, ITS-90* [°C]: temperatura en el sistema ITS-90 en grados centígrados.
5. *Conductivity* [S/m]: conductividad en siemens por metro.
6. *Salinity, Practical* [PSU]: salinidad práctica. Aunque las unidades en la que se nos presenta son *Unidades de Salinidad Práctica*, sabemos que en realidad la salinidad práctica es adimensional.
7. *Density, sigma-t* [kg/m³]: densidad del agua en quilogramos por metro cúbico.
8. *Oxygen, SBE 43* [mg/L]: medida del oxígeno en miligramos por litro. El término SBE 43 indica el modelo del sensor que realiza la medida.
9. *Oxygen, SBE 43* [% saturación]: medida del oxígeno en porcentaje de saturación. Lo escogemos porque proporciona una visión más orientativa que la concentración en mg/L a la hora de interpretar los datos en cada momento.
10. *Fluorescence, WET Labs WET Star* [mg/m³]: fluorescencia de la clorofila *in vivo*, que proporciona la concentración de clorofila en miligramos por metro cúbico. Datos tomados con un sensor modelo *WET Labs WET Star*.
11. *Turbidity, Seapoint* [FTU]: turbidez en el punto marino, en unidades de turbiedad.
12. *Time, Elapsed* [s]: tiempo transcurrido en segundos.
13. *Descent rate* [m/s]: velocidad de descenso de la sonda.
14. *Acceleration* [m/s²]: añadimos una columna con la aceleración de descenso de la sonda ya que es importante que la sonda baje a velocidad constante para que la lectura de los parámetros sea correcta.

En las tres siguientes columnas se presentan las lecturas de los voltajes de los canales de la sonda. En nuestro caso, la sonda constaba de tres canales, el 0, el 1 y el 2. En la última columna se puede ver el *flag* que es la forma que tiene el programa de marcar los datos que son incorrectos o no son válidos por algún motivo. Para aquellos datos válidos en la columna *flag* debe aparecer un cero, de no ser así aquel dato debe revisarse.

En total, en los archivos convertidos deberemos ver 18 columnas de datos con los que trabajar.

En julio de 2005, se iniciaron las medidas de PAR de esta serie de datos. Por eso, en el paso de conversión de datos, añadimos una columna antes de la que nos proporciona el tiempo transcurrido. Esta columna contiene la información de *PAR/Irradiance, Biospherical/ Licor*.

Al añadir un sensor también se añade un canal de voltaje, con lo que ahora la sonda tendrá cuatro canales de voltaje, numerados el 0 al 3. Es por eso que los archivos a partir de esta fecha pasan a presentar 20 columnas en lugar de 18.

Para tener un archivo unificado con todos los perfiles, se añaden también dos columnas a los archivos anteriores a julio de 2005. La columna correspondiente a la irradiación y al canal de voltaje en el que se conectó el sensor de irradiación estará vacía hasta esta fecha.

2. Filter

La herramienta *filter* hace correr un filtro pasa-bajos sobre una o más columnas de las series de datos de manera que suaviza las altas frecuencias (rápidamente cambiantes) en los datos con la intención de que la fase entre los diferentes datos sea cero y no haya más medidas de una variable que de otra. Esta diferencia de fase entre las diferentes medidas se debe a que cada sensor tiene un tiempo de reacción distinto y para un intervalo de tiempo considerado, no todos los sensores toman el mismo número de medidas.

Las constantes de tiempo recomendados para la sonda CTD *SBE19plus*[®] que se han utilizado son de 0.5 segundos para la temperatura y la conductividad y de 1.0 segundos para la presión.

3. Align

Existe un desplazamiento temporal entre las medidas tomadas por los diferentes sensores. Este desplazamiento temporal se debe a que la sonda tiene un tamaño considerable, de manera que los diferentes sensores están situados en puntos más o menos distantes entre ellos. Cuando se sumerge la sonda en el mar, el agua no llega a todos los sensores a la vez y por eso cada sensor toma la medida en un instante de tiempo diferente al de otro sensor. Para que sea posible corregir este error es muy importante que la sonda se sumerja en el mar a velocidad constante.

Para la sonda *SBE19plus*[®] la temperatura tiene un avance relativo respecto de la presión de +0.5 segundos, mientras que la conductividad no viene avanzada. En referencia al oxígeno, el avance recomendado es de entre +3 y +7 segundos, por lo que se escoge +5, tanto para las medidas de oxígeno en mg/L como para las medidas en % de saturación. Para la fluorescencia configuramos el mismo avance que para el oxígeno, +5 segundos.

4. Cell thermal mass

Esta herramienta proporciona un filtro para eliminar los efectos de la conductividad de masa térmica de la conductividad real.

Los parámetros recomendados para agua salada en el uso de la sonda *SBE19plus*[®] son $\alpha = 0.04$ y $1/\beta = 8.0$.

5. Loop edit

Debido a que las medidas con la sonda se toman en el mar y la persona que manipula la sonda no está sobre una superficie estable, sino que se encuentra sobre una embarcación, a veces la sonda no se sumerge de manera totalmente recta y monótona, ya que las olas que puede haber en la superficie marina hacen que esta suba y baje. Este efecto de subida y bajada, llamado *loop* se puede corregir con esta herramienta.

Solo hace falta indicarle que la velocidad a la que baja la sonda CTD es muy baja. La opción *Remove surface soak* en nuestro caso no es necesaria seleccionarlo porque la selección de los datos se realizará de forma manual.

Escogemos una velocidad para la sonda de 0.001m/s, pero esto nos da un error porque en superficie la sonda baja más lentamente. Por eso decidimos escoger una velocidad mínima menor de $1 \cdot 10^{-6}$ m/s, que es lo mínimo que permite el programa. Como escogiendo esta velocidad mínima permitida, el programa de procesado continua informando de error, quitamos el paso del loop edit de nuestro proceso de tratamiento de datos.

6. Derive

Escogemos cuáles son las variables que quiero derivar a partir de los datos tomados por la sonda.

Estas variables escogidas son:

- Salinity Practical, [PSU]
- Density, sigma-t [kg/m^3]

Estas nuevas variables derivadas, ya están corregidas gracias a los pasos anteriores de la secuencia de tratamiento de datos.

7. Section

En este apartado se pide al programa que escoja sólo las series de datos que se seleccionan. Seleccionaremos sólo los datos correspondiente a una bajada, es decir, aquellos que van desde la profundidad mínima a la que la sonda ha empezado a medir (superficie) hasta la profundidad máxima. De esta manera despreciamos los datos que toma la sonda mientras se encuentra todavía en el aire al inicio de la toma de datos y aquellos datos que ha tomado en el momento de la ascensión, mientras la sacaban del agua.

Para ello le indicamos al programa cual es el primer número de *scan count* que debe considerar y cuál es el último. Este proceso es manual y debe hacerse individualmente para cada archivo de datos.

8. Bin Average

Esta herramienta de promedio se basa en los rangos de presión, temperatura, números de *scan* y tiempo. En nuestro caso los datos que queremos promediar son los de la presión. Escogemos una ventana de promediado (*bin size*) de 0.5db y le pedimos que incluya los datos de superficie, con valor de la presión en la superficie igual cero, de manera que el mínimo en está en 0 y el máximo en 0.25db.

Haciendo esto, les estamos pidiendo al programa que nos presente cada vez resultado promedio de promediar los datos que hay en intervalos de 0.25dB de longitud.

9. Derive

Ahora que hemos cortado los datos por donde nos interesa y hemos realizado un promedio, volvemos a derivar las variables que nos interesa conocer.

10. Bouyancy

Con esta herramienta calculamos la frecuencia de Brunt-Väisälä a partir de los datos tomados por la sonda.

11. Plot

El programa puede crear una gráfica a partir de todas las series de datos si se considera apropiado.

Los parámetros recomendados por los fabricantes en el manual para la sonda CTD *SBE19 plus*[®] no han resultado válidos para nuestras series de datos ya que uno de los requisitos a la hora de tomar los datos es que la sonda se vaya sumergiendo a velocidad constante. En nuestras series de datos se puede observar que la velocidad de descenso de la sonda no es constante, como tampoco lo es la aceleración. En realidad, cuando la sonda baja lo hace de manera acelerada.

Debido a esa aceleración, existe un retraso de unos sensores respecto a los otros que no es el previsto por los fabricantes. El desajuste más importante se produce en la conductividad (y, consecuentemente, en la salinidad y la densidad σ_t). Vemos que ajustando la sonda con los parámetros recomendados se obtienen medidas que, en algunas ocasiones, dan unos valores de salinidad y de densidad más pequeños en capas de agua más profundas. Cómo esto físicamente no es posible, tiene que existir un error de alineación entre el sensor que mide la presión y el que mide la conductividad.

Para conseguir alinear los datos de la sonda realizamos una serie de pruebas acierto-error hasta que vemos que los datos salen alineados de manera que la salinidad va aumentando a medida que aumenta la presión y la salinidad máxima coincide con la presión máxima.

Para el set de datos de 2004 esto se ha conseguido avanzando la conductividad, la salinidad y la temperatura 1.5 segundos respecto a la temperatura.

Para el set de datos de 2005 se cambió el procedimiento de toma de datos, por lo que cambiamos el alineado de la salinidad, la conductividad y la densidad σ_t que ahora se han avanzado 1 segundo respecto a la temperatura.

2.2.2. SURFER 7[®] DE GOLDEN SOFTWARE

Una vez terminado el tratamiento de las series de datos, tenemos como resultado los perfiles de la columna de agua para cada estación y para cada día de muestreo. El siguiente paso es asociar cada estación con unas coordenadas (ver tabla 2). Estas coordenadas están referidas al sistema de referencia geodésico ETRS89 (Sistema de Referencia Terrestre Europeo de 1989). Este *datum* geodésico es consistente con las medidas que toman los diferentes sistemas modernos de navegación (GPS, GLONASS y GALILEO). A partir del 27 de julio de 2007 en España se adopta el sistema ETRS89, sustituyendo al sistema geodésico de referencia regional oficial hasta entonces (para la Península Ibérica y las Islas Baleares), el ED50, permitiendo una completa integración de la cartografía oficial española con los sistemas de navegación y la cartografía de otros países europeos. Este sistema ya está integrado, aunque existe un periodo de transición hasta el 2015 en el que pueden convivir ambos sistemas de referencia geodésicos.

El programa *Surfer 7[®]* permite hacer mapas y trazar líneas de contorno en 3D. Nuestro objetivo a la hora de utilizarlo es conseguir establecer cuáles son las diversas masas de aguas en la bahía y poder analizar el intercambio volumétrico que se produce entre ellas. Para ello debemos realizar diversos pasos:

1. Convertimos todos nuestros archivos de datos a archivos de *Microsoft Excel[®]*, con los que es más fácil trabajar mediante *Surfer 7[®]*. Creamos un archivo para cada día, de manera que cada archivo contiene la longitud y la latitud de las estaciones en las que se llevaron a cabo mediciones con la CTD, el número que identifica la estación y la fecha y la hora en las que se llevó a cabo la medición.
2. De la página web oficial de la *Generalitat de Catalunya, Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural*, descargamos la cartografía correspondiente a la línea de la costa catalana. Estos datos todavía están referenciados al sistema de referencia cartográfico UTM-31N con *datum* ETRS89, por lo que antes debemos tratarlos mediante el programa *MiraMon 7[®]* que transformará los datos proporcionados a coordenadas de latitud-longitud con *datum* ETRS89.
3. La cartografía de la línea de la costa será nuestro mapa base a la hora de trabajar con *Surfer 7[®]*. Después, sobre este mapa, podremos añadir otros mapas con las situaciones de las diferentes instalaciones de acuicultura y zonas de producción marisquera. La cartografía de estos elementos también puede descargarse desde la misma página web de la *Generalitat de Catalunya*.
Modificamos el archivo descargado donde aparece toda la costa catalana de manera que sólo aparezca cartografiada la línea de la costa de la bahía de Alfacs. Este será el mapa sobre el que vamos a trabajar.
4. Ahora se trata de situar para cada día de muestreo, las diferentes estaciones o lugares donde tuvo lugar una medición con la sonda CTD, encima del mapa base. Para ello, también con el programa *Surfer[®]* leemos cada uno de los archivos *Microsoft Excel[®]* creados anteriormente, con la latitud y la longitud de las diferentes estaciones.

Con cada uno de estos archivos creados, vamos a realizar un análisis de la salinidad, de la densidad del agua y de la concentración de clorofila. Analizamos la salinidad, la densidad y la fluorescencia (directamente relacionada con la concentración de clorofila a) en dos puntos de la columna de agua, en la superficie (a 0.5db de profundidad) y en el fondo (se entiendo por fondo el punto más profundo en cada punto). Hay que tener en cuenta que la profundidad de fondo cambia para cada estación. Para realizar este análisis, representamos mediante el programa *Surfer 7*[®] las secciones horizontales de salinidad, densidad y concentración de clorofila en superficie y fondo para toda la bahía. Algunos de estos perfiles pueden verse en el anexo 3.

Los pasos a seguir son:

1. Separar con un código en lenguaje de programación *R* las diferentes estaciones y los diferentes días.
2. Escoger transectos. Vemos que hay tres transectos interesantes: (Serramar – Mitad boca – Faro), (Chiringuito – Entre chiringuito y muelle – Muelle), (Transecto central trabucador- Central – Emisario). Ver figura 5.
3. Representar el perfil horizontal de la densidad, la salinidad y la fluorescencia para toda la bahía. Podemos ver un ejemplo de estas representaciones en las figuras de la 8 a la 10.
4. Representar el perfil vertical de la densidad, la salinidad, la fluorescencia y la estabilidad para cada transecto. Podemos ver un ejemplo de estas representaciones en las figuras de la 11 a la 13.

Estas representaciones gráficas se realizan con el objetivo de definir las masas de agua dentro de la bahía. Podemos ver la recopilación de algunas de las representaciones gráficas creadas en el anexo 3.

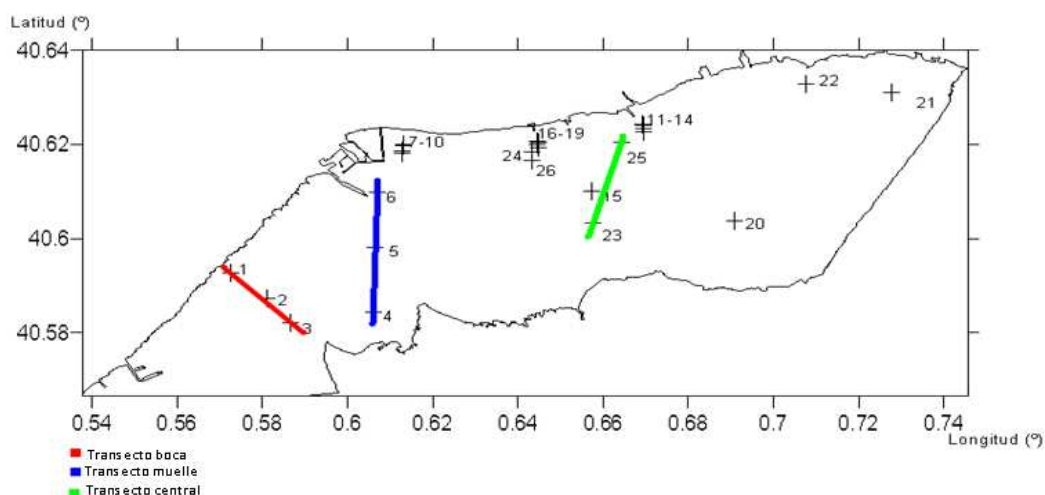


Figura 5: identificación de los transectos seleccionados en la bahía de Alfacs.

Cada uno de los transectos escogidos está compuesto por tres estaciones de muestreo. La composición de cada uno de los transectos viene detallada en las tablas de la 3 a la 5.

Estación	Distancia entre estaciones [°]	Profundidad máxima estación [db]
Serramar	0	4.5
Faro	0.0100955	6
Mitad boca Bahía	0.0174806	5.25

Tabla 3: estaciones que conforman el transecto de la boca. La estación Serramar es la identificada con el código 1, la estación Mitad boca Bahía tiene el código 2 y la estación Faro está identificada con el código 3.

Estación	Distancia entre estaciones [°]	Profundidad máxima estación [db]
Trabucador	0	4.25
Central	0.0069	5.25
Emisario	0.018552	5

Tabla 4: estaciones que conforman el transecto central. La estación Trabucador es la identificada con el código 23, la estación Central está identificada con el código 15 y la estación Emisario tiene el código 25.

Estación	Distancia entre estaciones [°]	Profundidad máxima estación [db]
Chiringuito	0	3.25
Entre chiringuito y muelle	0.0139	4.5
Muelle	0.025516	6.5

Tabla 5: estaciones que conforman el transecto del muelle. La estación Chiringuito es la identificada con el código 4, la estación Entre chiringuito y muelle está identificada con el código 5 y la estación Muelle tiene el código 6.

2.2.3. STELLA 8[®] DE ISEE SYSTEMS

El software *Stella 8[®]* permite crear modelos y realizar simulaciones para diferentes escenarios a partir de los parámetros disponibles.

Los programas llamados de *Visual Modeling Environment* (VME) como el *Stella[®]* (<http://www.iseesystems.com>), permiten a los usuarios crear diferentes modelos sin necesidad de escribir un código. Esto presenta diferentes ventajas: la creciente disponibilidad de herramientas de simulación para los no-especialistas (como investigadores sin un conocimiento profundo de informática o código de programación), permite el intercambio de modelos entre diferentes usuarios y, además, una eficiente reutilización de submodelos (Filgueira *et al.*, 2012). Aunque hay VME que presentan mucha sofisticación, éstos no permiten (o no hemos encontrado estudios que lo confirmen) crear simulaciones con una alta resolución espacial en modelos de sistemas dinámicos, como los de los ecosistemas marinos. Los VMEs han sido aplicados

principalmente a modelos terrestres, donde los procesos físicos pueden ser simplificados de manera significativamente más fácil que en modelos de hidrodinámica costera. Para ambientes marinos, la mejora de la capacidad para construir fácilmente modelos totalmente físico-espaciales biogeoquímicos acoplados basados en VME serían beneficiosas, ya que es una extensión natural del contexto espacial impulsada por SIG, planificación espacial marina y la gestión basada en los ecosistemas (Filgueira *et al.*, 2012).

Para diseñar un modelo que pueda representar la depleción de la clorofila y del seston en la bahía de Alfacs primero tenemos que ver como circula el agua por dentro de la bahía. Hay que resaltar que para el punto fuera sólo hay datos disponibles a partir del 19/11/2004, por eso solo se ha podido calcular la depleción de la clorofila a partir de esa fecha.

En estudios anteriores (Camp *et al.*, 1987) se comprobó que el agua dentro de la bahía fluía siguiendo el patrón principal que se puede ver en la figura 6, entrando por la boca, llegando hasta la parte más interna de la bahía y volviendo a salir luego por la boca. Además, la masa de agua con mayor densidad y, por lo tanto, más salada, fluye por la capa inferior y la masa de agua dulce, menos densa, fluye por la superficie.

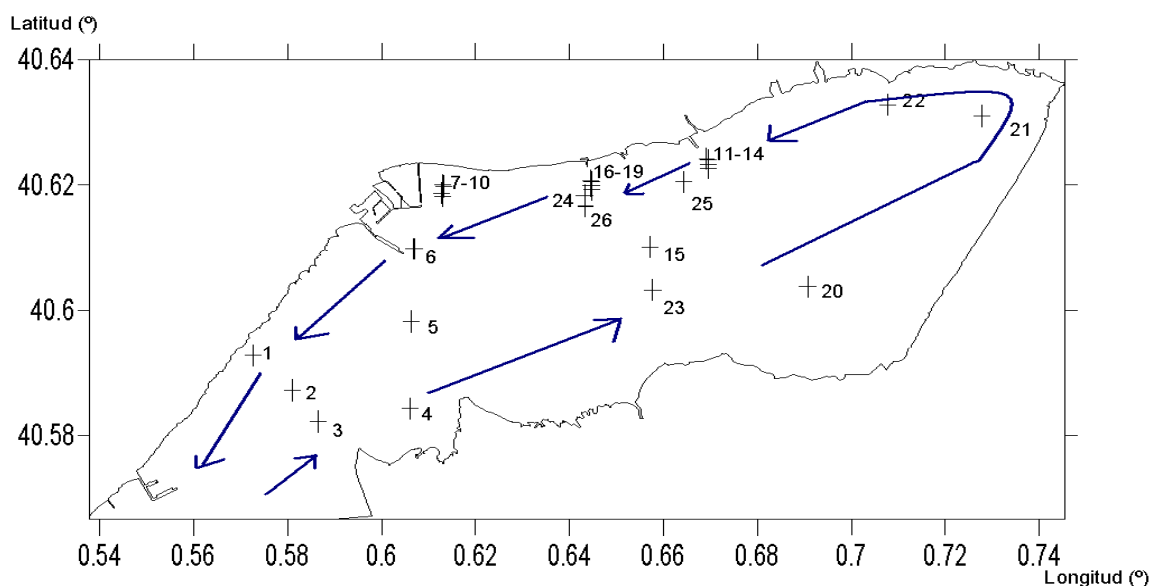


Figura 6: circulación del agua en el interior de la bahía de Alfacs. Aunque no se refleja en esta figura, hay que tener en cuenta que la masa menos densa (de agua dulce) circula por la superficie y la más densa (de agua salada) circula por las capas inferiores. (Camp *et al.*, 1987).

Aunque el patrón principal de circulación dentro de la bahía es el que vemos en la figura 6, hay que tener en cuenta que debido a los efectos del viento o de la marea, entre otros, hay momentos en los que la circulación de agua toma direcciones o sentidos diferentes a los que se muestran en la figura 6. Estos cambios en el patrón de circulación tienen una contribución menor en la depleción del seston y la clorofila y no se abordan en este estudio. La velocidad de circulación del agua de mar en el interior de la bahía

varía entre 0.29m/s y 0.40m/s (Llebot *et al.*, 2010), en función de los diferentes parámetros ambientales, como el viento o las mareas.

A efectos prácticos, podemos ver que el agua que entra desde el mar exterior, sigue el siguiente esquema:

1. El agua entra en la bahía. El punto central (estación con código 15) es el punto que cogemos como referencia para saber la cantidad de seston que hay en nuestra agua antes de que empiece la depleción por parte de los moluscos y otros organismos.
2. El agua sigue circulando hacia el norte hasta llegar a las estaciones Aquadelt (código 21) y Torre de San Juan (código 22) donde se encuentra con la costa. Allí se produce un cambio en la dirección de la circulación, que empieza circular en sentido opuesto al que tenía en el momento de entrar en la bahía.
3. El agua empieza a pasar por las zonas de viveros de mejillón, de manera que empieza a hacerse evidente la depleción del seston. Primero pasa por los viveros del extremo centro (código 11-14). Una vez el agua sale de esta zona de viveros ya podemos calcular una primera depleción.
4. El agua salida de los viveros del extremo centro, con menos seston y clorofila de los que tenía al entrar en la bahía, sigue circulando en dirección a la salida de la bahía, pasando antes por los viveros Venecia (código 16-19). En este punto se produce una segunda depleción.
5. Después de atravesar la zona de los viveros Venecia, el agua ha visto reducida otra vez su concentración en seston y clorofila. En su camino hacia la salida de la bahía, todavía atravesará otra zona de viveros, la de los viveros del puerto (código 7-10). En este punto tendremos una tercera depleción.
6. Cuando la masa de agua circulante ha terminado de atravesar todos los viveros de la bahía, podemos calcular la depleción total que se ha producido en la masa de agua proveniente del punto central después de atravesar toda la bahía.

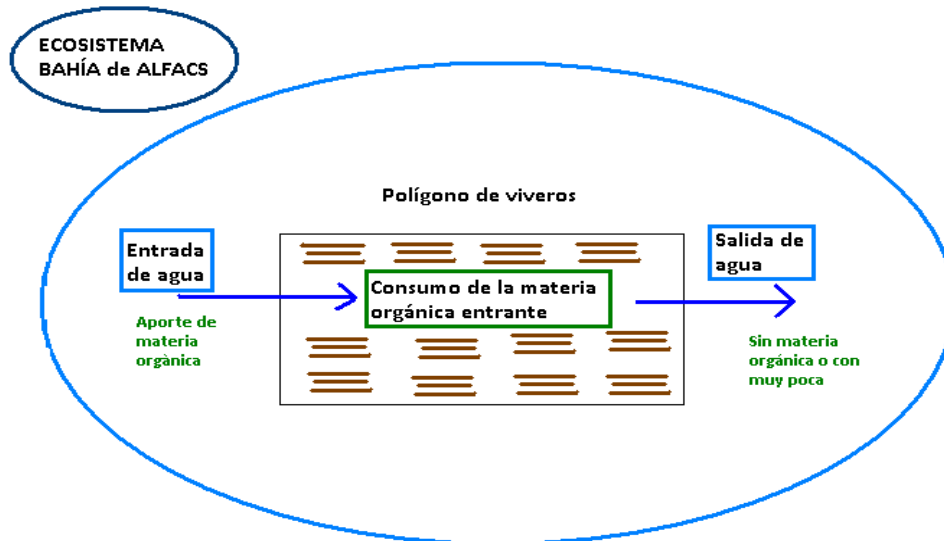


Figura 7: esquema que sintetiza el movimiento de una masa de agua y el devenir de la materia orgánica dentro de la bahía de Alfacs. Consideramos que se trata de un sistema lineal, donde el agua rica en materia orgánica y nutrientes entra por la boca de la bahía, pasa por la zona de viveros, donde se produce el consumo de materia orgánica por parte de los moluscos y luego, esta misma agua sale otra vez por la boca con una concentración de materia orgánica inferior (o nula en el caso más extremo).

El esquema que se ha creado mediante el *software Stella 8*[®] con tal de reproducir el patrón anterior de circulación de la masa de agua puede verse en la figura 7.

Como se ve en la figura 7, suponemos que el agua circula en línea recta. Esta es una aproximación debido a que en realidad el patrón de circulación de agua dentro de la bahía presenta patrones de circulación secundarios. Debido al efecto del viento o de las mareas el agua puede circular en diferentes direcciones, aunque estos patrones de circulación secundarios tienen una influencia menor y no se han considerado determinantes en el cálculo de la capacidad de carga de la bahía. También hay que tener en cuenta, aunque no se presentan en la figura 7, las entradas de agua provenientes de los canales de riego, que aportan una cantidad de agua dulce a la bahía, que hemos considerado constante o poco variable, en la época en la que se encuentran abiertos.

El consumo en este trabajo se ha calculado siempre por cada gramo de la carne seca del mejillón, por lo que otras variables integradas en el modelo, además de los aportes externos de agua, han sido el número de mejillones por m² de vivero y el peso seco de la carne de un mejillón.

Otro detalle presente en el modelo, es la conversión de los datos de clorofila en datos de seston. Para crear el modelo de depleción se ha trabajado en concentraciones de seston y no en concentraciones de clorofila *a*. Actualmente, existe una discusión sobre si es mejor trabajar con datos de clorofila o con datos de seston. La decisión de trabajar con seston se ha tomado porque bastantes autores están de acuerdo en que los datos de clorofila no son los más apropiados (Filgueira *et al.*, 2009). En estudios anteriores

realizados en el IRTA se obtuvo el índice de proporción de clorofila/seston. Además, esta conversión ha sido necesaria ya que los diferentes modelos y funciones han sido desarrollados para concentración de seston/materia particulada y en este estudio sólo se disponían de datos de concentración de clorofila. Esta conversión se realiza mediante un factor que traduce la concentración de clorofila en concentración de seston y viceversa (tabla 7).

3. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los procesos llevados a cabo con el objetivo de obtener el modelo de capacidad de carga.

3.1. PERFILES VERTICALES Y SECCIONES HORIZONTALES DE LA BAHÍA

Las representaciones gráficas realizadas mediante el programa *Surfer 7*[®] nos dan una idea cualitativa de los que sucede dentro de la bahía. Aun así, esto no es suficiente y debemos realizar un análisis más profundo de los datos de los que disponemos con el objetivo de definir las masas de agua que forman la bahía. Para lograr esto calcularemos estadísticamente la situación de la pycnoclina y la depleción de la clorofila en las diferentes zonas de la bahía.

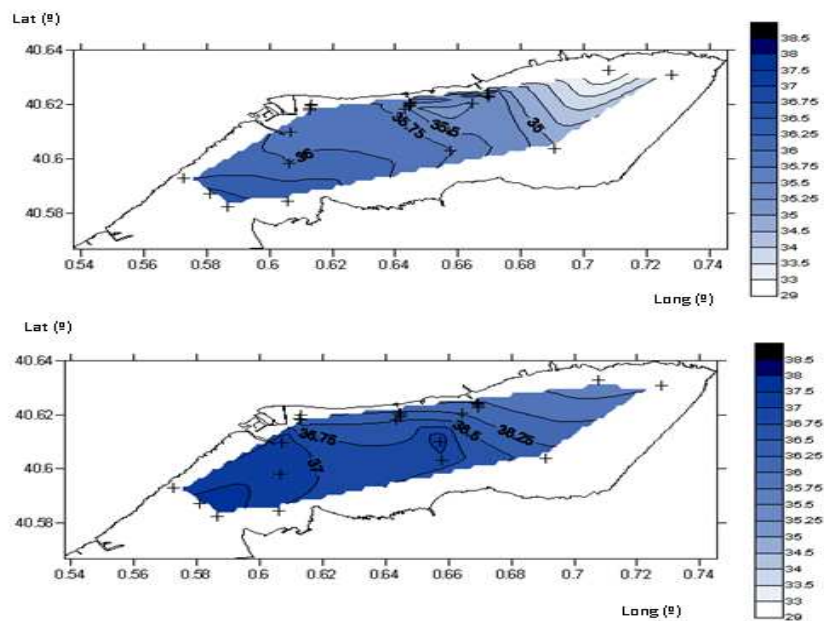


Figura 8: ejemplo de sección horizontal de la salinidad [PSU] para toda la bahía (datos del día 25/05/2005). En la figura superior vemos la distribución de salinidad en superficie (profundidad de 0.5m) y en la inferior vemos la distribución de salinidad en el fondo (profundidad del fondo variable para cada estación, rango 2.5 – 6m).

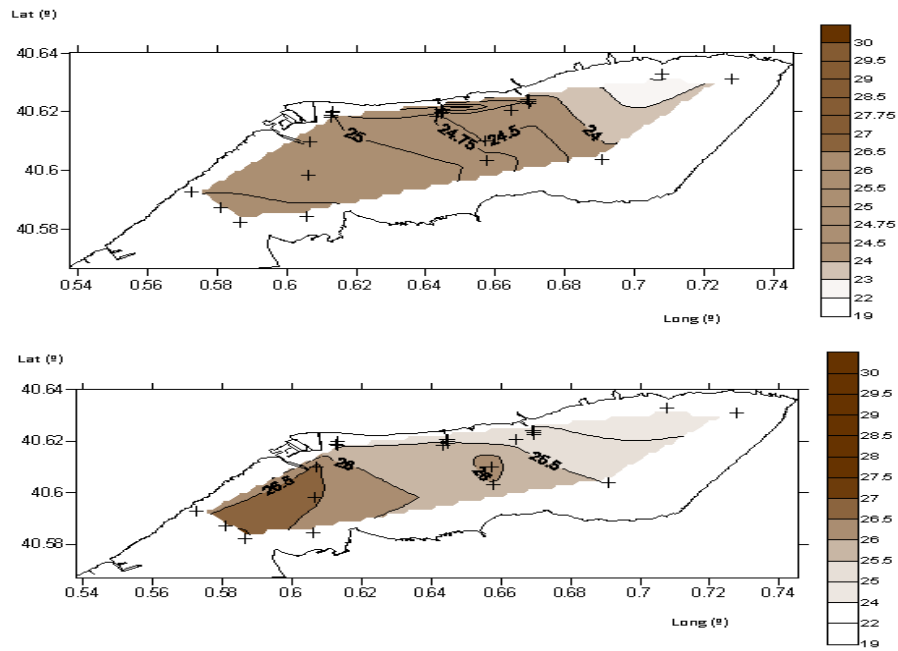


Figura 9: ejemplo de sección horizontal de la densidad [kg/m^3] para toda la bahía (datos del día 25/05/2005). En la figura superior vemos la distribución de densidad en superficie (profundidad de 0.5m) y en la inferior vemos la distribución de densidad en el fondo (profundidad del fondo variable para cada estación, rango 2.5 – 6m).

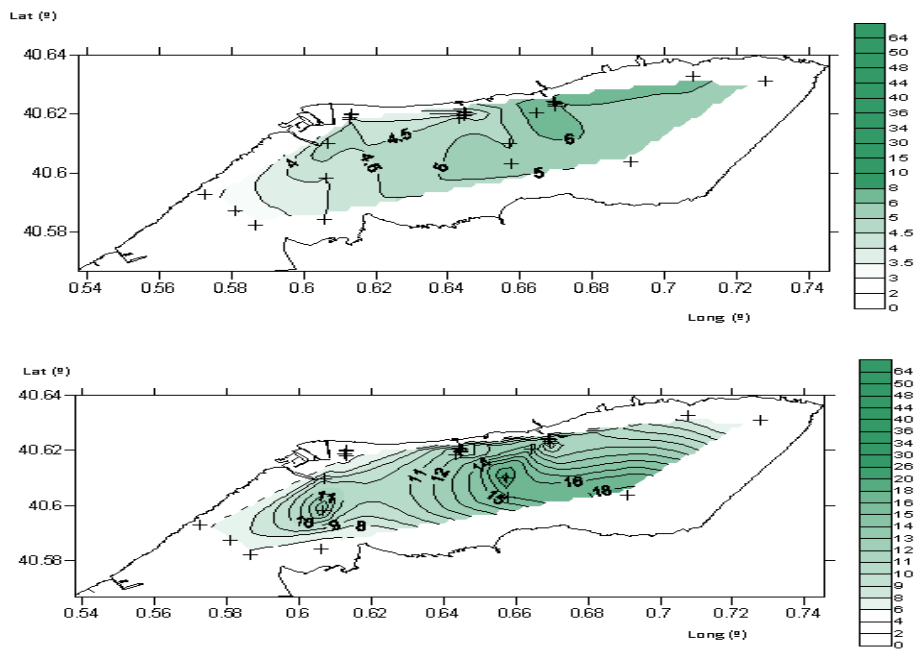


Figura 10: ejemplo de sección horizontal de la fluorescencia o concentración de clorofila [mg/m^3] para toda la bahía (datos del día 25/05/2005). En la figura superior vemos la distribución de fluorescencia en superficie (profundidad de 0.5m) y en la inferior vemos la distribución de fluorescencia en el fondo (profundidad del fondo variable para cada estación, rango 2.5 – 6m).

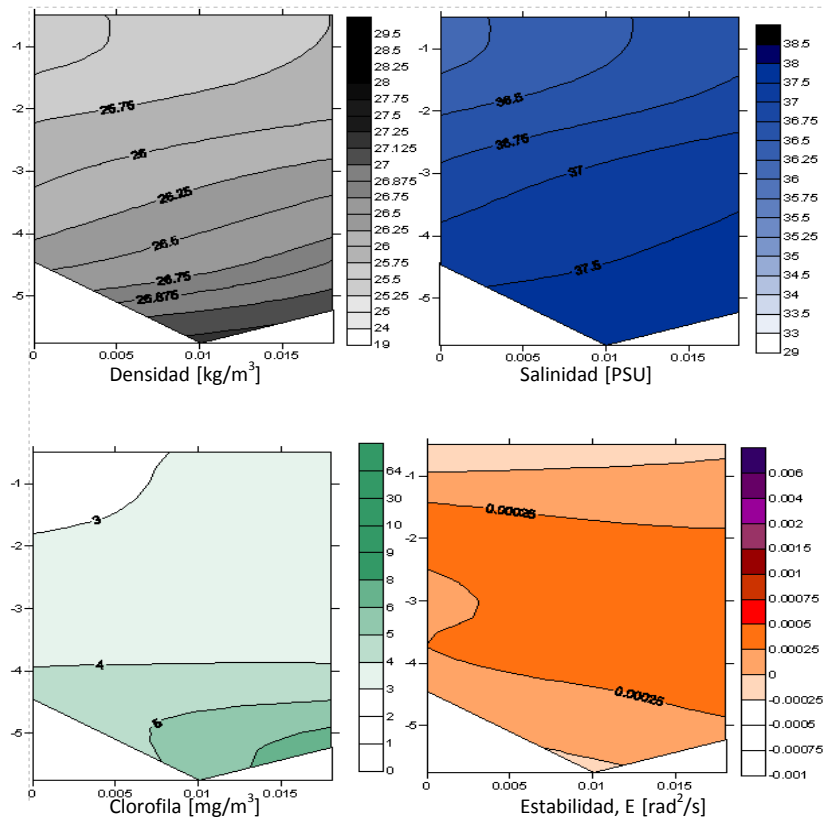


Figura 11: ejemplo de perfil vertical de la densidad, salinidad, clorofila y estabilidad de la columna de agua para el transecto de la boca (datos del día 25/05/2005). El eje x representa la distancia entre las estaciones del transecto y en el eje y la profundidad [db].

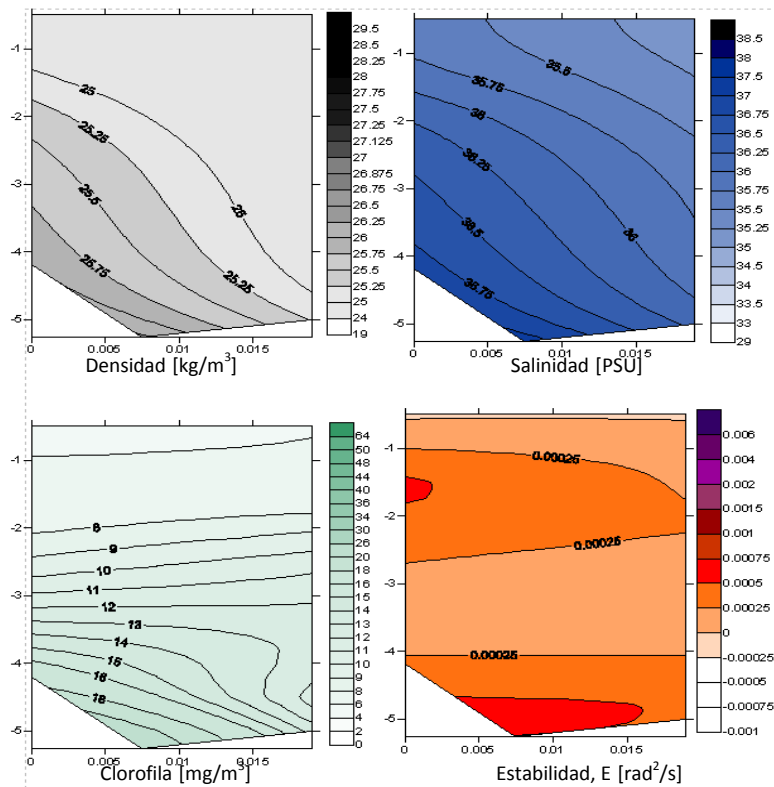


Figura 12: ejemplo de perfil vertical de la densidad, salinidad, clorofila y estabilidad de la columna de agua para el transecto central (datos del día 25/05/2005). El eje x representa la distancia entre las estaciones del transecto y en el eje y la profundidad [db].

En las figuras de la 8 a la 13, podemos observar como las tres variables estudiadas, salinidad, densidad y concentración de clorofila varían desde la superficie, aumentando su valor conforme aumenta la profundidad. Además, se intuye una correlación entre la densidad y la salinidad de la masa de agua por un lado y, por otro, entre la concentración de clorofila y la estabilidad de la columna de agua (figuras de la 11 a la 13).

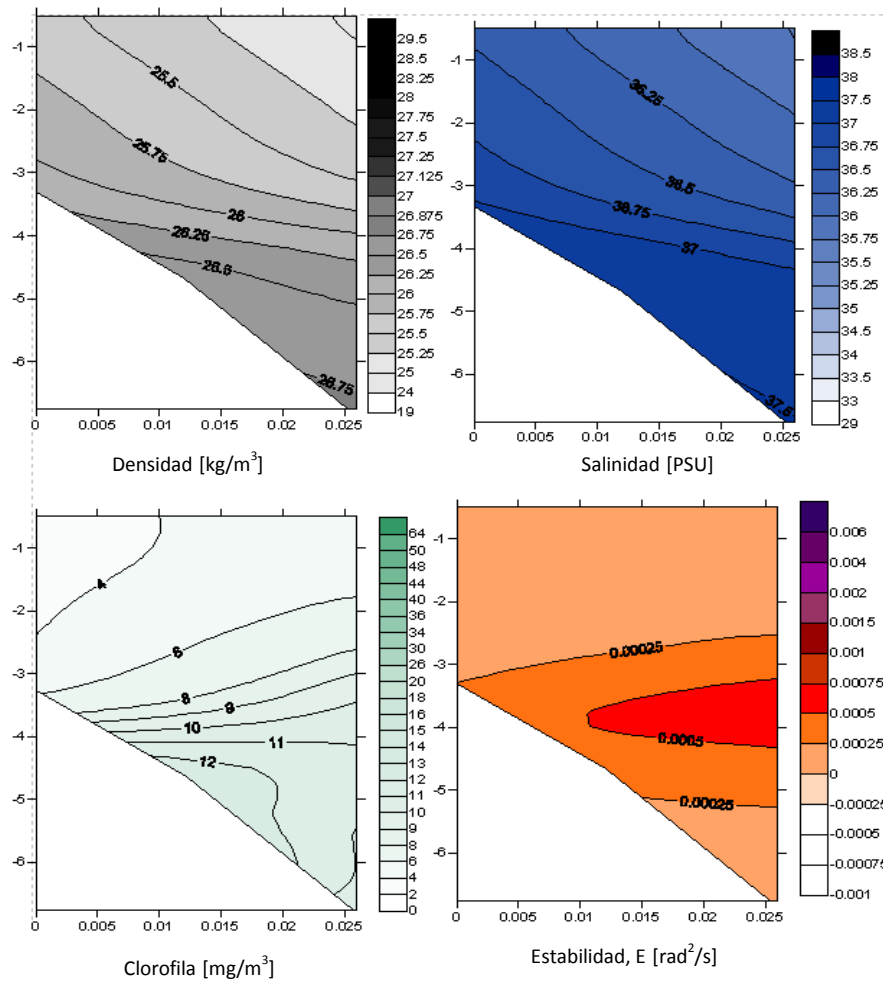


Figura 13: ejemplo de perfil vertical de la densidad, salinidad, clorofila y estabilidad de la columna de agua para el transecto del muelle (datos del día 25/05/2005). El eje x representa la distancia entre las estaciones del transecto y en el eje y la profundidad [db].

Una característica importante que se observa en los perfiles verticales y las secciones horizontales de la bahía, es que el agua presenta una mayor salinidad y, consecuentemente, una mayor densidad, en la boca de la bahía. Es por la boca de la bahía, situada en la zona sud-oeste, por donde se produce la entrada de agua salada hacia el interior de la bahía. El agua del interior de la bahía, además, se ve afectada por la mezcla con agua dulce proveniente de los canales de riego de los arrozales del delta. Esta mezcla disminuye la salinidad del agua de la bahía en las zonas cercanas a la costa oeste (donde desembocan los canales) y en la zona nordeste de la bahía, donde el flujo de agua es menor y el agua está más estancada.

Esta entrada de agua en la bahía a través de la zona de la boca, provoca que el intercambio y movimiento de agua también sea mayor en la zona sudoeste de la bahía. El perfil horizontal de la concentración de clorofila, muestra que las “manchas” de concentración de clorofila se encuentran también situadas en la zona más interna de la bahía, lejos de la boca sudoeste. En el interior de la bahía, el flujo y las corrientes de agua son menores que en la entrada y permiten a la clorofila asentarse en esta zona.

3.2. CÁLCULO DE LA PICNOCLINA

Para determinar la picnoclina en cada momento se utilizó el código de programación en R que figura en el anexo 4. Obtenemos la profundidad y la densidad a la que se da la picnoclina para cada perfil.

El primer punto a tener en cuenta es que vemos que la densidad a la que se da la picnoclina es muy variable en función de la época del año. Con el objetivo de dar una explicación este fenómeno, realizamos primero un promedio para los diferentes meses del año. Este ejercicio nos muestra que la densidad de la picnoclina es más o menos parecida entre los meses de abril a diciembre, aunque experimenta una variación bastante grande para los meses de enero a abril. El motivo por el que tiene lugar esta variación es que los canales de riego no se encuentran siempre abiertos. Entre los meses de enero y abril, en los que los canales de riego que aportan agua dulce a la bahía están cerrados, la densidad donde se presenta la picnoclina es, en promedio, de 27.1 kg/m^3 . En cambio, entre los meses de abril a diciembre, durante los que los canales de riego están abiertos, la densidad de la picnoclina sufre un descenso brusco debido al aporte de agua dulce, menos densa. En estos meses, la densidad a la que se presenta la picnoclina es, en promedio, de 24.7 kg/m^3 . Finalmente, debido a este fenómeno decidimos dividir el año en dos épocas, la época en la que están los canales abiertos y en la que están los canales cerrados (ver tabla 6).

Época del año	Densidad picnoclina (rango 19.2 – 29.3) [kg/m^3]	Profundidad picnoclina (rango 2 – 7) [db]
Canales abiertos (abril – diciembre)	24.71561	2.61062
Canales cerrados (enero – abril)	27.10357	2.65474

Tabla 6: situación de la picnoclina según la época del año (canales abiertos – canales cerrados).

En la tabla 6, podemos ver que también se ha calculado cuál es la profundidad promedio a la que se da la picnoclina. En este caso, a diferencia de lo que pasa con la densidad, la

profundidad de la picnoclina no experimenta ningún cambio considerable en función de si los canales de riego están abiertos o cerrados.

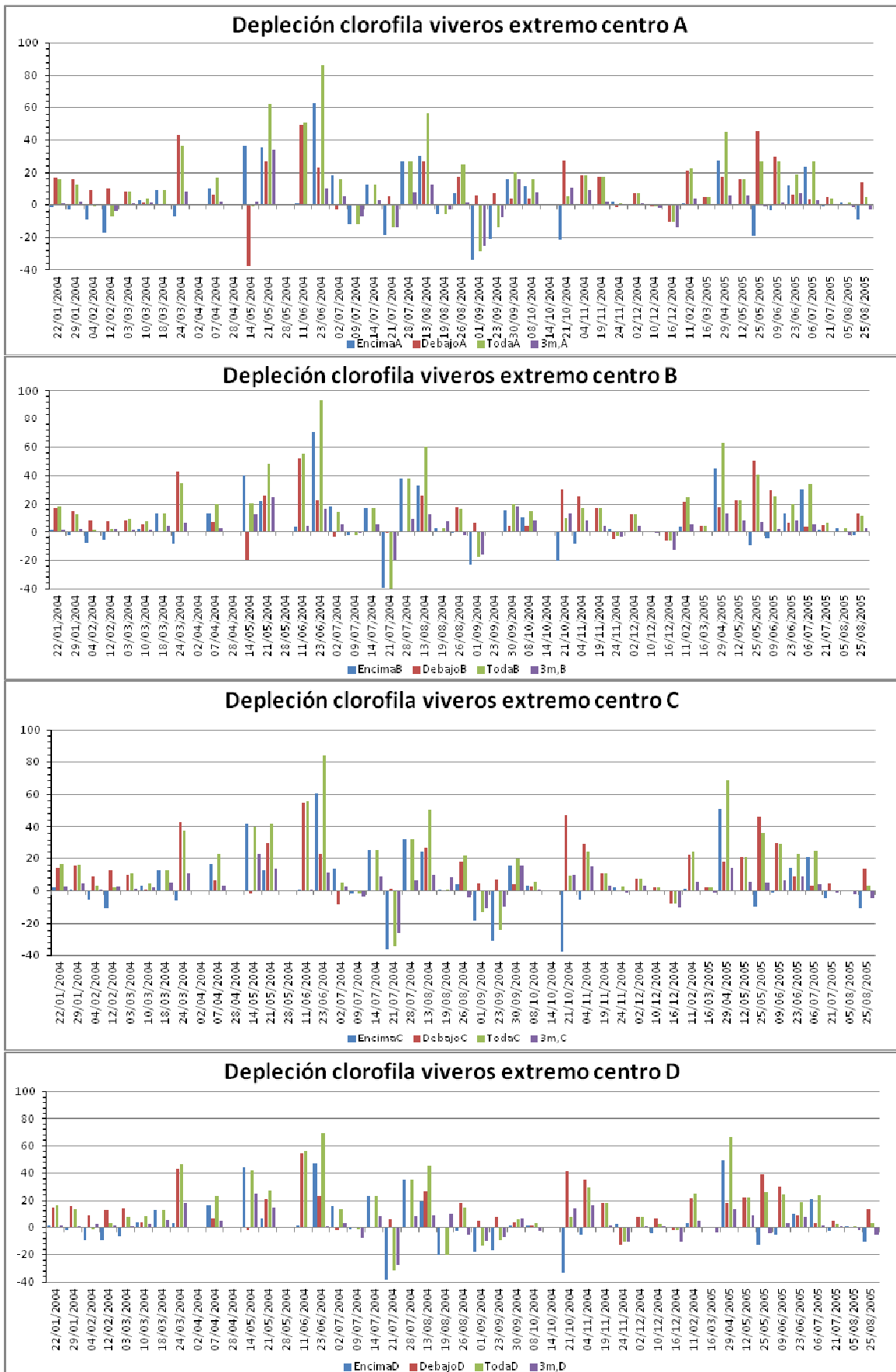
3.3. CÁLCULO DE LA DEPLECIÓN DEL SESTON Y DE LA CLOROFILA

Para acabar de definir las masas de agua de la bahía, calculamos la depleción de la clorofila y del seston.

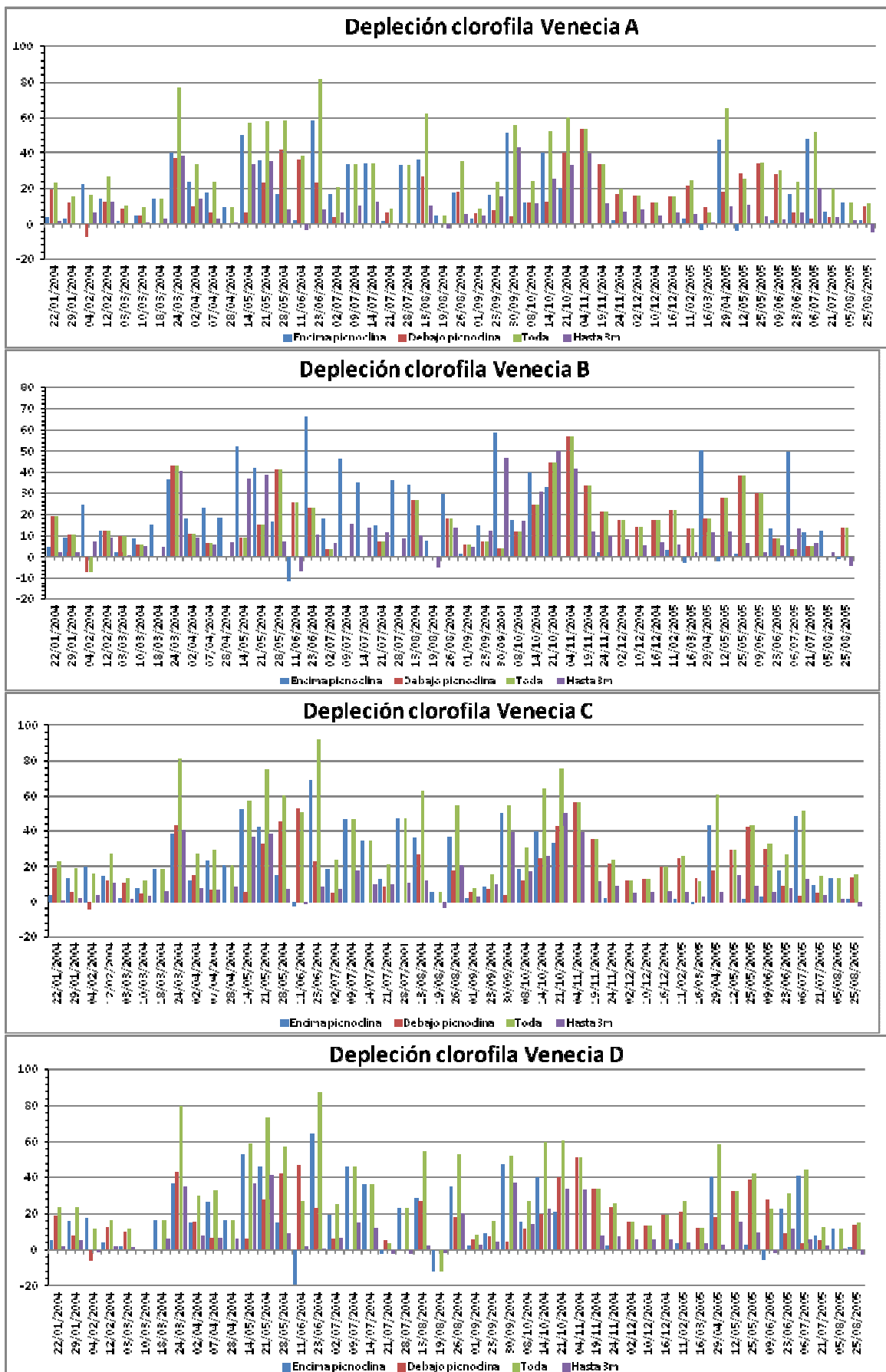
El primer paso será realizar una integración de los datos de clorofila con el objetivo de obtener la cantidad de clorofila acumulada en la columna de agua. También nos interesa calcular la cantidad de clorofila acumulada por encima de la picnoclina y por debajo, debido a que hemos dividido la bahía en diferentes masas de agua en función de la picnoclina. Además, calculamos la cantidad de clorofila acumulada también por encima de los 3m de profundidad. Hemos escogido 3m de profundidad como medida de referencia porque es por encima de los 3m donde habitualmente encontramos las cuerdas de mejillón.

Obtenemos el valor de la depleción de la clorofila calculando la diferencia de concentración entre una de las estaciones de entrada de agua en la bahía y los viveros. Como estación de entrada de agua escogemos la estación 15 (central), ya que está situada más o menos en el centro de la bahía y tiene una profundidad máxima grande que permite compararla el resto de las estaciones. Este punto se coge de referencia desde hace años y se ha utilizado como punto de referencia para otros estudios, aunque está claro que se habría podido escoger otro punto para este trabajo.

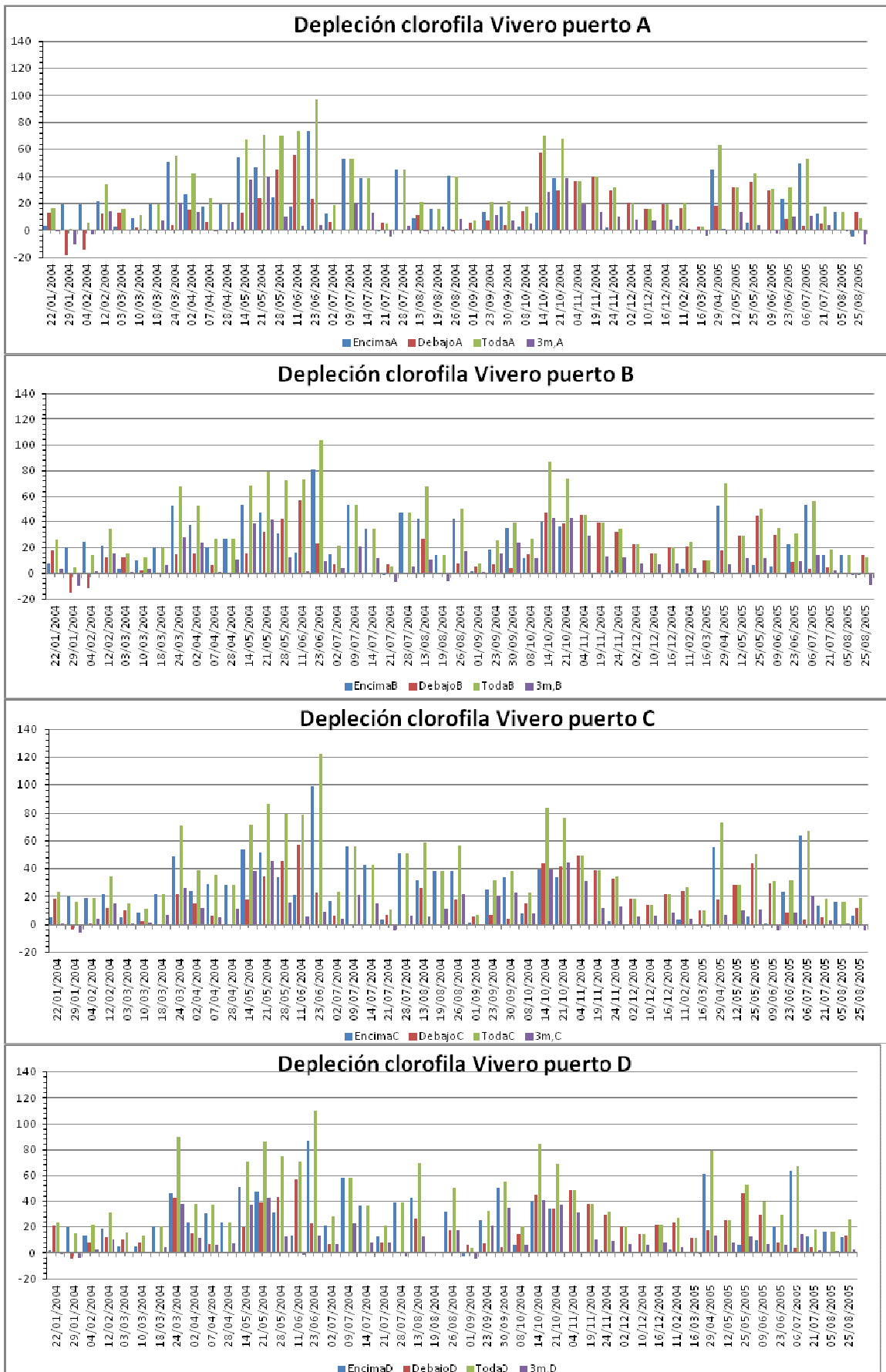
Los resultados obtenidos para el cálculo de la depleción de la clorofila en los diferentes conjuntos de viveros de la bahía pueden verse en el anexo 5. La interpretación de los resultados presentados en el anexo 5 puede verse en las gráficas de la 1 a la 5. La gráfica 1 muestra la depleción de la clorofila en los cuatro viveros del extremo centro (código 11-14), la gráfica 2 muestra los resultados para los cuatro viveros del conjunto Venecia (código 16-19), la gráfica 3 muestra la depleción en los cuatro viveros del puerto (código 7-10), la gráfica 4 muestra la depleción para el punto fuera (código 26), externo a los viveros Venecia y en la gráfica 5 se representa la depleción de la clorofila en el punto emisario (código 25), externo a los viveros del extremo centro.



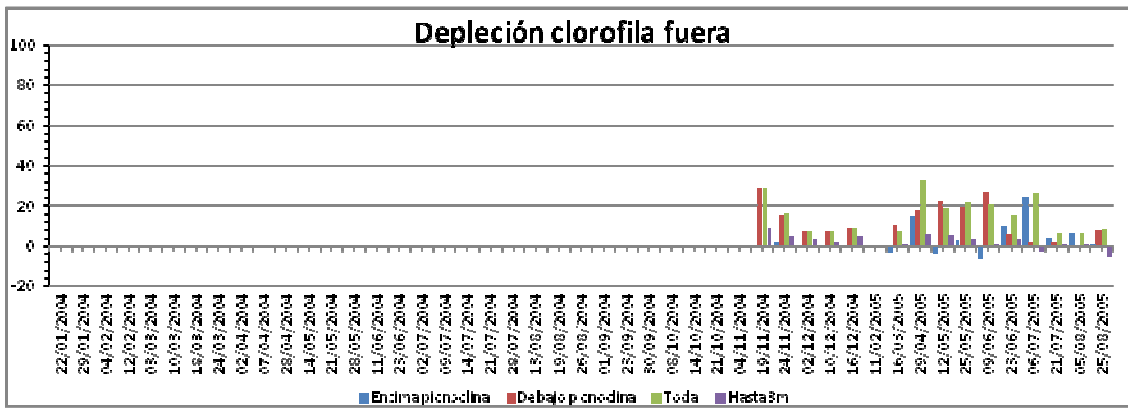
Gráfica 1: depleción de la clorofila en el conjunto de viveros del extremo centro (código 11-14).



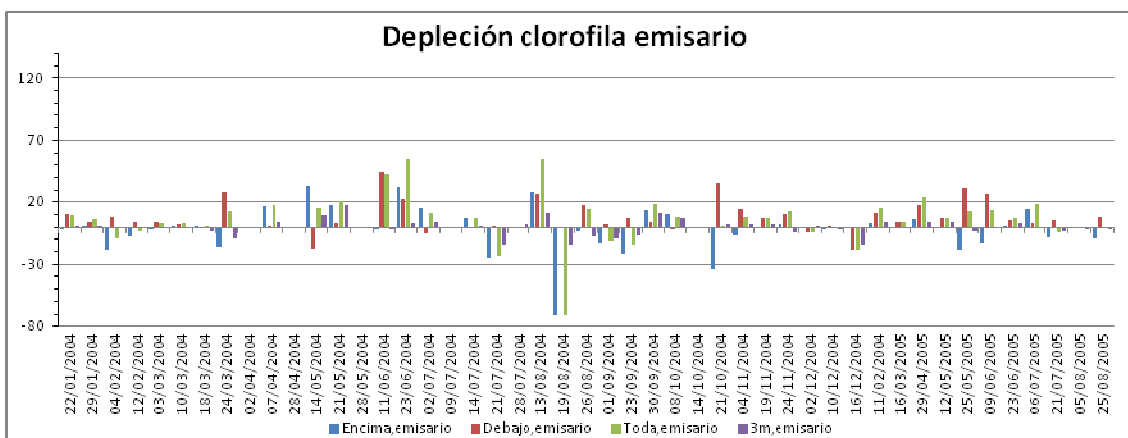
Gráfica 2: depleción de la clorofila en el conjunto de viveros Venecia (código 16-19).



Gráfica 3: depleción de la clorofila en el conjunto de viveros del puerto (código 7-10).



Gráfica 4: depleción de la clorofila en el punto fuera (código 26) externo a los viveros Venecia.



Gráfica 5: depleción de la clorofila en el punto emisario (código 25), externo a los viveros del extremo centro.

La depleción en los puntos externos a los viveros, en el punto fuera (código 26) y en el punto emisario (código 25) se ha calculado porque estos dos puntos actúan como puntos de control. Al ser puntos externos a los viveros pero muy cercanos a ellos, la depleción debe estar presente pero debe ser mucho menor que en el interior de los viveros. Las gráficas 4 y 5 constatan este hecho.

Las gráficas de la 1 a la 5 presentan características comunes:

- En todas hay episodios de depleción de la clorofila negativos, resultado de que el consumo de clorofila por parte de los organismos no llega a superar los aportes de clorofila en la zona. Estos episodios vemos que son poco frecuentes en las zonas de viveros y en el punto fuera de las cuerdas. Además, la amplitud de los episodios de depleción negativa es pequeña en comparación con la depleción general. En cambio, en el punto emisario, estos episodios de depleción negativa son más frecuentes y de mayor amplitud.
- Todos presentan mayor depleción de la clorofila en los meses de abril a diciembre respecto a los otros meses.

Los valores del índice que transforma los datos de clorofila en datos de seston en función de la situación dentro de la bahía podemos verlos en la tabla 7. Este índice se ha obtenido a partir de la razón entre la concentración de clorofila (mg/m^3) y la concentración de seston (mg/L). Este índice es adimensional.

Estación	Índice de conversión
Central (código 15)	1.32
Viveros	0.74
Fuera (código 26)	1.09

Tabla 7: valores del índice de proporción clorofila/seston que varía en función de la situación dentro de la bahía.

Se ha aplicado este índice a las concentraciones de clorofila disponibles y se ha podido calcular la depleción del seston. Las gráficas de depleción del seston pueden verse en el anexo 5. Debido a que la cantidad de seston presente se ha obtenido de manera proporcional respecto a la cantidad de clorofila, las gráficas resultantes del cálculo de la depleción del seston no presentan diferencias remarcables respecto a las de depleción de la clorofila.

Una vez transformados los datos de clorofila a seston, se ha calculado la depleción del seston para los diferentes viveros, integrando toda la columna de agua para obtener la concentración por unidad de superficie [mg/dm^2] y en porcentaje [%].

$$Depleción \left[\frac{\text{mg}}{\text{dm}^2} \right] = seston_punto_referencia \left[\frac{\text{mg}}{\text{dm}^2} \right] - seston_punto_evaluado \left[\frac{\text{mg}}{\text{dm}^2} \right] \quad (5)$$

$$Depleción [\%] = 100 - \left(\frac{seston_punto_evaluado \left[\frac{\text{mg}}{\text{dm}^2} \right]}{seston_punto_referencia \left[\frac{\text{mg}}{\text{dm}^2} \right]} \right) 100 \quad (6)$$

Se han obtenido los promedios de depleción del seston para cada uno de los conjuntos de viveros y para las diferentes épocas del año: invierno (enero, febrero y marzo), primavera (abril, mayo y junio), verano (julio, agosto y septiembre) y otoño (octubre, noviembre y diciembre). Estos resultados pueden verse en las tablas de la 8 a la 15. En estas tablas se presentan los nombres de los viveros en siglas, de manera que VEC corresponde a Viveros del Extremo Centro, VV corresponde a Viveros Venecia y VP corresponde a Viveros del Puerto. En la figura 14, se muestra un esquema cualitativo del significado de los datos que reflejan estas tablas.

Época del año	VEC respecto punto Central	VV respecto VEC	VP respecto VV	VV respecto punto Central	VP respecto punto Central
Invierno	13.62	10.11	3.67	23.82	26.68
Primavera	48.93	8.05	7.44	43.418	52.14
Verano	36.17	16.03	6.72	45.50	48.25
Otoño	1.49	14.69	2.76	31.62	30.42

Tabla 8: promedio de la depleción del seston [mg/dm^2] para los diferentes conjuntos de viveros y las diferentes épocas del año por encima de la picnoclina.

Época del año	VEC respecto punto Central	VV respecto VEC	VP respecto VV	VV respecto punto Central	VP respecto punto Central
Invierno	22.37	2.40	1.64	22.11	21.06
Primavera	34.88	6.93	2.70	34.52	37.53
Verano	12.35	4.48	1.59	12.79	12.23
Otoño	29.49	12.68	5.95	42.03	45.41

Tabla 9: promedio de la depleción del seston [mg/dm^2] para los diferentes conjuntos de viveros y las diferentes épocas del año por debajo de la picnoclina.

Época del año	VEC respecto punto Central	VV respecto VEC	VP respecto VV	VV respecto punto Central	VP respecto punto Central
Invierno	32.40	8.45	3.64	41.14	40.47
Primavera	71.51	10.10	10.33	72.75	82.64
Verano	42.48	16.53	6.00	54.14	56.54
Otoño	32.30	18.18	5.58	56.08	58.93

Tabla 10: promedio de la depleción del seston [mg/dm^2] para los diferentes conjuntos de viveros y las diferentes épocas del año para toda la columna de agua.

Época del año	VEC respecto punto Central	VV respecto VEC	VP respecto VV	VV respecto punto Central	VP respecto punto Central
Invierno	12.21	4.77	1.90	15.62	14.44
Primavera	22.50	6.33	3.15	23.98	25.17
Verano	18.23	9.36	4.14	23.13	22.56
Otoño	18.07	10.67	2.76	30.66	30.74

Tabla 11: promedio de la depleción del seston [mg/dm^2] para los diferentes conjuntos de viveros y las diferentes épocas del año hasta los 3m de profundidad.

Época del año	VEC respecto punto Central	VV respecto VEC	VP respecto VV	VV respecto punto Central	VP respecto punto Central
Invierno	52.78	38.48	39.33	65.18	73.94
Primavera	66.75	32.70	44.10	62.18	74.82
Verano	58.45	42.06	28.65	66.79	70.99
Otoño	65.52	54.45	32.03	89.13	85.88

Tabla 12: promedio de la depleción del seston (en %) para los diferentes conjuntos de viveros y las diferentes épocas del año por encima de la picnoclina.

Época del año	VEC respecto punto Central	VV respecto VEC	VP respecto VV	VV respecto punto Central	VP respecto punto Central
Invierno	75.46	19.95	26.00	68.55	68.20
Primavera	89.46	29.57	37.19	82.76	88.24
Verano	89.21	79.51	96.93	87.21	64.66
Otoño	55.67	58.96	35.78	79.77	86.97

Tabla 13: promedio de la depleción del seston (en %) para los diferentes conjuntos de viveros y las diferentes épocas del año por debajo de la picnoclina.

Época del año	VEC respecto punto Central	VV respecto VEC	VP respecto VV	VV respecto punto Central	VP respecto punto Central
Invierno	61.56	33.84	26.40	75.57	75.60
Primavera	72.07	36.36	45.10	77.41	85.93
Verano	51.85	42.59	26.52	71.41	74.92
Otoño	51.22	58.42	36.87	80.20	84.50

Tabla 14: promedio de la depleción del seston (en %) para los diferentes conjuntos de viveros y las diferentes épocas del año para toda la columna de agua.

Época del año	VEC respecto punto Central	VV respecto VEC	VP respecto VV	VV respecto punto Central	VP respecto punto Central
Invierno	53.41	25.74	16.43	61.81	54.83
Primavera	59.12	33.38	23.66	63.66	66.36
Verano	46.25	37.16	24.00	58.93	57.19
Otoño	40.08	52.56	23.31	73.63	74.93

Tabla 15: promedio de la depleción del seston (en %) para los diferentes conjuntos de viveros y las diferentes épocas del año hasta los 3m de profundidad.

Las gráficas de la 6 a la 9, muestran la dependencia entre la depleción y la concentración de seston disponible en el medio. Como se puede observar, la correlación entre la depleción y la concentración de seston es muy alta. La depleción se relaciona de manera directa con la concentración de materia disponible, aunque también depende de otros factores ambientales, como la temperatura. No obstante, la depleción se relaciona con estos factores de manera indirecta, pues éstos ya tienen una alta influencia en la concentración de seston disponible en el medio.

La depleción del seston, $d(x)$, en función de la concentración de seston disponible en el punto central, x , se puede expresar mediante las siguientes funciones en los diferentes conjuntos de viveros de mejillón:

- Viveros del Extremo Centro: $d(x) = 0.6302 \cdot x$ (7)
- Viveros Venecia: $d(x) = 0.7658 \cdot x$ (8)
- Viveros del Puerto: $d(x) = 0.8259 \cdot x$ (9)

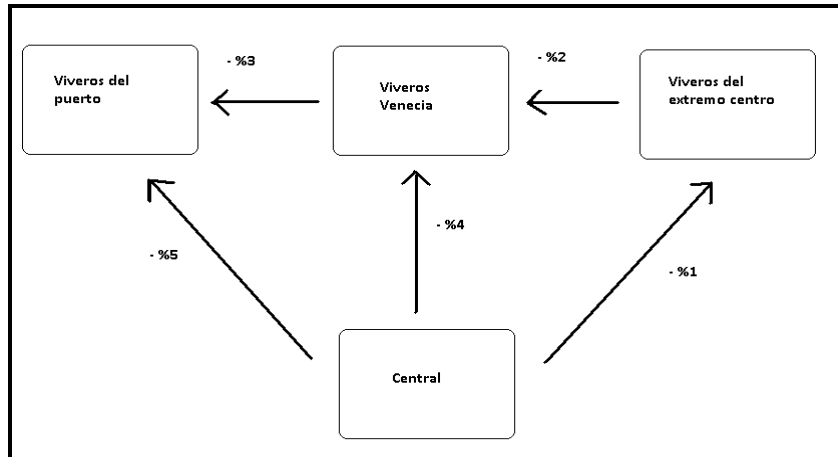
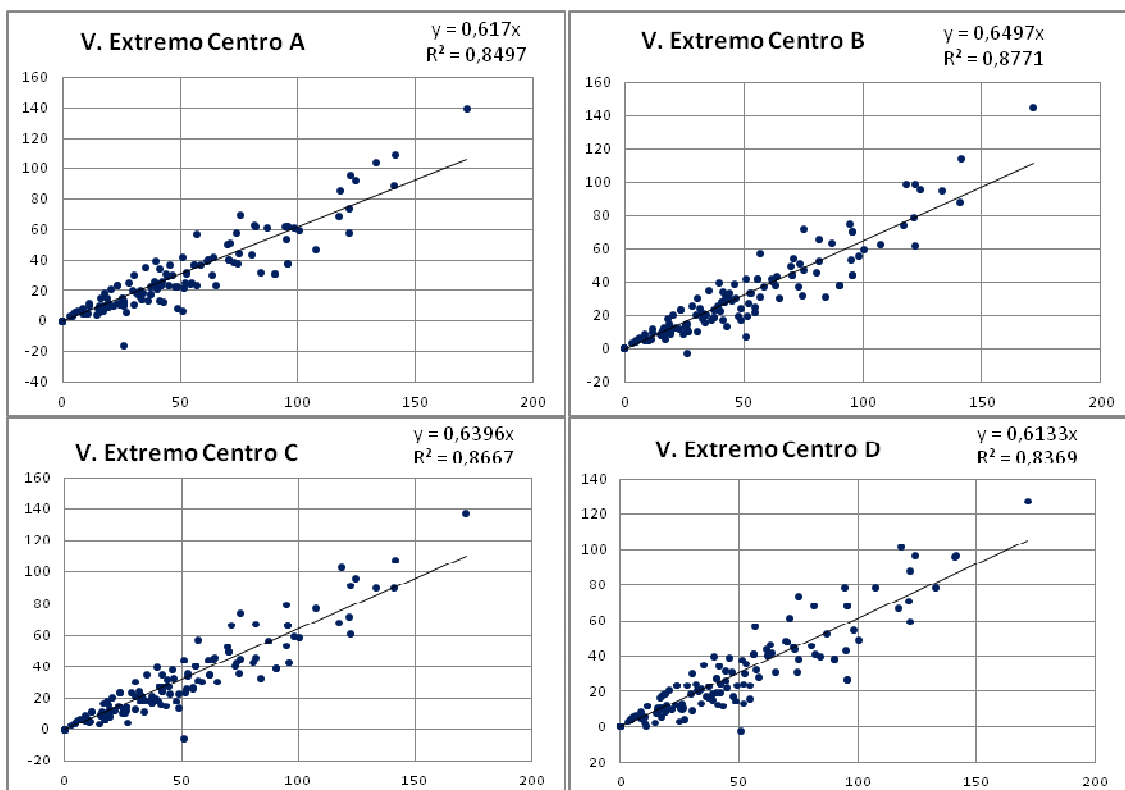
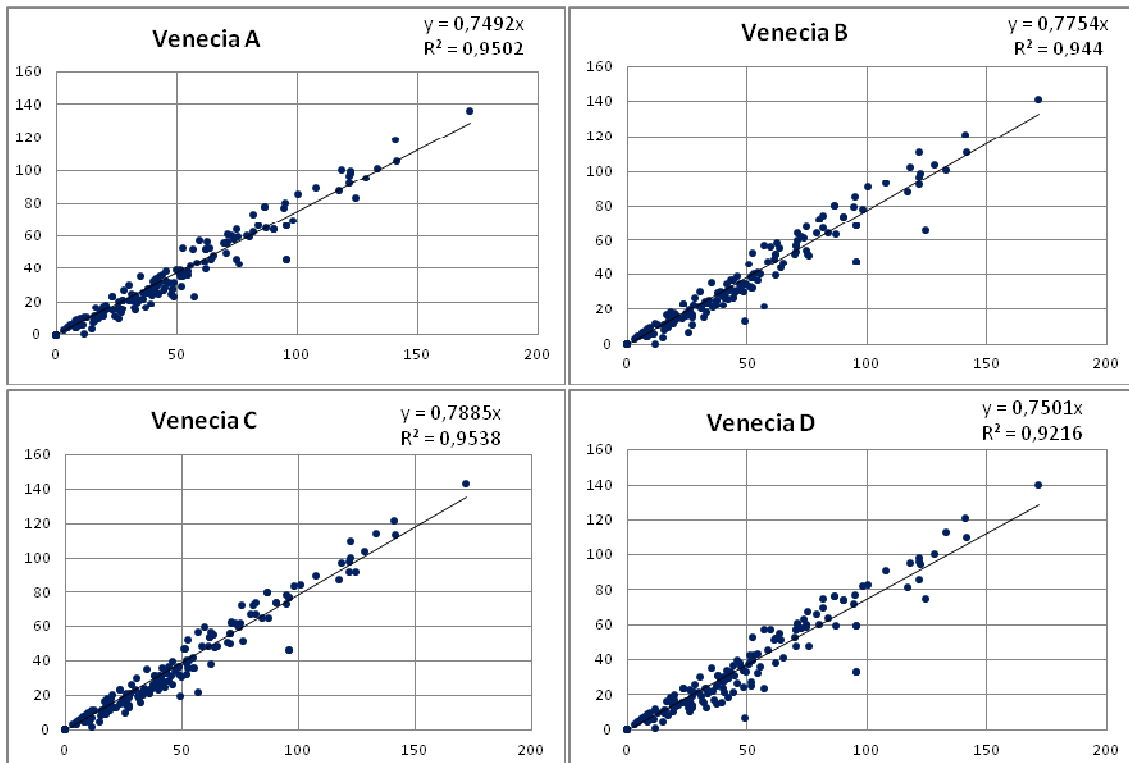


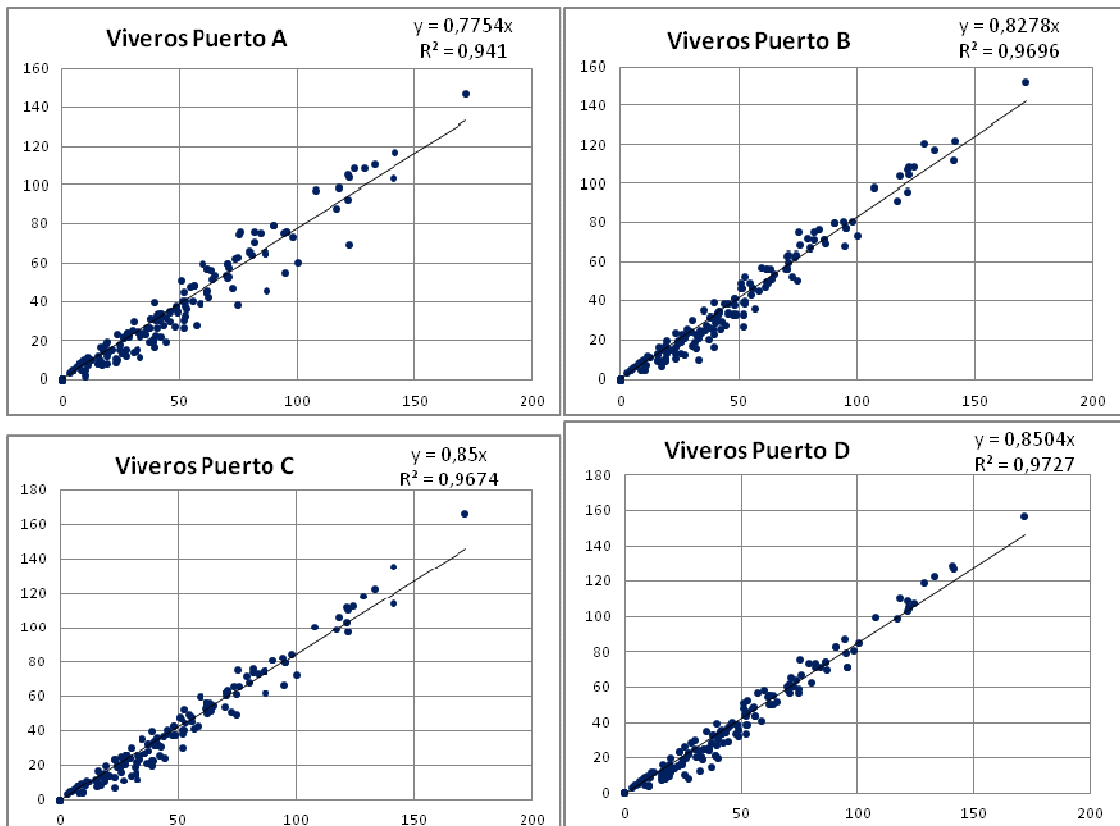
Figura 14: esquema de los códigos de depleción del sesten y la clorofila en la bahía (%1 a %5), que traduce los datos recogidos en tablas de la 8 a la 15. Se presentan con un signo negativo porque se trata de consumo. El porcentaje %1 es el porcentaje de depleción que se produce en los viveros del extremo centro respecto al punto central, el %2 es el que se produce en los viveros Venecia respecto a los viveros del extremo centro, el %3 se produce en los viveros del puerto respecto a los viveros Venecia, el %4 se produce en los viveros Venecia respecto al punto central y el %5 se produce en los viveros del puerto respecto al punto central.



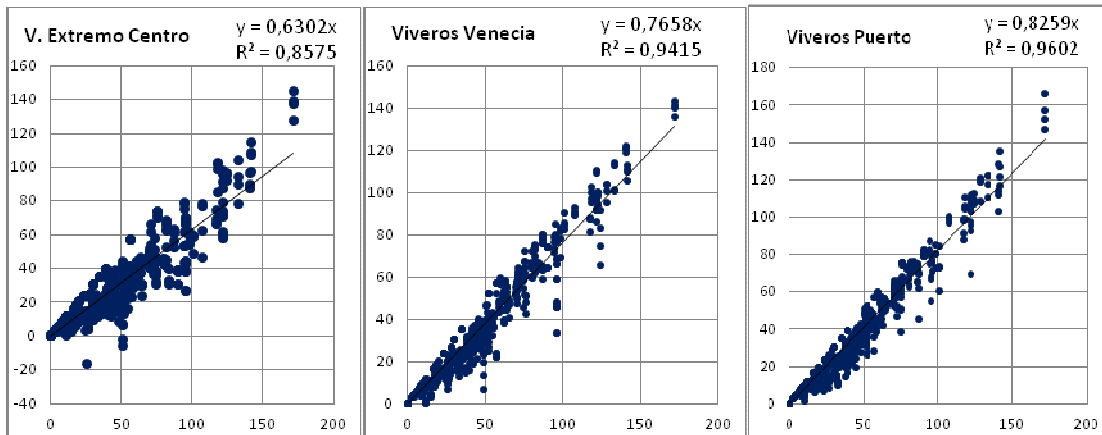
Gráfica 6: depleción del sesten en los viveros del extremo centro en función de la concentración de sesten disponible [mg/dm²] en el punto central.



Gráfica 7: depleción del seston en los viveros Venecia en función de la concentración de seston disponible [mg/dm³] en el punto central.



Gráfica 8: depleción del seston en los viveros del puerto en función de la concentración de seston disponible [mg/dm³] en el punto central.

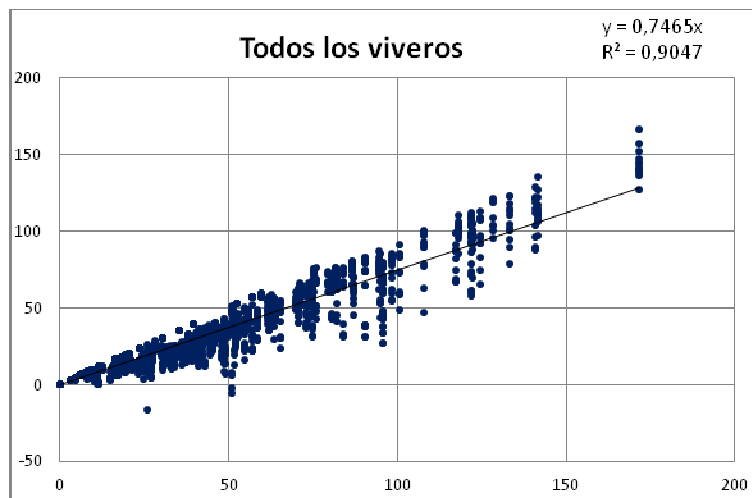


Gráfica 9: depleción del seston en función de la concentración disponible en el punto central [mg/dm^2] para los tres conjuntos de viveros.

A partir de las ecuaciones (7), (8) y (9) podemos expresar la depleción del seston en función de la concentración de seston disponible, de manera general, como

$$d(x) = 0.7465 \cdot x \quad (10)$$

donde, igual que antes, $d(x)$ es la depleción y x representa la concentración de seston disponible en mg/dm^2 . Este resultado puede verse en la gráfica 10.



Gráfica 10: depleción del seston en función de la concentración de seston [mg/dm^2] disponible en el punto central para todos los viveros con cultivo de bivalvos.

3.4. MODELO DE DEPLECIÓN

Para poder calcular la depleción, se han tomado las medidas de los diferentes viveros mediante el software *MiraMon 7*[®].

Los tres puntos donde se han realizado los muestreos con la sonda CTD en los viveros pueden verse en la figura 15. Las dimensiones de las zonas de viveros pueden verse en la tabla 16.

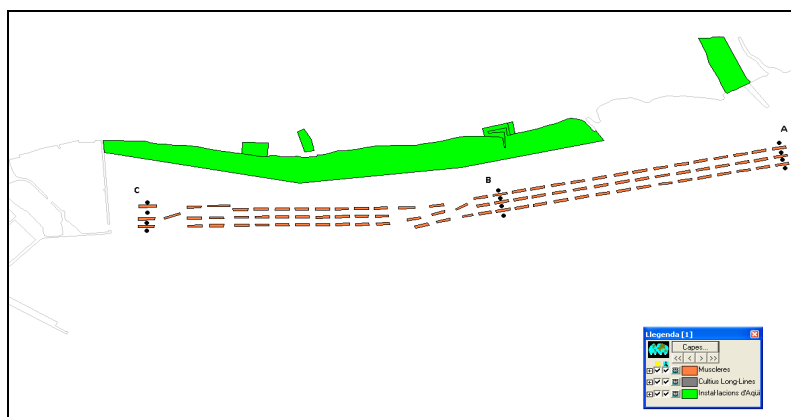


Figura 15: puntos de muestro con la sonda CTD. En cada uno de los puntos (A, B y C) se realizaron cuatro medidas con la sonda CTD, para cada uno de los viveros (A, B, C y D, donde A es el vivero más próximo a la costa y el D es el más adentrado en el mar).

Zona de viveros	Longitud (m)	Superficie (m ²)	Superficie cultivada (m ²)
Viveros del extremo Centro (desde el punto A al punto B)	2123.8	337038.2	81274.2
Viveros Venecia hasta viveros Puerto (desde el punto B al punto C)	2672.5	469069.0	86107.2

Tabla 16: dimensiones de las zonas de viveros donde se ha calculado la depleción del seston y la clorofila. La superficie cultivada se ha obtenido midiendo solo la superficie ocupada por los viveros de cultivo, sin contar la superficie ocupada por agua del mar.

Debido a que conocemos el rango de velocidades mínima y máxima que toma el agua del mar cuando circula por la bahía (Llebot, 2010), se ha calculado el tiempo mínimo y máximo de tránsito, que es el tiempo que tarda la masa de agua en cruzar las dos zonas de viveros (tabla 17).

Zona de viveros	Velocidad del agua (m/s)	Tiempo de tránsito (h)
Desde A hasta B	0.29	2.03
	0.40	1.47
Desde B hasta C	0.29	2.56
	0.40	1.86
Total: desde A hasta C	0.29	4.59
	0.40	3.33

Tabla 17: tiempo que tarda la masa de agua en cruzar las zonas de viveros cultivadas con mejillón.

Conocido el tiempo de tránsito y conocida la depleción que se ha producido en la zona de viveros, podemos calcular la depleción por unidad de tiempo en la zona de cultivo de moluscos (tabla 18). Este consumo varía para las diferentes épocas del año, del mismo modo que lo hace la depleción. Para conocer la depleción total en una zona,

multiplicamos la depleción por m^2 por la superficie total en m^2 de la zona que estamos evaluando. Debido a que se ha considerado que los moluscos cultivados se encuentran siempre por encima de los 3m de profundidad, utilizamos los datos de depleción hasta los 3m de las tablas 12 a la 15.

Conocida la depleción de seston por unidad de tiempo, calculamos el consumo de un mejillón por unidad de tiempo y el consumo correspondiente a 1g de carne seca de mejillón por unidad de tiempo. Para ello, necesitamos conocer la cantidad de mejillones que hay en cada una de las zonas de viveros.

Los datos necesarios para el cálculo de la cantidad de mejillones en cada una de las zonas de viveros pueden encontrarse en la tabla 19 y el consumo en la tabla 20.

Zona de viveros	Depleción [mg/dm ²]	Depleción total en la zona [mg]	Tiempo de tránsito [h]	Depleción [mg/h]
Desde A hasta B (Sup = 337038.2m ²)	<i>Invierno:</i> 4.771912	$1.61 \cdot 10^8$	2.03	$7.93 \cdot 10^7$
			1.47	$1.10 \cdot 10^8$
	<i>Primavera:</i> 6.329794	$2.13 \cdot 10^8$	2.03	$1.05 \cdot 10^8$
			1.47	$1.45 \cdot 10^8$
	<i>Verano:</i> 9.357444	$3.15 \cdot 10^8$	2.03	$1.55 \cdot 10^8$
			1.47	$2.15 \cdot 10^8$
	<i>Otoño:</i> 10.67393	$3.60 \cdot 10^8$	2.03	$1.77 \cdot 10^8$
			1.47	$2.45 \cdot 10^8$
Desde B hasta C (Sup = 469069.0m ²)	<i>Invierno:</i> 1.905342	$8.94 \cdot 10^7$	2.56	$3.49 \cdot 10^7$
			1.86	$4.81 \cdot 10^7$
	<i>Primavera:</i> 3.153722	$1.48 \cdot 10^8$	2.56	$5.78 \cdot 10^7$
			1.86	$7.96 \cdot 10^7$
	<i>Verano:</i> 4.136165	$1.94 \cdot 10^8$	2.56	$7.58 \cdot 10^7$
			1.86	$1.04 \cdot 10^8$
	<i>Otoño:</i> 2.760174	$1.29 \cdot 10^8$	2.56	$5.04 \cdot 10^7$
			1.86	$6.94 \cdot 10^7$
Total Desde A hasta C (Sup = 806107.2m ²)	<i>Invierno:</i> 6.677254	$5.38 \cdot 10^8$	4.59	$1.17 \cdot 10^8$
			3.33	$1.62 \cdot 10^8$
	<i>Primavera:</i> 9.483516	$7.64 \cdot 10^8$	4.59	$1.67 \cdot 10^8$
			3.33	$2.30 \cdot 10^8$
	<i>Verano:</i> 13.493609	$1.09 \cdot 10^9$	4.59	$2.37 \cdot 10^8$
			3.33	$3.27 \cdot 10^8$
	<i>Otoño:</i> 13.434104	$1.08 \cdot 10^9$	4.59	$2.36 \cdot 10^8$
			3.33	$3.25 \cdot 10^8$

Tabla 18: depleción del seston por unidad de tiempo [mg/h] en las dos zonas de viveros con cultivo de moluscos bivalvos estudiadas.

Mes del año	Temperatura [°C]	Talla del mejillón [mm]	Carne seca del mejillón [g]
Enero	11.40	50.523	0.402
Febrero	11.93	51.544	0.372
Marzo	12.70	53.065	0.441
Abril	14.62	56.477	0.433
Mayo	18.95	60.476	0.807
Junio	21.93	66.499	1.227
Julio	25.16	64.798	1.132
Agosto	26.43	66.193	1.116
Septiembre	25.43	66.564	1.106
Octubre	21.41	33.521	0.219
Noviembre	16.58	41.447	0.261
Diciembre	13.01	48.692	0.372

Tabla 19: datos del tamaño de los mejillones y el peso de las cuerdas en un punto medio del polígono estudiado (punto B) en los diferentes meses del año a una profundidad de hasta 3m.

Según los datos facilitados por los productores de mejillón de la zona, en un vivero hay entre 1000 y 1200 cuerdas de mejillón. Cada una de estas cuerdas pesa unos 7kg en el momento de la siembra, en otoño, y unos 25kg en el momento de la recolecta del mejillón, en verano. Además, sabemos que en una cuerda hay, aproximadamente, unos 1200 o 1300 mejillones.

Con estos datos y los datos de la tabla 18, podemos calcular la cantidad de mejillones que hay en las zonas de estudio (tabla 20) y obtener la depleción por gramo de carne seca (tabla 21). Cuando hablamos de índice/tasa de depleción (del inglés, *Depletion Rate*, DR) nos referimos a la cantidad de materia particulada total (en miligramos) que los moluscos filtran por unidad de tiempo (en horas). Esta tasa depende de la actividad de los moluscos a la hora de ingerir alimento, pero también de la cantidad de materia particulada total disponible en el medio.

Zona de viveros	Nº de viveros	Nº de cuerdas	Nº de mejillones	Peso de las cuerdas (kg)	Carne seca de mejillón (g)
Desde A hasta B (<i>Sup</i> = 337038.2m ²)	42	46200	5.78·10 ⁷		Febrero: 2.15·10 ⁷
					Abril: 2.50·10 ⁷
				Julio: 1.16·10 ⁶	Julio: 6.54·10 ⁷
				Octubre: 3.23·10 ⁵	Octubre: 1.27·10 ⁷
Desde B hasta C (<i>Sup</i> = 445293.7m ²)	45	49500	6.19·10 ⁷		Febrero: 2.30·10 ⁷
					Abril: 2.68·10 ⁷
				Julio: 1.24·10 ⁶	Julio: 7.01·10 ⁷
				Octubre: 3.47·10 ⁵	Octubre: 1.36·10 ⁷
Total: Desde A hasta C (<i>Sup</i> = 782331.9m ²)	87	95700	1.20·10 ⁸		Febrero: 4.46·10 ⁷
					Abril: 5.20·10 ⁷
				Julio: 2.39·10 ⁶	Julio: 1.36·10 ⁸
				Octubre: 6.70·10 ⁵	Octubre: 2.63·10 ⁷

Tabla 20: estimación del número de mejillones en cada una de las zonas de estudio dentro de la bahía de Alfacs.

En la tabla 21 puede verse índice DR. Para obtenerlo se ha dividido la depleción de materia particulada deplecionada en cada zona (en mg/h) por la cantidad de gramos de carne seca de mejillón en cada zona. Se ha calculado el rango del DR (DR mínimo y máximo) mediante los datos de depleción mínima y máxima obtenidos anteriormente.

Zona de viveros	Época del año	DR [mg/h]	DR [mg/h] promedio
De A hasta B	Invierno	3.69	4.41
		5.12	
	Primavera	4.20	5.00
		5.80	
	Verano	2.37	2.83
		3.29	
Otoño	13.93	16.62	
		19.30	
De B hasta C	Invierno	1.52	1.66
		1.79	
	Primavera	2.16	2.57
		2.97	
	Verano	1.08	1.28
		1.48	
Otoño	3.71	4.41	
		5.10	
Total: de A hasta C	Invierno	2.62	3.13
		3.63	
	Primavera	3.21	3.82
		4.42	
	Verano	1.74	2.07
		2.40	
Otoño	8.97	10.67	
		12.36	

Tabla 21: Índice de depleción (DR). Indica el consumo de seston por gramo de carne seca de mejillón y por hora, según la época del año y la zona de viveros estudiada.

Los resultados de la tabla 21 muestran una disminución de la tasa de depleción en los meses de verano, cuando las temperaturas son más elevadas. También muestran que la tasa de depleción es mayor en la zona de viveros desde A hasta B que desde B hasta C.

Dado que los muestreos realizados con la sonda CTD nos proporcionaron originalmente la concentración de clorofila en mg/m^3 y los transformamos a datos de seston en mg/L , se tiene la relación entre la masa de seston y el volumen de agua. Podemos calcular el índice CR tal como se presenta en los trabajos de Galimany *et al.* (2011), llamado índice/tasa de aclaración (del inglés, *clearance rate*, CR) para cada individuo, que expresa la cantidad de agua filtrada por cada individuo por unidad de tiempo. En la tabla 22 podemos encontrar los promedios de la concentración de seston en las diferentes zonas de viveros estudiadas. A partir de los datos de concentración de seston de la tabla 22, transformamos el DR obtenido [$\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$] a CR [$\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$]. Los resultados obtenidos en el cálculo del CR pueden encontrarse en la tabla 23.

Época	Concentración de seston promedio [mg·L ⁻¹]
Invierno	2.98
Primavera	5.33
Verano	5.27
Otoño	3.41

Tabla 22: promedios de la concentración de seston en mg/L en la zona de viveros según la época del año.

Zona de viveros	Época del año	CR [L·h ⁻¹]	CR [L·h ⁻¹] promedio
De A hasta B	Invierno	1.24	1.48
		1.72	
	Primavera	0.79	0.94
		1.09	
	Verano	0.45	0.54
		0.62	
Otoño	4.09	4.87	
De B hasta C	Invierno	0.51	0.56
		0.60	
	Primavera	0.41	0.48
		0.56	
	Verano	0.20	0.24
		0.28	
Otoño	1.09	1.29	
Total: de A hasta C	Invierno	0.88	1.05
		1.22	
	Primavera	0.60	0.72
		0.83	
	Verano	0.33	0.39
		0.46	
Otoño	2.63	3.13	
		3.62	

Tabla 23: índice CR del mejillón, *Mytilus galloprovincialis*, en la bahía de Alfacs para diferentes épocas del año.

3.5. APLICACIÓN DEL MODELO DEB

En este apartado la depleción del seston se ha modelizado usando las ecuaciones del modelo DEB. De este modo, el consumo de seston por parte de los moluscos se representa mediante la función tasa de ingestión de energía (del inglés, *energy ingestion rate*, \dot{p}_x), ecuación (3).

Para modelizar la depleción, aplicamos la función tasa de ingestión de energía de manera que el término de *Michaelis-Menten* de la ecuación (4) cambia en función de la concentración de seston presente en la masa de agua después del paso de ésta por cada uno de los conjuntos de viveros. Los valores de los parámetros que intervienen en las ecuaciones del modelo pueden encontrarse en la tabla 24.

En el estudio de Rosland *et al.* (2009) estiman el valor del *half-saturation coefficient* (χ_k) a partir de la siguiente expresión

$$\chi_k = \frac{\{\dot{p}_{\chi_m}\}}{CR} V^{2/3} c_f^{-1} \rightarrow \chi_k = \frac{273 \cdot (0.419)^{-1} \cdot V^{2/3}}{CR} \quad (11)$$

donde CR es el *clearance rate* en L·día⁻¹ y c_f es un factor de conversión de unidades de energía (J·día⁻¹) a unidades de clorofila a ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) = 0.419J· μg^{-1} de clorofila a . El volumen estructural del mejillón se calcula a partir de la longitud y el coeficiente de forma, $V = (\delta_M L)^3$.

Parámetros	Símbolo	Unidades	Valor
Tasa de ingestión máxima en función del área específica	$\{\dot{p}_{\chi_m}\}$	J·cm ⁻² ·día ⁻¹	273 ^b
Coefficiente de forma	δ_M	-	0.29 ^e
Temperatura de Arrhenius	T_A	K	5800 ^a
Rango de tolerancia del límite inferior	T_L	K	275 ^a
Temperatura de Arrhenius para la tasa de decrecimiento en el límite inferior	T_{AL}	K	45430 ^a
Temperatura de Arrhenius para la tasa de decrecimiento en el límite superior	T_{AH}	K	31376 ^a
Temperatura de referencia	T_I	K	289 ^a
Rango de tolerancia en el límite superior	T_H	K	296 ^a
Densidad de volumen estructural	ρ	g·cm ⁻³	1 ^b
Exponente alométrico para la ingestión	b_{mi}	-	-0.4 ^c
Tasa de ingestión de referencia	I_m	mg/día	0.1 ^c
Constante de escala	C_{mi}	-	Debe calibrarse
Tasa constante de temperatura para ingestión estándar	Q_{mi}	°C ⁻¹	0.07 ^c
Peso de referencia del mejillón	M_{wRef}	g	0.250 ^d

Tabla 24: valores de diferentes parámetros usados en los modelos SFG y DEB encontrados en el estudio de Rosland *et al.* (2009) y que fueron extraídos de diferentes estudios (^a,^b,^c,^d,^e). ^a van der Veer *et al.* (2006), ^b Thomas *et al.* (2011), ^c Dowd (1997), ^d Grant *et al.* (2008), ^e Brigolin *et al.* (2009).

A partir de los valores medidos del CR calculados en este estudio, estimamos el valor de χ_k (tabla 25). Vemos que el índice CR depende fuertemente con la temperatura, de modo que el coeficiente de *half-saturation* también tiene esta dependencia con la temperatura. Una vez estimado el valor del coeficiente χ_k podemos aplicar los dos modelos, DEB y SFG. Este coeficiente difiere del que se ha encontrado en la literatura (Filgueira *et al.*, 2011) debido a que, al ser una bahía mediterránea, en la bahía de Alfacos tienen lugar grandes cambios en la temperatura en función de la época del año (tabla 19). También es debido a estas variaciones de temperatura que el χ_k no puede tomarse como un valor constante, sino que varía a lo largo del año.

Mes	T (°C)	CR (L·h ⁻¹)	CR (L·día ⁻¹)	χ _k (μg·L ⁻¹)
Invierno	11.93 ± 0.01	1.05	25.17	0.85
Primavera	14.62 ± 0.01	0.72	17.18	1.25
Verano	25.16 ± 0.01	0.39	9.43	2.28
Otoño	16.58 ± 0.01	3.13	75.06	0.29

Tabla 25: cálculo del *half-saturation coefficient* en diferentes épocas del año, calculado con la expresión deducida en el estudio de Rosland *et al.* (2009).

Para la aplicación del modelo DEB usamos las ecuaciones (3) y (4) citadas en el texto anteriormente, además de otras ecuaciones que podemos encontrar en la tabla 1 de este trabajo.

Fijémonos en que de las ecuaciones (3) y (4) llegamos a

$$\dot{p}_X = \{\dot{p}_{Xm}\} T_D V^{2/3} \frac{\chi}{\chi + \chi_k} \quad (12)$$

En la expresión (12), la función T_D tiene la expresión dada en la tabla 1 y que recordamos aquí

$$T_D = \exp\left(\frac{T_A}{T_1} - \frac{T_A}{T_k}\right) \left(1 + \exp\left(\frac{T_{AL}}{T_k} - \frac{T_{AL}}{T_L}\right) + \exp\left(\frac{T_{AH}}{T_H} - \frac{T_{AH}}{T_k}\right)\right)^{-1} \quad (13)$$

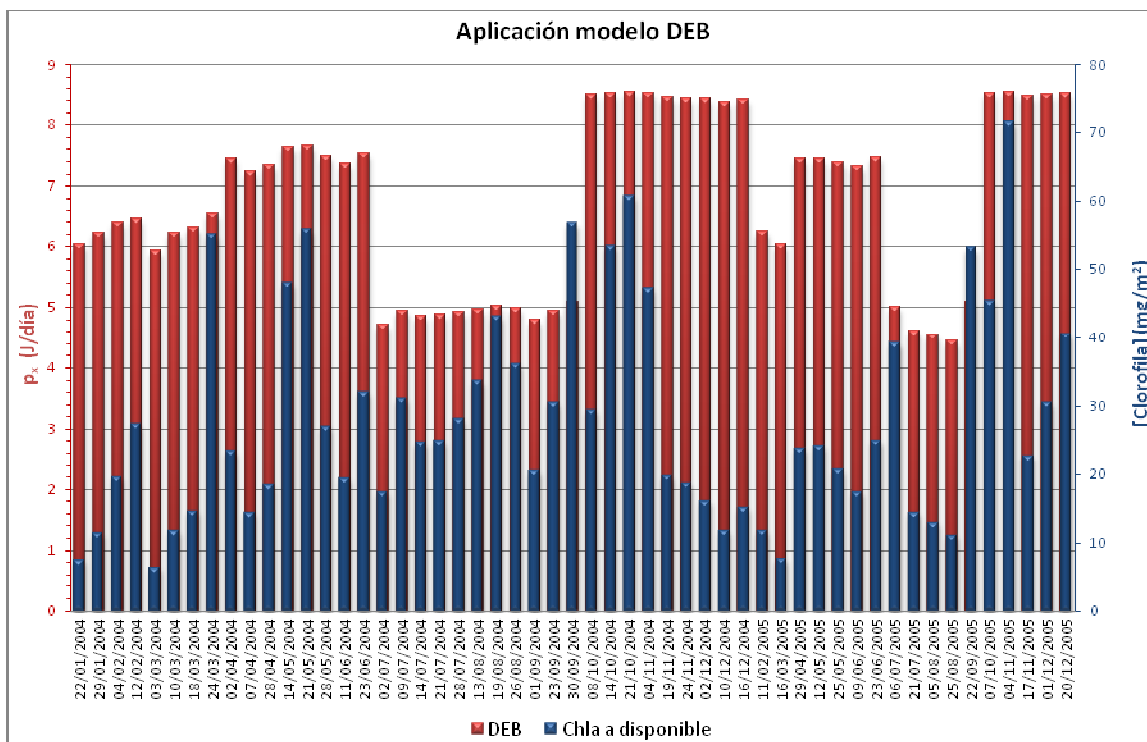
En la ecuación (13) del coeficiente T_D , los valores de los parámetros fueron estimados en diversos estudios anteriores como se indica en la tabla 24. Hay que tener en cuenta que los valores de estos parámetros deberían ser revisados a la hora de aplicarlos en estudios sobre aguas mediterráneas, debido a que los rangos de temperatura que se dan en estas zonas son diferentes de los que se dan en las aguas atlánticas para los que se han estimado estos parámetros. No obstante, al ser este estudio una primera aproximación al concepto de capacidad de carga y a los modelos de crecimiento de moluscos, tomamos como válidos estos valores, aunque sabiendo que en estudios posteriores para aguas mediterráneas los valores de los parámetros deben ser revisados.

El modelo DEB permite calcular el índice de ingestión (J·día⁻¹) en función de la concentración de clorofila presente en el medio y de la superficie estructural del mejillón, como puede verse en la ecuación (12). Los resultados obtenidos después de aplicar el método se dan en la tabla 26 y en la gráfica 11.

Época del año	T_k (°C)	T_D	M_w (g)	χ_k ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	\dot{p}_x ($\text{J}\cdot\text{día}^{-1}$)
Invierno	11.93	0.74	0.372	0.85	$6.63 \cdot \frac{\chi}{\chi + 0.85}$
Primavera	14.62	0.87	0.433	1.25	$7.82 \cdot \frac{\chi}{\chi + 1.25}$
Verano	25.16	0.59	1.132	2.28	$5.29 \cdot \frac{\chi}{\chi + 2.28}$
Otoño	16.58	0.95	0.261	0.29	$8.57 \cdot \frac{\chi}{\chi + 0.29}$

Tabla 26: datos de mejillón en la bahía de Alfacs y aplicación de las ecuaciones de la teoría DEB sobre los datos de temperatura y masa del mejillón de la bahía de Alfacs, en función de la concentración de clorofila disponible en el medio.

En la gráfica 11 puede verse que en los meses de verano hay una concentración de clorofila (en azul) presente en el medio bastante elevada pero que la cantidad de energía ingerida por los mejillones (en rojo) durante el periodo de verano sufre un descenso notable. Durante los meses de otoño y primavera, con temperaturas más suaves, en cambio, la cantidad de energía asimilada por los moluscos es muy elevada teniendo en cuenta que las concentraciones de clorofila son muy bajas. Este resultado, es típico de la aplicación de la teoría DEB debido a que introduce una alta dependencia entre la ingestión y la temperatura.



Gráfica 11: resultados de la aplicación del modelo DEB. En azul, puede verse la concentración de clorofila a en mg/m^2 disponible en el medio a lo largo de los dos años sobre los que se ha realizado este estudio y, en rojo, la energía ingerida por mejillón en $\text{J}\cdot\text{día}^{-1}$, en función de la clorofila presente en el medio, según las ecuaciones de la teoría DEB.

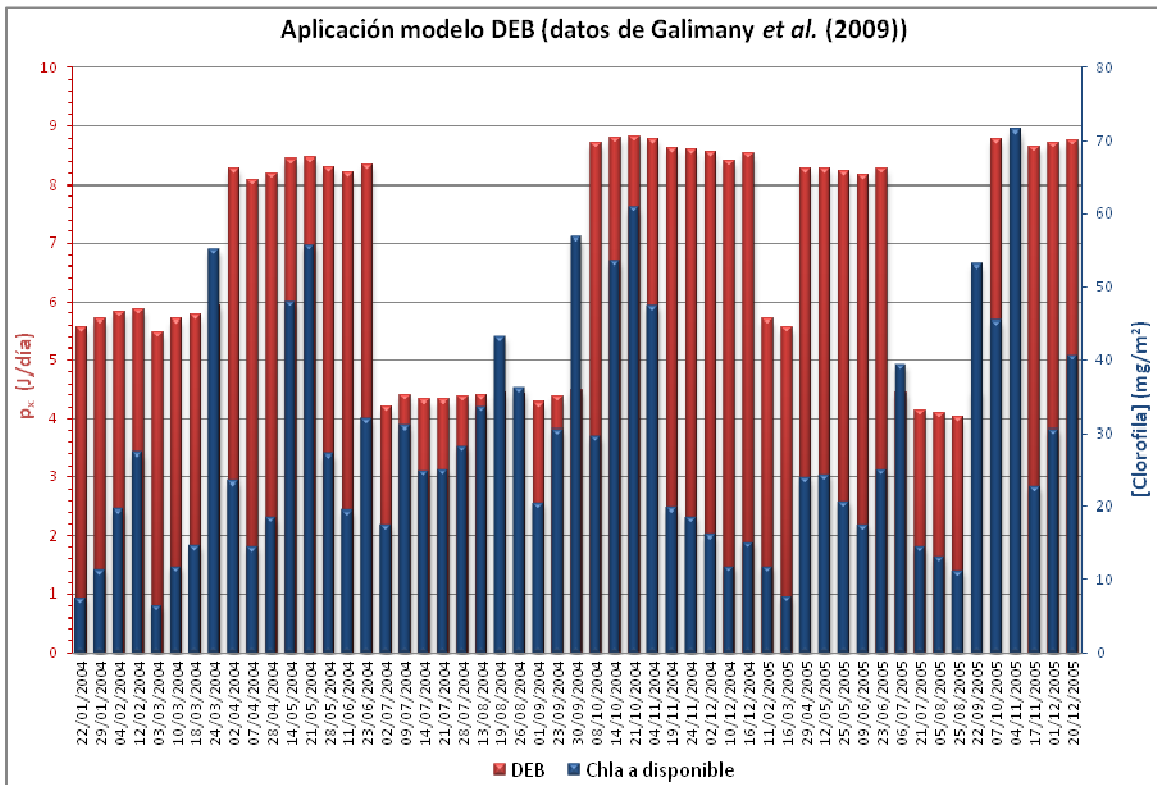
Como en el modelo de depleción, donde se obtuvo que el CR era inferior durante los meses de verano, en este caso también puede deducirse que debido a las temperaturas elevadas durante los meses más calurosos, los mejillones ingieren menos cantidad de alimento (Anestis *et al.*, 2007).

Realizamos los mismos cálculos para el modelo DEB con datos obtenidos en los experimentos de filtración *in situ* simulados llevados a cabo por Galimany *et al.* (2009). Los datos obtenidos en aquellos experimentos pueden verse en la tabla 27.

Época del año	T [°C]	T _D [K]	Longitud [mm]	Peso seco de la carne [mg]	CR [L·h ⁻¹]	CR [L·día ⁻¹]	X _k [µg·L ⁻¹]	\dot{p}_x (J·día ⁻¹)
Invierno	10.5 ±0.1	0.67	50.85 ± 4.72	804.04 ± 294.76	3.37 ± 0.41	80.88	0.63	$6.01 \cdot \frac{\chi}{\chi + 0.63}$
Primavera	16.7 ±0.1	0.95	59.09 ± 4.99	872.60 ± 266.36	2.25 ± 0.41	54.00	0.95	$8.60 \cdot \frac{\chi}{\chi + 0.95}$
Verano	25.9 ±0.1	0.51	63.85 ± 7.28	1136.97 ±490.56	1.29 ± 0.38	30.96	1.66	$4.62 \cdot \frac{\chi}{\chi + 1.66}$
Otoño	18.1 ±0.1	0.99	42.27 ± 4.02	446.66 ± 134.95	3.01 ± 0.81	72.24	0.71	$8.92 \cdot \frac{\chi}{\chi + 0.71}$

Tabla 27: datos de temperatura, longitud y peso del mejillón y CR extraídos de los trabajos de Galimany *et al.* (2009). Cálculo del χ_k y aplicación de estos datos a la ecuaciones del modelo DEB.

En la gráfica 12 puede verse el resultado de la aplicación del modelo DEB sobre los datos de la bahía a partir de los datos obtenidos por Galimany *et al.* (2009). Vemos que en este caso se aprecia el mismo efecto de la temperatura sobre la asimilación de la energía.



Gráfica 12: resultados de la aplicación del modelo DEB. En azul, puede verse la concentración de clorofila a en mg/m^2 disponible en el medio a lo largo de los dos años sobre los que se ha realizado este estudio y, en rojo, la energía ingerida por mejillón en $\text{J}\cdot\text{día}^{-1}$, en función de la clorofila presente en el medio, según las ecuaciones de la teoría DEB y a partir de los datos extraídos del trabajo de Galimany *et al.* (2009).

3.6. APLICACIÓN DEL MODELO SFG

En este apartado, la depleción del seston se ha modelizado usando las ecuaciones del modelo SFG. De este modo, el consumo de seston por parte de los moluscos se representa mediante la función de ingestión, ecuación (1).

En la modelización de la depleción, aplicamos la función de ingestión de manera que el término de *Michaelis-Menten* de la ecuación (2) cambia en función de la concentración de seston presente en cada momento. Los valores de los parámetros que intervienen en las ecuaciones del modelo pueden encontrarse en la tabla 24.

Los valores del parámetro χ_k para la aplicación del modelo SFG se han tomado iguales que los estimados anteriormente en la aplicación del modelo DEB. Estos valores pueden encontrarse en la tabla 25, para las diferentes estaciones del año.

Fijémonos que con las ecuaciones (1) y (2) llegamos a

$$I = I_m C_{mi} \left(\frac{M_w}{M_{wref}} \right)^{b_{mi}} \exp(Q_{mi} T) \left(\frac{\chi}{\chi + \chi_k} \right) \quad (14)$$

$$\frac{I}{C_{mi}} = I_m \left(\frac{M_w}{M_{wref}} \right)^{b_{mi}} \exp(Q_{mi} T) \left(\frac{\chi}{\chi + \chi_k} \right) \quad (15)$$

En las expresiones (14) y (15) C_{mi} es una constante adimensional el valor de la cual debe calibrarse. Los valores de los otros parámetros pueden encontrarse en las tablas 24 y 28.

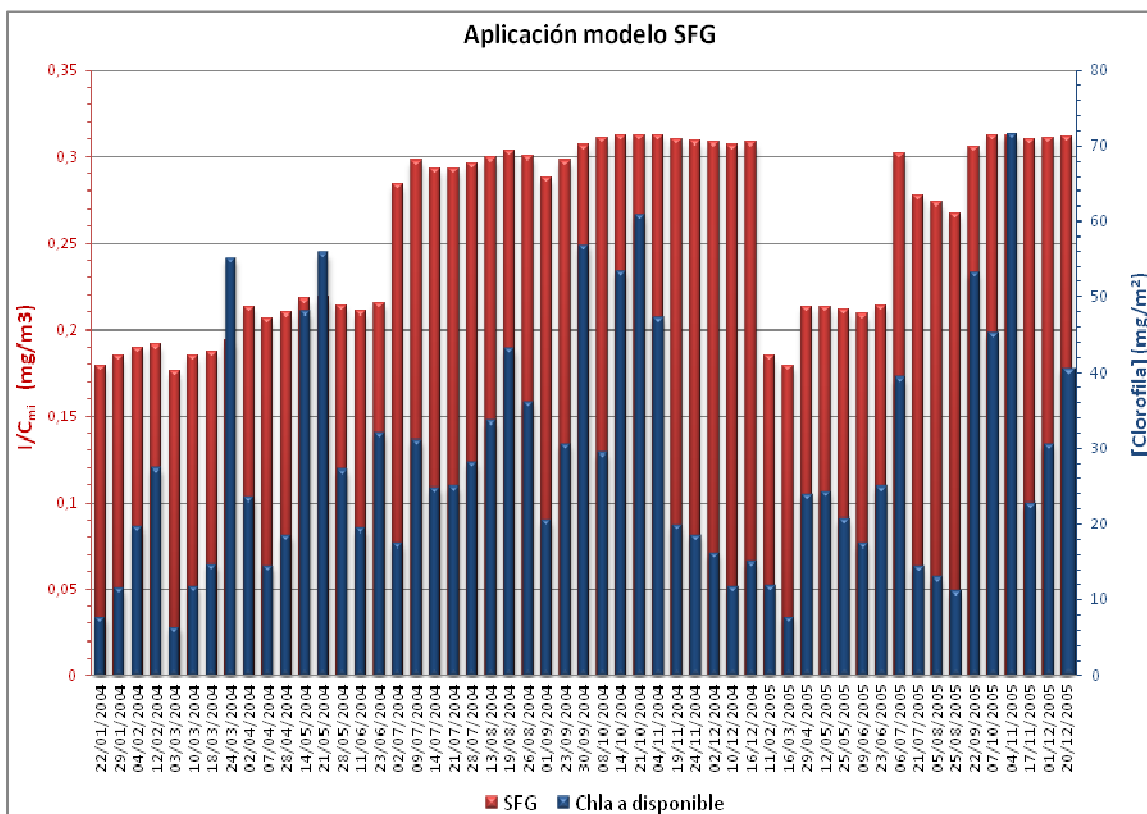
Mes y año	Longitud (mm)	M_w (g)	χ_k ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	I/C_{mi} ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Invierno	51.544	0.372	0.85	11.93 ± 0.01	$0.197 \cdot \frac{\chi}{\chi + 0.85}$
Primavera	56.477	0.433	1.25	14.62 ± 0.01	$0.223 \cdot \frac{\chi}{\chi + 1.25}$
Verano	64.798	1.132	2.28	25.16 ± 0.01	$0.318 \cdot \frac{\chi}{\chi + 2.28}$
Otoño	41.447	0.261	0.29	16.58 ± 0.01	$0.314 \cdot \frac{\chi}{\chi + 0.29}$

Tabla 28: datos de mejillón en la bahía y aplicación de las ecuaciones del modelo SFG sobre los datos de temperatura y masa del mejillón de la bahía de Alfacs, en función de la concentración de clorofila disponible en el medio.

En la gráfica 13 pueden verse los resultados de la aplicación de las ecuaciones del modelo SFG. En esta gráfica encontramos la concentración de clorofila disponible en el medio (en azul) y el cociente I/C_{mi} (en rojo) para distintas fechas.

La gráfica 13 muestra que la ingestión por parte los moluscos aumenta conforme lo hace la concentración de clorofila disponible en el medio, incluso en los meses más calurosos. Este resultado no es coherente con el que se ha obtenido en este trabajo en el modelo de depleción y en la aplicación de la teoría DEB.

Nótese en la gráfica 13, que los valores representados en el eje vertical en rojo, no son valores reales de ingestión, ya que lo que se presenta en ese eje es el cociente de la ingestión y una constante de calibración del modelo. El valor de esta constante no se ha calculado en este trabajo.



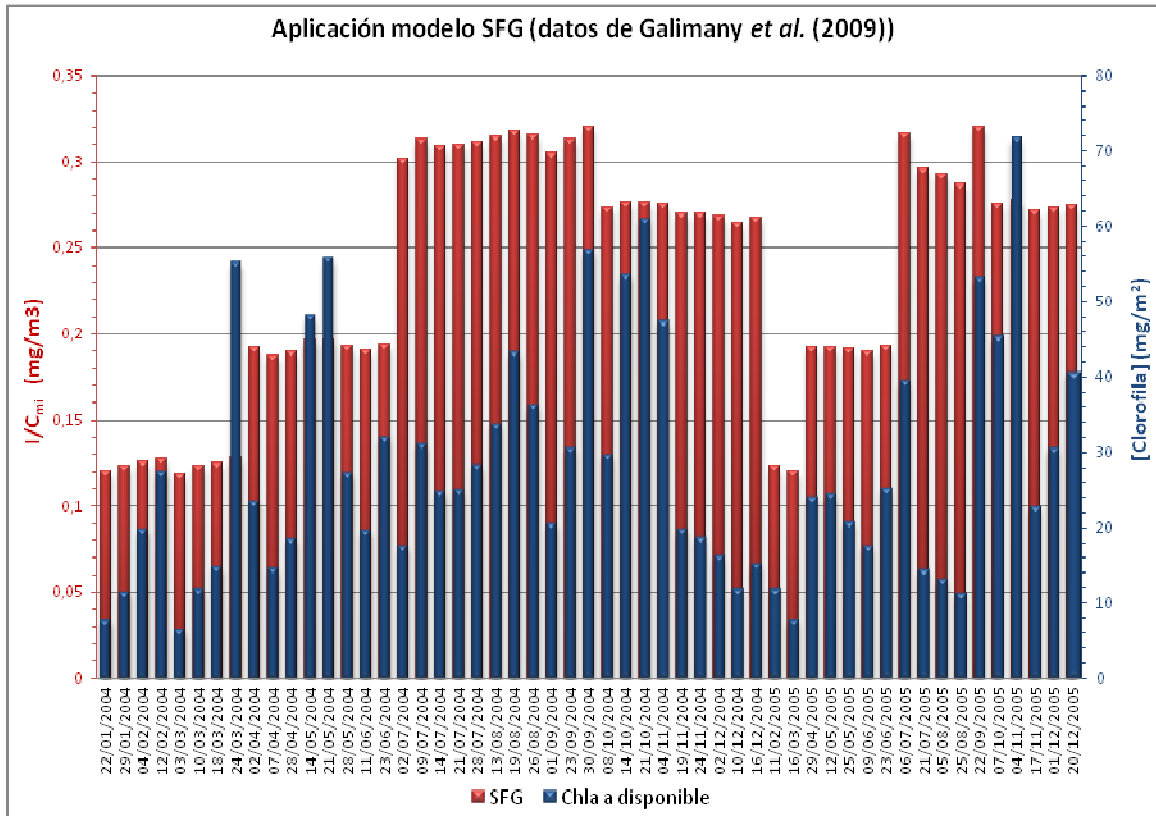
Gráfica 13: resultados de la aplicación del modelo SFG. En azul, puede verse la concentración de clorofila *a* en mg/m^2 disponible en el medio a lo largo de los dos años sobre los que se ha realizado este estudio y, en rojo, el cociente I/C_{mi} , en función de la clorofila presente en el medio, según las ecuaciones del modelo SFG.

Del mismo modo que se ha hecho con el modelo DEB, vamos a valorar la aplicación del modelo SFG con datos obtenidos en los experimentos de filtración *in situ* simulados llevados a cabo por Galimany *et al.* (2009). Los datos obtenidos en aquellos experimentos pueden verse en la tabla 29.

Mes y año	Longitud [mm]	M_w (g)	χ_k ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	I/C_{mi} ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Invierno	50.85 ± 4.72	804.04 ± 294.76	0.63	10.5 ± 0.1	$0.13 \cdot \frac{\chi}{\chi + 0.63}$
Primavera	59.09 ± 4.99	872.60 ± 266.36	0.95	16.7 ± 0.1	$0.20 \cdot \frac{\chi}{\chi + 0.95}$
Verano	63.85 ± 7.28	1136.97 ± 490.56	1.66	25.9 ± 0.1	$0.33 \cdot \frac{\chi}{\chi + 1.66}$
Otoño	42.27 ± 4.02	446.66 ± 134.95	0.71	18.1 ± 0.1	$0.28 \cdot \frac{\chi}{\chi + 0.71}$

Tabla 29: datos de temperatura, longitud y peso del mejillón de los trabajos de Galimany *et al.* (2009). Aplicación de estos datos a la ecuaciones del modelo SFG.

En la gráfica 14 puede verse el resultado de la aplicación del modelo SFG sobre los datos de Galimany *et al.* (2009) y sobre los datos de concentración de clorofila de la bahía. Igual que en la gráfica 13, encontramos la concentración de clorofila disponible en el medio (en azul) y el cociente I/C_{mi} (en rojo) para distintas fechas.



Gráfica 14: resultados de la aplicación del modelo SFG. En azul, puede verse la concentración de clorofila *a* en mg/m^2 disponible en el medio a lo largo de los dos años sobre los que se ha realizado este estudio y, en rojo, el cociente I/C_{mi} , en función de la clorofila presente en el medio, según las ecuaciones del modelo SFG y a partir de los datos extraídos del trabajo de Galimany *et al.* (2009).

Como se ve en la gráfica 14, la aplicación del modelo SFG sobre los datos *in situ* simulados de Galimany *et al.* (2009) sigue mostrando que el modelo SFG no muestra una disminución de la ingestión durante los meses de verano.

3.7. CAPACIDAD DE CARGA

Los resultados obtenidos en este trabajo se han aplicado al *software Stella 8*® con el objetivo de predecir, en primera aproximación, cuál sería la capacidad de carga de la bahía de Alfacs. Esto significa poder predecir la cantidad de mejillones que podría

albergar esta bahía en función de la cantidad de alimento disponible en ella para su alimentación.

3.7.1. CAPACIDAD DE CARGA DEL POLÍGONO DE VIVEROS

Actualmente en el polígono de viveros de la bahía encontramos 87 viveros con unas 1000 cuerdas de mejillón cada uno, es decir, unas **87.000 cuerdas**. Aproximadamente, cada cuerda contiene unos 1250 mejillones.

Para modelizar la capacidad de carga del polígono de viveros, hemos empleado el siguiente esquema (ver figura 16).

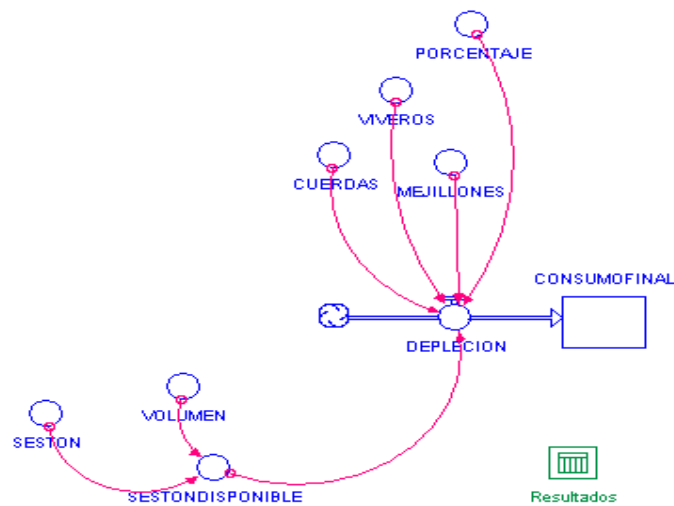


Figura 16: primer esquema creado con el software Stella 8^o para predecir la densidad de mejillones que es capaz de albergar el polígono de viveros. El término porcentaje en la figura se refiere al porcentaje de depleción calculado en este trabajo.

En este modelo, el porcentaje de depleción es el dado por la ecuación (10), la ecuación general de la depleción calculada en este estudio: $d(x) = 0.7465 \cdot x$

En este caso la densidad máxima que puede albergar el polígono de viveros sin detrimento de la cantidad de alimentos que pueden ingerir los moluscos es de **116.000** cuerdas. Esto es una densidad de 0.145cuerdas/m² o, lo que es lo mismo, una cuerda de cultivo cada 6.9m².

Este resultado también asegura que la cantidad de alimento será suficiente para todos los moluscos en otoño, cuando el porcentaje de depleción por parte de los moluscos es más elevado que durante el resto del año.

Podemos realizar una modelización del sistema más precisa con el esquema que se presenta en la figura 17.

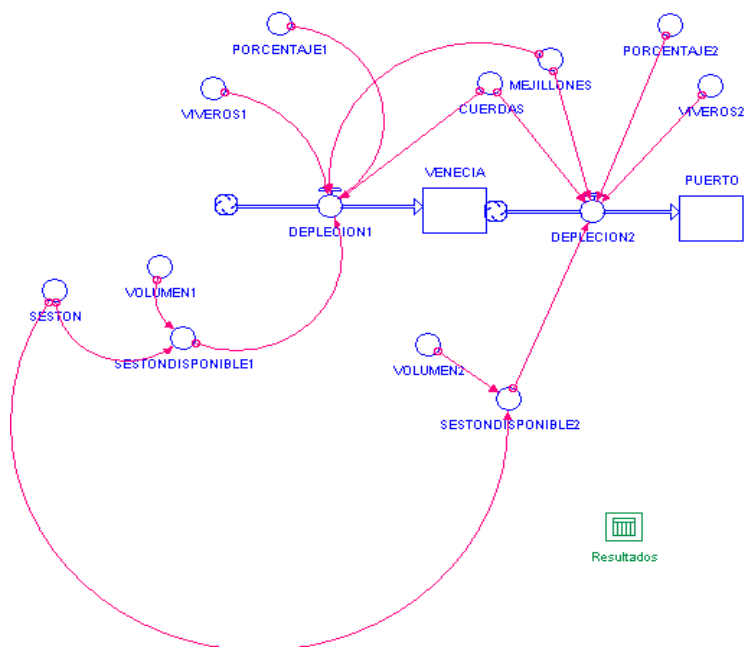


Figura 17: segundo esquema creado con el software Stella 8[®] para predecir la densidad de mejillones que es capaz de albergar el polígono de viveros. En este esquema se modela el sistema del polígono de viveros teniendo en cuenta que el porcentaje de depleción no es el mismo en la zona de viveros que va del punto A al punto B que en la zona de viveros del punto B al punto C.

Los porcentajes de depleción usados en cada zona son los que mostramos en las tablas de la 12 a la 15.

En este caso los resultados muestran que la densidad máxima de cultivo que puede albergar la zona es de **117.000** cuerdas, repartidas de la siguiente manera: **57.000** cuerdas en la zona desde el punto A hasta el punto B y **60.000** cuerdas en la zona desde el punto B hasta el punto C. Esto puede traducirse a que la densidad de cuerdas debe ser de 0.17cuerdas/m^2 en la zona desde A hasta B y de 0.13cuerdas/m^2 o, lo que es lo mismo, que en la zona de A a B debemos encontrar una cuerda de cultivo en cada 5.9m^2 y en la zona de B a C una cuerda en cada 7.8m^2 .

3.7.2. CAPACIDAD DE CARGA DE LA BAHÍA DE ALFACS

En este caso, vamos a ver cuántos viveros podría albergar la bahía. Esto se traduce en calcular cuantas filas de viveros se podrían añadir al polígono de viveros si aumentamos su tamaño para extenderlo hacia el interior de la bahía.

