

## Capítulo 6

Portada

Menú rápido

# Discusiones y conclusiones.

*Y contemplando el tráfico y el ruido, me puse a pensar en lo que he vivido, de donde vengo a donde voy lo que tengo y lo que soy. -Alex Lora en un archivo mp3, Trondheim 3 de mayo de 2002.*

Este capítulo consta de tres partes en las que se discutirán los resultados de la dinámica de la mezcla en el estuario, la distribución de los organismos a lo largo del estuario y el área de impacto y las longitudes características de la pluma del estuario del Ebro bajo diferentes condiciones.

### 6.1 Dinámica de la mezcla en el estuario.

#### 6.1.1 Áreas tipo que se encuentran presentes en el estuario del delta del Ebro.

##### **Criterio para evaluar el inicio y final de una interface de densidades.**

La evaluación de la mezcla en el estuario y la determinación de áreas características dentro del mismo, depende en gran parte de una buena evaluación del inicio y final de la interface de densidades. Es relativamente fácil establecer a la vista de un perfil de salinidades o de densidades el inicio y final de una interface, el problema es el de realizarlo automáticamente mediante un criterio estandar para todos los perfiles.

Con este fin se ha evaluado y analizado el uso del criterio empírico de Legović (1991) además se analiza el principio físico que sobre el que se basa (§4.2.4). