

# Capítulo 1

# INTRODUCCIÓN.

Portada

Menú rápido

*Para decirlo de una manera más simple, había decidido de pronto que no debía permitirse que tanto esfuerzo, tanta dedicación a una tarea tan importante se perdieran solo por culpa de un pequeño grupo de tontos perdidos en ensoñaciones.* -Chybee al darse cuenta de su propia misión en el crisol del tiempo (Bruner, 1995).

La dinámica de los procesos físicos influyen la vida fitoplanctónica en una gran variedad de formas, pero sólo un grupo de parámetros físicos básicos afectan a estos procesos de forma clara. Los parámetros más importantes son la temperatura, la luz y la turbulencia. Los primeros dos son relativamente fácil de medir y de controlar en simulaciones experimentales. Sin embargo la turbulencia es difícil de medir e interpretar, particularmente en experimentos de campo, y sólo recientemente se han desarrollado sensores fiables para hacer medidas de alta resolución necesarias para cuantificar la turbulencia. Muchos aspectos de los efectos de la turbulencia sobre el fitopláncton aún están insuficientemente explorados. Lazier y Mann (1989) dan una visión introductoria de la turbulencia desde una perspectiva ecológica, recientemente Marrasé et al. (1990) muestran como los enfoques físicos y biológicos se complementan.

Tradicionalmente los efectos negativos de la turbulencia fueron el foco de los estudios en la investigación ictioplanctónica, prestando especial atención en como la turbulencia por mezcla vertical, rompía las altas concentraciones de comida que se distribuían de forma intermitente (zonación en parches o *patchines*) tanto en el espacio como en el tiempo; lo que se suponía que implicaba un decrecimiento en la alimentación y supervivencia de las larvas de pez. Los efectos de la turbulencia sin embargo son bastante más complicados y afectan la dinámica planctónica de diferentes maneras, tanto con efectos positivos en la producción como produciendo efectos negativos. Cury y Roy (1989) estudiando la adición de peces juveniles a la población (reclutamiento) de peces pelágicos en las áreas de surgencia o *upwelling*, encontraron que existía una velocidad de viento óptima para el reclutamiento de peces; sugiriendo que estos efectos estaban causados en parte por los vientos que inducen la surgencia y el aumento de la producción planctónica asociada a la mezcla vertical y por otra al efecto negativo de mezcla turbulenta horizontal

en detrimento de la alimentación larval. Estudios en laboratorio y campo de la alimentación de los copépodos, indican que la turbulencia puede tener múltiples efectos en la alimentación del zoopláncton (Alcaráz et al. 1988; Saiz y Alcaráz 1992). Por esta razón las variables turbulentas estimadas de forma global a partir de fluidos medios (*proxi turbulence*) deben ser usadas con mucho cuidado. Las investigaciones de respuestas biológicas a efectos de la turbulencia deberían preferiblemente realizarse mediante estudios de biología básica y procesos físicos (Sundby, 1997).

Después de saber cuales son los procesos biológicos que están influenciados por la turbulencia, también es importante conocer los principales procesos que ocurren en las capas superficiales del mar, como zona de producción de todas las formas planctónicas. Obviamente es la luz el recurso energético básico para la producción de biomasa, pero también son necesarios nutrientes, cuyo máximo ocurre en profundidad. Esta distribución nohomogenea de los dos requerimientos fundametales para la producción primaria, requiere de un proceso adicional que les conecte, este es el flujo vertical (turbulento) de nutrientes. Para que el flujo vertical actue sobre el fitoplancton de manera irreversible, debe producir mezcla a las escalas de Kolmogorv y Batchelor (ver §2.3).

En las capas superficiales del océano el viento transfiere energía de la atmósfera a la zona eufótica y la turbulencia es el medio más importante para transferir el momento de las grandes escalas a las pequeñas escalas. Desde un punto de vista general no debería sorprendernos que la energía turbulenta contribuya a la producción de biomasa planctónica (Gabaldón, 2001).

Existen varios aspectos importantes de cómo la turbulencia afecta el fitoplancton

1. La turbulencia influencia la distribución planctónica; esta puede ser descrita teóricamente por una difusión Fickiana, en un marco euleriano utilizando los coeficientes de intercambio turbulento o de remolino (eddy) para describir los efectos de la turbulencia. Sundby (1997) enfoca este aspecto en la distribución vertical usando como ejemplo huevos de peces; con propiedades físicas sencillas desde un punto de vista hidrodinámico y propiedades biológicas bien descritas.
2. La turbulencia influencia los rangos de encuentro entre las partículas fitoplanctónicas individuales, por ejemplo predador y presa; siendo este más conveniente de describir en un marco lagrangiano con medidas directas de las velocidades turbulentas. Los rangos de encuentro entre partículas planctónicas, pueden ser ilustrados por investigaciones donde larvas de bacalao que se alimentan de nauplios de copépodo, son influenciados por interacción de las partículas inducidas por turbulencia.
3. La turbulencia produce el transporte vertical de nutrientes hasta la zona eufótica.

4. La estructura de la turbulencia a pequeña escala puede afectar el transporte difusivo molecular a las escalas del fitopláncton.
5. La turbulencia también afecta las condiciones de mezcla horizontal cuando el aporte de nutrientes se origina por ejemplo en la zona costera; donde puede presentarse el caso paradójico (Linden y Simpson (1976), Simpson (1987)) en el que a mayor turbulencia existe un menor flujo horizontal.

Estos y otros aspectos de la interacción altamente no-lineal de la turbulencia y el ecosistema marino, ha sido descrita en Marrasé et al. (1990), Peters y Redondo (1997), Gabaldón (2001).

Dado que las aguas costeras adyacentes a desembocaduras de ríos y lagunas costeras son ecosistemas ricos en biomasa, una mejor comprensión de los procesos que desarrollan la productividad orgánica primaria en las zonas costeras productivas, nos conducirá a un mejor entendimiento de la cadena trófica de la zona y a un mejor uso de los recursos que la componen.

## 1.1 OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN.

*Un reto es una apuesta personal que todo Mortal debería estar dispuesto a realizar. Son los intrépidos quienes miran los retos en el horizonte y van a por ellos.*  
-Barcelona, 13 de junio de 2001.

Se planearon campañas de muestreo durante un ciclo anual con el fin de analizar y describir el comportamiento de la mezcla y la dinámica sobre organismos fitoplanctónicos dentro del estuario del delta del Ebro; de lo que se derivaron las campañas de *Cytmar y Pionner*.

Adicionalmente se desarrollaron experimentos específicos con la finalidad de analizar el comportamiento de la pluma en la zona del delta. Estos se desarrollan en sistemas turbulentos estratificados y bajo rotación.

Con el fin de establecer algunos de los componentes hidrodinámicos claves para el desarrollo de este proyecto, este trabajo de tesis se plantea los siguientes:

### Objetivos generales.

1. **Analizar la dinámica de la mezcla en un ambiente estuarino, donde la interface de densidades ocurre bajo diferentes condiciones hidrodinámicas.**
2. **Establecer las relaciones que comparten entre si los valores hidrodinámicos determinantes de la mezcla en el ámbito de la interface y las especies claramente nativas de los ambientes de agua dulce y de mar.**
3. **Determinar al área de impacto y las longitudes características de la pluma a nivel de mesoescala en el mar Mediterraneo adyacente, de acuerdo a diferentes condiciones de caudal local de descarga del río Ebro.**

### **Objetivos particulares.**

#### **1. Analizar la dinámica de la mezcla en un ambiente estuarino, donde la interface de densidades ocurre bajo diferentes condiciones hidrodinámicas.**

- 1.1 Establecer las condiciones tipo que se encuentran presentes en el estuario del delta del Ebro.
- 1.2 Determinar los valores de las variables de acuerdo a los caudales de las diferentes capas que intervienen en la mezcla a lo largo del estuario.
- 1.3 Establecer los valores y los rangos de los principales parámetros hidrodinámicos que controlan la mezcla en el estuario.
- 1.4 Determinar la distancia de penetración de la cuña respecto de las densidades superficiales.

#### **2. Establecer las relaciones que comparten entre sí los valores hidrodinámicos determinantes de la mezcla en el ámbito de la interface y las especies claramente nativas de los ambientes de agua dulce y de mar.**

- 2.1 Cuantificar la presencia de organismos nativos de ambientes de río y mar dentro del estuario.
- 2.2 Relacionar su presencia en la columna de agua de acuerdo a las características hidrodinámicas de las misma.

#### **3. Determinar al área de impacto y las longitudes características de la pluma a nivel de mesoescala en el mar Mediterraneo adyacente, de acuerdo a diferentes condiciones de caudal local de descarga del río Ebro.**

- 3.1 Calcular el área de impacto de la pluma bajo las diferentes caudales estacionales medidos.
- 3.2 Comparar los resultados para los diferentes escenarios experimentales de laboratorio, con las observaciones experimentales de campo, experimentaciones numéricas y observaciones remotas.

### **Motivaciones.**

Dada la variedad existente en un ecosistema estuarino, es imprescindible conocer la dinámica a la que se encuentran sometidos los organismos en este, ya que en un medio estratificado como es un estuario esta claro que la disponibilidad de nutrientes para los organismos planctónicos productores primarios en el agua, será proporcional a la mezcla entre las diferentes capas que se encuentran en contacto dada la limitada capacidad de movimiento autónomo por parte de algunas especies. Respecto al valor biológico que un ambiente de este tipo puede tener sobre las zonas cercanas Carrillo (1994) destaca el uso de estas áreas como zonas de refugio, alimentación, reproducción y crecimiento por la comunidad de peces

costeros para su desarrollo. También diversos estudios muestran el ambiente estuarino como un sistema rico en nutrientes y una variedad biológica que tiene una incidencia positiva sobre la productividad de la zona costera adyacente.

La importancia que tienen los aspectos biológicos en un sistema tan complejo como el ambiente estuarino no implica que sean los únicos presentes, ya que existen otros como puede ser la salinización del agua superficial del río a lo largo del estuario. El uso de una herramienta sencilla de utilizar como la evaluación de la distancia a la cual puede estar presente la cuña salina aguas arriba del río a partir de las salinidades de la columna de agua incluyendo las de la desembocadura bajo condiciones de bajo caudal que permita la penetración estable de una cuña salina; resultaría de vital importancia en un hipotético uso del agua del río aguas abajo de la población de Amposta para usos diversos como pueden ser de riego o domésticos e incluso el uso del agua antes de entrar en el área de estudio.

## 1.2 ÁREA DE ESTUDIO.

### 1.2.1 El delta del Ebro.

El río Ebro es el mayor río de España; sus últimos 30 kilómetros antes de llegar al mar Mediterráneo discurren por una planicie deltaica muy suave formada gracias a la deposición de material puesto en suspensión por el río, donde las aguas son de diferentes características a las presentes aguas arriba. Estas características han sido modificadas de forma importante en el presente siglo fundamentalmente debido, a la puesta en servicio de numerosos embalses en toda la cuenca y en particular los de Mequinenza y Riba-roja.

El área de estudio de este trabajo es el delta que forma este río al desembocar en el Mar Mediterráneo, y se localiza entre 40°40' Norte y 00°40' Este (figura 1.1).

La descarga media anual ha decrecido en los últimos cien años de  $592 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a  $424 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  como resultado del uso intensivo del agua en la cuenca (Ibáñez et al. 1996, 1997). El delta del Río Ebro está clasificado según Pritchard, (1955) (en Guillen (1992)) como un río de tipo II ya que posee una cuña salina, que presenta una fuerte y marcada interface *haloclina* debido a su bajo régimen de mareas, y su circulación principalmente es afectada por las descargas del río.

### 1.2.2 Aspectos generales.

La Confederación Hidrográfica del Ebro (CHEBRO, 2000) reporta que para el río Ebro existe una cuenca con una superficie de  $85.001 \text{ km}^2$ , de la cual en territorio español hay  $84.051 \text{ km}^2$ . El cauce principal tiene una longitud de  $910.5 \text{ km}$ . Aproximadamente los últimos  $32 \text{ km}$  de río discurren por la planura deltaica. Las características deltaicas del río se inician  $11 \text{ km}$  aguas abajo de Tortosa (Verdaguer et al., 1985). Entre Amposta y la desembocadura, el río Ebro tiene normalmente un ancho medio de  $237 \text{ metros}$  con una desviación estándar de  $58$

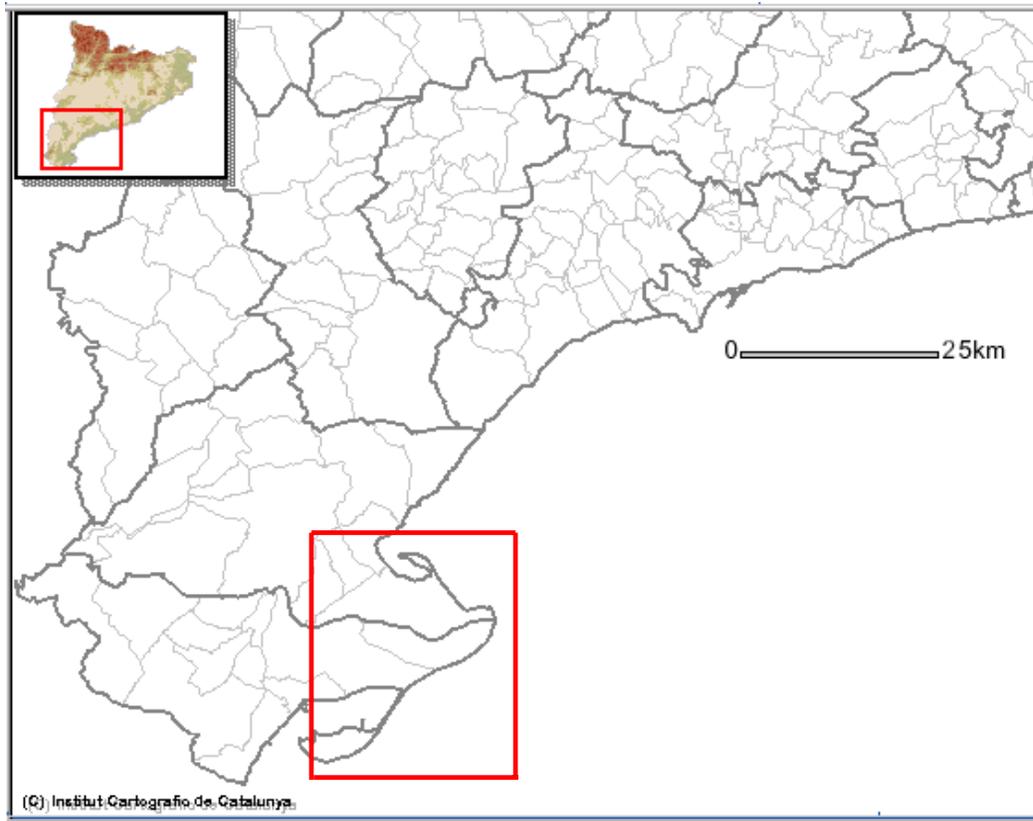


Figura 1.1: Área de estudio.

metros; el valor de la profundidad máxima en una sección es de  $6.77\text{ m}$  con una desviación de  $1.8\text{ m}$  y el área media de la sección es de  $1.051\text{ m}^2$  con una desviación típica de  $184\text{ m}^2$  (Ibáñez, 1993).

El cauce del Ebro presenta en diferentes puntos un cambio brusco de profundidad que reciben el nombre de peceras. Una de las más significativas es la pecera del Molí de Soldevila situada entre Tortosa y Amposta a la altura de Camp Redó. Esta pecera presenta un cambio de profundidad entre  $5\text{ m}$  a  $20\text{ m}$ , y afecta a una longitud del río de unos  $400\text{ m}$  (Alonso, 1997). El desnivel del Ebro entre Tortosa y Amposta en una distancia de  $14\text{ km}$ , es de  $0.87\text{ m}$  mientras que entre Amposta y  $26\text{ km}$  aguas abajo, el desnivel es de  $0.12\text{ m}$  (Carreras, 1940). Cabe suponer que el anterior desnivel se refiere a la superficie del agua para caudales medios. Las velocidades medias en una sección al inicio del Delta en las proximidades de Amposta se sitúan sobre los  $0.4\text{-}0.5\text{ m s}^{-1}$  para un caudal de  $470\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ , mientras que para  $800\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$  son  $0.7\text{-}0.8\text{ m s}^{-1}$ . Para un caudal  $450\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$  la velocidad puntual máxima en una sección también situada en esta zona es del orden de  $1\text{ m s}^{-1}$ .

Aunque en el Mediterráneo la marea tiene poca amplitud, su influencia en el comportamiento hidráulico del tramo final del Ebro es apreciada dada la práctica

ausencia de pendiente, lo que causa que una cuña salina pueda penetrar hacia aguas arriba siendo observable en Tortosa, por lo que administrativamente esta ciudad se encuentra en el límite de la zona marítimo terrestre (Dolz y Gómez (1992), Dolz (1993) y Dolz et al. (1997)).

### 1.2.3 Caudales históricos.

El uso del agua del río Ebro es muy variado, y en el entorno del estuario del Ebro, se alternan campos de cultivo de arroz con las lagunas y pantanos. La región es considerada climatológicamente como mediterránea seca con una temperatura media anual alrededor de 16-17 °C con una precipitación de alrededor de 550 mm al año.

Según CHEBRO (2000) la precipitación media anual en la cuenca en el período 1940-86, fue de 660 mm, con una distribución muy variable habiendo estaciones donde se superaron los 2.500 mm mientras que otras sólo presentaron 300mm. La aportación media anual de la cuenca en el mismo periodo fue de 18.212 hm<sup>3</sup>, mientras que la aportación media anual en la estación de aforos de Tortosa es de 13.408 hm<sup>3</sup> durante el período de 1960-1993, contando con un máximo 22.540 hm<sup>3</sup> y un mínimo 4.283 hm<sup>3</sup>.

Esta aportación tiene la siguiente distribución mensual: 1.580 hm<sup>3</sup> en enero; 1.580 hm<sup>3</sup> también en febrero; 1.609 hm<sup>3</sup> en marzo; 1.513 hm<sup>3</sup> en abril, 1.244 en mayo; 1.101 hm<sup>3</sup> en junio, 552 hm<sup>3</sup> en julio; 369 en agosto, 483 hm<sup>3</sup> en septiembre; 802 hm<sup>3</sup> en octubre, 1.193 hm<sup>3</sup> en noviembre y 1.382 hm<sup>3</sup> en diciembre. Las aportaciones máxima y mínima mensual de este período son 5.311 hm<sup>3</sup> y 83 hm<sup>3</sup>.

La propuesta de Plan Hidrológico establece que actualmente el volumen anual medio vertido al mar, una vez satisfechas todas las demandas, es de 9.281 hm<sup>3</sup>, más 3.153 hm<sup>3</sup> que corresponden al caudal mínimo de 100 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> propuesto de forma provisional para el Ebro en el Delta. La distribución mensual de este caudal vertido es muy irregular, de forma que al simular el período 1940-1986, un total de 155 meses presentan vertido nulo (entre ellos 39 meses de julio, 44 meses de agosto y 36 meses de septiembre). Dolz et al. (1997) reportan la existencia de 138 embalses en la cuenca del Ebro con una capacidad total de 6.837 hm<sup>3</sup> (37,5% de la aportación natural media) que suavizan la distribución anual de caudales. Los embalses de con Mequinenza 1.528 hm<sup>3</sup> y Riba-roja con 210 hm<sup>3</sup> situados en el tramo final del Ebro, por su parte Ibáñez et al. (1997) reporta también la presencia de 170 embalses que indudablemente tienen un notable efecto regulador de caudales que llegan hasta la zona de estudio en el Delta.

La aportación media anual en Tortosa ha descendido un 14,8% debido a los embalses y regadíos que utilizan los dos canales de riego en Xerta con una capacidad total de 50 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> y que están en funcionamiento entre marzo y diciembre (Maldonado (1986), Ibáñez (1993)). Es de resaltar que antes de la puesta en servicio de los embalses de Mequinenza y Riba-roja, en Tortosa se registraron caudales medios diarios de 12 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> en julio de 1964, agosto y septiembre de

1962 (MOPU, 1979). Mientras que los caudales máximos registrados en Tortosa en el siglo pasado antes y después de la implementación de los embalses de Mequinenza y Ribaroja se presentan en la tabla 1.1.

Tabla 1.1: Caudales máximos registrados en Tortosa antes y después de la puesta en funcionamiento de los embalses de Mequinenza y Riba Roja en el siglo pasado. Capacidad de encauzamiento en Tortosa  $\simeq 2800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

<b>Pre-Embalses</b>	
<b>Fecha</b>	<b>Caudal [<math>\text{m}^3 \text{s}^{-1}</math>]</b>
24 de octubre de 1907	12.000
22 de mayo de 1921	5.500
29 de octubre de 1937	10.000
29 de enero de 1960	4.000
5 de enero de 1961	4.400
<b>Post-Embalses</b>	
9 de noviembre de 1982	3.200
24 de enero de 1997	2.600

Dolz y Puertas (1990) destacan las variaciones horarias de los caudales aguas abajo de los embalses de Flix, Ribaroja y Mequinenza, debido principalmente a los aprovechamientos hidroeléctricos de estos; mencionando que normalmente los caudales durante el sábado y domingo son muy inferiores a los del resto de la semana. Además de estas variaciones, debemos tomar en cuenta la existencia a lo largo del recorrido por el Delta, que el río gana caudal procedente de las formaciones acuíferas conectadas a su cauce (Pérez (1975), Dolz y Puertas (1990)), este hecho lo clasifica como una cuenca ganadora.

#### 1.2.4 La cuña salina.

El agua de mar que es más densa que el agua dulce del río, penetra por las capas bajas del cauce del río hacia agua arriba formando una cuña de agua salada situada en el fondo y sobre la cual circula el agua dulce que el río aporta. Su geometría, es decir espesor y longitud depende de la morfología y la pendiente del cauce, del caudal circulante y de la marea.

La forma del cauce puede favorecer o limitar el avance de la cuña hacia aguas arriba. Dado que la práctica ausencia de marea en el Mediterráneo favorece la estabilidad de una cuña salina, el caudal circulante en el río establece la longitud de la cuña, de manera que a mayor caudal del río, menor será la longitud de río afectada por la cuña.

Otro factor a tomar en cuenta es la presencia del viento del este que propicia su formación, mientras que los vientos del sureste dificultan el desagüe del río y favorecen la entrada del agua de mar en el cauce. Tradicionalmente una cuña salina estable es caracterizada hidráulicamente como un flujo bicapa, ya que el agua dulce de la capa superior fluye aguas abajo hacia el mar al mismo tiempo que por la parte inferior en la capa profunda se introduce agua del mar salada y más densa hacia el río. El contacto entre ambas capas produce una tercera capa de pequeño espesor con elevados gradientes de densidad y salinidad que llamaremos capa de mezcla; una vez se ha desarrollado la capa de mezcla podemos denominar el flujo de la columna de agua como tricapa.

La capa superior al deslizarse sobre la capa de agua salada, arrastra parte de esta agua salada de la capa inferior; por lo que esta pérdida que sufre la cuña, se ve compensada por la entrada de agua nueva de mar por la parte inferior. En el tramo final del río Ebro, la cuña salina puede alcanzar en verano longitudes de aproximadamente 30 km, mientras que en invierno cuando mayores caudales se encuentran presentes suele ser del orden de 10 km o incluso desaparecer. Antes de la puesta en funcionamiento de los embalses de Mequinenza y Riba Roja (como se ha mencionado en §1.2.3), las diferencias de caudales máximos y mínimos de caudales eran más severos, y la cuña salina podía encontrarse incluso en Tortosa (Aragón, 1943 en Dolz et al. (1997)). Otro factor que condiciona en gran medida la posición de la cuña salina es la topografía del cauce que pueden crear una barrera en su avance, presentando así límites estables de la cuña para un rango de caudales. Ibáñez (1993) destaca singularidades importantes tanto en el cauce del río como la barra de la desembocadura: En las cercanías de la isla de Gracia, en la isla de Sapinya y en la confluencia con el Barranco de la Galera. Esta última está situada a 32 km de la desembocadura, y 4 km aguas arriba de Amposta, coincidiendo prácticamente con el inicio del tramo deltaico del río Ebro. Para que la cuña salina alcance esta sección, los caudales deben de ser inferiores a los  $80 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Con caudales entre los 300 y  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  el límite de la cuña se sitúa en la isla de Gracia a 18 km de la desembocadura, mientras que con los  $100 - 80 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  se sitúa en la isla de Sapinya a 20 km. La presencia de la cuña en los últimos 5 km, requiere caudales inferiores a los  $400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (figura 1.2).

### 1.2.5 La salida al mar.

La desembocadura del río Ebro evoluciona constantemente debido a la interacción entre el material que el propio río aporta que prolonga el cauce y el que es removido por la dinámica costera que acorta el cauce. Un análisis detallado de la evolución histórica de la desembocadura del Ebro puede ser consultado en Maldonado (1986). Pero una tendencia clara en los últimos años es el retroceso de la desembocadura hacia tierra (Jiménez, 1996).

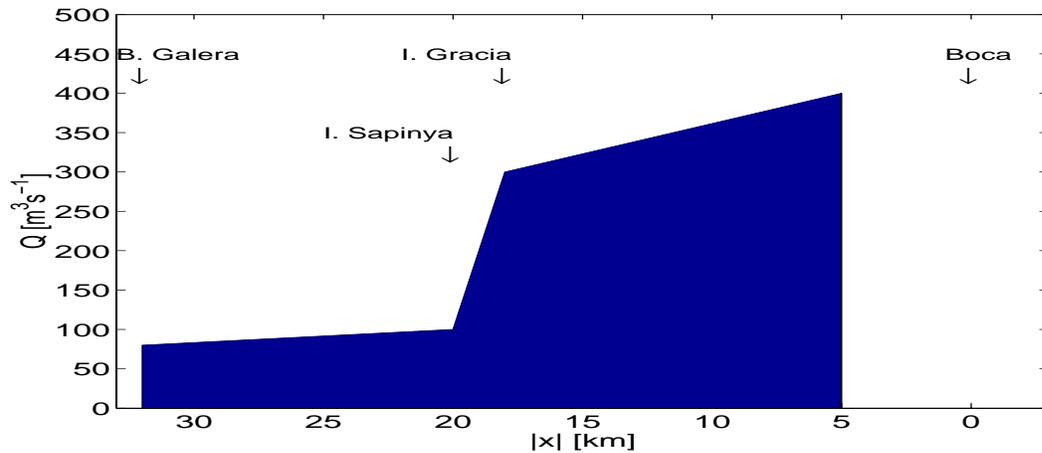


Figura 1.2: Posiciones de la cuña correspondientes a los rangos de caudal en el río Ebro, de acuerdo a Ibáñez (1993).

### 1.3 LA TURBULENCIA COMO AMBIENTE BIOLÓGICO.

La vida del plácton implica por definición la suspensión y movimiento en el agua, la capacidad de movimiento de muchos de la gran mayoría de organismos fitoplanctónicos se ve sobrepasada por la del ambiente en el que desarrollan sus vidas. Por lo que las propiedades hidrodinámicas en el ambiente acuático toman un papel fundamental en la ecología del fitoplácton.

Las interacciones que se presentan entre el agua y los organismos son variadas, los movimientos del ambiente acuático controlan tanto el movimiento de los propios organismos como el de las propiedades físico químicas relevantes del agua de las cuales toman su alimento. Los efectos que el medio ambiente pueden tener sobre estos organismos, son variados ya que las fuentes son en si diversas; basta con recordar los diferentes eventos que pueden presentarse a a nivel de gran escala, mesoescala y microescala, los criterios para la consideración de estas escalas se representan en la tabla 1.2.

Tabla 1.2: Magnitudes características de las diferentes escalas presentes en los fluidos turbulentos en el océano.

Escala	Orden característico [m]
Microescala	$10^{-6} - 10^0$
Mesoescala	$10^0 - 10^2$
Gran escala	$10^2 - 10^4$

La gran escala comprende grandes giros a nivel de mares y océanos, donde grandes masas de agua son transportadas y mezcladas entre si. Por su parte la

mesoescala comprende fenómenos como la *surgencia*, chorros, giros y frentes que proveen de mecanismos que inyectan nutrientes y aumentan la productividad en las capas superficiales de agua (Yamazaki y Osborn (1988), LeFèvre y Frontier (1998), Owen (1989)); a este escala se encuentra la mezcla como la estudiamos en este trabajo entre las las diferentes capas del estuario del delta del Ebro. Mientras que la micro escala afecta a nivel de el transporte celular, pudiendo tener efecto sobre el pastoreo por herbívoros (Marrasé et al. (1990), Kiorboe (1997) y Alcaráz (1997)).

### 1.3.1 Las formas del fitopláncton y la energía.

Una de las grandes maravillas de la naturaleza es la diversidad de formas vivas que pueden observarse, la diversidad fitoplanctónica no es una excepción. Una aproximación clásica de categorías morfológicas toma en cuenta componentes como alvéolos, cintas, cabellos, ramificaciones y mucus, estos pueden verse aplicados a células y colonias de muchos tipos y clases (Morris, 1981).

Otro tipo de propiedades como forma, superficie-volumen, radios o posición de los apéndices, pueden interpretarse como adaptaciones para prevenir el hundimiento, incrementar la absorción de nutrientes o evitar el pastoreo; aparentando que estos hechos funcionales y morfológicos del fitopláncton son relevantes al ambiente turbulento. Margalef (1978) propuso una sistematización morfológica del fitopláncton de acuerdo al suplemento de nutrientes y la intensidad de la turbulencia; y lo llamo *phytoplankton mandala* (Figura 1.3).

En el gráfico los mayores grupos taxonómicos ocupan diferentes espacios, en los extremos encontramos a dos grupos de la siguiente manera:

1. Las diatomeas no móviles y con alto potencial de crecimiento, florecen en aguas ricas en nutrientes y relativamente turbulentas; ya que su carencia de movilidad se ve compensada con su resuspension gracias al forzamiento turbulento.
2. Por otra parte los dinoflagelados que son organismos móviles por la posesión de flagelos pueden relativamente regular su posición en la columna de agua, permitiendo su supervivencia en aguas estratificadas donde su movilidad mejora su flotabilidad, permitiendo la adquisición de nutrientes en otras capas compitiendo en mejores condiciones con organismos que no poseen esta movilidad.
3. Otros grupos fitoplanctónicos como los cocolitofóridos parecen ocupar posiciones intermedias no extremas.

Una sucesión típica de fitopláncton en términos de la mandala de Margalef seguiría una tendencia desde la esquina de alta turbulencia y altos nutrientes, hasta la esquina opuesta de bajos nutrientes y baja turbulencia; las mareas rojas tendrían tendencia a aparecer en situaciones anómalas con altos valores de nutrientes y baja turbulencia gracias a su movilidad. Una relación similar es reportada

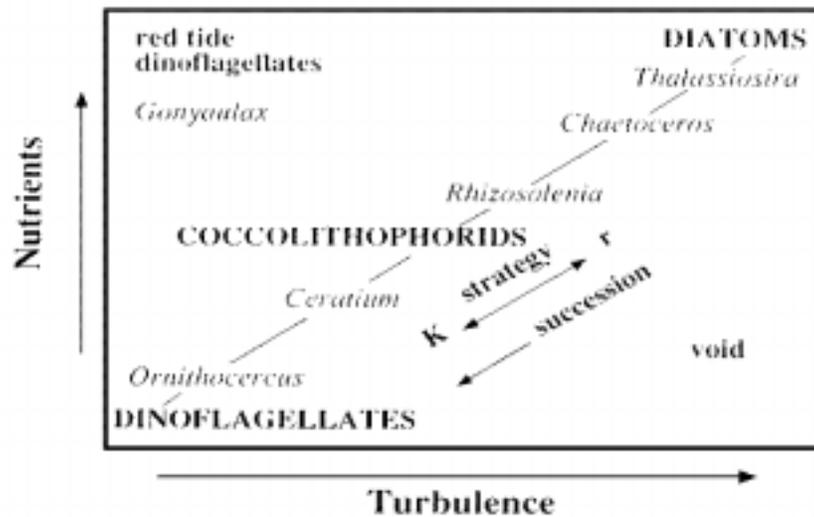


Figura 1.3: Representación gráfica de la mandala de Margalef, donde las principales formas de vida fitoplanctónicas están colocadas en un espacio ecológico definido por concentración de nutrientes y turbulencia (Margalef, 1978).

por Margalef y Estrada (1981) para grupos de especies de fitopláncton en costas del noroeste de África por medio de análisis de componentes principales (figura 1.4), muestran una agrupación muy parecida a la propuesta por el mandala de Margalef teniendo como ejes los componentes II y III que corresponden con el gradiente de la energía externa de zona costera y mar abierto, en un ambiente de surgencias.