Sabemos que el tiempo de residencia del agua dentro de la bahía de Alfacs es de entre 10 y 20 días y que la superficie de la bahía es de $49 \cdot 10^6 \text{m}^2$ y su volumen de $153 \cdot 10^6 \text{m}^3$ (Camp, J., 1994). Con estos datos, podemos calcular cual es la tasa de renovación (TR) del agua dentro de la bahía de Alfacs.

$$TR = \frac{153 \cdot 10^6}{15} = 1.02 \cdot 10^7 \text{ m}^3/\text{día} = 1.02 \cdot 10^{10} \text{ L}/\text{día}$$

Una vez obtenido este valor y conocidas las concentraciones de clorofila en la bahía podemos calcular la cantidad de clorofila disponible en la bahía cada hora durante el tiempo de residencia del agua. Este valor irá cambiando a lo largo del año debido a que la concentración de clorofila en el medio también cambia a lo largo del año. Si este valor lo comparamos con el índice DR obtenido en el trabajo, que nos da la cantidad de clorofila o seston que consumen los moluscos por día (referido a 1g de carne seca de mejillón). Podremos predecir la cantidad de mejillones que puede albergar la bahía con tal de que su consumo no supere el *stock* de materia orgánica disponible en la bahía.

El resumen de estos datos y del cálculo del índice DR para el conjunto de la bahía podemos verlo en la tabla 30.

Estación del año	Peso carne seca del mejillón [g] <i>Valores promedios</i>	DR [mg/día] <i>Obtenido en este trabajo</i>	Concentración de clorofila [mg/m ³]	Cantidad de clorofila disponible en el conjunto de la bahía [mg/día]
Invierno	0.4	75.12	5.30	$5.41 \cdot 10^7$
Primavera	0.8	91.68	12.33	$1.26 \cdot 10^8$
Verano	1.1	49.68	10.56	$1.08 \cdot 10^8$
Otoño	0.3	256.08	11.93	$1.22 \cdot 10^8$

Tabla 30: datos estacionales de las características del mejillón y de la bahía necesarios para el cálculo de la capacidad de carga de la bahía.

Implementamos estos datos en el modelo que podemos ver en la figura 18.

Es necesario introducir el término de tasa de división o de reproducción del fitoplancton, sin éste los resultados mostrarían que la bahía no es capaz de albergar ni la cantidad de mejillones que contiene en la actualidad durante más de 13 días. Este resultado no sería correcto debido a que el fitoplancton tiene una actividad y se multiplica durante su tiempo de residencia en el interior de la bahía. Se ha implementado esta tasa de reproducción del fitoplancton considerando que el fitoplancton se reproduce dividiéndose en dos cada día que pasa, por lo que cada día la cantidad de fitoplancton disponible en el medio se verá duplicada.

Las ecuaciones incluidas en este modelo son:

CONSUMO VIVEROS = MEJILLONES POR CUERDA·NÚMERO DE CUERDAS·NÚMERO DE VIVEROS·DR por un gramo de mejillón [mg/día]·PESO DE LA CARNE del mejillón [g]

STOCK BAHÍA = CR bahía [m³/día]·CONCENTRACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA en el agua entrante [mg/m³]·TASA DE REPRODUCCIÓN del fitoplancton

Hay que tener en cuenta que la concentración de materia orgánica en el agua entrante, el peso de la carne del mejillón y el índice depleción por gramo de carne seca del mejillón son estacionales, es decir, que varían según la época del año. Para aplicar el modelo, se han introducido los valores extremos de estas variables, que son en otoño, cuando el consumo por parte de los moluscos es mayor que en el resto del año. De esta manera, si la bahía es capaz de soportar la carga de 253 viveros de cultivo de moluscos durante el otoño, que es cuando éstos más consumen, también lo es el resto del año. De hecho, durante las estaciones de invierno, primavera y verano habría un excedente de fitoplancton en el agua de la bahía.

Consideraciones que hay que tener en cuenta en este modelo:

- Hemos supuesto que el sistema es completamente unidireccional, como se ve en la figura 7. Esta aproximación implica que no hay flujos de corriente de agua en otras direcciones dentro de la bahía. Un modelo más preciso debería tener en cuenta estos cambios en la dirección de circulación del agua para tener en cuenta efectos de realimentación, entre otros.
- Para predecir la capacidad de carga del ecosistema solo se ha tenido en cuenta que el flujo de seston o clorofila hacia la zona de cultivo debe ser suficiente para abastecer a los moluscos allí cultivados. Al realizar esta aproximación no se ha tenido en cuenta la cantidad de excrementos y de materia orgánica adicional que la concentración de moluscos cultivados predicha introducirían en el ecosistema. Estos aportes afectan a las condiciones del agua de bahía. Tampoco se ha tenido en cuenta si la concentración de oxígeno en la bahía puede soportar una carga de organismos tan elevados. Podría pasar que la cantidad de oxígeno disuelto en el agua de la bahía no fuera suficiente para mantener con vida una cantidad tan elevada de organismo. Un modelo más preciso de capacidad de carga debería tener en cuenta estos factores.
- Tampoco se ha tenido en cuenta el consumo por parte de otros organismos, como por ejemplo el zooplancton.

4. DISCUSIÓN

En este trabajo se ha establecido y aplicado un protocolo de tratamiento de los datos procedentes de las diferentes campañas realizadas en la bahía, en las que se obtuvieron los datos mediante sondas CTD que proporcionaron datos de temperatura, conductividad, concentración de oxígeno disuelto, concentración de clorofila y turbidez del agua marina. Tal y como está configurada la sonda CTD de fábrica, esta requiere que a la hora de realizar los perfiles se hagan a una velocidad constante. Nuestros datos no cumplían este requisito ya que la velocidad de descenso de la sonda no era constante, por lo que, los datos de las diferentes variables estaban desajustados. Por lo tanto teníamos que modificar la configuración de alineación de los sensores para corregir este problema. Para conseguir alinear los datos de la sonda se realizaron una serie de pruebas ensayo-error hasta que los datos estuvieron alineados de manera que la salinidad máxima coincidía en el fondo con la presión máxima. Además, al trabajar en una zona de poca profundidad es necesario hacer el máximo esfuerzo en el tratamiento de los datos para no tener que desechar las medidas de la zona más superficial de la columna del agua.

También se ha decidido usar los datos de la salinidad práctica, sin transformarlos a salinidad absoluta. Según el manual *TEOS-10* no es necesaria una corrección de la anomalía de la salinidad absoluta (δS_A) para aguas superficiales de zonas costeras. Sin embargo, podría pensarse que para el caso particular de la bahía de Alfacs, esta corrección sí es necesaria debido al hecho de que se producen muchas entradas de agua procedente de canales de riego ricas en nutrientes y sales, ya que el problema real es que la salinidad medida con la sonda CTD se mide a partir de datos de conductividad mientras la salinidad también depende de elementos no iónicos, como el silicio, que no se detectan con el conductímetro. No obstante, esta corrección no es aplicable en la bahía de Alfacs porque no existen datos de aguas de referencia de esta bahía.

Con los datos corregidos se han podido realizar perfiles y secciones de las distintas variables que nos permitan caracterizar las distintas masas de agua que forman la bahía. Los perfiles verticales mostraron que el agua presenta una salinidad mayor en la entrada, la boca sudoeste de la bahía que conecta las aguas interiores con las del mar exterior. Al ser ésta la zona con mayor salinidad también es la que presenta un agua de densidad más elevada. Además, se ha podido comprobar que las manchas de clorofila se forman en el interior de la bahía, lejos de la boca sudoeste, donde las corrientes de agua son menores.

La realización del presente estudio ha permitido situar la picnoclina (zona donde se da el máximo gradiente de densidad) en las diferentes épocas del año. En la época desde enero hasta abril, cuando los canales de riego que aportan agua dulce dentro de la bahía están cerrados, la picnoclina se encuentra a una profundidad de 2.65db y presenta una

de densidad de 27.10kg/m^3 . De abril a diciembre, cuando los canales de riego están abiertos y el agua dulce y de menor densidad fluye hacia el interior de la bahía la densidad que presenta la pycnoclina es menor, de 24.72kg/m^3 ; sin embargo, la profundidad a la que se encuentra situada no experimenta una variación apreciable ya que se presenta a los 2.61db de profundidad. Este factor hace necesaria la división del año en dos épocas a la hora de hacer estudios sobre las aguas de la bahía, la época de canales abiertos (de abril a diciembre) y la de canales cerrados (de enero a abril).

El cálculo de la depleción en las distintas zonas de estudio muestra que hay episodios en los que la depleción es negativa. Este hecho es el resultado de que se producen entradas de agua dentro de la bahía que aportan materia particulada. Debido a este factor, la cantidad de materia particulada ingerida por los moluscos no supera la cantidad de materia particulada aportada, por lo que la concentración de materia al final supera la concentración de materia que había inicialmente, dando como resultado una depleción negativa. Estos episodios son poco frecuentes y su intensidad es pequeña en las zonas de viveros, donde la actividad de los moluscos es elevada. Por otro lado, se da mayor depleción del seston entre los meses de abril y diciembre. Este hecho es debido, por una parte, a que es durante estos meses cuando se produce el cultivo del mejillón y, por otra, a que durante estos meses, los canales de riego están abiertos y, por lo tanto, hay un aporte de agua dulce (y, en consecuencia, de clorofila) hacia la bahía. Además, según Anestis *et al.* (2007) y como se ha podido constatar a lo largo de este trabajo, un aumento de la temperatura ambiente provoca un estrés en los moluscos que hace que éstos consuman menos de lo que lo hacen habitualmente. Otro hecho remarcable es que podemos ver que la depleción no experimenta grandes variaciones de un vivero a otro del mismo conjunto. Si comparamos la depleción entre los diferentes conjuntos de viveros podemos ver que en el conjunto de viveros del extremo centro la depleción es bastante inferior que en los dos otros conjuntos. Además, en el punto emisario se puede apreciar que los episodios de depleción, además de ser menos intensos, aparecen contrarrestados en bastantes momentos en los que hay aporte de clorofila, es decir, depleción negativa. Esto último es debido a que, al ser el emisario un punto externo a los viveros donde no hay cultivo, hay menos organismos consumiendo clorofila y además, al ser un punto situado más hacia el centro de la bahía que los viveros, también es sensible al aporte de clorofila desde el mar abierto y desde los canales de riego.

Para crear el modelo de depleción se ha trabajado en concentraciones de seston y no en concentraciones de clorofila a . Actualmente, existe una discusión sobre si es mejor trabajar con datos de clorofila o con datos de seston. La decisión de trabajar con seston se ha tomado porque bastante autores están de acuerdo en que los datos de clorofila no son los más apropiados (Filgueira *et al.*, 2009).

En ocasiones, pueden darse episodios en los que las concentraciones de alimento disponible son tan elevadas que los moluscos dejan de consumir. De las gráficas de la 6

a la 10, se deduce que en la bahía de Alfacs la concentración de alimento disponible nunca llega a saturar a los organismos bivalvos. Estos episodios no están presentes en la bahía durante la época en la que se ha realizado el análisis, ya que, como se ve en los gráficos, el consumo no deja de aumentar mientras lo hace la concentración de seston disponible.

El índice CR obtenido en este trabajo puede contrastarse con los resultados de Galimany *et al.* (2011). En los estudios de Galimany *et al.* (2011) también se hace patente que el CR es considerablemente menor en los meses de verano. Este hecho, se debe a que la ingesta por parte de los mejillones se ve afectada por un aumento de la temperatura (Anestis *et al.*, 2007). En su estudio, Anestis *et al.* (2007) exponen que a temperaturas superiores a 24 o 25°C la habilidad del *Mytilus galloprovincialis* para asimilar la comida y la energía asociada a ella se ve reducida de manera significativa, entre otras cosas debido a que mantiene su concha cerrada por periodos más largos de tiempo.

No obstante, hay que notar que hay diferencia entre el índice CR obtenido en los experimentos de Galimany *et al.* (2011) y los obtenidos en este estudio. En nuestro caso, el CR se ha obtenido con datos de campo. Al trabajar con datos de campo, solo disponemos de valores de concentración de clorofila (que luego hemos transformado a datos de seston) en los puntos A, B y C. No disponemos de medidas de los aportes de materia que se han podido producir entre puntos de medida. Este hecho hace que la depleción medida en los diferentes tramos no sea exactamente la real, ya que la concentración de clorofila medida al final, resulta ser mayor que la que habría si la zona de estudio estuviera aislada del resto de la bahía. Al no estarlo, hay entradas de agua que aportan materia orgánica a la zona de estudio. Este hecho, que explica por qué el CR obtenido en este trabajo es menor que el obtenido en los trabajos *in situ* simulados como los de Galimany *et al.* (2011) y también explica que el índice CR sea menor en la zona de viveros desde el punto B hasta el punto C que desde el B al A. Como ya habíamos hecho notar al estudiar la depleción en las diferentes zonas de viveros, entre B y C parece que tiene que haber más aportes de agua proveniente de lugares externos a la zona de viveros que entre los puntos A y B, ya que la depleción ahí es menor aunque la cantidad de mejillones por unidad de superficie es similar a la de la otra zona de estudio.

La elaboración del modelo de depleción ha permitido constatar que la depleción del seston y la clorofila en el interior de la bahía está relacionada de manera directa con la concentración de materia disponible. También muestra que, aunque en los meses de verano los moluscos cultivados en la bahía se encuentran en su fase más madura (por lo que deberían consumir más alimento) y la concentración de alimento disponible en el medio es relativamente elevada, la depleción disminuye de manera considerable en estos meses. Este hecho permitió constatar que la relación entre la ingestión por parte de los moluscos estaba directamente relacionada con la temperatura ambiente, como

afirma el estudio de Anestis *et al.* (2007). La aplicación del modelo *Dynamic Energy Budget* en la bahía muestra una reducción en la cantidad de energía ingerida por parte de los organismos durante los meses de verano, cuando la temperatura alcanza estos valores por encima de los 24°C.

Hay ciertos aspectos que se deben resaltar respecto a la aplicación del modelo DEB en la zona. Aunque en estudios anteriores en los que se había aplicado este modelo se permitían estimar y calibrar un valor para el coeficiente de saturación media, χ_k , que resultaba útil en cualquier época del año, esto no ha sido posible en las aguas de la bahía de Alfacs debido a que el rango de temperaturas en estas aguas es realmente amplio. En consecuencia, se ha estimado un valor de χ_k para las diferentes estaciones del año. El parámetro χ_k se ha estimado dentro del rango valorado como aceptable por Filgueira *et al.* (2011) excepto en la época de verano, cuando las temperaturas del agua del mar alcanzan sus valores máximos. Este hecho puede deberse a que los estudios realizados por Filgueira *et al.* (2011) fueron realizados en aguas atlánticas, que no alcanzan temperaturas tan elevadas como las que puede alcanzar el agua de la bahía de Alfacs en verano. Se puede observar que el parámetro aumenta su valor de manera significativa en verano.

Otro factor destacable en la aplicación del modelo DEB en la bahía de Alfacs, es que aunque sí se ha tenido en cuenta el amplio rango de temperaturas en la determinación del parámetro χ_k , el resto de parámetros usados en el modelo se han tomado iguales que los utilizados en estudios anteriores, como el de Rosland *et al.* (2009) para aguas atlánticas. En posteriores aplicaciones del modelo DEB debe tenerse en cuenta este hecho y se debe empezar a estudiar la variación de estos parámetros para aguas mediterráneas con mayores rangos de temperatura, con el objetivo que los resultados predichos mediante el modelo DEB puedan ser más precisos. En este trabajo, debido a la limitación en el tiempo, se ha considerado que la aproximación de usar los parámetros estimados en estudios anteriores era suficiente para una primera aplicación y un primer contacto con el modelo DEB, ya que el objetivo era determinar si este modelo es aplicable a aguas mediterráneas o no. Al concordar los resultados predichos por el modelo de depleción con los resultados obtenidos mediante la teoría DEB, podemos concluir que el *Dynamic Energy Budget* es un modelo válido para las aguas de la bahía de Alfacs, aunque requiera de las mejoras citadas anteriormente para futuras aplicaciones.

La aplicación del modelo SFG en la bahía de Alfacs no ha dado resultados satisfactorios. Los resultados de la aplicación del modelo muestran que la ingestión de alimento por parte de los organismos aumenta conforme lo hace la concentración de clorofila en el medio y no se ve afectada por el aumento de temperatura en los meses de verano. Este resultado no es coherente con los resultados obtenidos en este trabajo en el modelo de depleción y en la aplicación de la teoría DEB, que muestran una disminución del

consumo de alimento en verano. Debido a que el modelo no ha dado resultados satisfactorios para la bahía de Alfacs, no se ha invertido esfuerzo en el cálculo de la constante de calibración del modelo (C_{mi}), puesto que el valor de esta constante no cambia la tendencia creciente del consumo en función del aumento de la concentración de clorofila, χ .

El modelo SFG no funciona para la bahía de Alfacs debido a que no introduce una dependencia con la temperatura lo suficientemente fuerte, como sí lo hace la teoría DEB. En las ecuaciones del modelo SFG podemos ver que la ingestión sólo depende de la temperatura a través de un factor exponencial, de manera que un aumento de la temperatura siempre conlleva un aumento de la ingestión y viceversa. No hay ningún parámetro en las ecuaciones del modelo SFG que introduzcan la limitación que los moluscos presentan frente a grandes aumentos de temperatura ambiente.

Los resultados obtenidos en este estudio han permitido determinar los valores de los distintos parámetros que intervienen en el funcionamiento del ecosistema de la bahía de Alfacs. Además, es posible realizar simulaciones mediante la variación de los valores de los distintos parámetros que permiten estimar la capacidad de carga de la bahía de Alfacs.

Se han podido utilizar los resultados obtenidos en este trabajo para realizar un primer cálculo de la capacidad de carga, tanto del polígono de viveros como del conjunto de la bahía. Este cálculo de la capacidad de carga se ha realizado suponiendo que la circulación del agua en el interior de la bahía se produce de manera unidireccional en una sola dirección. Asumiendo esto, el agua entra por la boca aportando una cantidad de alimento a la bahía y luego circula por el interior de la bahía. La capacidad de carga se ha calculado de manera que la cantidad de alimento consumido por los moluscos no supere la cantidad de alimento disponible en el medio.

En la actualidad, en el polígono de viveros de la bahía de Alfacs hay 87 viveros de cultivo de moluscos. Cada uno de estos viveros contiene 1000 cuerdas de mejillón y cada una de las cuerdas alberga 1250 mejillones, aproximadamente. Los resultados obtenidos muestran que la zona de viveros es capaz de soportar una densidad de 117 viveros si se considera el polígono como un solo sistema o de 117 viveros si se divide el polígono de viveros en dos zonas como se ha hecho a lo largo del trabajo (zona del punto A al punto B y zona del punto B al punto C), ya que el consumo en las dos zonas ha resultado distinto en los cálculos desarrollados en este trabajo. Si se considera toda la bahía, los resultados muestran que la bahía es capaz de soportar una carga de 253 viveros, esto es, 3 polígonos de viveros como el que hay en la actualidad.

A la hora de analizar estos resultados para la capacidad de carga de la bahía de Alfacs, hay que tener en cuenta que en esta primera aproximación para el cálculo de la capacidad de carga solo se ha tomado como factor limitante que la cantidad de alimento

consumida no debe superar la cantidad de alimento disponible en el medio. No se han tenidos en cuenta otros factores que pueden ser limitantes a la hora de calcular la capacidad de carga de la bahía, como la disponibilidad de oxígeno disuelto en el medio o como el aporte de materia orgánica (heces, desechos, mudas,...) que el volumen de moluscos cultivados considerado aportaría al medio. Tampoco se ha tenido en cuenta que hay otros organismos consumidores de fitoplancton en la bahía, como por ejemplo el zooplancton.

5. CONCLUSIONES

En este estudio es hecho relevante que cuando se trabaja con datos tomados en aguas poco profundas debe realizarse un esfuerzo mayor a la hora de realizar el tratamiento de estos datos, con el objetivo de no perder las medidas de la zona más superficial de la columna de agua.

El estudio de los perfiles verticales y las secciones horizontales de la bahía ha permitido observar la formación de “manchas” de clorofila en el interior de la bahía, en la zona central y más alejada de la boca. En la boca es donde se produce la entrada (y salida) del agua hacia el interior (y exterior) de la bahía y este intercambio de agua lo provoca este desplazamiento de las “manchas” de clorofila hacia el interior.

La pycnoclina en la bahía se sitúa a una profundidad más o menos constante de unos 2.6db de presión durante todo el año, aunque la densidad a la que se presenta varía. De abril a diciembre cuando los canales de riego de los arrozales están abiertos, la densidad la pycnoclina presenta una densidad media de 24.72kg/m^3 ; sin embargo, de enero a abril, cuando los canales están cerrados y no hay aporte de agua dulce (menos densa), presenta una densidad de 27.10kg/m^3 . Este hecho hace necesario dividir el año en dos épocas, la de canales abiertos y la de canales cerrados, a la hora de hacer estudios sobre las aguas de la bahía.

Tanto el índice DR como el CR se reducen durante los meses más calurosos de verano, hecho que es coherente con el resto de resultados obtenidos en este estudio y que confirma la hipótesis de que los moluscos se ven afectados por el aumento de temperaturas que tiene lugar durante los meses de verano y que les produce un estrés que los mantiene más tiempo cerrados y que afecta a su capacidad para alimentarse y para asimilar la energía del alimento que ingieren.

No es posible determinar un valor constante para todo el año del parámetro χ_k para la bahía de Alfacs debido a los grandes cambios de temperatura entre las diferentes estaciones anuales. No obstante esto, la aplicación del modelo DEB a la bahía de Alfacs ha proporcionado resultados satisfactorios.

La aplicación del modelo de depleción y del modelo DEB también han permitido observar que hay una dependencia importante entre la cantidad de materia (y, por lo tanto, energía) consumida por los moluscos bivalvos y la temperatura ambiente.

El modelo SFG no es aplicable en la bahía de Alfacs debido a que la temperatura del agua llega a valores muy elevados durante los meses de verano y el modelo SFG no tiene en cuenta la limitación que presentan los moluscos a consumir alimento en condiciones de temperaturas elevadas, como sí lo hacen el modelo DEB y el modelo de depleción en este estudio y como muestran las observaciones llevadas a cabo en

diferentes campañas de muestreo en la bahía de Alfacs. Debido a esto, en este estudio no se ha calibrado la constante C_{mi} de las ecuaciones del modelo SFG.

Los resultados de este estudio permiten estimar los valores óptimos de los distintos parámetros y realizar simulaciones con variaciones de estos parámetros con el objetivo de estimar la capacidad de carga de la bahía de Alfacs. El cálculo de la capacidad de carga para la bahía de Alfacs teniendo en cuenta las aproximaciones realizadas en el estudio, que ya hemos explicado anteriormente, ha permitido predecir que el polígono de viveros actual es capaz de soportar una densidad de moluscos de 117 viveros como los actuales, en lugar de los 87 que hay actualmente. Además, ha permitido establecer que el conjunto de la bahía sería capaz de soportar un cultivo de mejillones 3 veces mayor del que hay en la actualidad.

6. REFERENCIAS

- Anestis, A., Lazou, A., Pörtner, H. O., Michaelidis, B. (2007). *“Behavioral, metabolic and molecular stress responses of marine bivalve Mytilus galloprovincialis during long-term acclimation at increasing ambient temperature.”* American Journal of Physiology – Regulatory, Integrative and Comparative physiology, vol. 293, 911-921.
- Brigolin, D., Dal Maschio, G., Rampazzo, F., Giani, M., Pastres, R., (2009). *“An individual based population dynamic model for estimating biomass yield and nutrient fluxes through and off-shore mussel (Mytilus galloprovincialis) farm.”* Estuarine Coastal Shelf Research 82, 365-376.
- Broecker, W. S., Takahashi, T. (1984). *“Is there a tie between CO₂ content and ocean circulation.”* Geophysical Monograph Series, vol. 29, 314-326.
- Camp, J., Delgado, M. (1987). *“Hidrografía de las bahías del Ebro.”* Scientia Marina 51 (3), 351-369.
- Camp, J. (1994). *“Aproximaciones a la dinámica Ecológica de una Bahía Estuárica Mediterránea.”* Tesis doctoral. Universidad de Barcelona.
- Dowd, M., (1997). *“On predicting the growth of cultured bivalves.”* Ecological Modeling 104, 113-131.
- Duarte, P., Meneses, R., Hawkins, A. J. S., Zhu, M., Fang, J., Grant, J., (2003). *“Mathematical modeling to assess the carrying capacity for multi-species culture within coastal waters.”* Ecological Modeling 168, 109-143
- Duarte, P., Fernández-Reiriz, M. J., Filgueira, R., Labarta, U., (2010). *“Modelling mussel growth in ecosystems with low suspended matter loads.”* Journal of Sea Research 64, 273-286.
- FAO 2011 Anuario de estadísticas de pesca del año 2010: Producción de acuicultura. <ftp://ftp.fao.org/FI/STAT/summary/inicio.htm>
- Filgueira, R., Grant, J., (2009). *“A box-model for ecosystem-level management of mussel culture carrying capacity in a coastal bay.”* Ecosystems 12, 1222-1233.
- Filgueira, R., Rosland, R., Grant, J., (2011). *“A comparison of scope for growth (SFG) and dynamic energy budget (DEB) models applied to blue mussel (Mytilus edulis).”* Journal of Sea Research 66, 403-410.
- Filgueira, R., Grant, J., Bacher, C., Carreau M., (2012). *“A physical-biogeochemical coupling scheme for modeling marine coastal ecosystems.”* Ecological Informatics 7 (1), 71-80.

- Fofonoff, N. P., (1962). *“Physical Properties of Seawater.”* The Sea: Ideas and Observations, vol. 1, Editor M. N. Hill, Interscience Publishers, New York, 3-50.
- Fofonoff, N. P., Millard, R. C., (1983). *“Algorithms for computation of fundamental properties of seawater.”* UNESCO Technical Papers in Marine Science 44.
- Fofonoff, N. P., (1985). *“Physical Properties of Seawater: A New Salinity Scale and Equation of State of Seawater.”* Journal of Geophysical Research, vol. 90, No. C2, 3332-3342.
- Galimany, E. Ramón, M., Ibarrola, I. (2011). *“Feeding behavior of the mussel Mytilus galloprovincialis (L.) in a Mediterranean estuary: A field study.”* Aquaculture 314, 236-243.
- Grant, J., Dowd, M., Thompson, K., Emerson, C., Hatcher, A. (1993). *“Perspectives on field studies and related biological models of bivalve growth.”* In: Bivalve filter feeders and marine ecosystems processes, 371-420. New York, Springer Verlag.
- Grant, J., Bacher, C., (1998). *“Comparative models of mussel bioenergetics and their validation at field culture sites.”* J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 219, 21-44.
- Grant, J., Curran K. J., Guyondet, T. L., Tita, G., Bacher, C., Koutitonsky, V., Dowd, M., (2007). *“A box model of carrying capacity for suspended model aquaculture in Lagune de la Grande-Entrée, Iles-de-la-Madeleine, Québec.”* Ecological Modeling vol. 200, issues 1-2, 193-206.
- Grant, J., Bacher, C., Cranford, P. J., Guyondet, T., Carreau, M., (2008). *“A spatially explicit ecosystem model of seston depletion in dense mussel culture.”* Journal of Marine Systems 73, issues 1-2, 155-168.
- Ibáñez C., Pont, D., Prat, N., (1997). *“Characterization of the Ebre and Rhone estuaries – A basis for defining and classifying salt-wedge estuaries.”* Limnol. Oceanogr., 42 (1), 89-101.
- IOC, SCOR and IAPSO, (2010). *“The international thermodynamic equation of seawater - 2010: Calculations and use of thermodynamic properties.”* Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides 56. UNESCO, 196 pp.
- Kremer, J., Nixon, S. W., (1978). *“A coastal marine ecosystem: Simulation and analysis.”* Springer-Verlag, New York. 217 pp.
- Kooijman, S. A. L. M., (2000). *“Dynamic Energy and Mass Budgets in Biological Systems.”* Cambridge University Press, Cambridge. 419 pp.

- Llebot C., (2010). *“Interactions between physical forcing, water circulation and phytoplankton dynamics in a microtidal estuary.”* Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Llebot C., Rueda, F. J., Solé, J., Lara Artigas, M., Estrada, M., (2010). *“Dynamic states in wind-driven microtidal estuary.”* In: C. Llebot *Interactions between physical forcing, water circulation and phytoplankton dynamics in a microtidal estuary. Tesis doctoral. Universidad de las Palmas de Gran Canaria.*
- Llebot C., Solé, J., Delgado, M., Fernández-Tejedor, M., Camp, J., Estrada, M., (2011). *“Hydrographical forcing and phytoplankton variability in two semi-enclosed estuarine bays.”* Journal of Marine Systems 86, 69-86.
- Pawlovicz, R., (2010). *“The TEOS-10 Primer: What every oceanographer needs to know about TEOS-10.”* Dept. of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Pouvreau, S., Bourlès, y., Lefebvre, S., Gangnery, A., Alunno-Bruscia, M. (2006). *“Application of a dynamic energy Budget to the Pacific oyster, Crassostrea gigas, under various environmental conditions.”* Journal of Sea Research 56, 156-167.
- Ramón M. et al, (2004 - 2007). *“Proyecto INIA del mejillón: Estudio integrado de los factores biológicos y ambientales condicionantes de la producción de mejillón (Mytilus galloprovincialis) en las bahías del Delta del Ebro.”* Entidad financiadora: INIA. Entidades participantes: IRTA, UB.
- Rosland, R., Strand, O., Alunno-Bruscia, M., Bacher, C., Strohmeier, T., (2009). *“Applying Dynamic Energy Budget (DEB) theory to simulate growth and bio-energetics of blue mussels under low seston conditions.”* Journal of Sea Research 62, 49-61.
- Schnoor, J. L., (1996). *“Environmental modeling: fate and transport of pollutants in water, air & soil.”* Wiley (Wiley-Interscience Publication), 682 pp.
- Solé, J., Turiel, A., Estrada, M., Llebot, C., Blasco, D., Camp, J., Delgado, M., Fernandez-Tejedor, M., Diògene, J., (2009). *“Climatic Forcing on hydrography of a Mediterranean bay (Alfacs bay).”* Continental Shelf Research 29, 1786-1800.
- Thomas, Y., Mazurié, J., Alunno-Bruscia, M., Bacher, C., Bouger, J. F., Gohin, F., Pouvreau, S., Struski, C., (2011). *“Modelling spatio-temporal variability of Mytilus edulis (L.) growth by forcing a dynamic energy budget model with satellite-derived environmental data.”* Journal of Sea Research 66, 308-317.
- UNESCO (1980). *“Background papers in supporting data on the practical salinity scale 1978.”* Tech. Pap. Mar. Sci. 37, 144 pp., UNESCO, Paris, 1981b.

- UNESCO (1980). *“Background papers in supporting data on the international equation of state of seawater.”* Tech. Pap. Mar. Sci. 38, 192 pp., UNESCO, Paris, 1981c.
- van der Meer, J., (2006). *“An introduction to Dynamic Energy Budget (DEB) models with special emphasis on parameter estimation.”* Journal of Sea Research 56, 85-102.
- van der Veer, H. W., Cardoso, J. F. M. F., van der Meer, J., (2006). *“The estimation of DEB parameters for various Northeast Atlantic bivalve species.”* Journal of Sea Research 56, 107-124.
- Warrick, A. W., Myers, D. E., Nielsen, D., R., (1986). *“Geostatistical methods applied to soil science.”* Agronomy 9, 53-82.

7. ANEXO 1

Algoritmo para la conversión de la conductividad a salinidad

El algoritmo está basado en el uso de la escala práctica de salinidad de 1978 (PSS-78) y la ecuación internacional de estado para el agua marina de 1980 (EOS80).

La profundidad requiere la latitud en grados y la función de la anomalía de volumen específico retorna la anomalía de densidad en la "call list".

Input variables $S = \text{salinity}$
 $T = \text{temperature in deg}_C \text{ (IPTS1968)}$
 $p = pr = \text{presión en db (1db = } 10^4 \text{ Pa)}$

$C(S,t,p)$: conductividad del agua de mar a la salinidad S (PSS-78), temperatura t (IPTS-68) y presión p en decibares.

El índice de conductividad definido $R = \frac{C(S,t,p)}{C(35,15,0)}$ puede dividirse en tres partes:

$$R = R_p \cdot R_t \cdot r_t$$

$$R_p(S,t,p) = \frac{C(S,t,p)}{C(S,t,0)}$$

$$R_t(S,t) = \frac{C(S,t,0)}{C(35,t,0)}$$

$$r_t(t) = \frac{C(35,t,0)}{C(35,15,0)}$$

La salinidad práctica se calcula con la ecuación

$$S = a_0 + a_1 R_t^{1/2} + a_2 R_t + a_3 R_t^{3/2} + a_4 R_t^2 + a_5 R_t^{5/2} + \Delta S \quad (1)$$

$$\Delta S = \frac{t-15}{1+k(t-15)} (b_0 + b_1 R_t^{1/2}) + b_2 R_t + b_3 R_t^{3/2} + b_4 R_t^2 + b_5 R_t^{5/2} \quad (2)$$

Los valores de las constantes son:

$a_0 = 0.0080$	$b_0 = 0.0005$	
$a_1 = -0.1692$	$b_1 = -0.0056$	
$a_2 = 25.3851$	$b_2 = -0.0066$	
$a_3 = 14.0941$	$b_3 = -0.0375$	$k = 0.0162$

$$\begin{aligned}
 a_4 &= -7.0261 & b_4 &= 0.0636 \\
 a_5 &= 2.7081 & b_5 &= -0.0144 \\
 \Sigma a_i &= 35.0000 & \Sigma b_i &= 0.0000
 \end{aligned}$$

Las ecuaciones (1) y (2) sirven para los rangos de t entre -2°C y 35°C y salinidad práctica entre 2 y 42.

$$r_t = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4 \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 c_0 &= 0.6766097 & c_3 &= -6.9698 \cdot 10^{-7} \\
 c_1 &= 2.00564 \cdot 10^{-2} & c_4 &= 1.0031 \cdot 10^{-9} \\
 c_2 &= 1.104259 \cdot 10^{-4}
 \end{aligned}$$

$$R_p = 1 + \frac{p(e_1 + e_2 p + e_3 p^2)}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + (d_3 + d_4 t)R} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 e_1 &= 2.070 \cdot 10^{-5} & d_1 &= 3.426 \cdot 10^{-2} \\
 e_2 &= -6.370 \cdot 10^{-10} & d_2 &= 4.464 \cdot 10^{-4} \\
 e_3 &= 3.989 \cdot 10^{-15} & d_3 &= 4.215 \cdot 10^{-1} \\
 & & d_4 &= -3.107 \cdot 10^{-3}
 \end{aligned}$$

Para unas S , t , p dadas el índice R_t está dado por $R_t = \frac{R}{R_p \cdot r_t}$ y la salinidad se computa con las ecuaciones (1) y (2).

Los valores siguientes se usan para comprobar el correcto funcionamiento de las ecuaciones anteriores.

R	t (°C)	p (db)	R _p	r _t	R _t	S
1	15	0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	35.000000
1.2	20	2000	1.0169429	1.1164927	1.0568875	37.245628
0.65	5	1500	1.0204864	0.77956585	0.81705885	27.995347

8. ANEXO 2

Algoritmo de funcionamiento del sensor PAR

Operating voltaje range: 6 – 15 VDC(+)

Usa un log amplifier para medir la señal de corriente detectada con

$$V = \log(I(\text{Amps}))/I_{\text{ref}}$$

Para calcular la irradiación utiliza la fórmula:

$$\text{Irradiación} = \text{Factor calibración} * (10^{\text{Light Signal Voltage}} - 10^{\text{Dark Signal Voltage}})$$

Los parámetros usados en la configuración del sensor son los siguientes:

- Dark Before: 0.201V
- Light – No filter Hldr: 2.629V
- Dark After – NFH: 0.201V
- Average Dark: 0.20065V
- I_{ref} : $1 \cdot 10^{-10}$ A
- I_{Dark} : $1.59 \cdot 10^{-10}$ A
- $10^{V_{\text{Dark}}}$: 1.587267A
- El factor de calibración:
 - Dry calibration factor: $2.01 \cdot 10^{13}$ quanta/cm²·s/"A" $3.35 \cdot 10^{-5}$ μEinstein/cm²·s/"A"
 - Wet calibration factor: $3.39 \cdot 10^{13}$ quanta/cm²·s/"A" $5.63 \cdot 10^{-5}$ μEinstein/cm²·s/"A"

9. ANEXO 3

La composición de los diferentes transectos representados en este anexo pueden verse en las tabla 3.1, 3.2 y 3.3 (*corresponden a las tablas 3, 4 y 5 del trabajo*).

Estación	Distancia entre estaciones	Profundidad máxima estación [db]
Serramar	0	4.5
Faro	0.0100955	6
Mitad boca Bahía	0.0174806	5.25

Tabla 3.1: estaciones que conforman el transecto de la boca. La estación Serramar es la identificada con el código 1, la estación Faro está identificada con el código 3 y la estación Mitad boca Bahía tiene el código 2.

Estación	Distancia entre estaciones	Profundidad máxima estación [db]
Trabucador	0	4.25
Central	0.0069	5.25
Emisario	0.018552	5

Tabla 3.2: estaciones que conforman el transecto central. La estación Trabucador es la identificada con el código 23, la estación Central está identificada con el código 15 y la estación Emisario tiene el código 25.

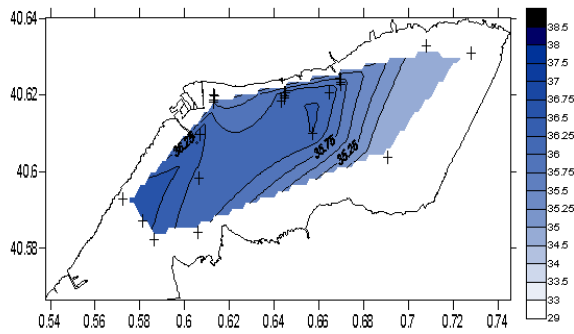
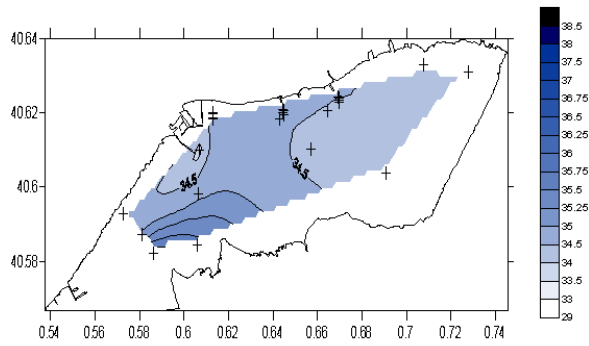
Estación	Distancia entre estaciones	Profundidad máxima estación [db]
Chiringuito	0	3.25
Entre chiringuito y muelle	0.0139	4.5
Muelle	0.025516	6.5

Tabla 3.3: estaciones que conforman el transecto del muelle. La estación Chiringuito es la identificada con el código 4, la estación Entre chiringuito y muelle está identificada con el código 5 y la estación Muelle tiene el código 6.

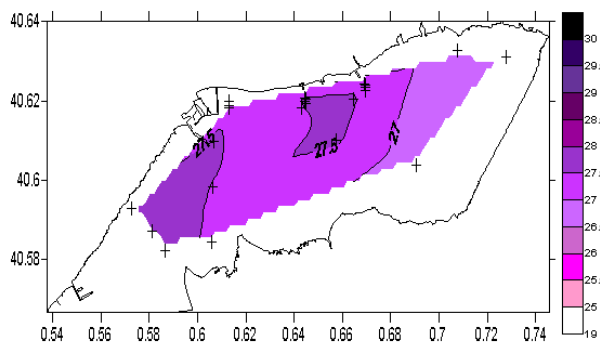
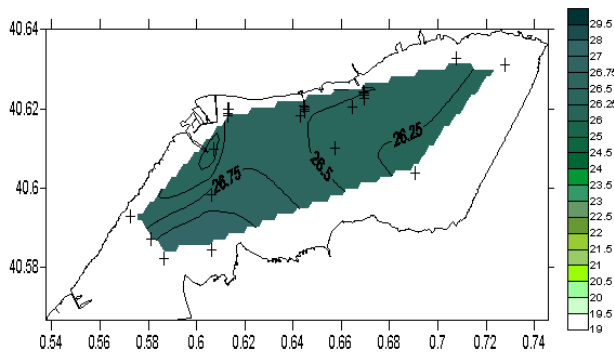
En este anexo, los perfiles horizontales presentan la longitud ($^{\circ}$) en el eje x y la latitud ($^{\circ}$) en el eje y. Los perfiles verticales la distancia entre las estaciones del transecto en el eje x y la profundidad en el eje y.

22/01/2004 – Perfiles horizontales de la bahía

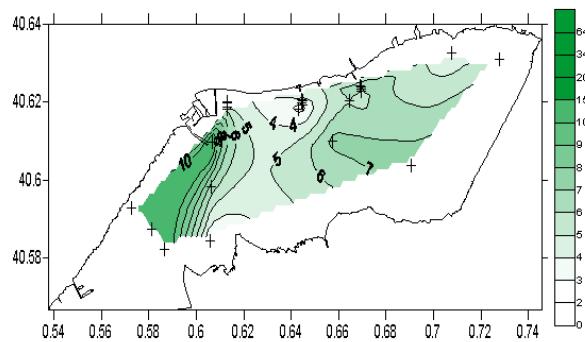
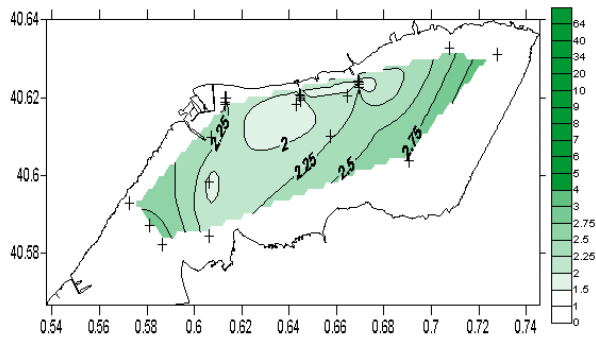
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



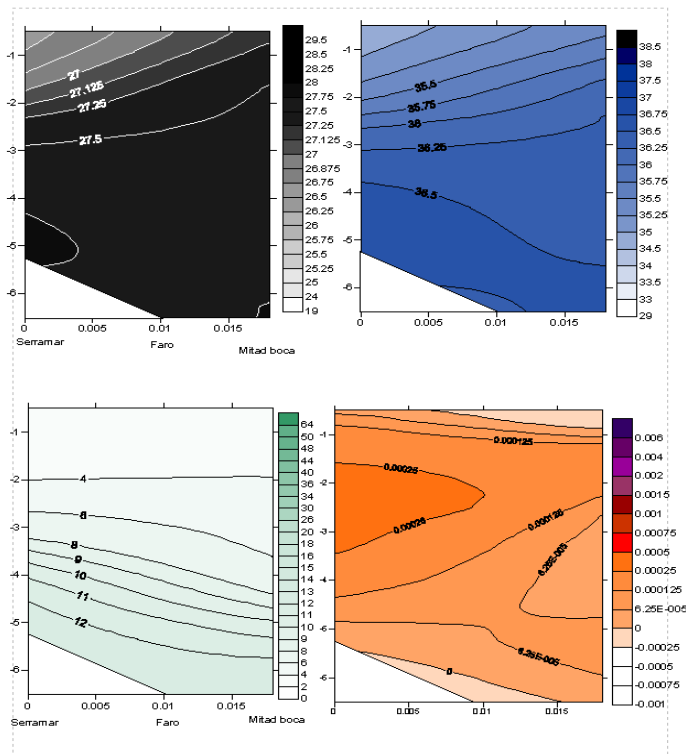
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



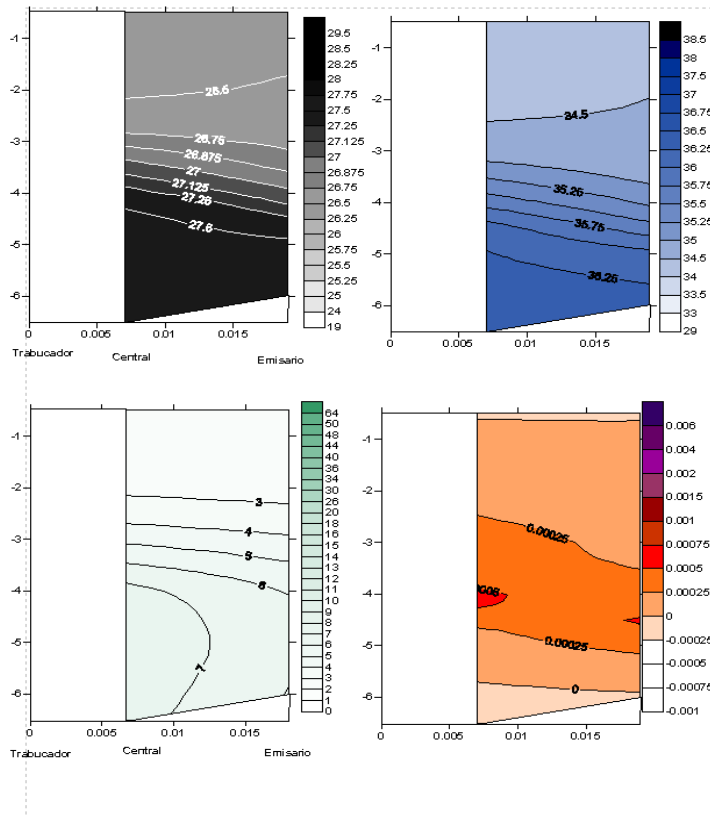
22/01/2004 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

Transecto boca

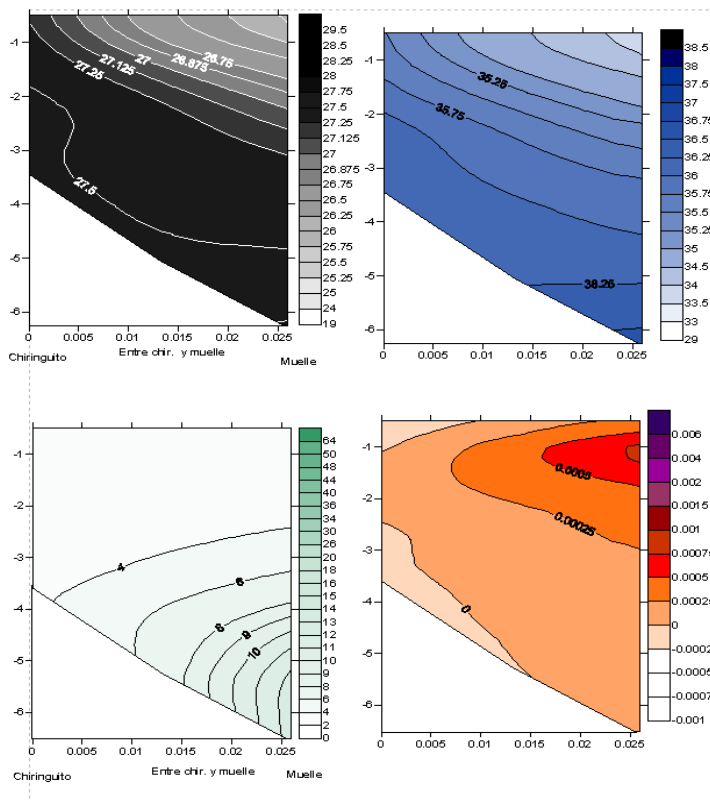


Transecto central



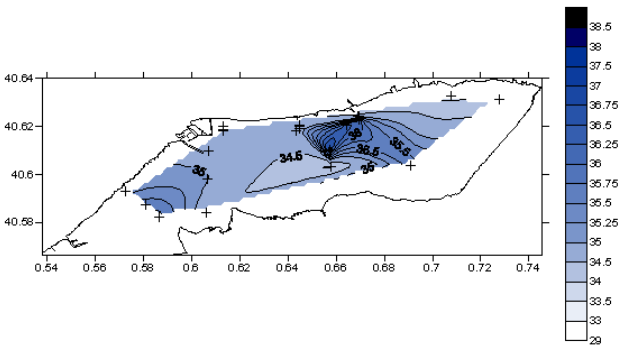
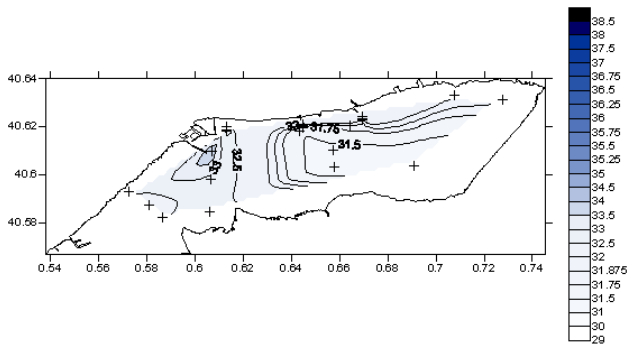
No había medidas de la estación "trabucador"

Transecto muelle

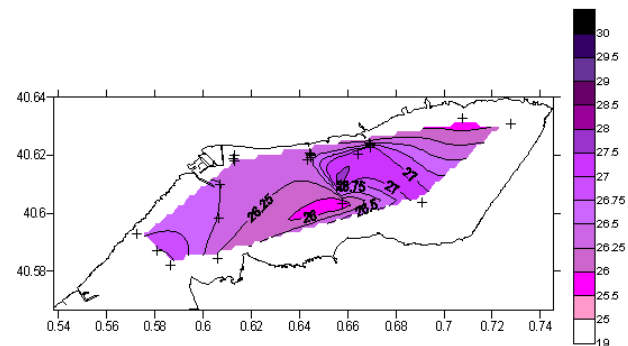
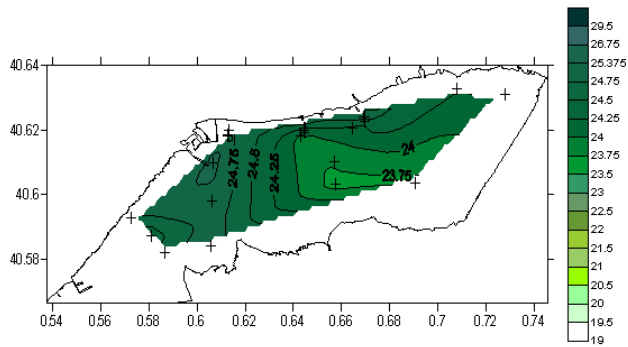


12/02/2004 – Perfiles horizontales de la bahía

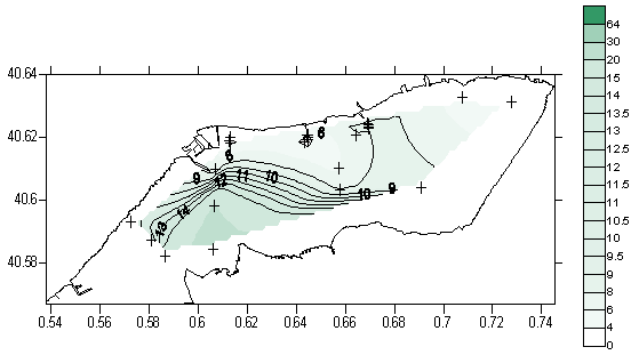
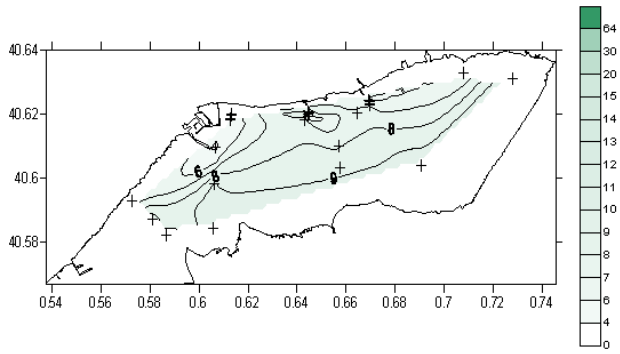
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



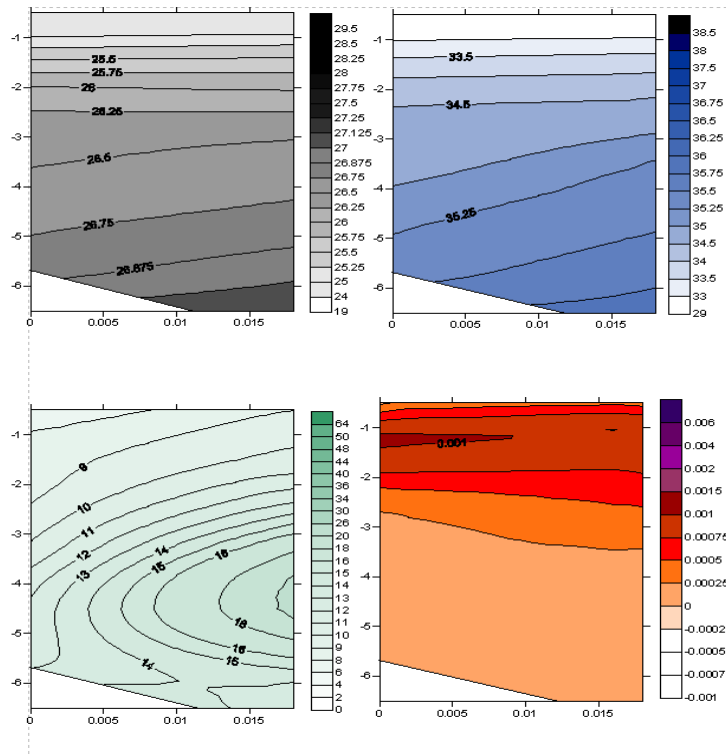
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



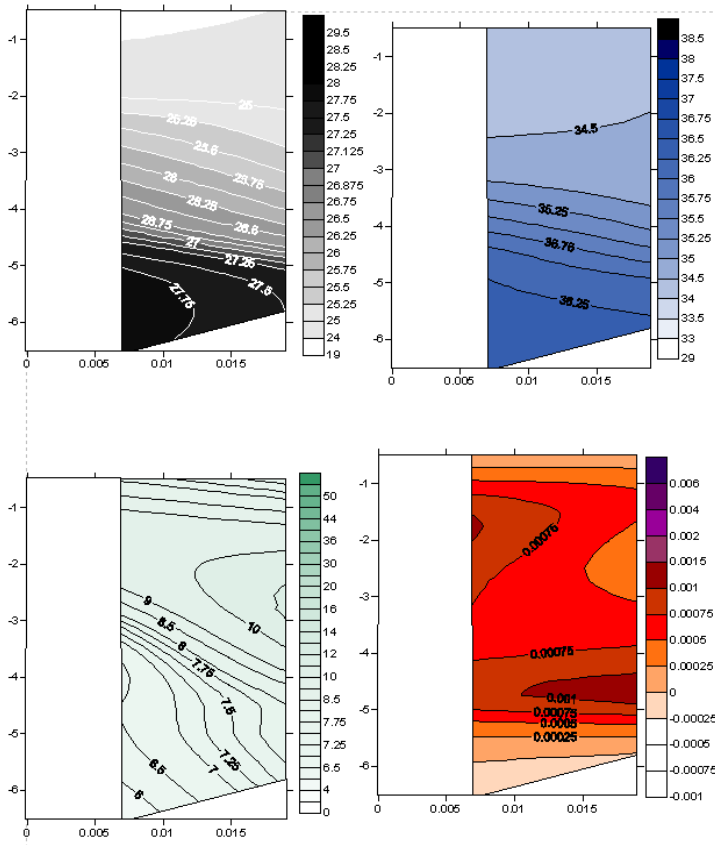
12/02/2004 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

Transecto boca

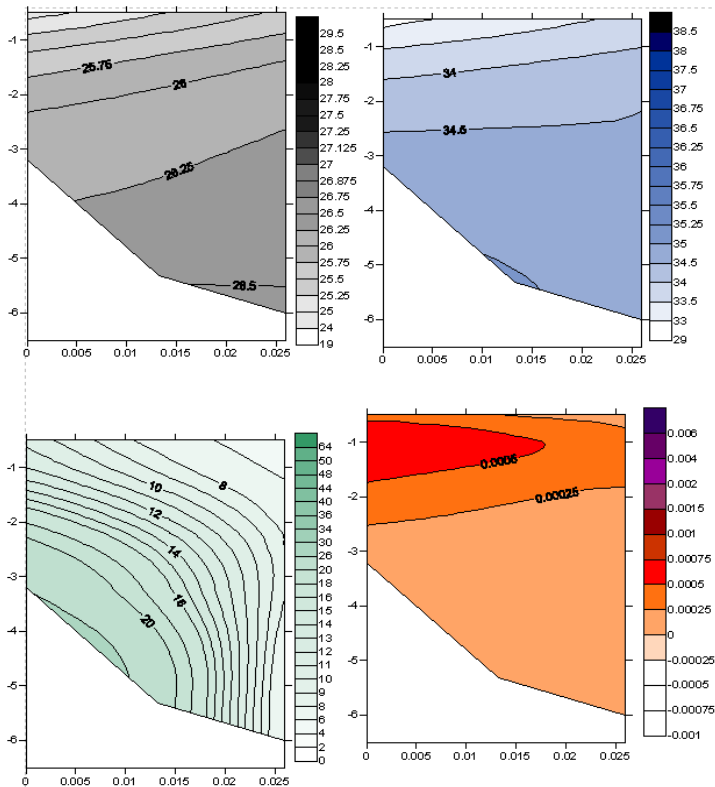


Transecto central



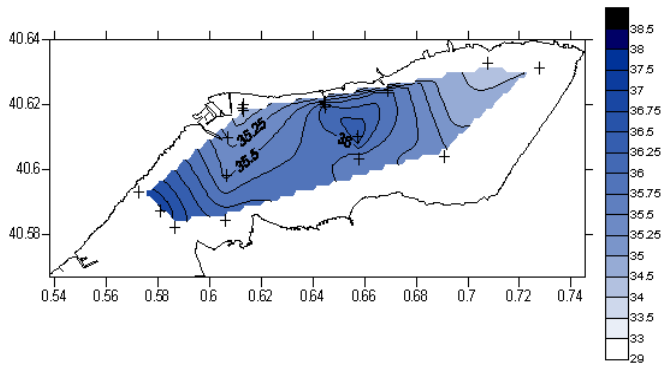
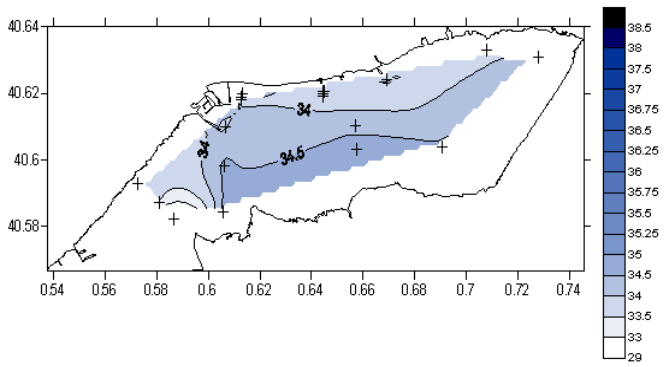
No había medidas estación "trabucador"

Transecto muelle

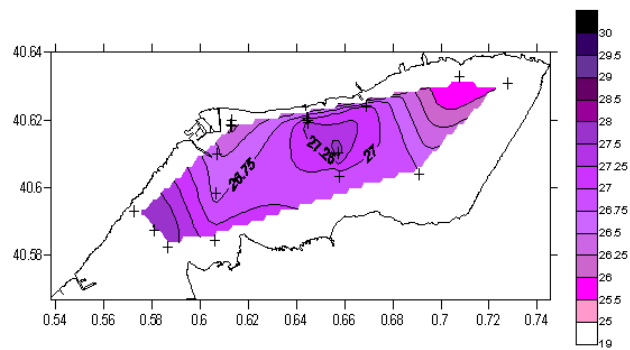
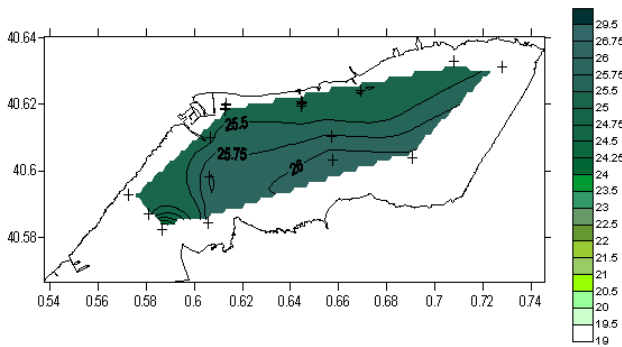


02/04/2004 – Perfiles horizontales de la bahía

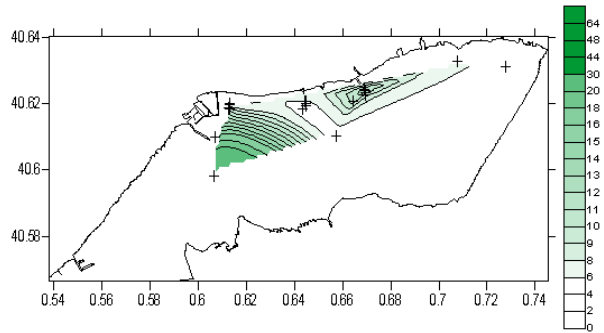
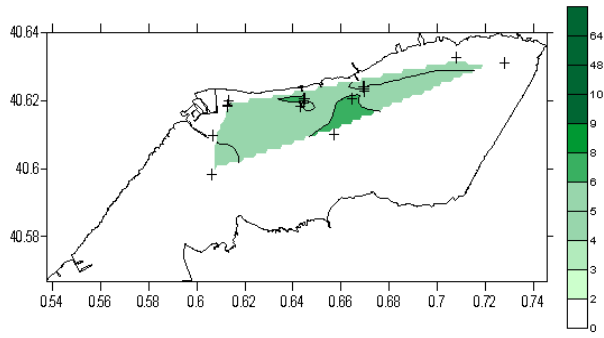
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



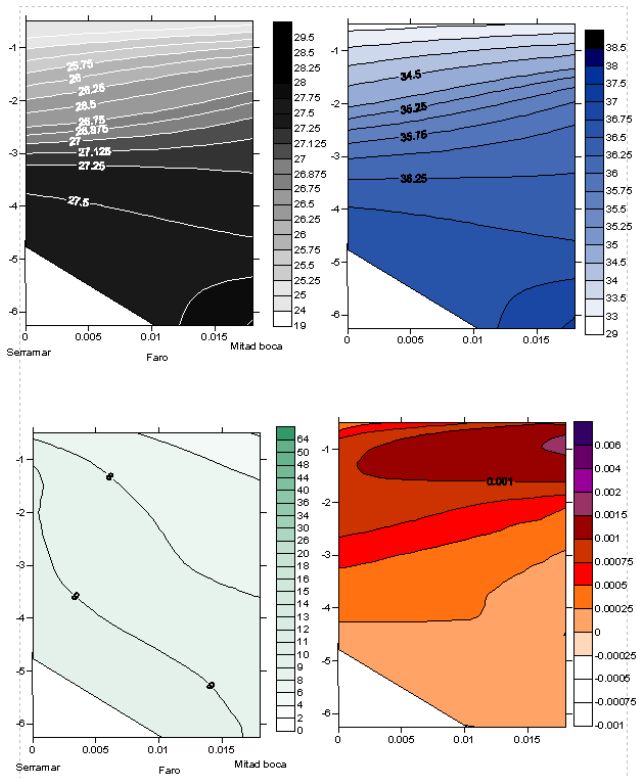
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



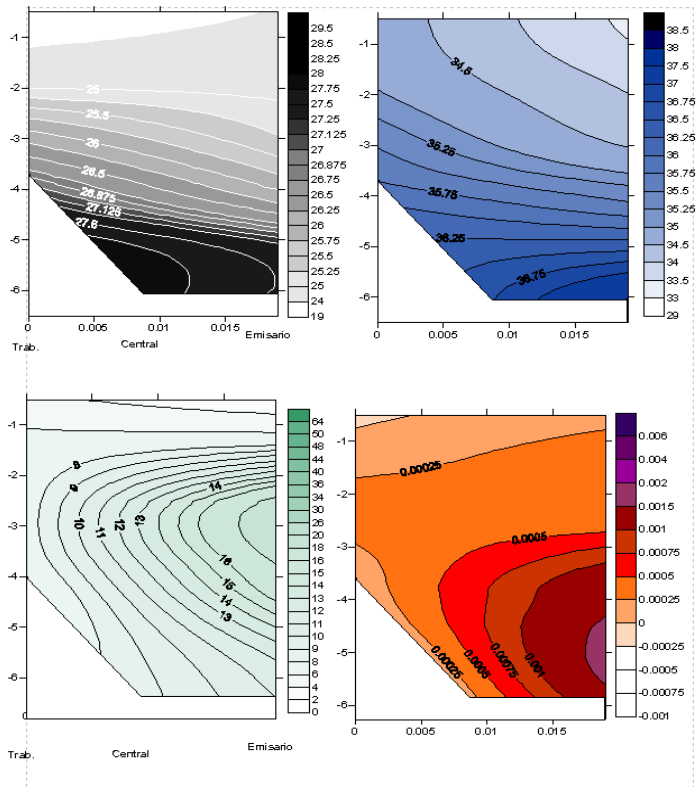
02/04/2004 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

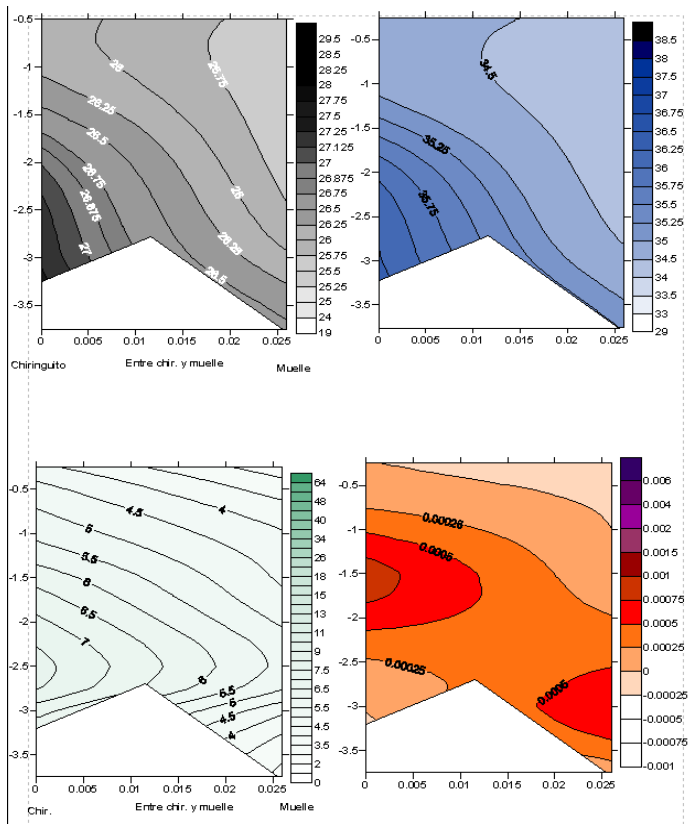
Transecto boca



Transecto central

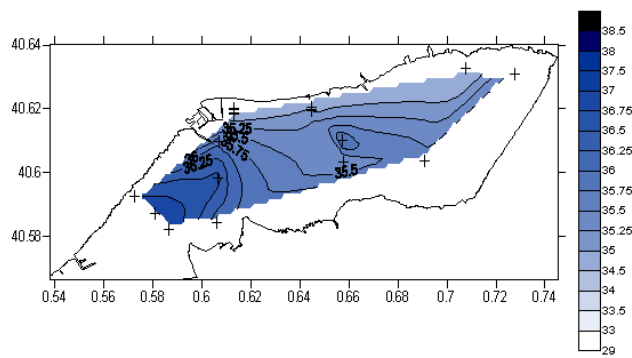
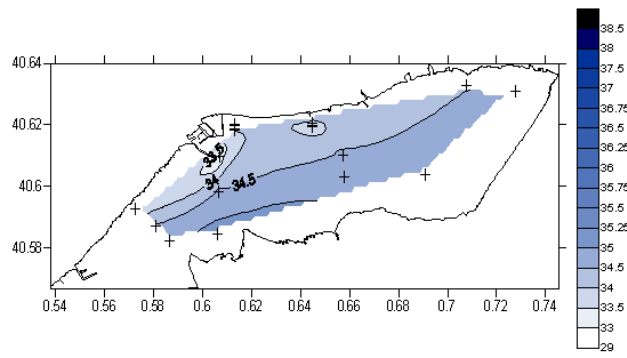


Transecto muelle

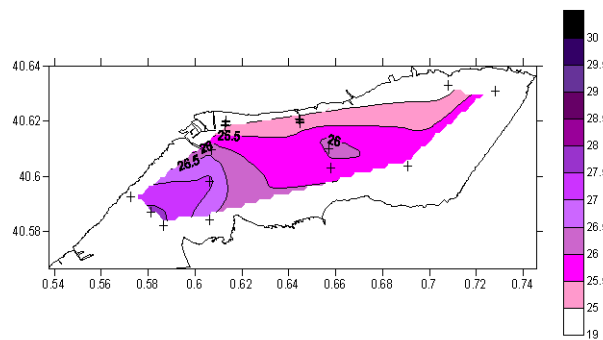
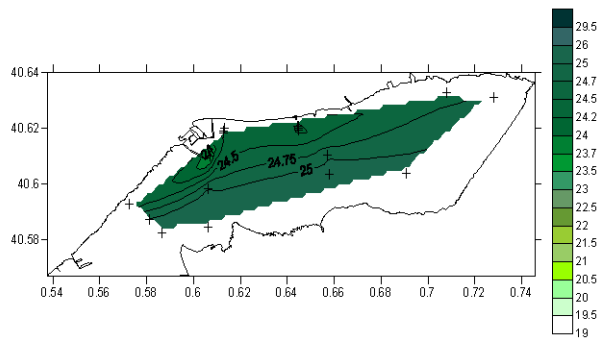


28/04/2004 – Perfiles horizontales de la bahía

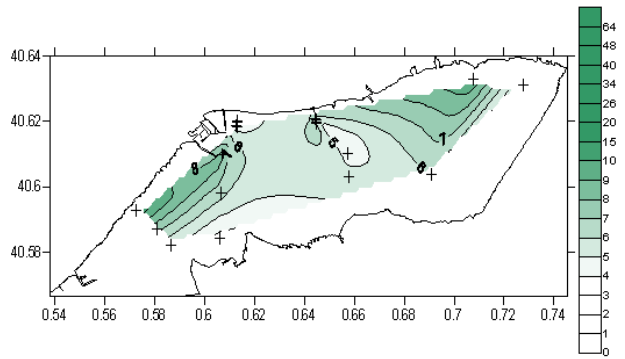
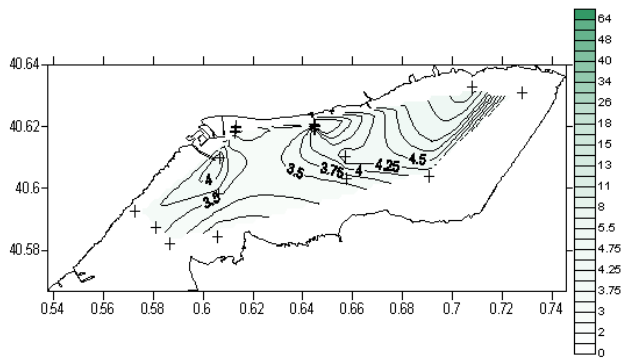
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



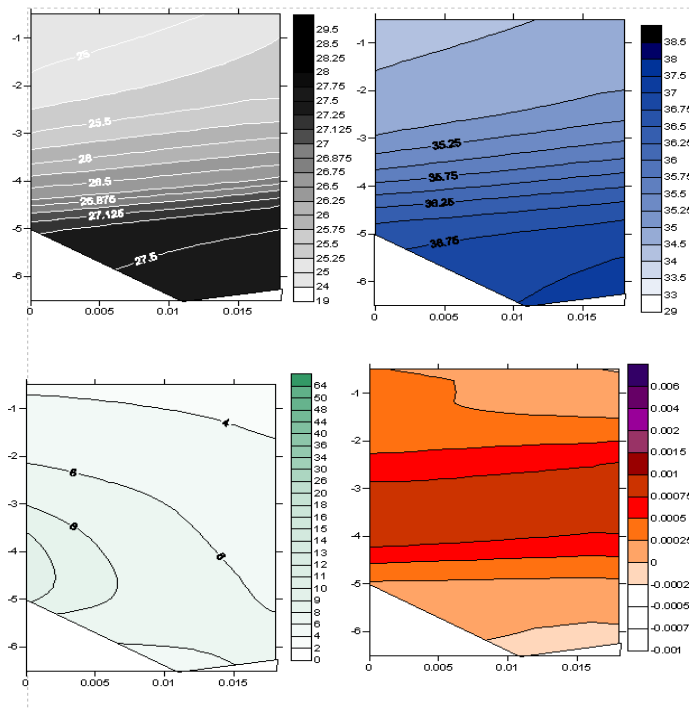
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



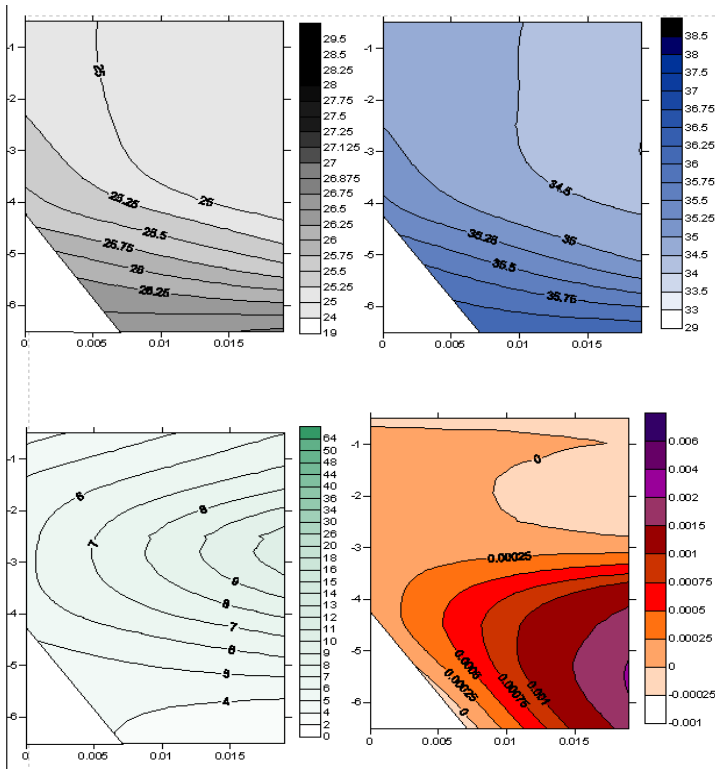
28/04/2004 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

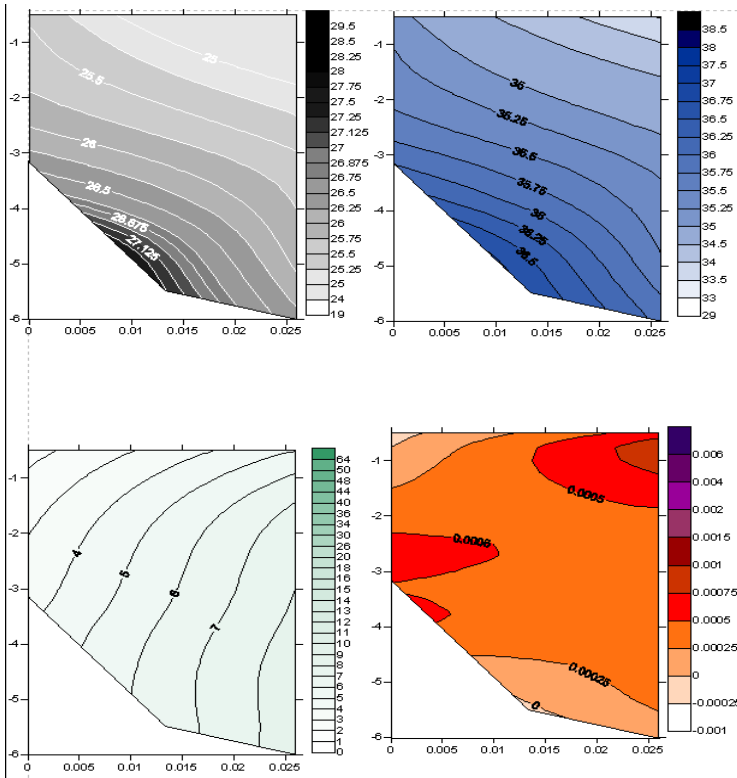
Transecto boca



Transecto central

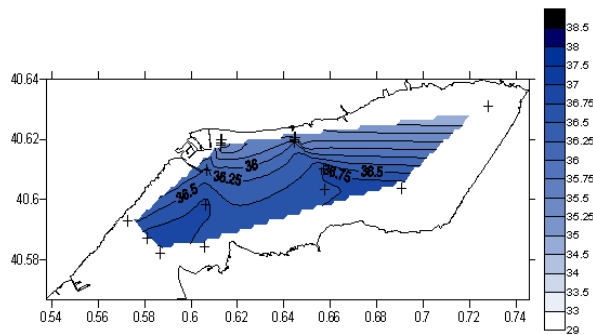
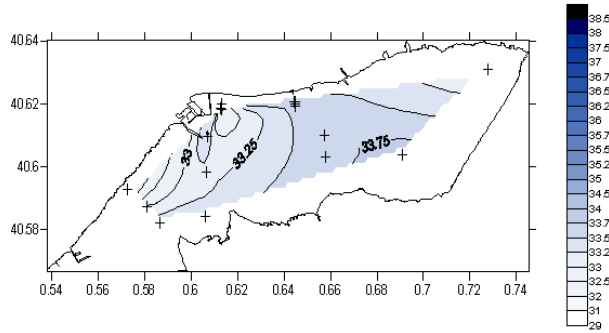


Transecto muelle

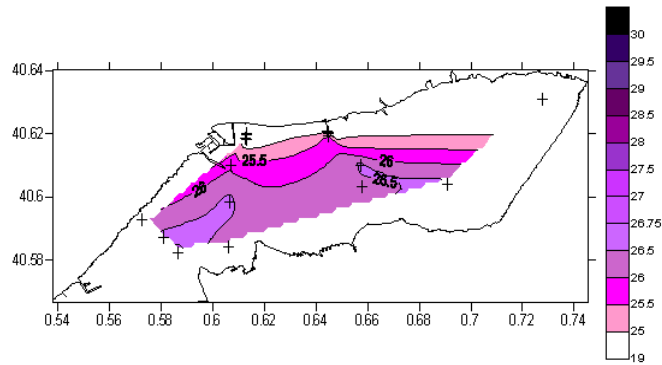
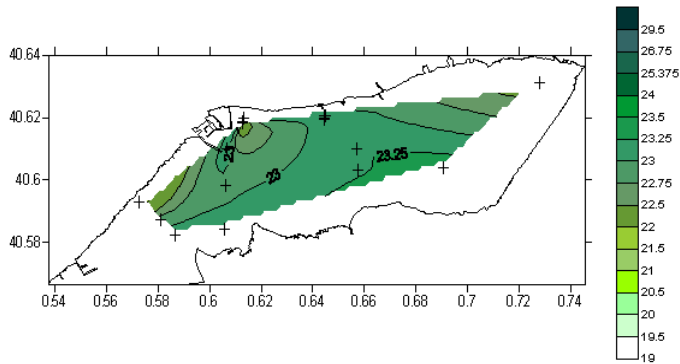


28/05/2004 – Perfiles horizontales de la bahía

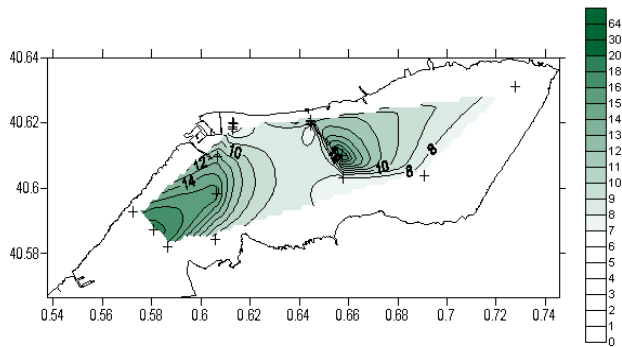
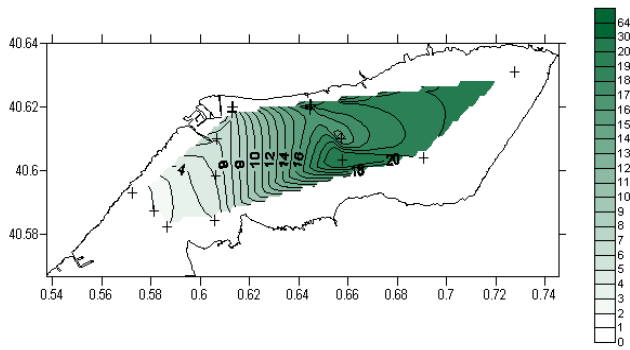
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



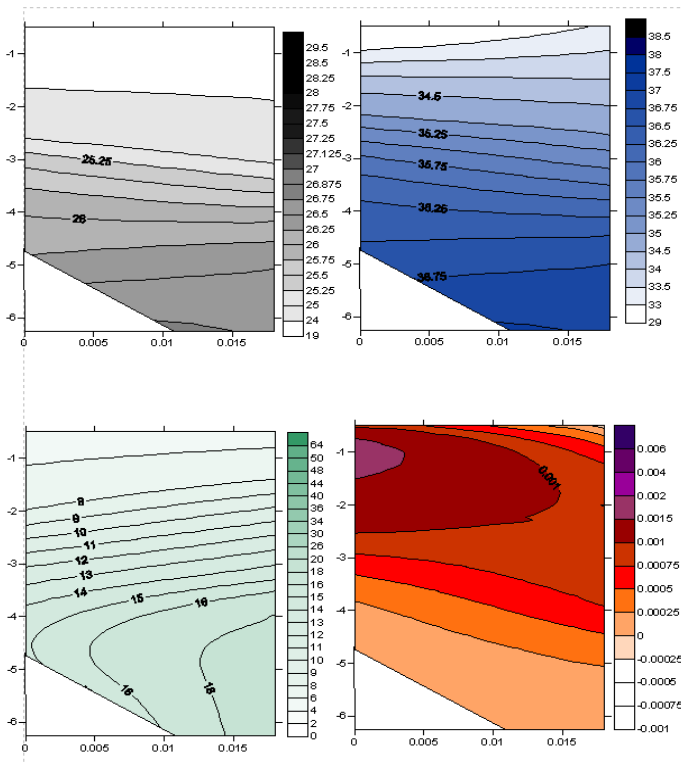
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



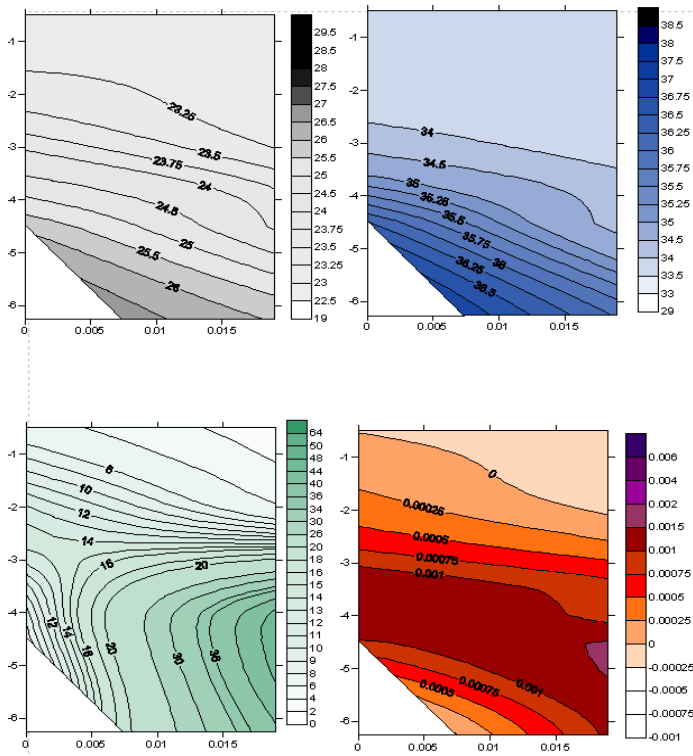
28/05/2004 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

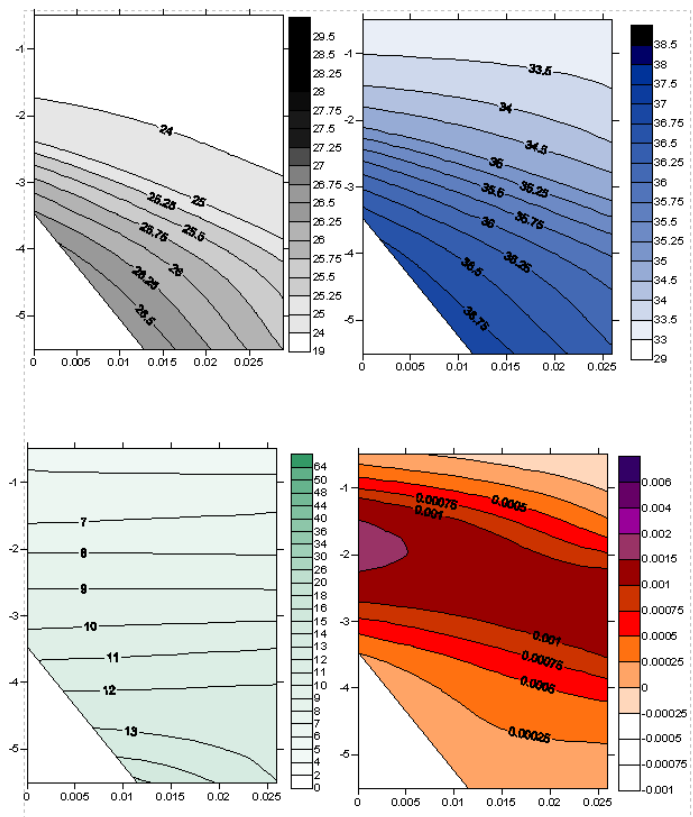
Transecto boca



Transecto central

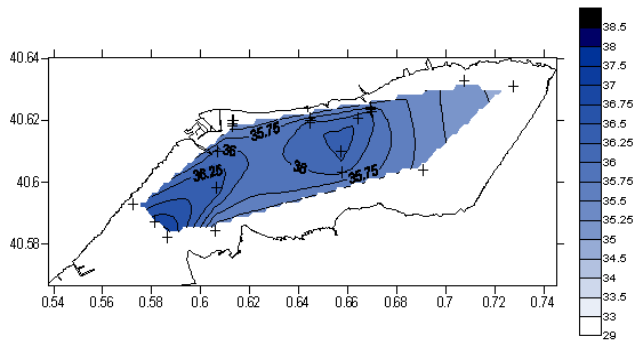
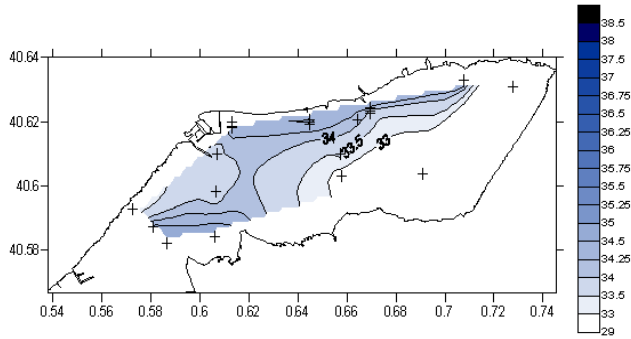