### 1.3.2 Turbulencia a mesoescala y la ecofisiología planctónica

La mesoescala en el océano va desde unos cuantos metros hasta kilómetros. El agua en movimiento puede contener células de fitopláncton y algunas de estas presentan distribuciones que no son el resultado pasivo de los movimientos de agua, la mezcla vertical en particular tiene una relevancia directa en la fisiología del fitopláncton porque determina la penetración de la luz y la entrada de nutrientes. Dado que el movimiento del agua afecta a los productores primarios, este afecta también a la organización de todo el sistema planctónico en el océano.

#### Parches horizontales

La distribución altamente heterogénea del fitopláncton en parches (*patches*) es generada por las interacciones de variables hidrodinámicas del medio, sobre partículas suspendidas tanto pasivas como activas, además de una respuesta biológica de los organismos que no pueden ser considerados como trazadores pasivos (Sour-

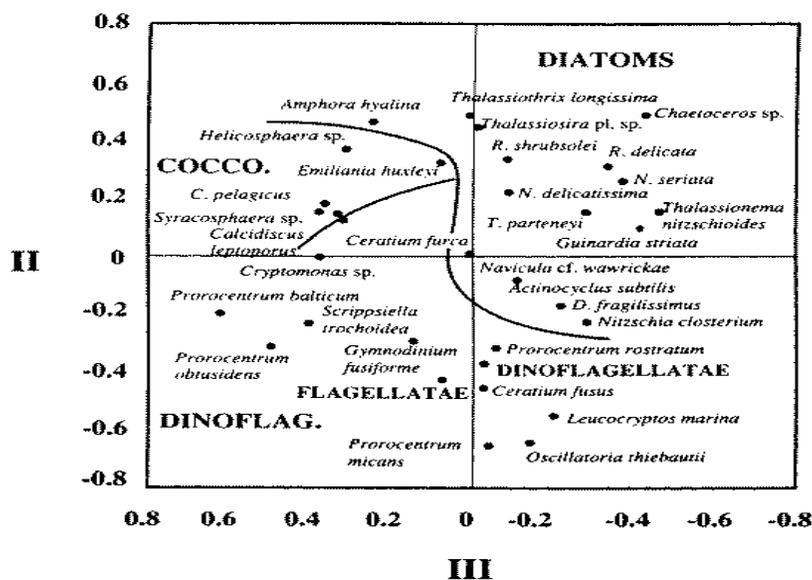


Figura 1.4: Especies y grupos de especies de acuerdo con sus coeficientes de correlación con el análisis del segundo (II) y el (III) tercer eje de componentes principales. Margalef y Estrada (1981).

nia, 1982). Por otra parte las respuestas derivadas del crecimiento, movilidad e interacción entre organismos son típicamente no lineales, a las que se superponen las fluctuaciones físico químicas del ambiente. Las respuestas de los organismos fitoplanctónicos a las respuestas físicas, son prácticamente inmediatas en los casos de luz y nutrientes, originando pulsos de crecimiento (Estrada, 1978).

La distribución parcheada del fitopláncton parece ser que obedece a una estrategia al pastoreo por parte de los organismos planctívoros, ya que de esta manera disminuyen la posibilidad de ser atrapados con una distribución parcheada frente a una distribución homogénea (Owen, 1989).

### Estructura de la columna de agua y la distribución fitoplanctónica

La estructura vertical de la columna de agua envuelve un delicado balance entre las fuerzas de desestabilización como la cizalla derivada del viento, las pérdidas de calor de la superficie y el gradiente de velocidades en la capa de mezcla y los efectos estabilizadores como la flotabilidad de la capa superficie derivada del calentamiento o el flujo de agua dulce (Denman y Garguett, 1995).

El perfil vertical típico del océano superior con una capa superficial de mezcla con una capa con gradiente de densidad o pycnoclina, se asocia con grandes variaciones en la intensidad de la energía de disipación turbulenta y es un efecto importante en el control de aporte de nutrientes y la distribución vertical del fitopláncton. Este mismo efecto ocurre en el sistema que nos ocupa, salvo la diferencia de que es la capa superior la que aporta los nutrientes al sistema estuarino

y costero cercano.

Otro hecho típico observado en aguas marinas estratificadas lejos de la costa es la presencia de una profundidad máxima de clorofila (*Deep Chlorophyll Maximum*) localizada dentro de la pycnoclina donde la distribución vertical del organismo es reducida (Cullen (1982) y Estrada (1985a)).