Transecto muelle

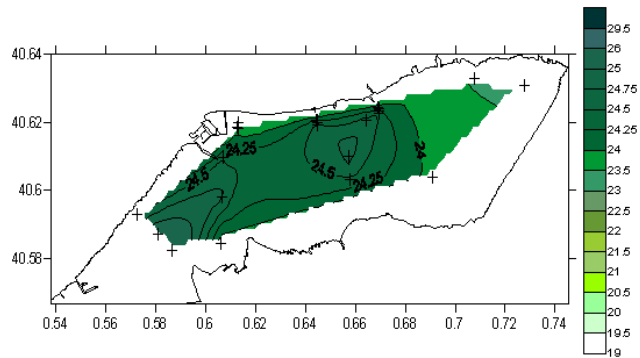
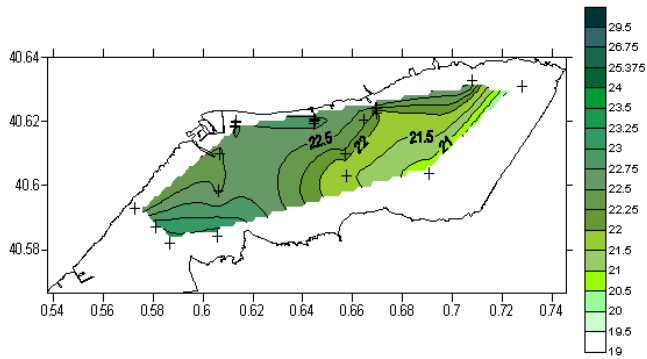


23/06/2004 – Perfiles horizontales de la bahía

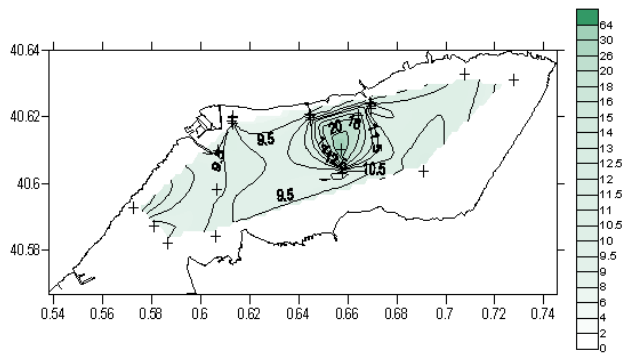
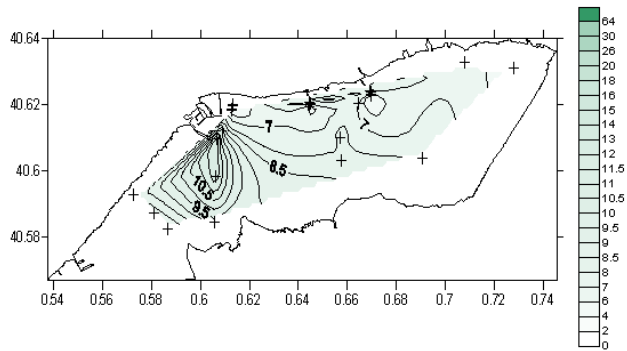
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



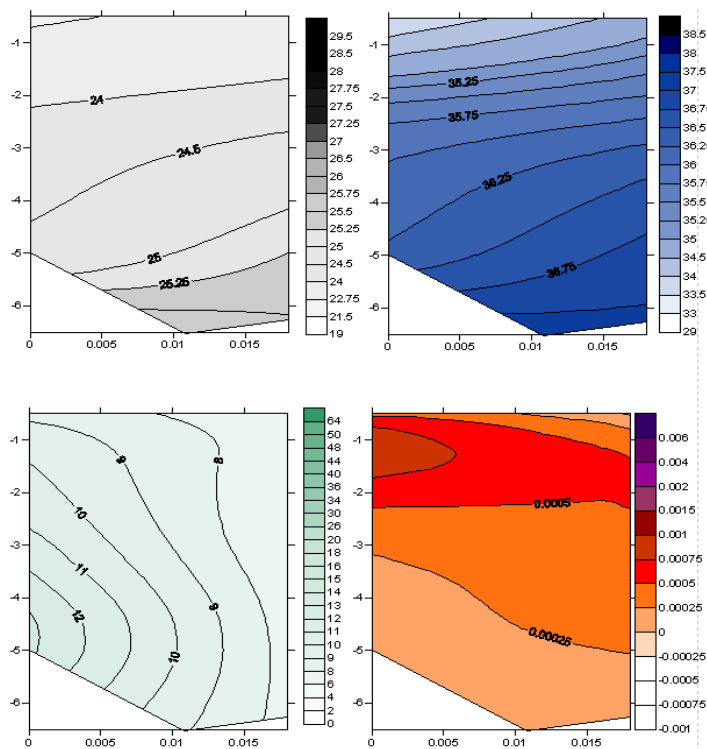
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



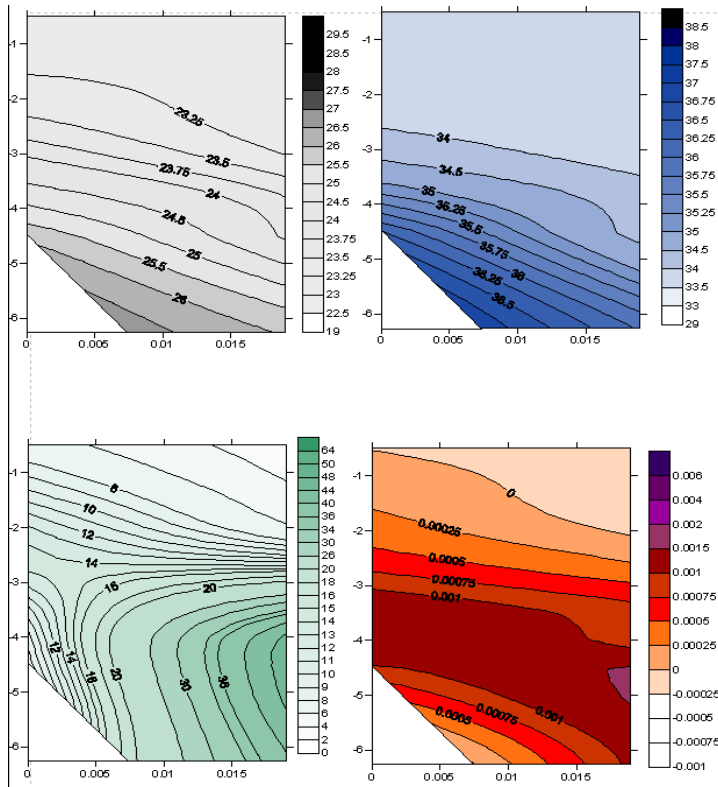
23/06/2004 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

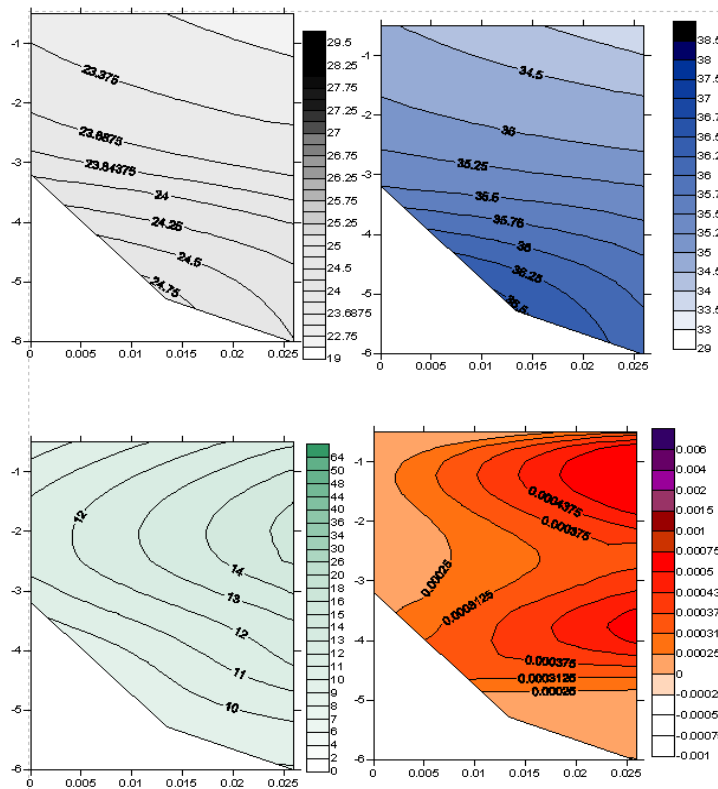
Transecto boca



Transecto central

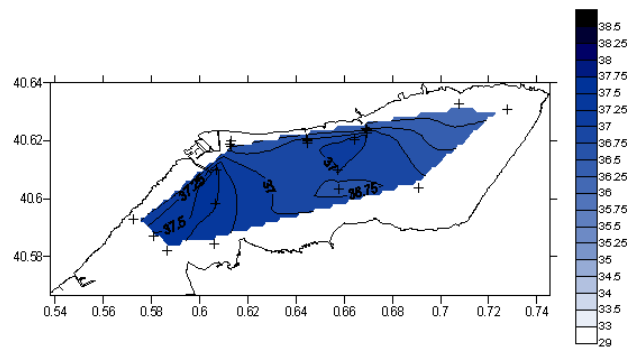
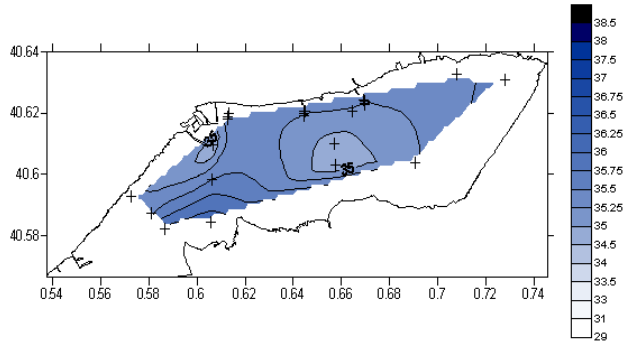


Transecto muelle

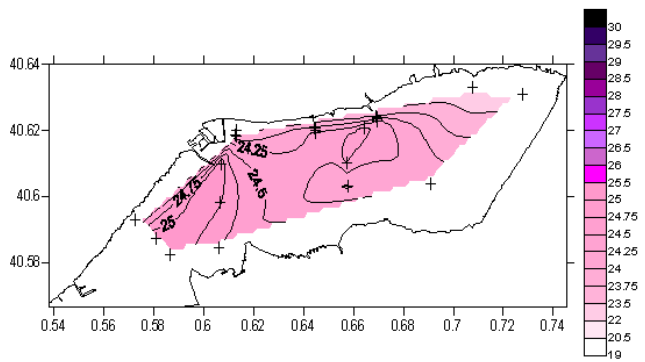
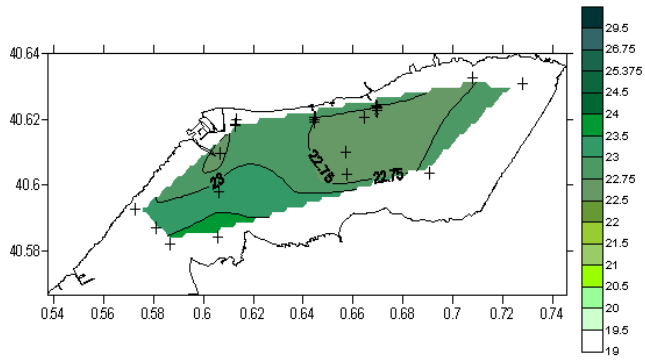


28/07/2004 – Perfiles horizontales de la bahía

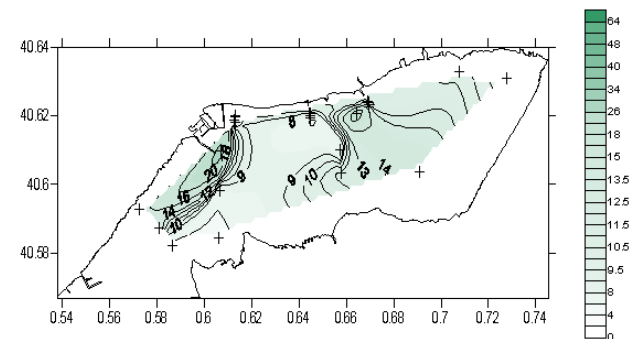
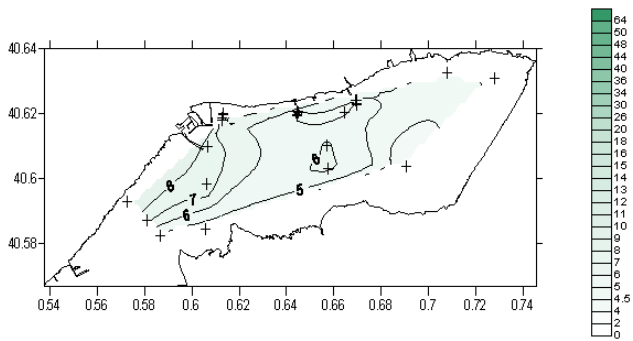
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



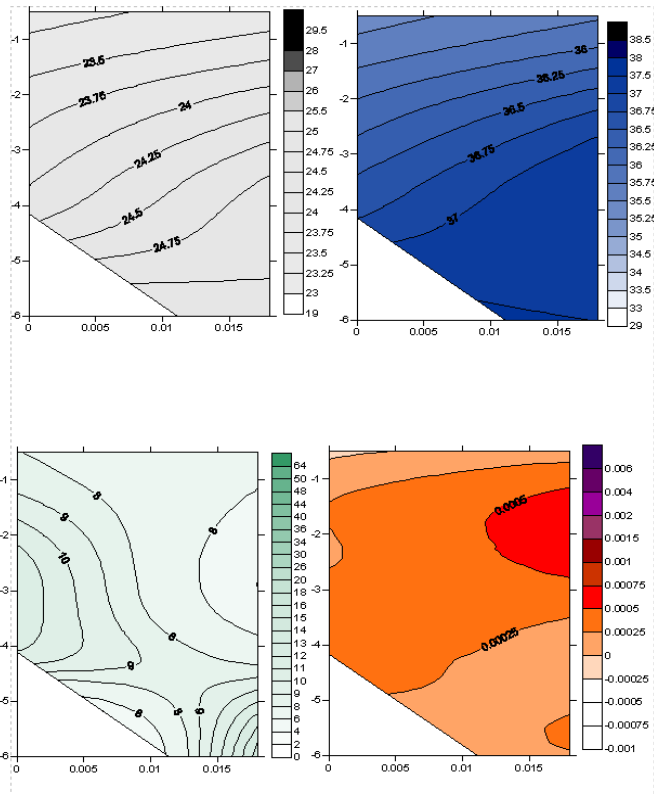
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



28/07/2004 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

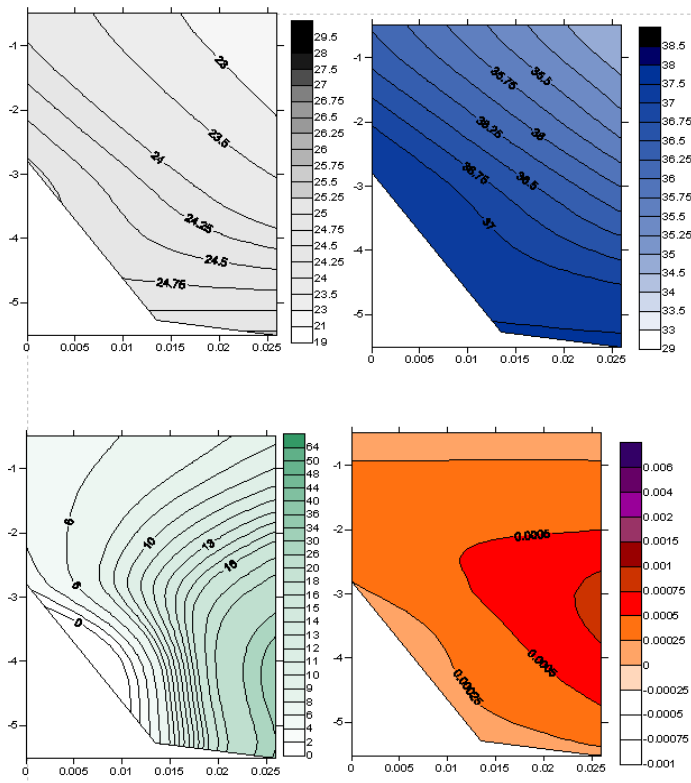
De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

Transecto boca



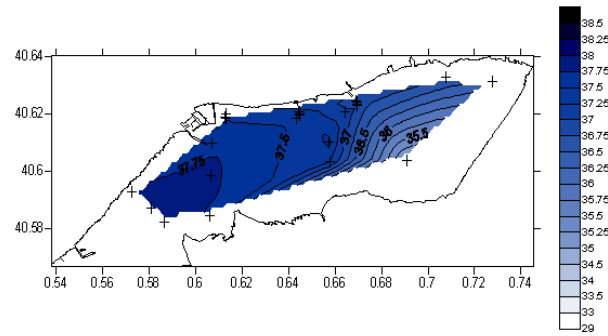
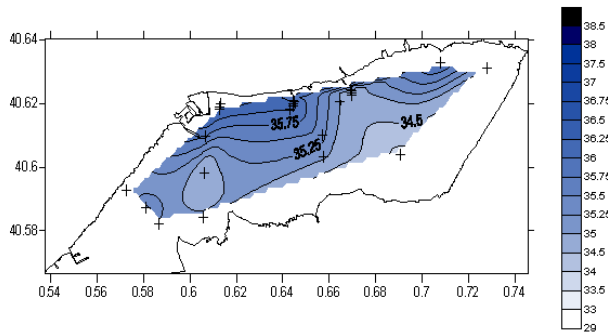
Transecto central - *No hay datos para este día*

Transecto muelle

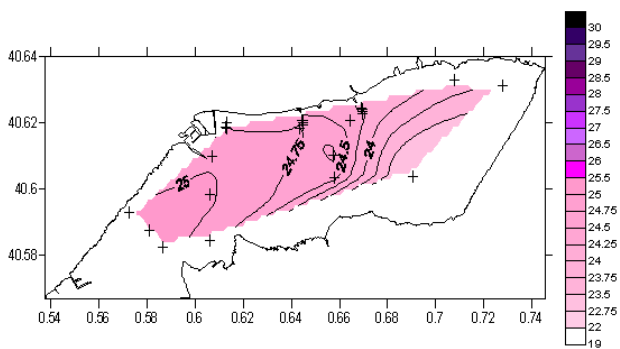
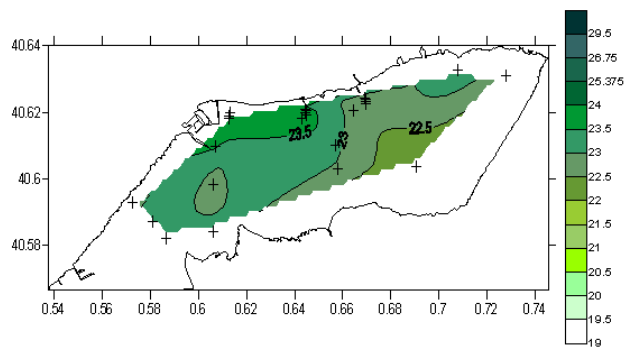


26/08/2004 – Perfiles horizontales de la bahía

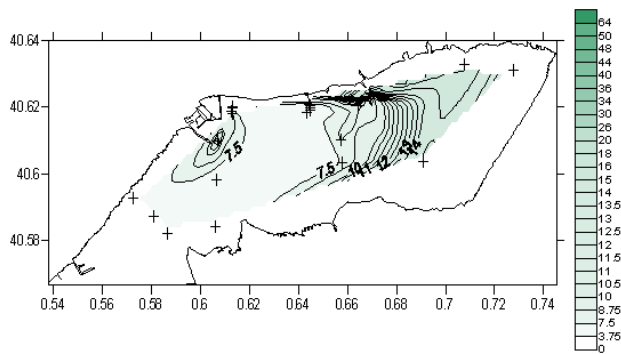
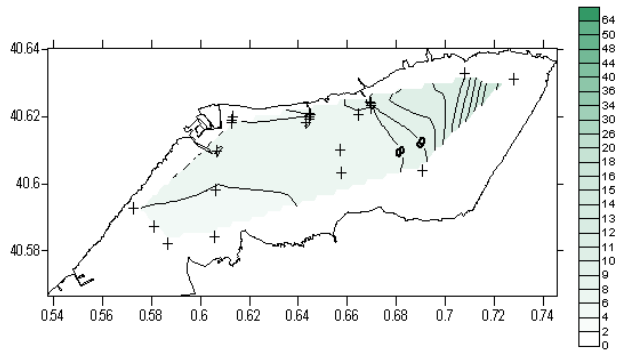
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



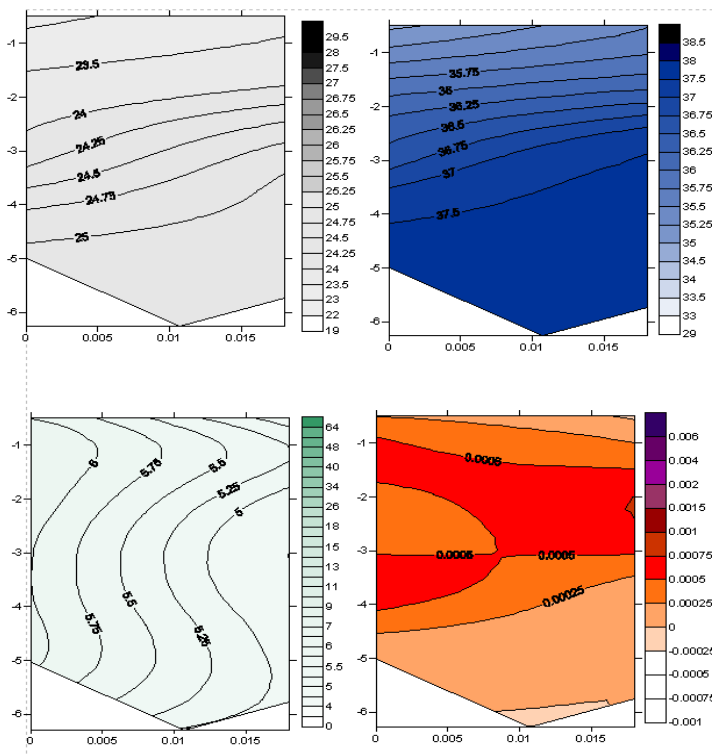
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



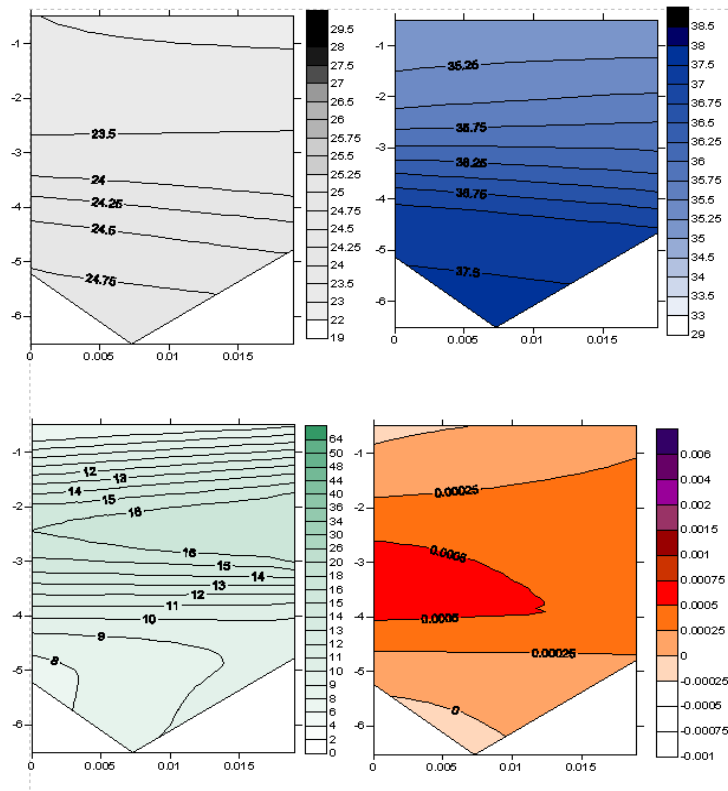
26/08/2004 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

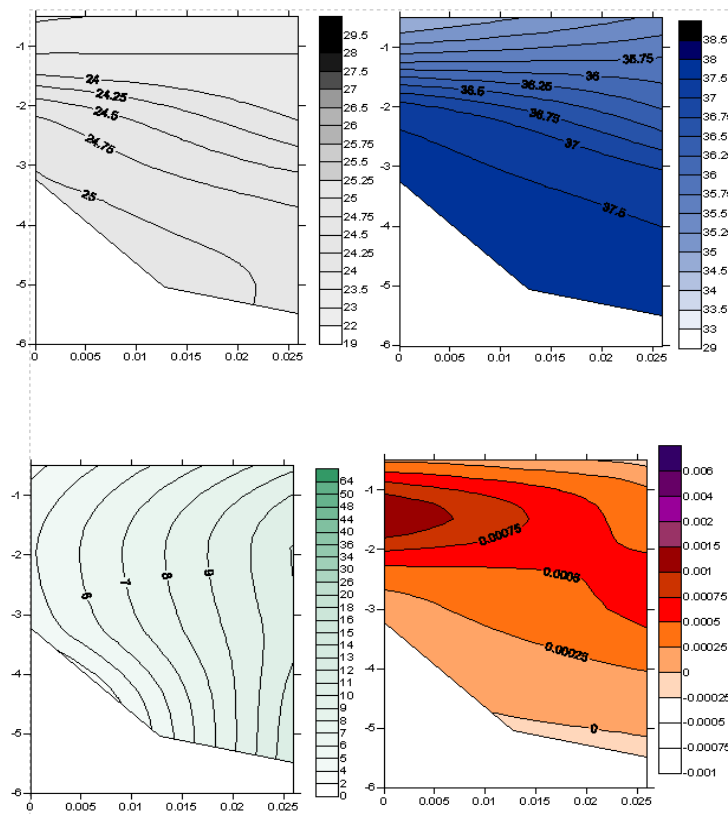
Transecto boca



Transecto central

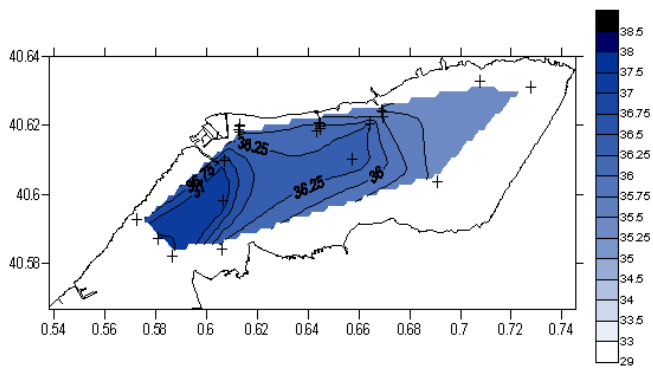
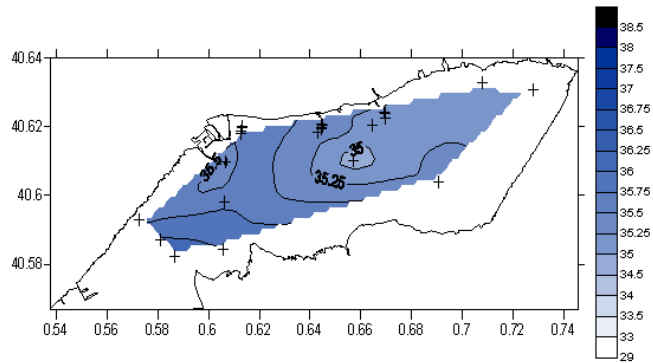


Transecto muelle

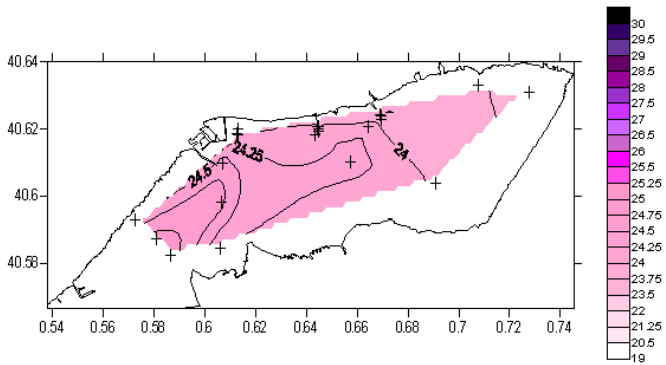
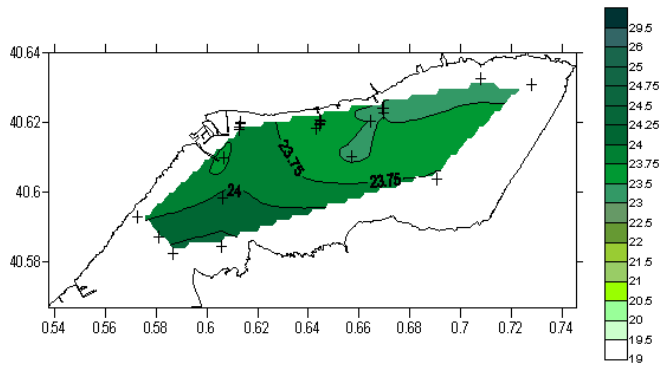


23/09/2004 – Perfiles horizontales de la bahía

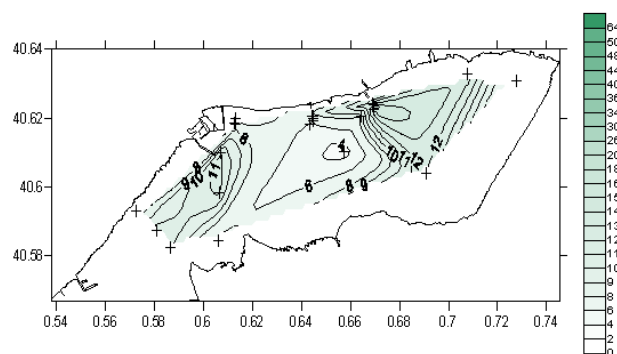
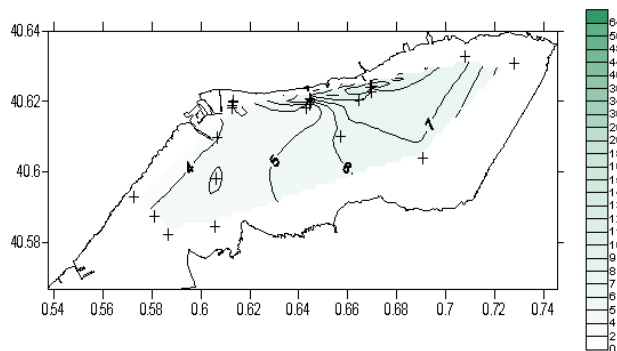
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



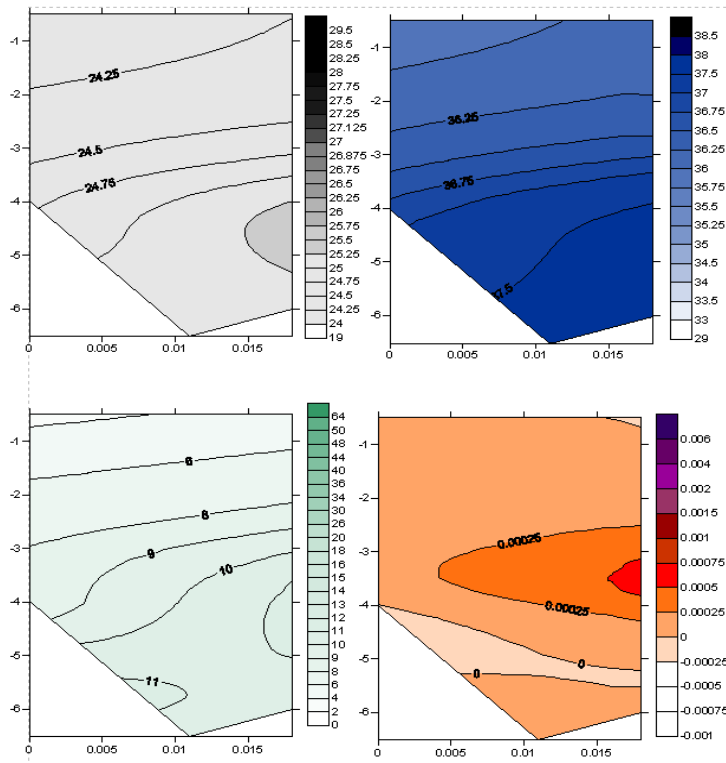
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



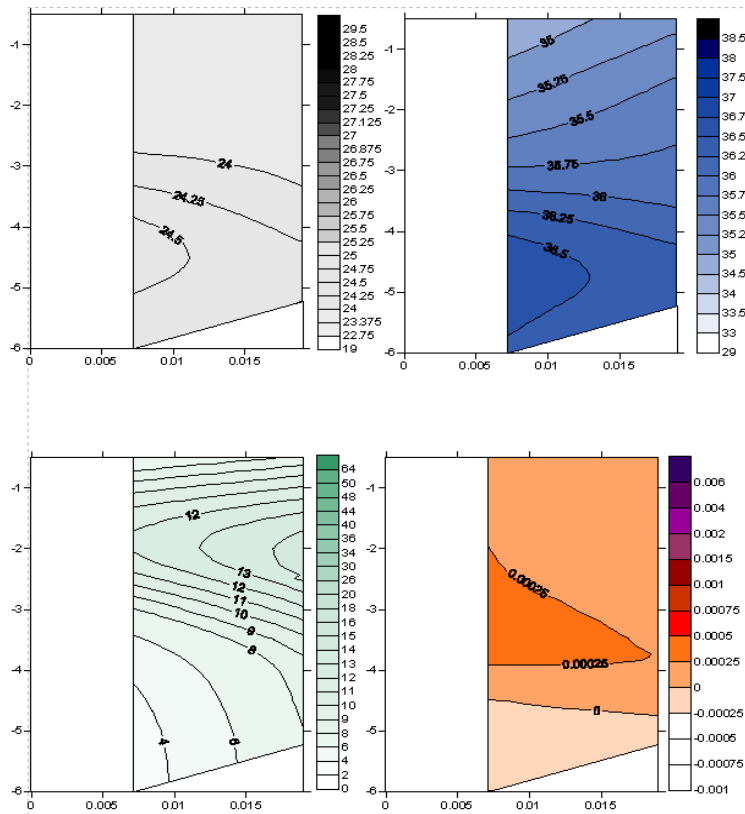
23/09/2004 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

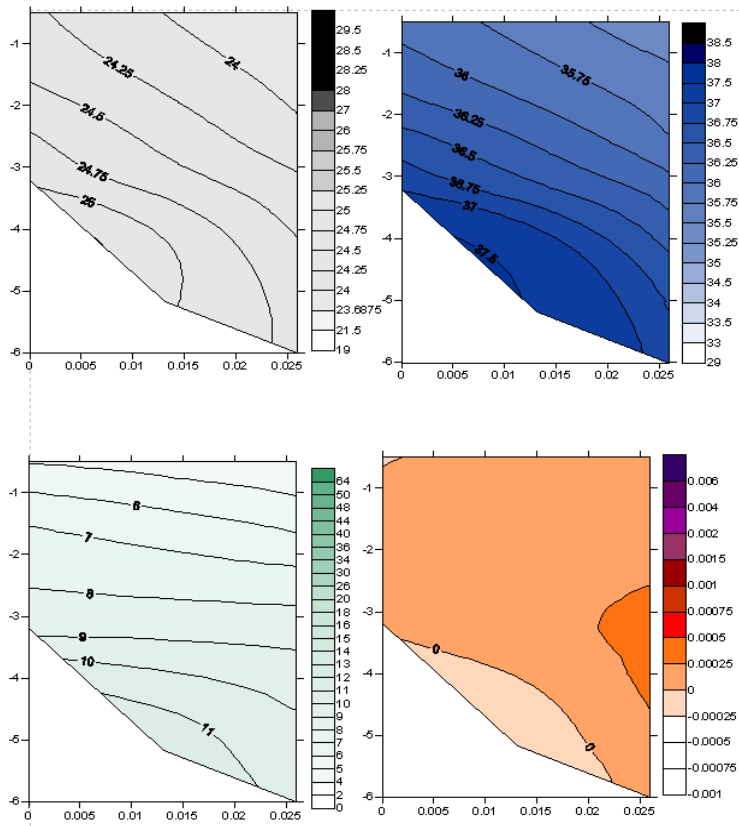
Transecto boca



Transecto central

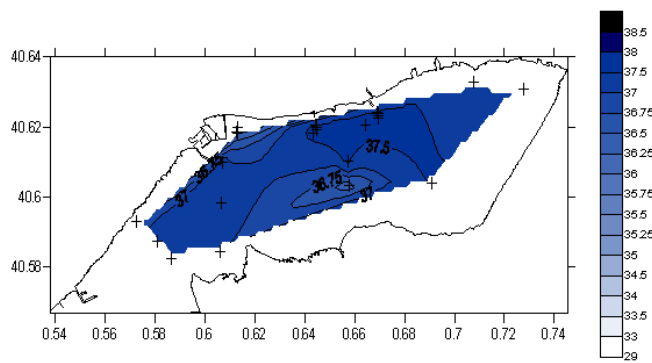
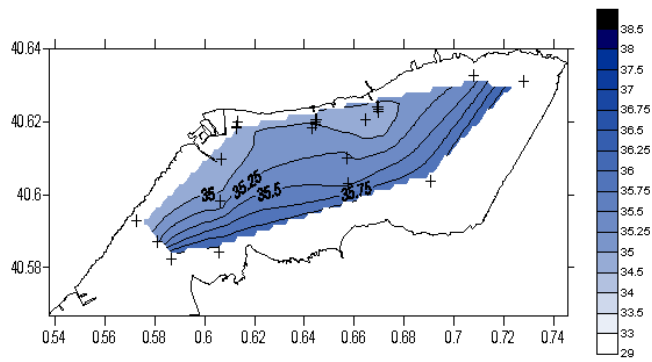


Transecto muelle

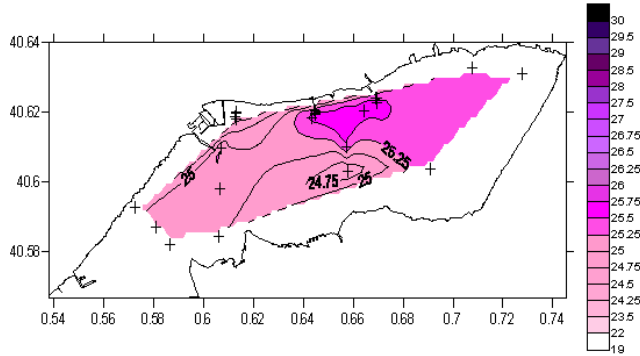
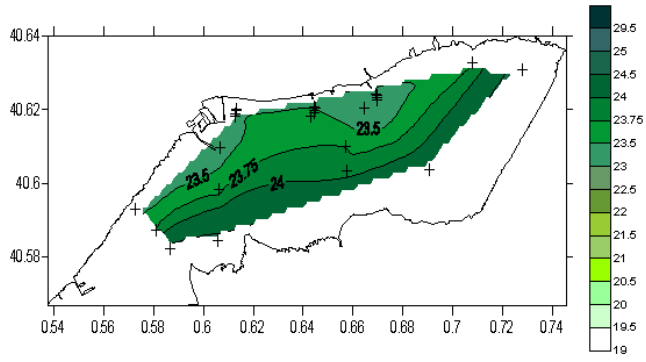


08/10/2004 – Perfiles horizontales de la bahía

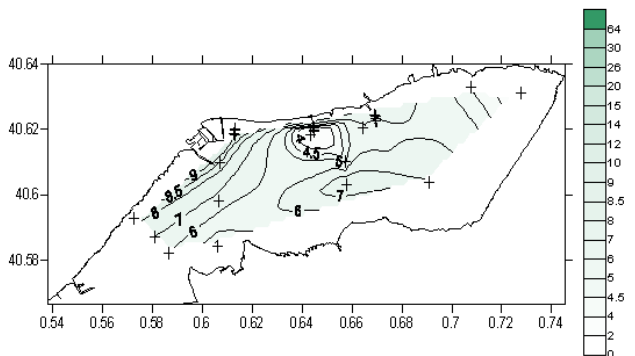
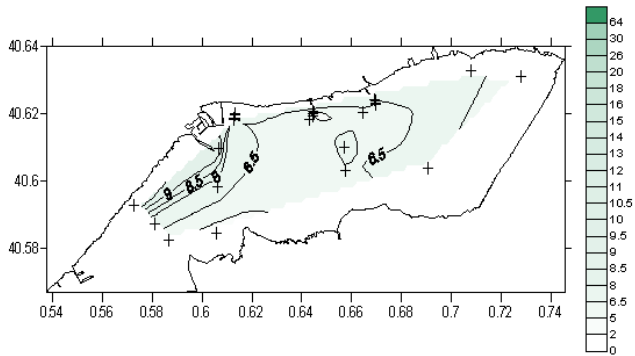
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



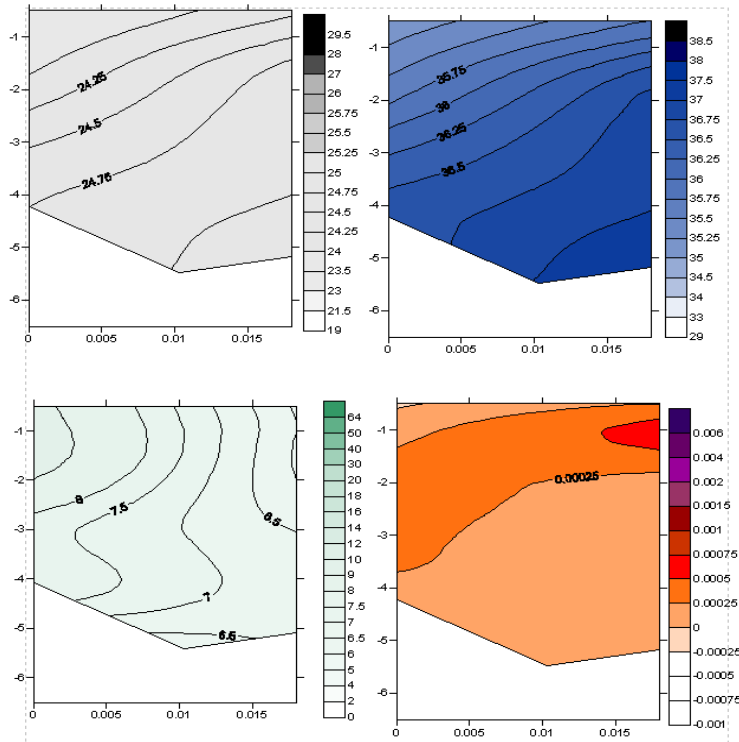
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



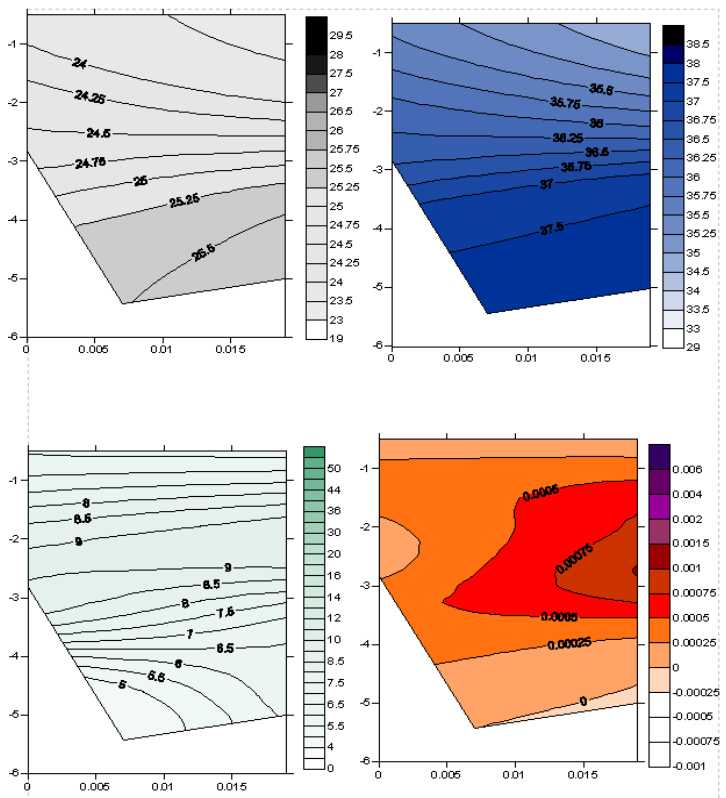
08/10/2004 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

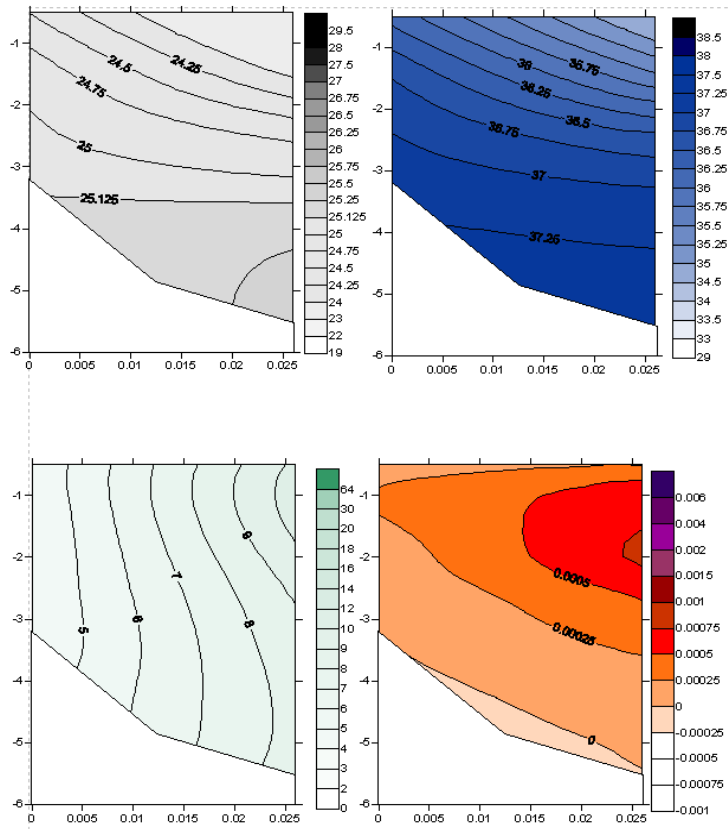
Transecto boca



Transecto central

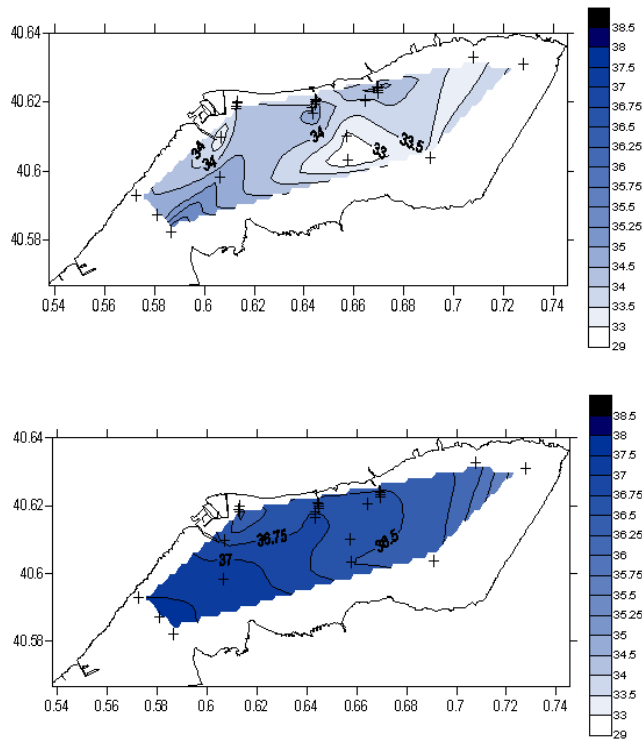


Transecto muelle

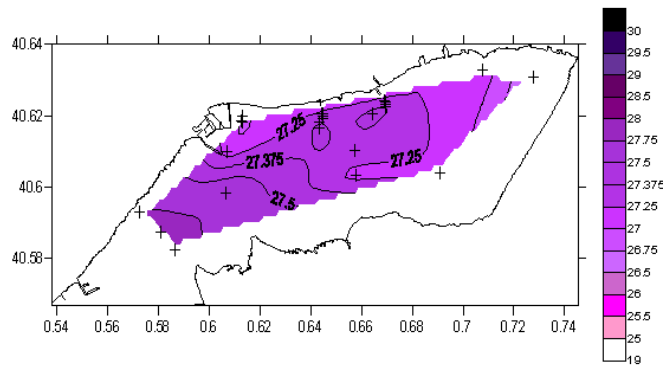
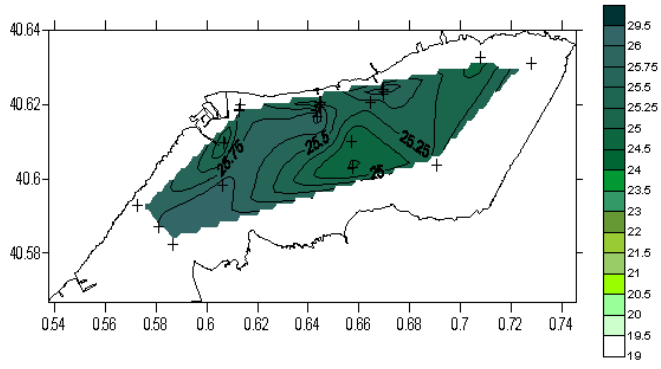


24/11/2004 – Perfiles horizontales de la bahía

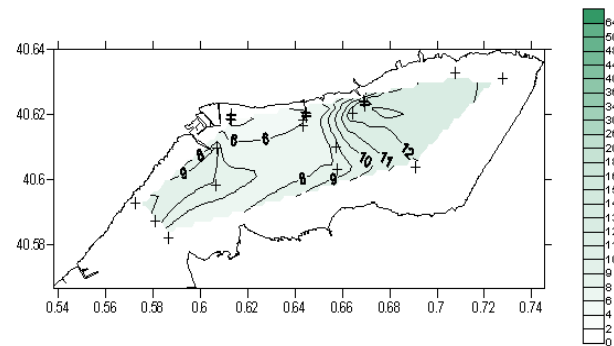
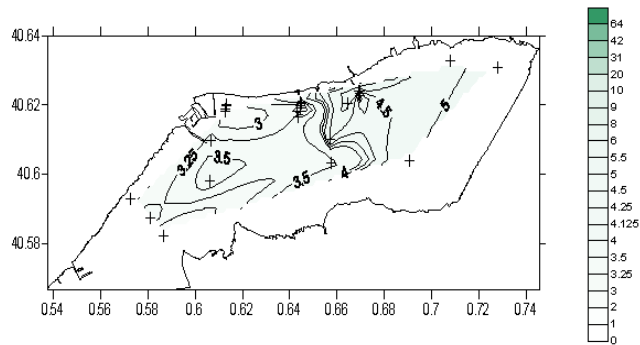
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



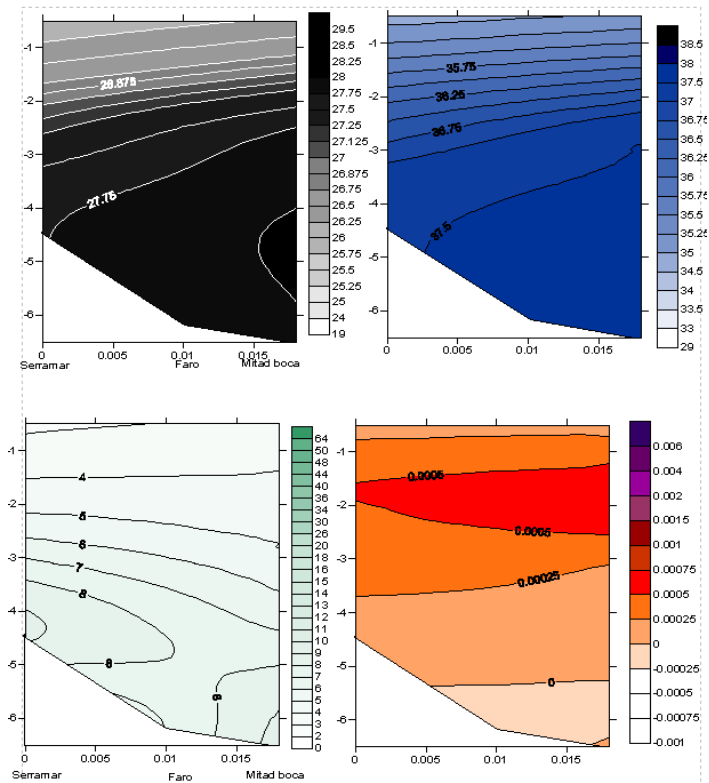
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



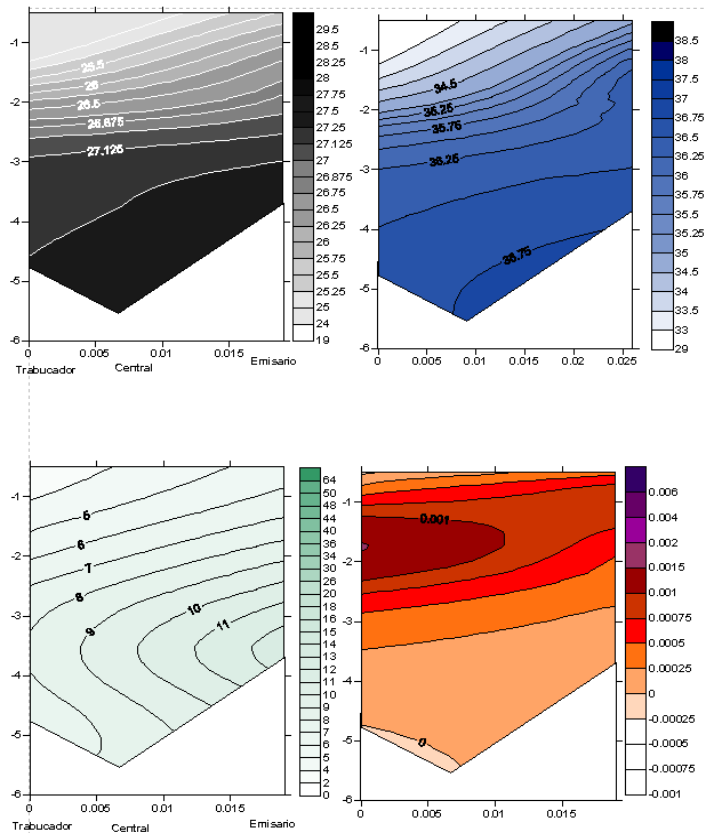
24/11/2004 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

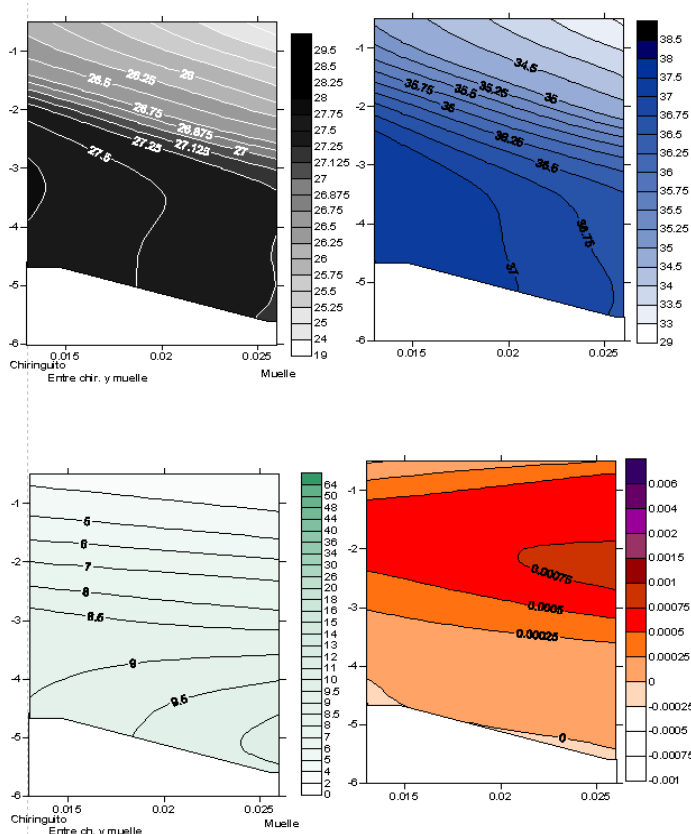
Transecto boca



Transecto central

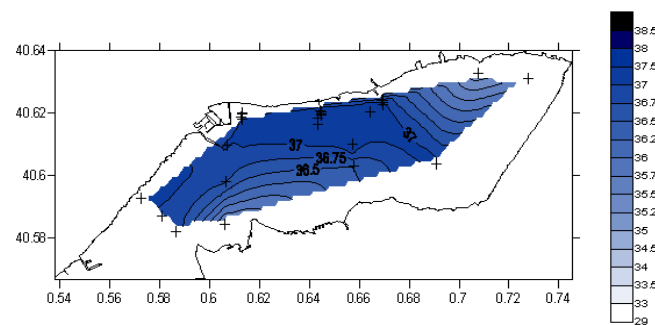
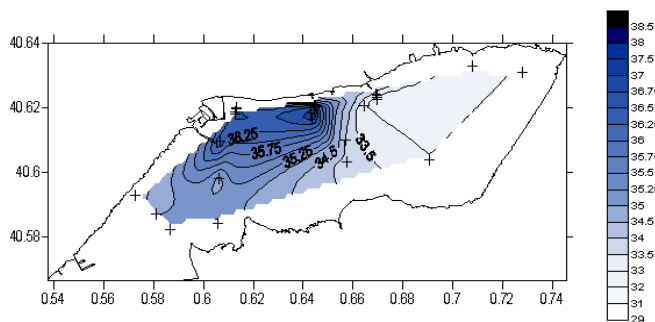


Transecto muelle

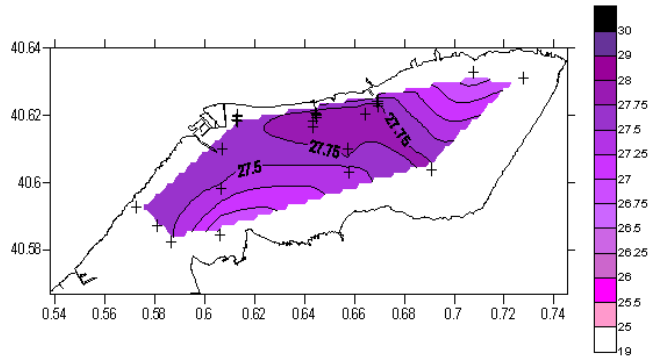
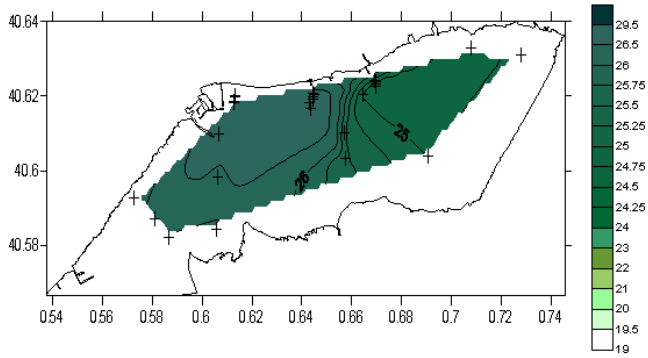


16/12/2004 – Perfiles horizontales de la bahía

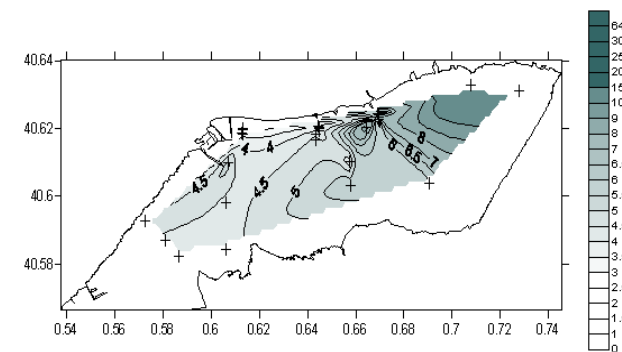
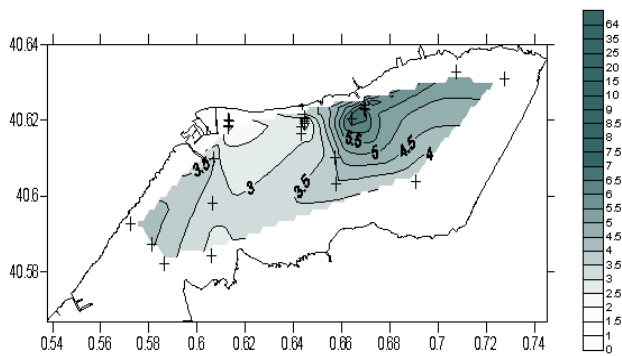
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



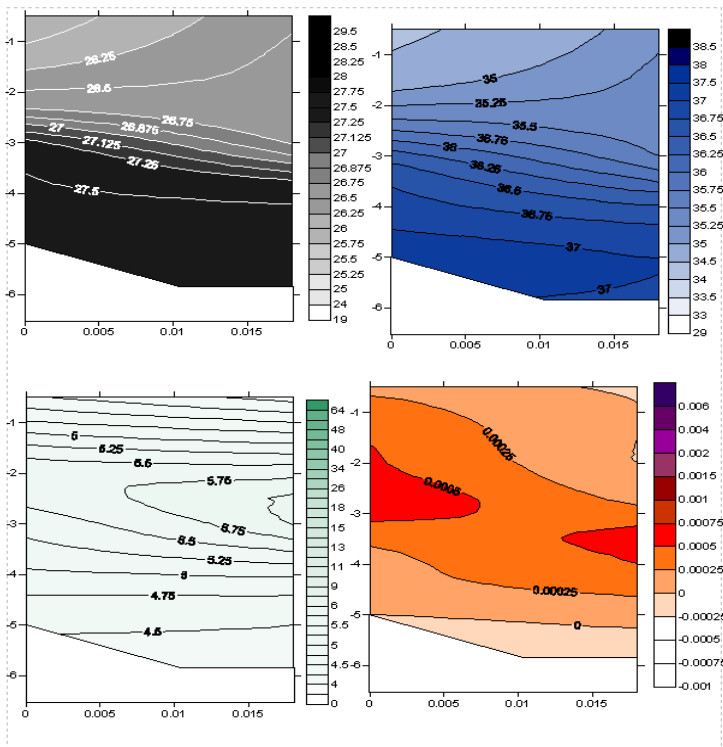
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



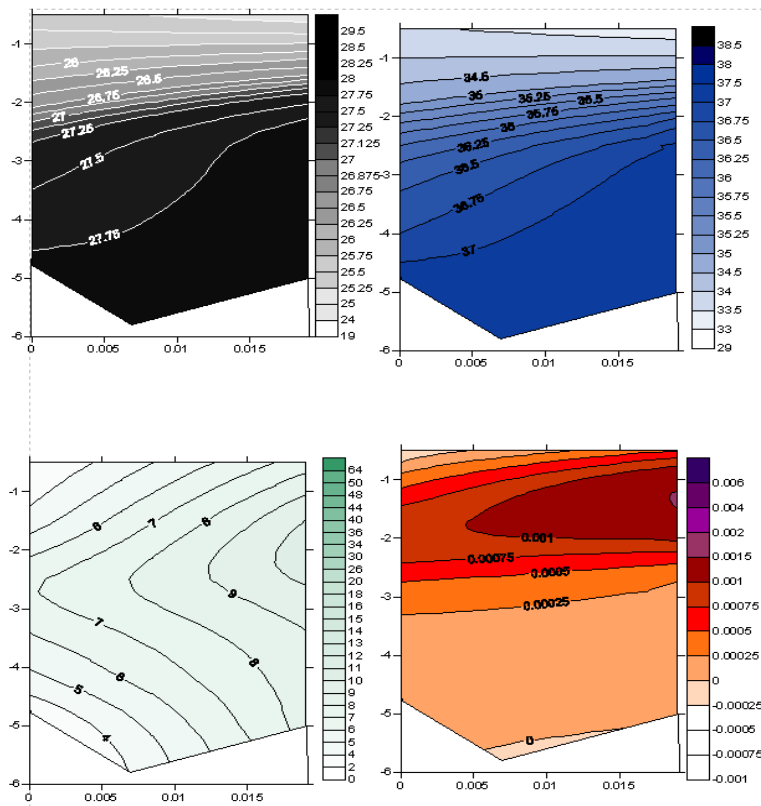
16/12/2004 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

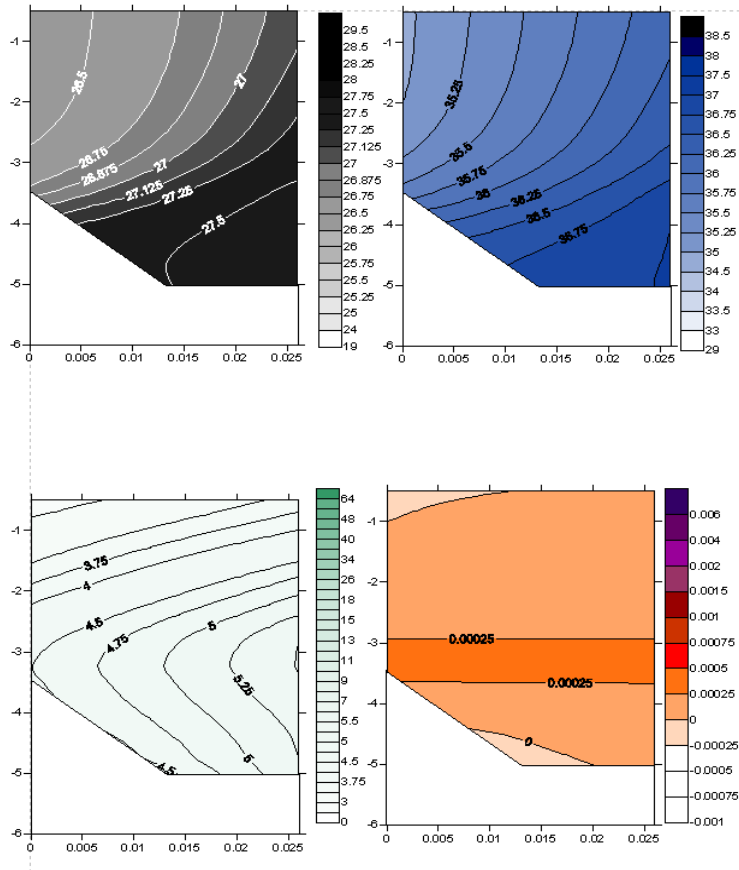
Transecto boca



Transecto central

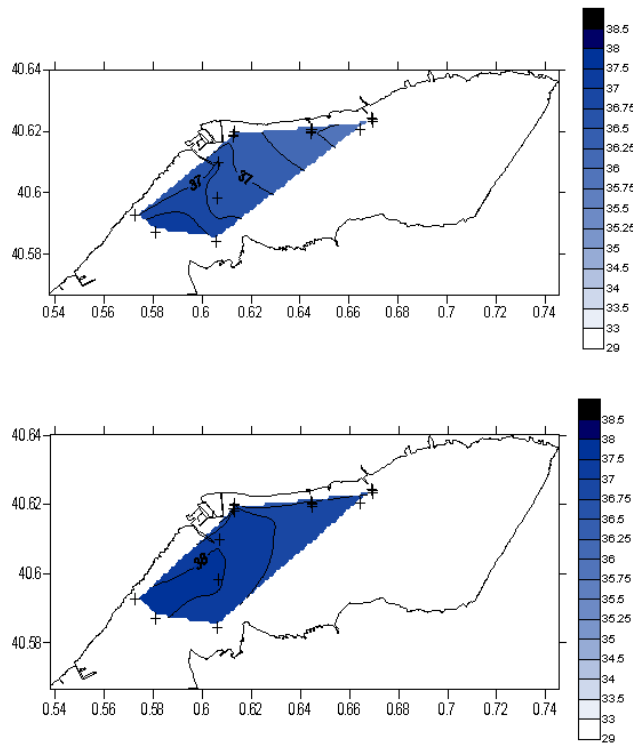


Transecto muelle

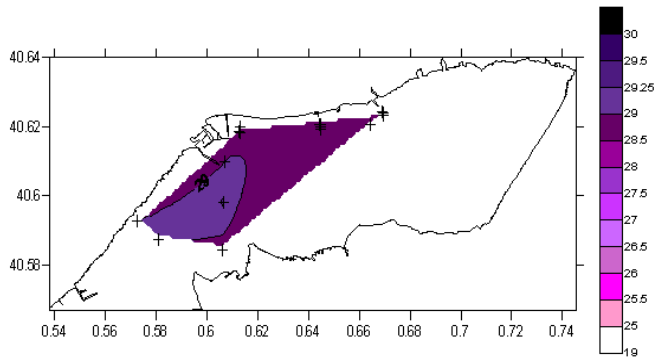
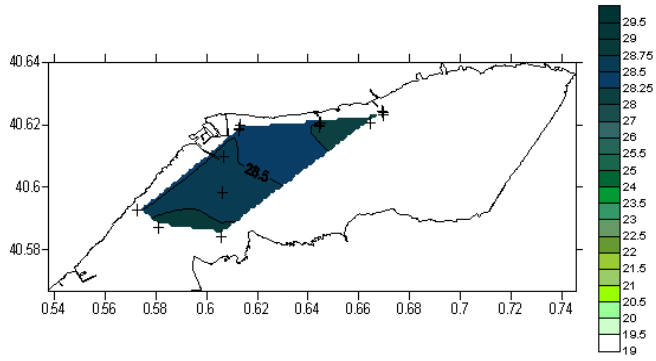


25/02/2005 – Perfiles horizontales de la bahía

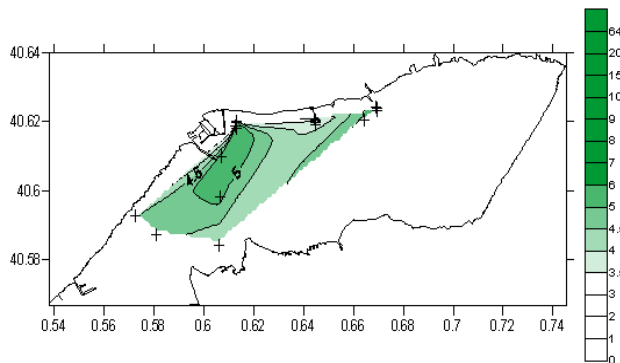
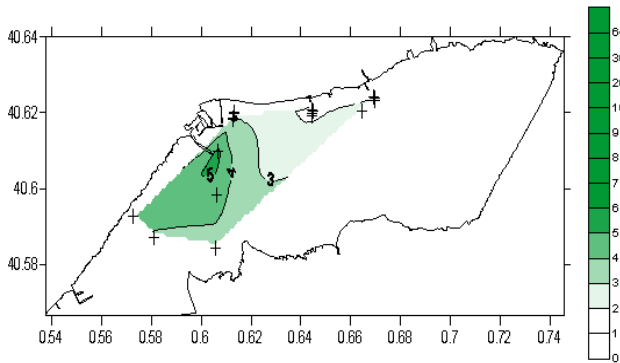
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



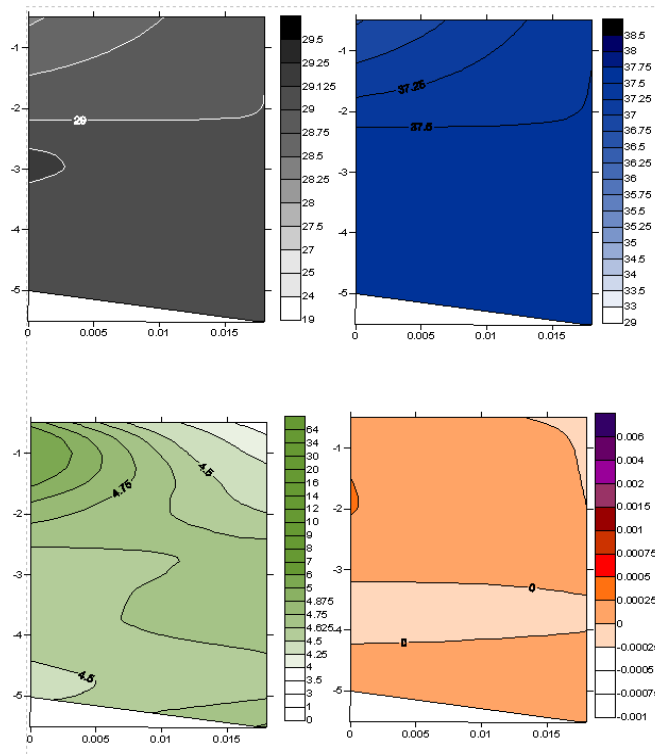
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



25/02/2005 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

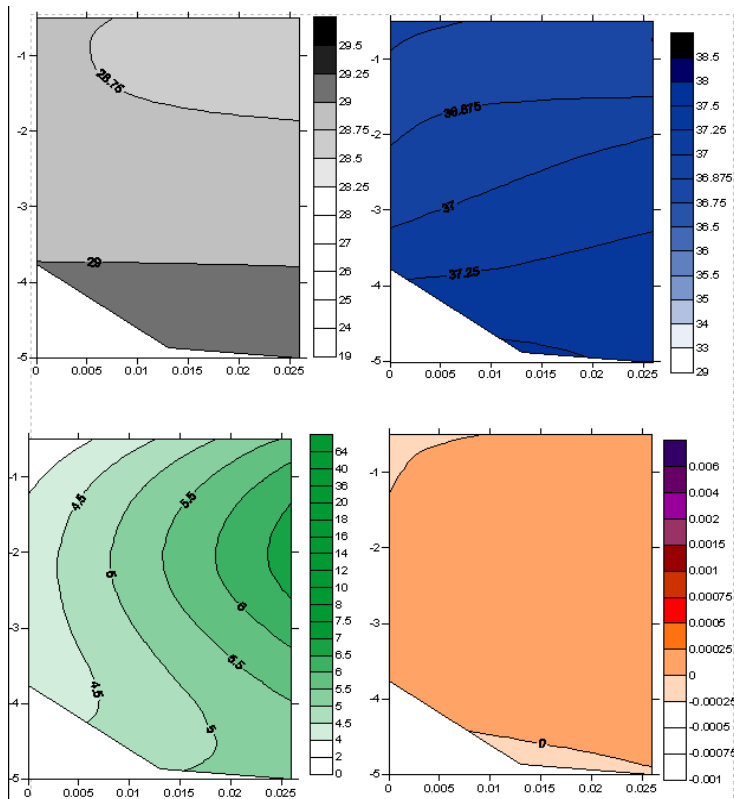
De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

Transecto boca



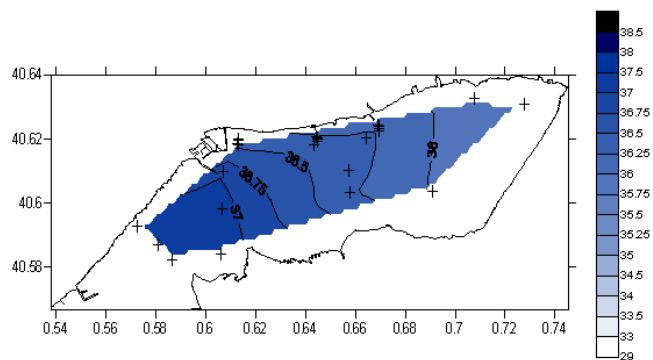
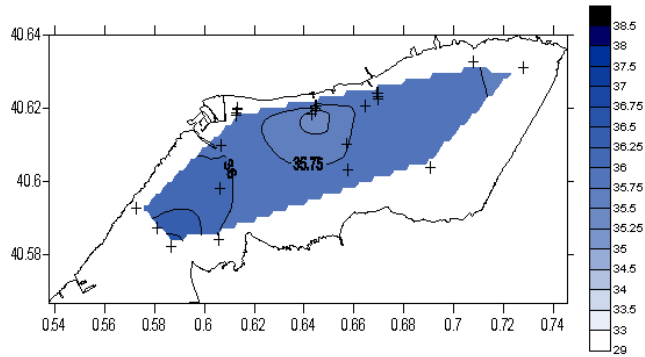
Transecto central – No hay datos para este día

Transecto muelle

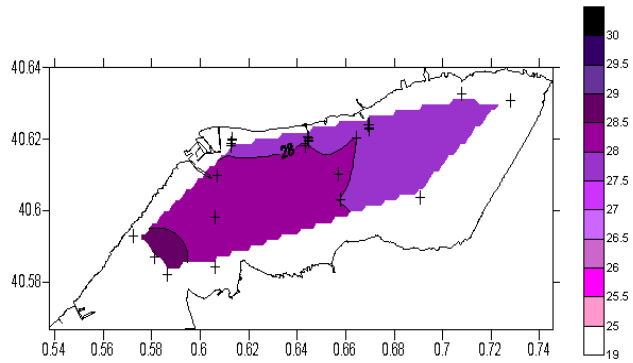
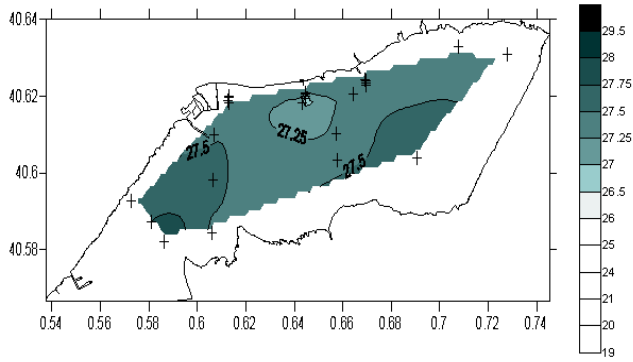


16/03/2005 – Perfiles horizontales de la bahía

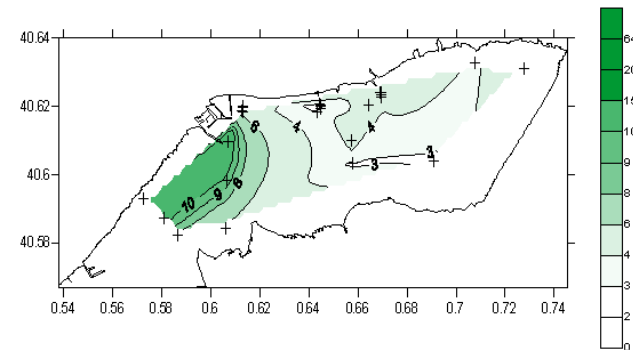
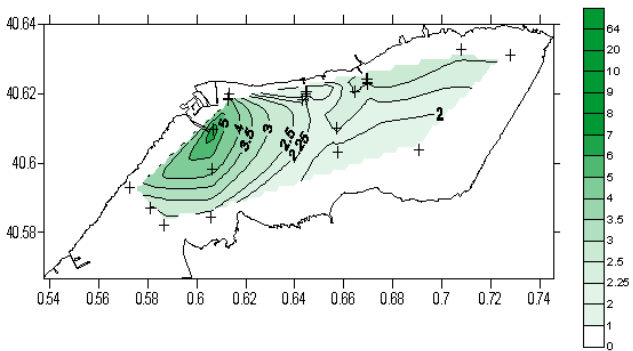
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



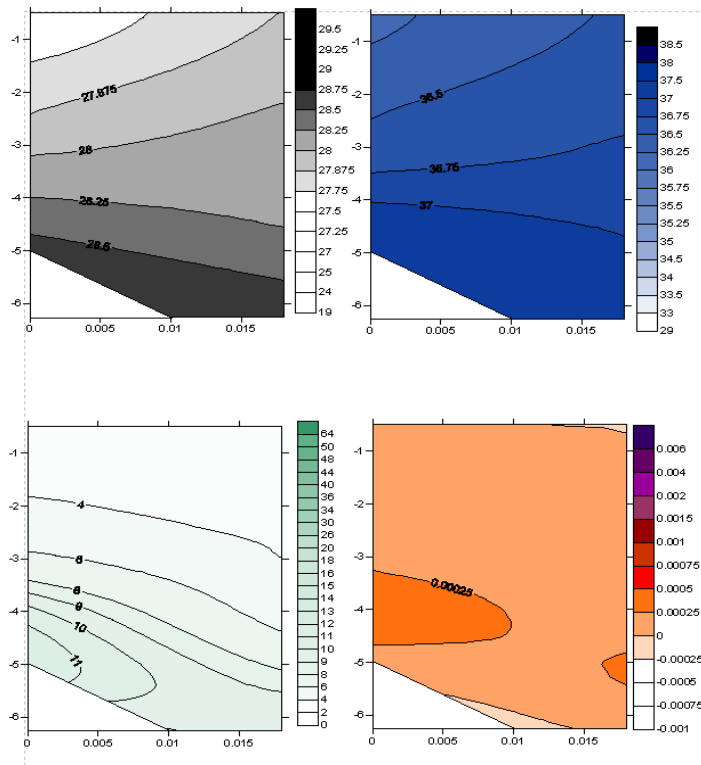
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



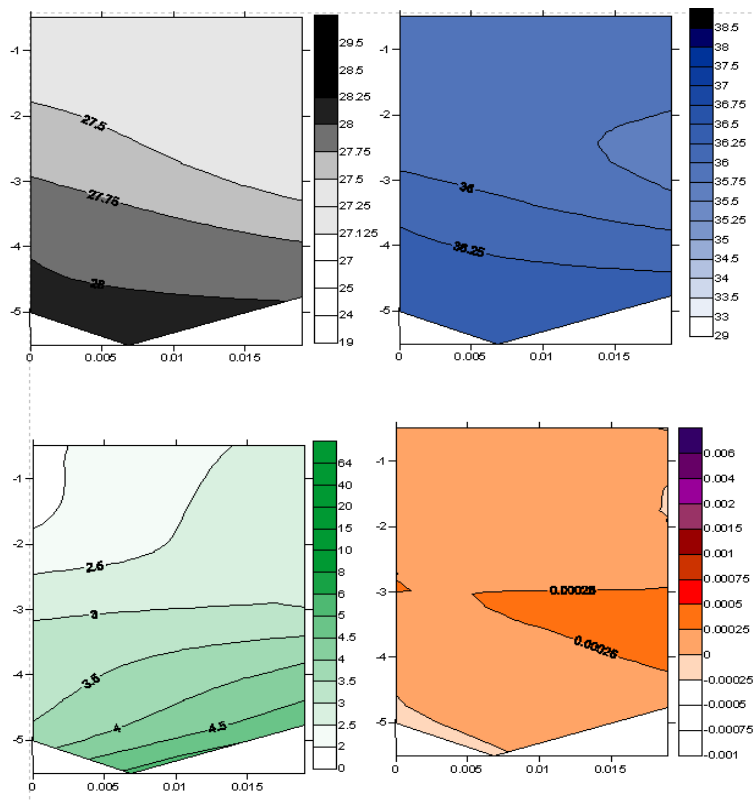
16/03/2005 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

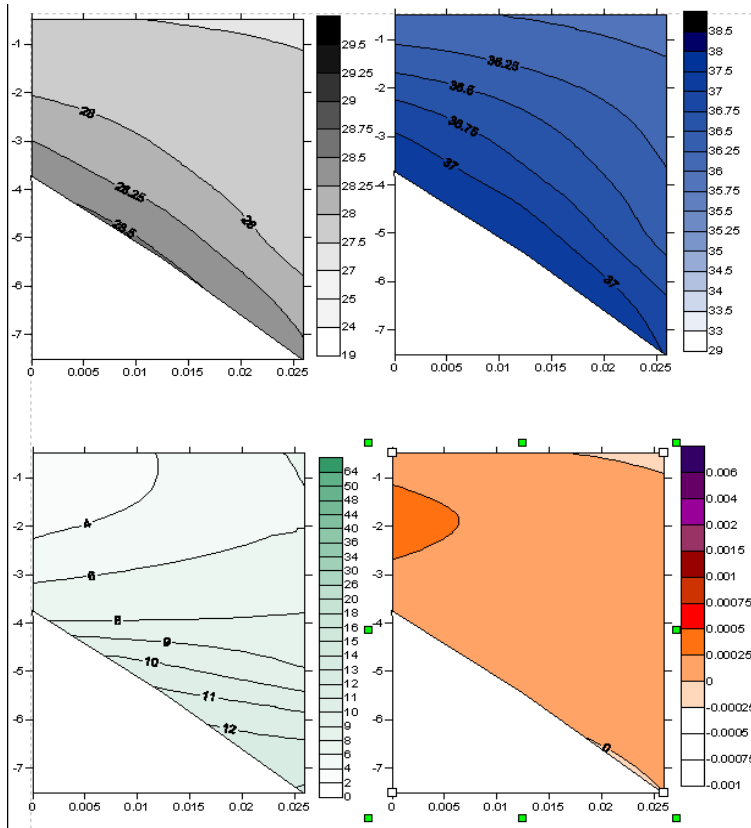
Transecto boca



Transecto central

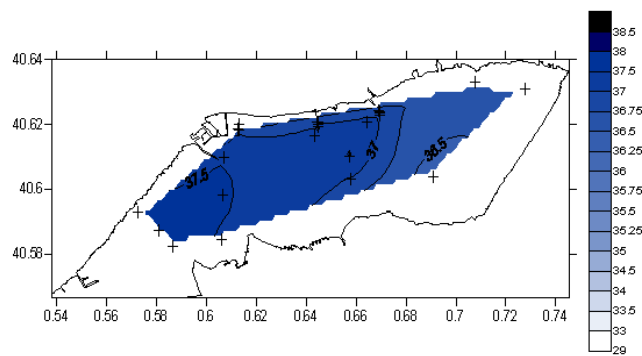
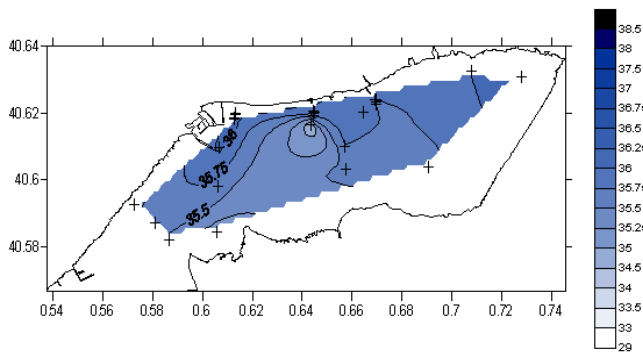


Transecto muelle

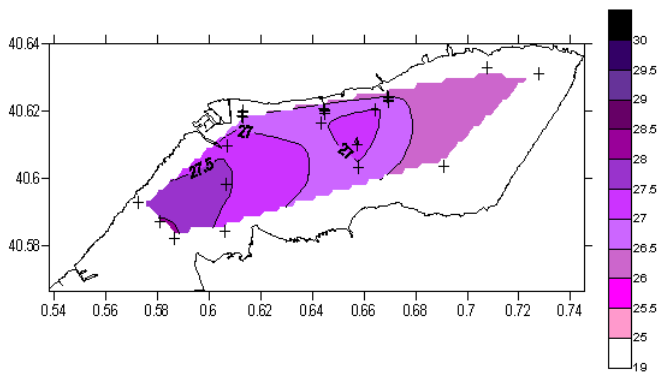
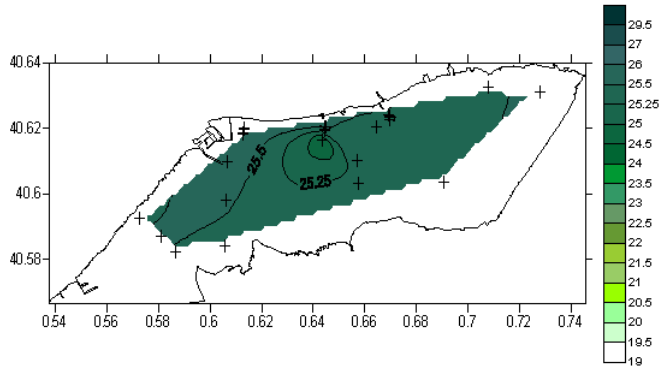


29/04/2005 – Perfiles horizontales de la bahía

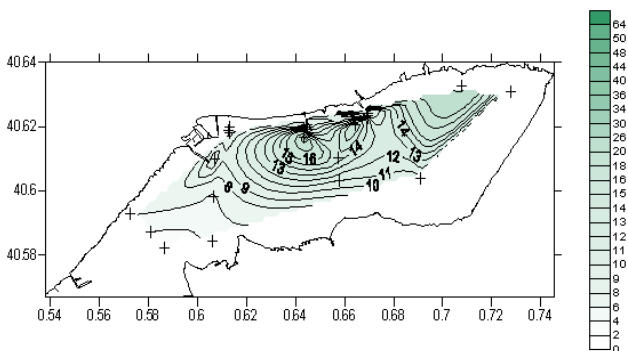
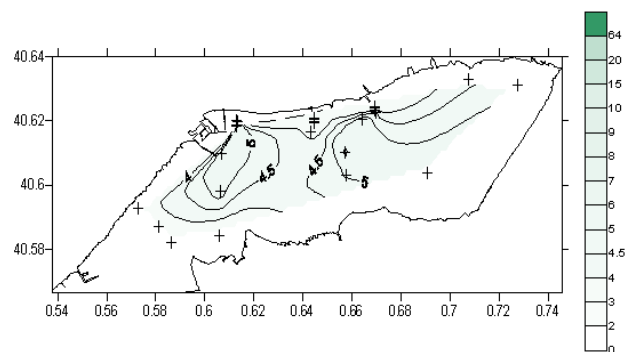
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



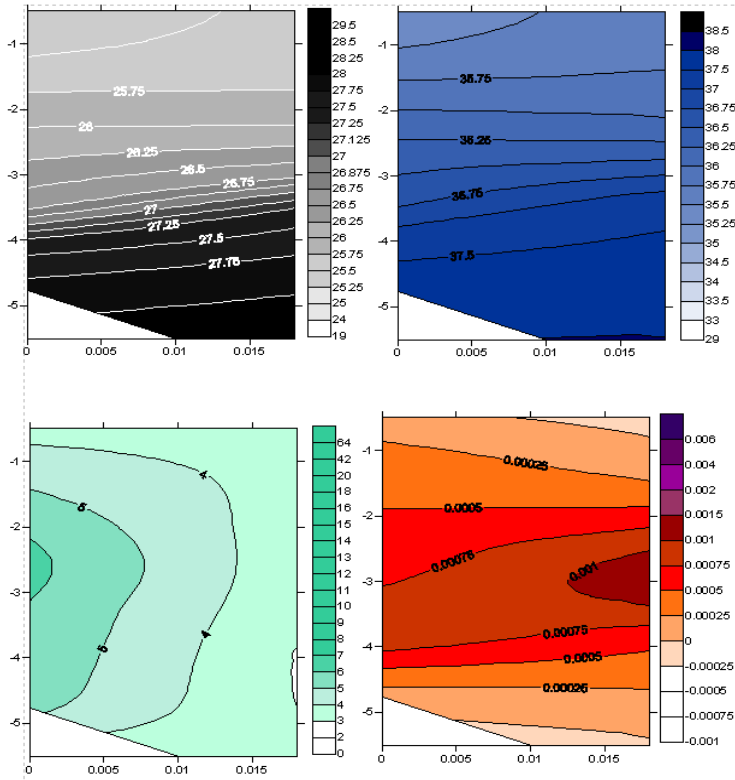
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



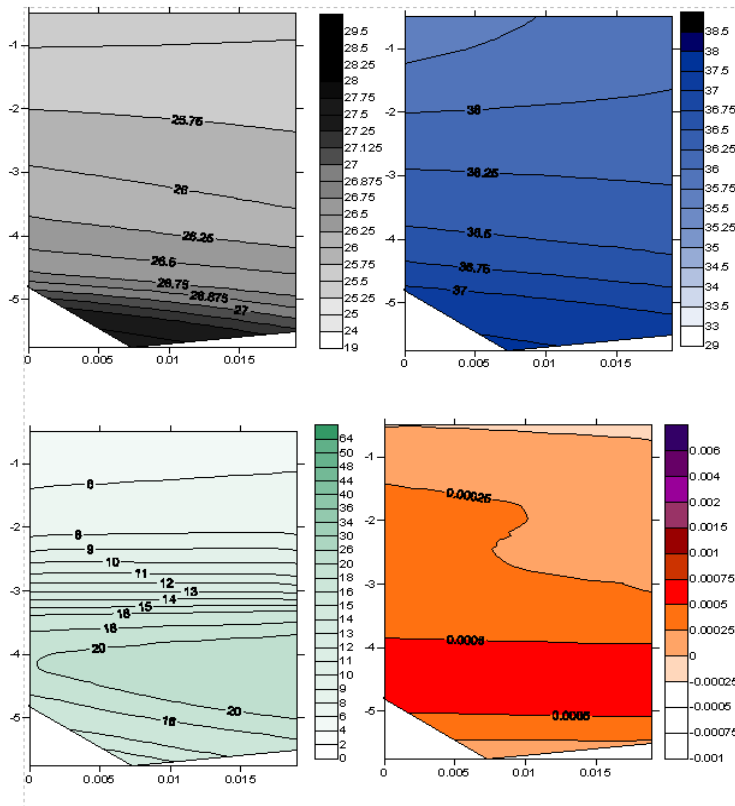
29/04/2005 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

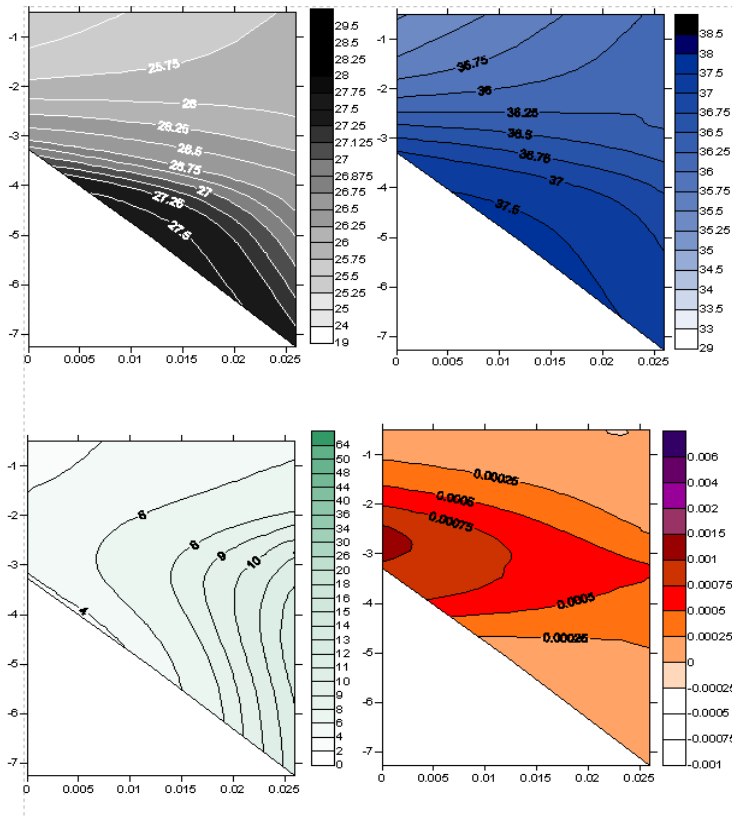
Transecto boca



Transecto central

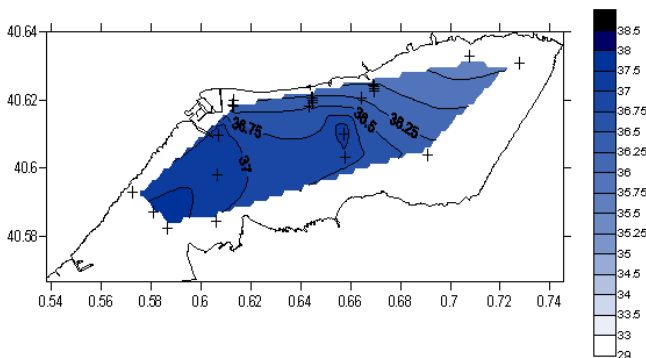
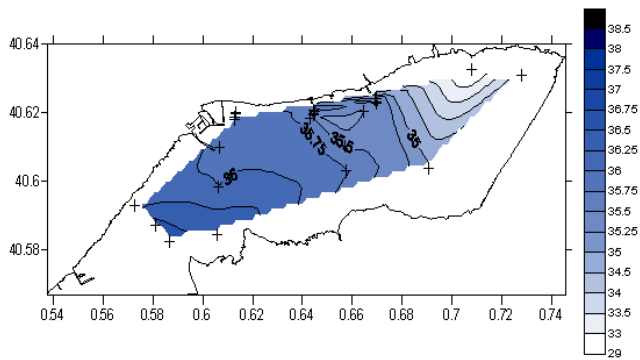


Transecto muelle

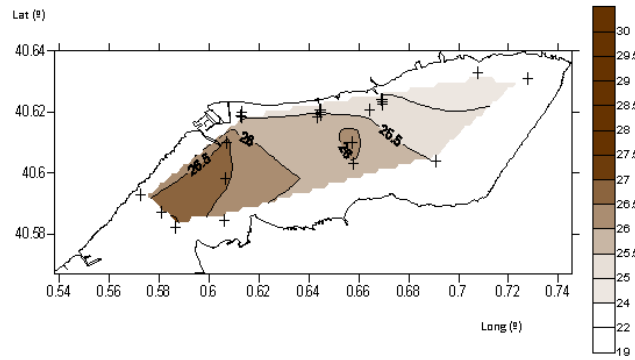
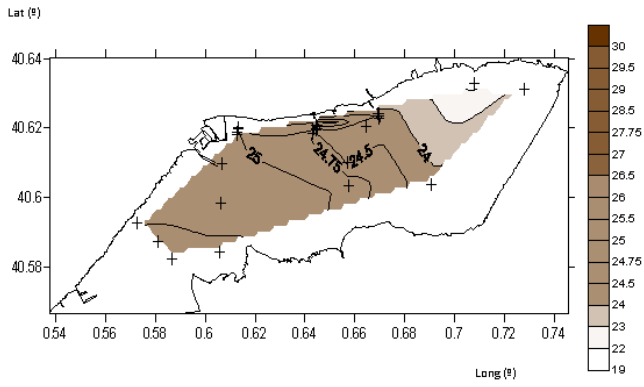


25/05/2005 – Perfiles horizontales de la bahía

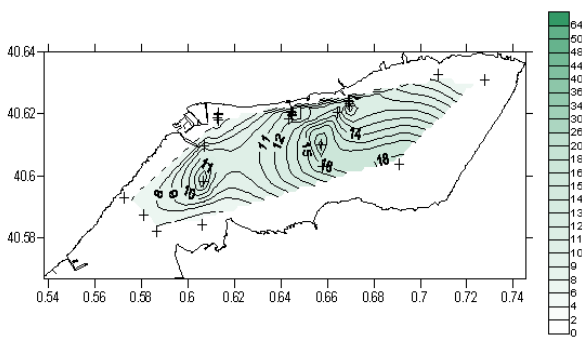
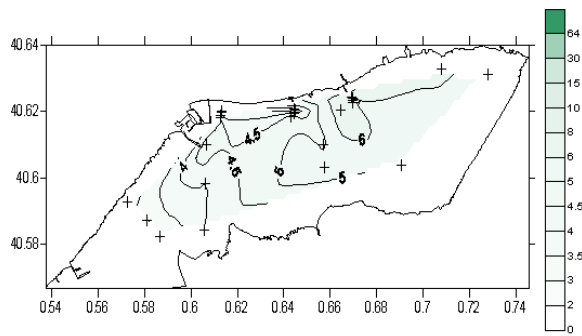
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



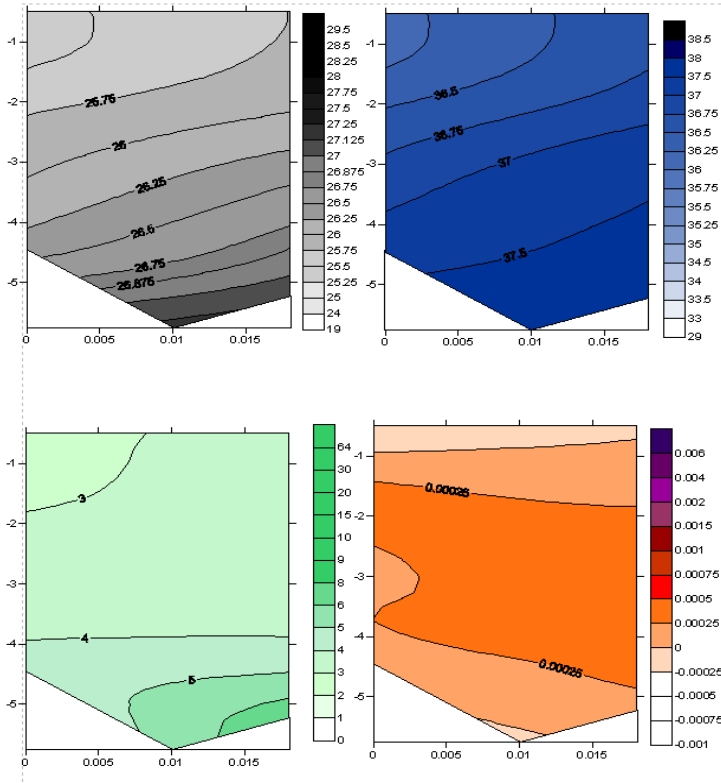
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



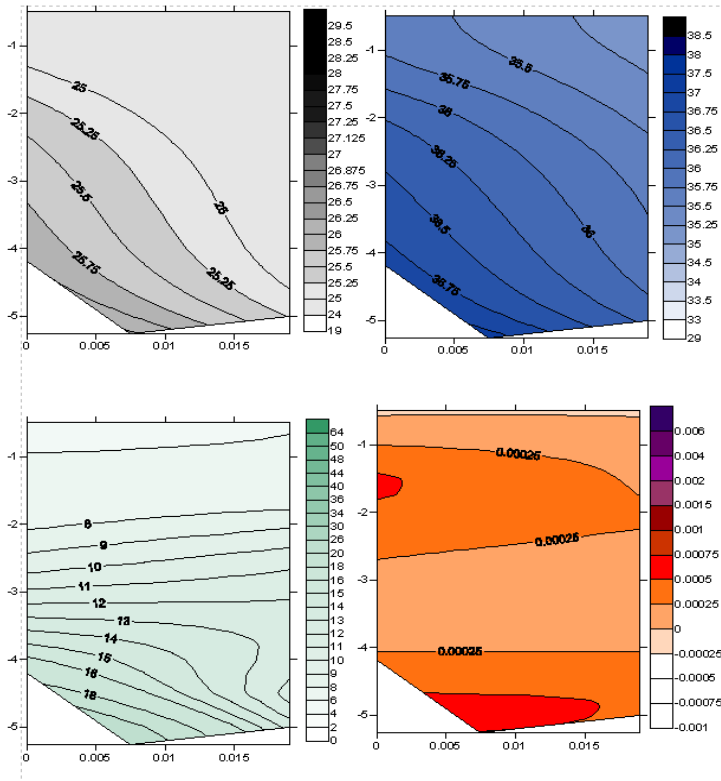
25/05/2005 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

Transecto boca

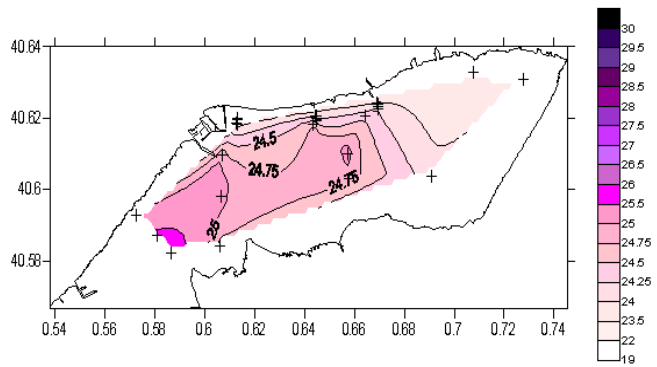
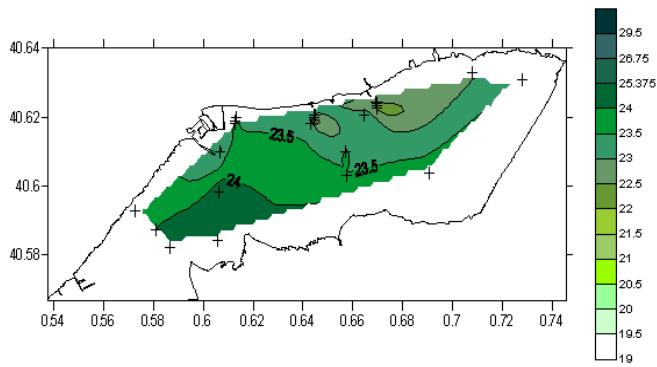


Transecto central

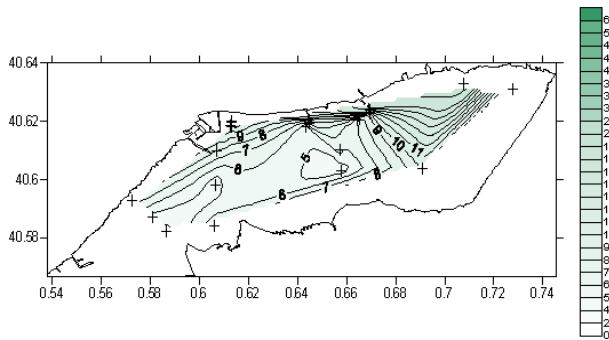
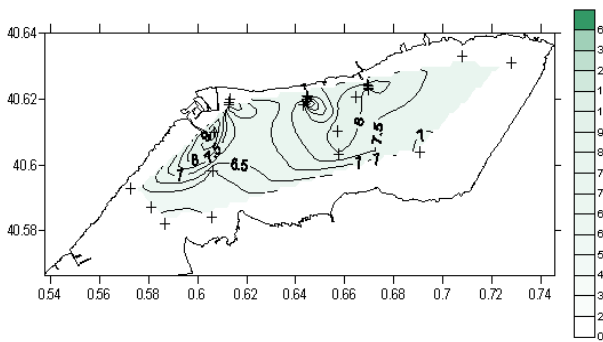


Transecto muelle

Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



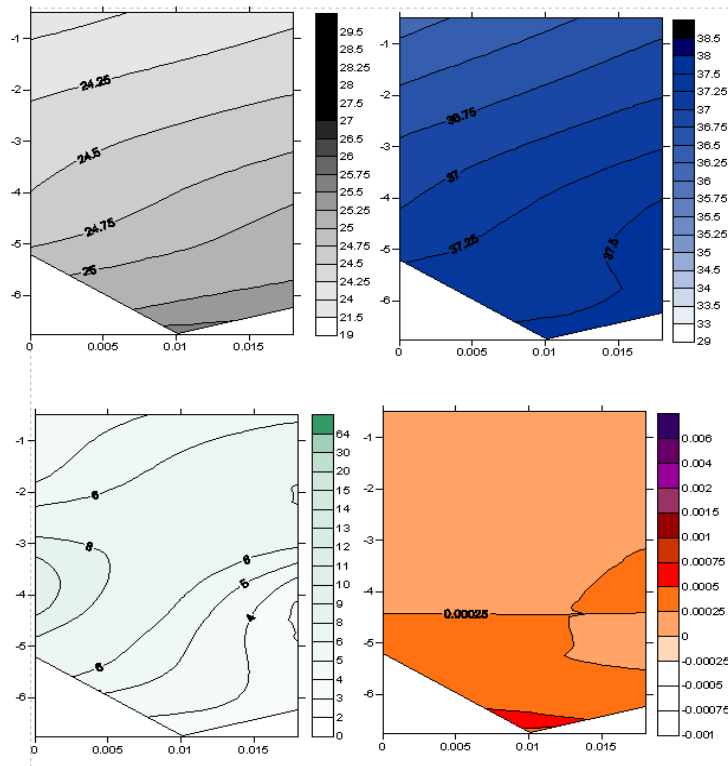
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



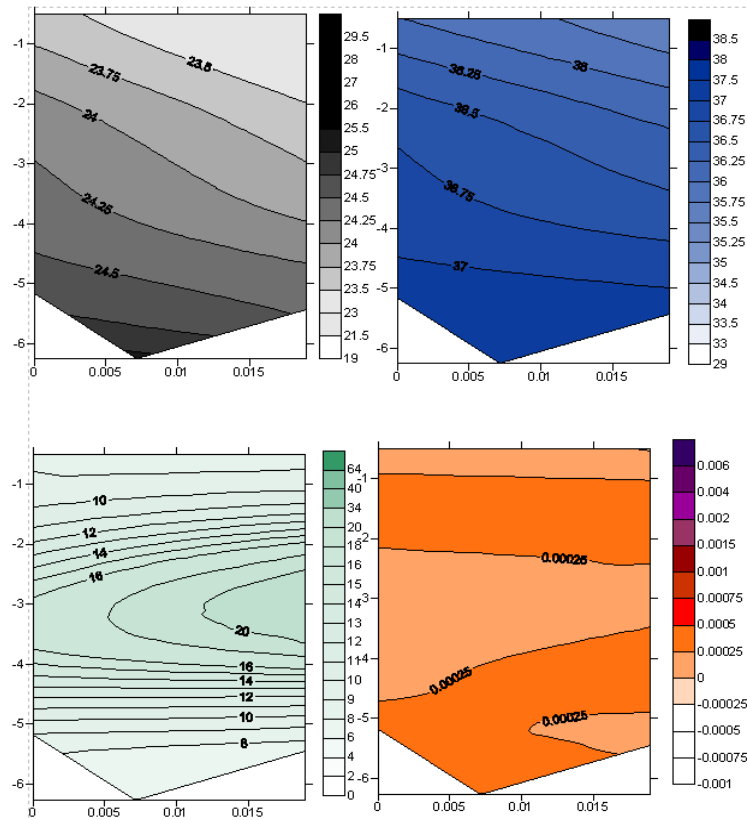
06/07/2005 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

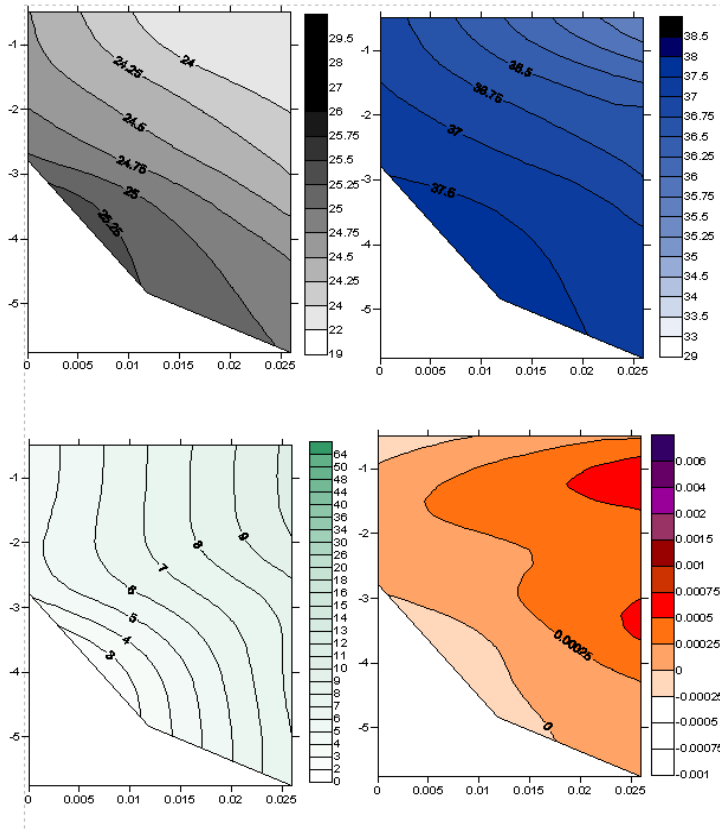
Transecto boca



Transecto central

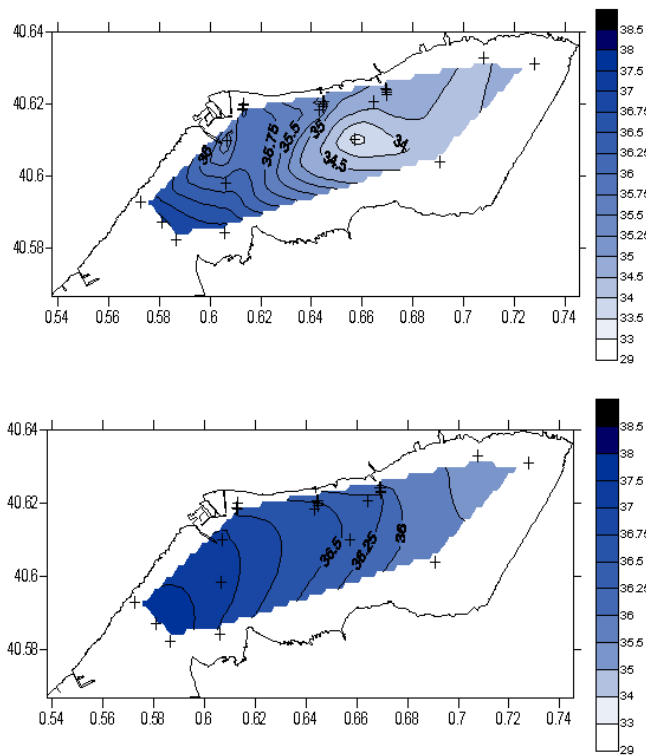


Transecto muelle

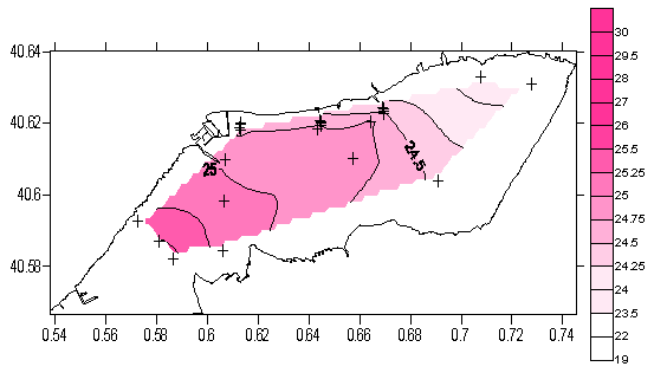
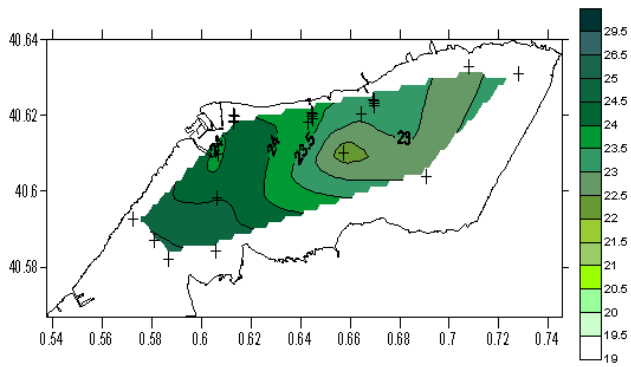


25/08/2005 – Perfiles horizontales de la bahía

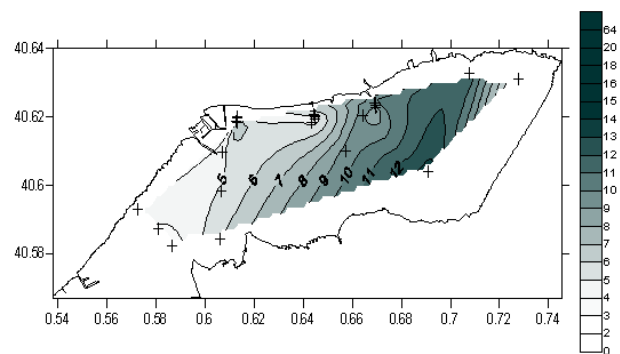
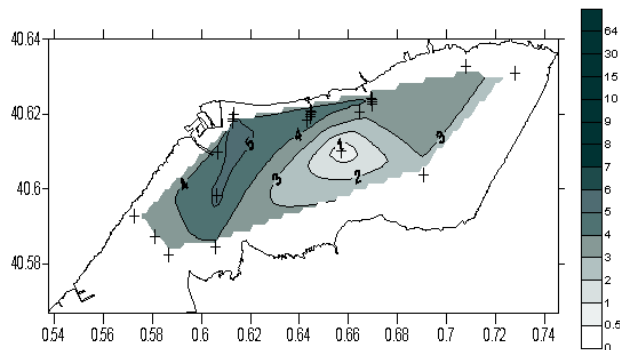
Salinidad superficie (superior) y fondo (inferior)



Densidad superficie (superior) y fondo (inferior)



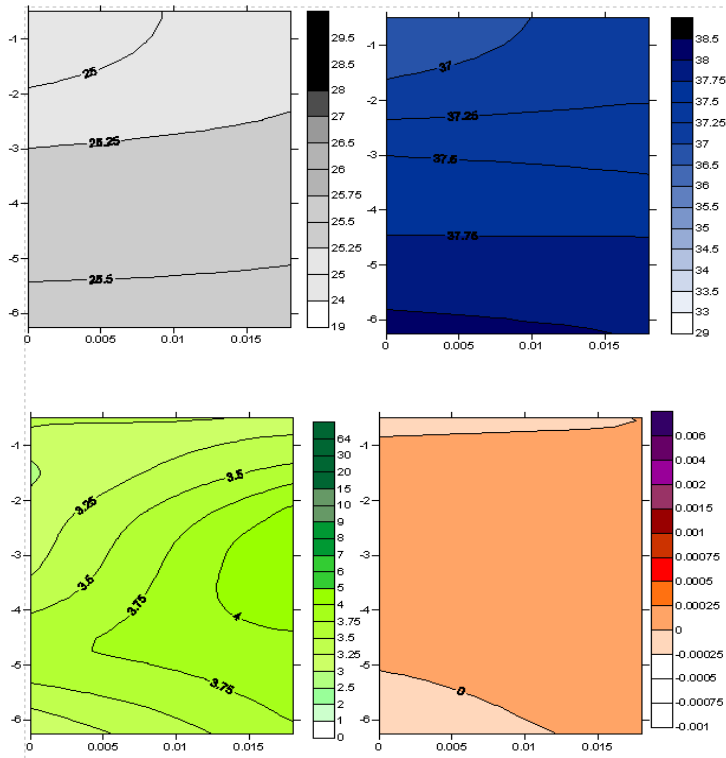
Clorofila superficie (superior) y fondo (inferior)



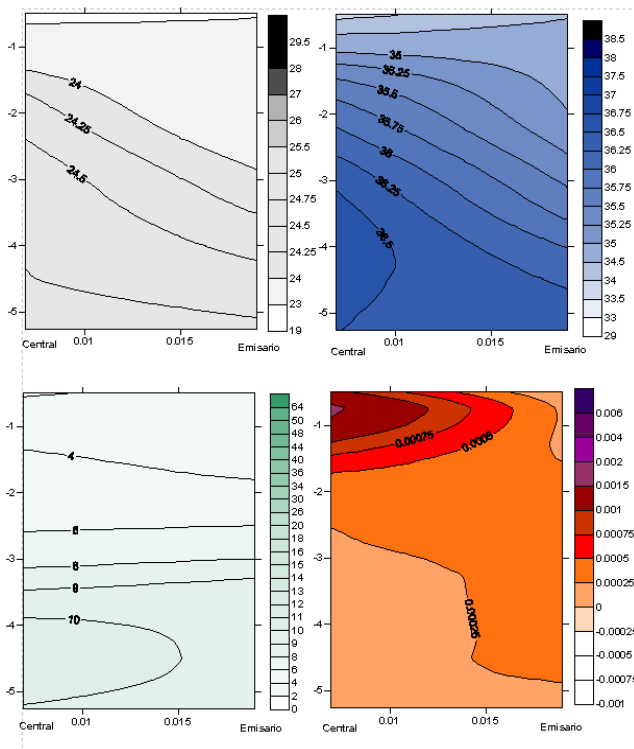
25/08/2005 - Perfiles verticales de los diferentes transectos de la bahía

De izquierda a derecha y de arriba abajo: densidad sigma-t [kg/m^3], salinidad [PSU], clorofila [mg/m^3], estabilidad [rad^2/s]

Transecto boca

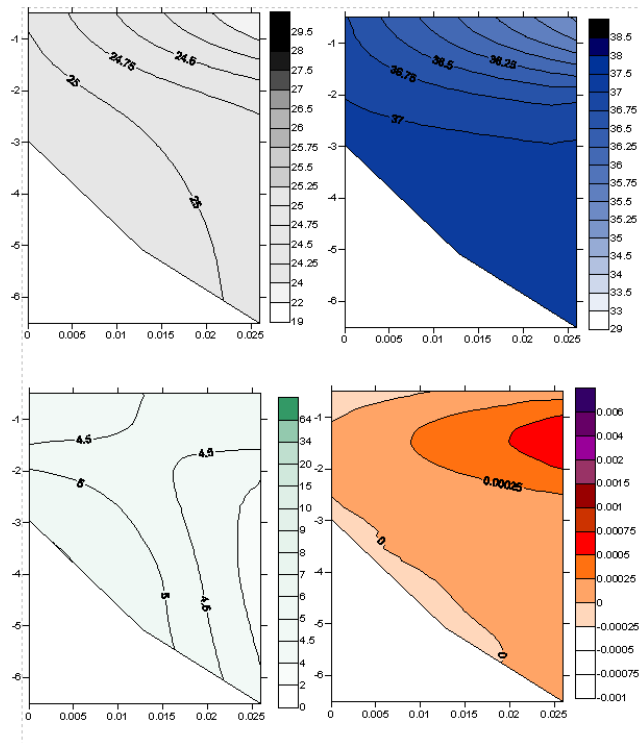


Transecto central



No hay datos de "Trabucador" para este día

Transecto muelle



10. ANEXO 4

Código de programación en R para detectar la picroclina en cada uno de los perfiles

```
setwd("C:/Documents and Settings/cguallar/Escritorio/Joana") #Carpeta con los datos

#Leer los datos de los perfiles

dades <- read.table("Excel final coord. uniformizadasR.csv", sep=";", header=T) #Nombre del archivo con los
datos de las estaciones

dades$Fecha <- as.Date(dades$Fecha,"%d/%m/%Y")

#Para saber el número de filas de cada estación y poder definir las estaciones

j <- 2

# Defino las variables y los archivos que voy a crear

absolut <- NULL
taulabs <- NULL
maxims <- NULL
densitat <- NULL
profunditat <- NULL
data <- NULL
taula <- NULL
estacio <- NULL
index <- NULL

for (i in 2:nrow(dades)){

  if (is.na(dades$Nombre.estación[i])==FALSE){

    if (dades$Nombre.estación[i]=="inici") { #Separo los diferentes perfiles que hay en el archivo.
      Cada perfil empieza con la palabra "inici"

      taula <- dades[j:(i-1),c(9,33,41)]

      absolut<- abs(taula[,3])

      taulabs <- taula

      taulabs[,3] <- absolut

      index<- which(taulabs[,3]==max(taulabs[,3],na.rm=T))[1] # Selecciona el
      máximo gradiente de densidad en cada perfil

      maxims<- c(maxims,taula[index,3])

      profunditat <- c(profunditat,taula[index,1])

      densitat <- c(densitat,taula[index,2])

      data <- c(data,dades$Fecha[i-1])

      estacio <- c(estacio,as.character(dades$Nombre.estación[i-1]))

      j<- i+1 }else{ next } }}}
```

```
tauladef <- cbind(estacio,data,profunditat,densitat,maxims) #Junto todos los datos en una tabla

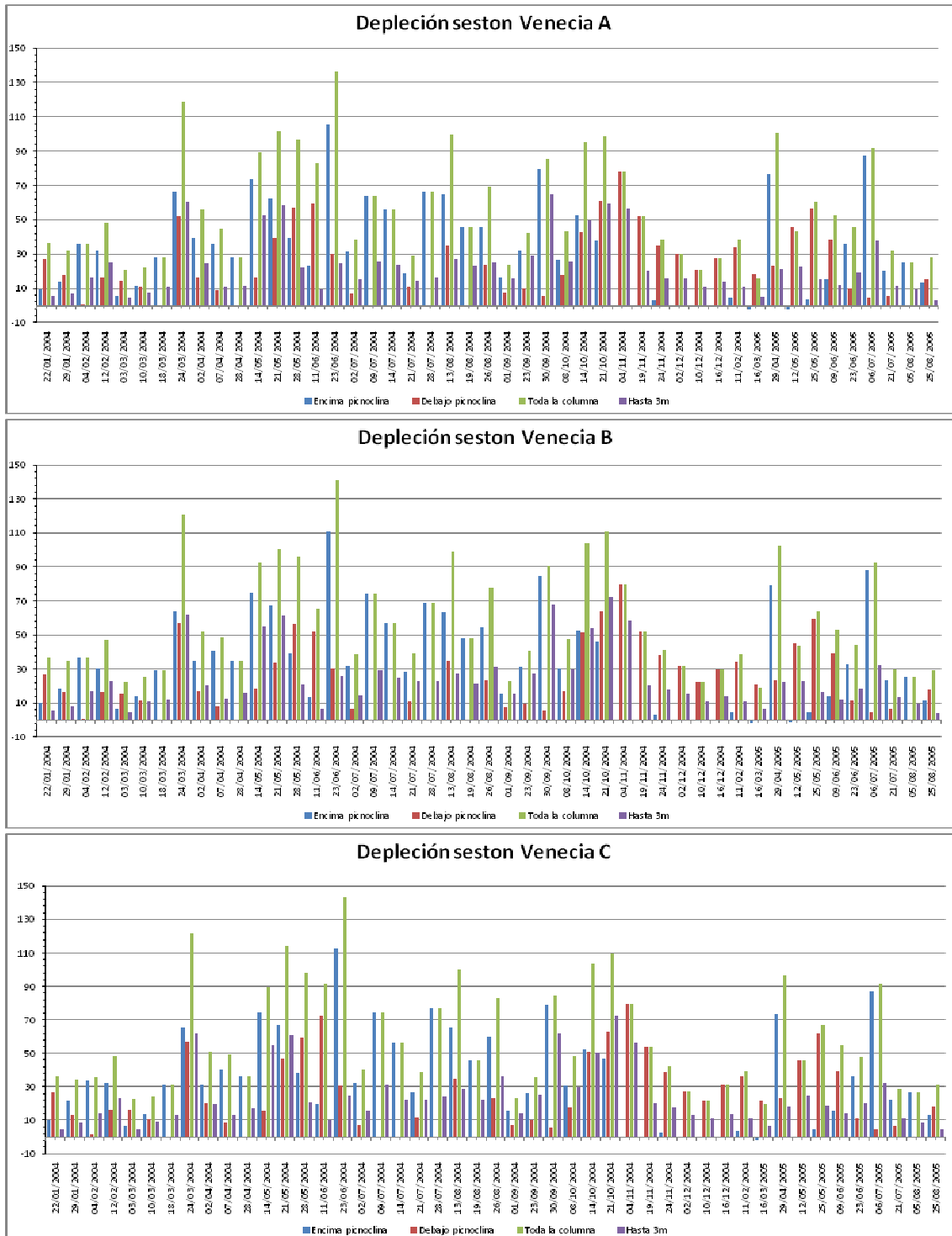
taulafinal <- as.data.frame(tauladef)

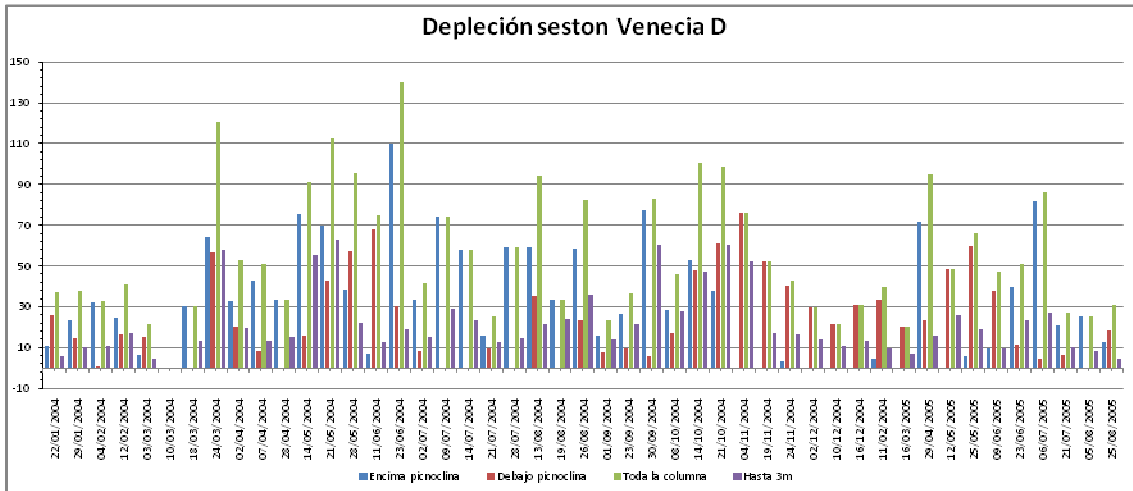
taulafinal$data <- as.Date(data , origin="1970-01-01")

write.table(taulafinal,file="Maxims.csv",sep=";",row.names=FALSE) #,col.names=NA) #Creo un archivo con la
tabla que se ha generado
```

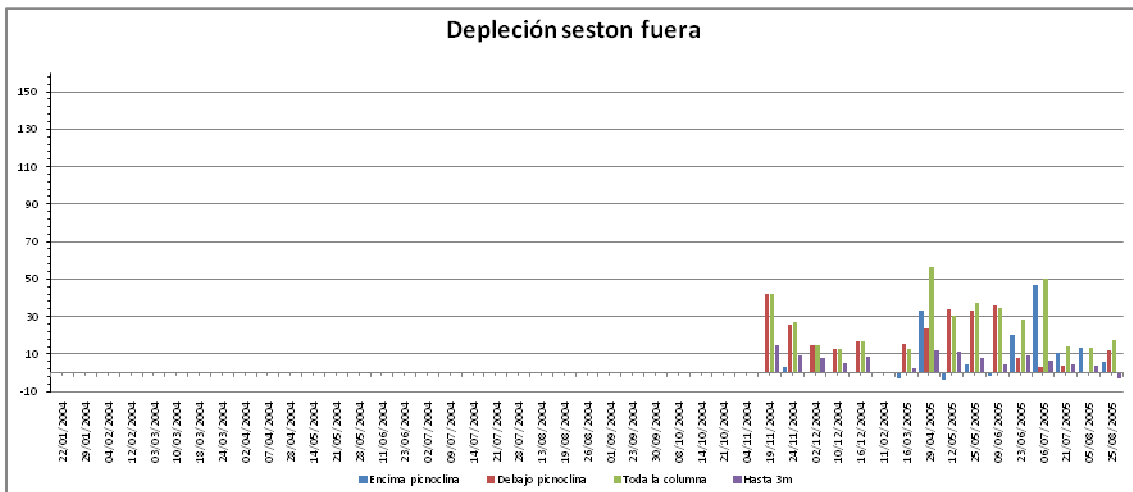
11. ANEXO 5

A continuación se muestran los gráficos de depleción del seston en algunos conjuntos de viveros de la bahía, de manera que se ve que son similares a los de la depleción de la clorofila (ver página 48 del texto).





Gráfica 6.1: depleción del sestion en el conjunto de viveros Venecia (código 16-19).



Gráfica 6.2: depleción del sestion en el punto fuera (código 26), externo a los viveros Venecia.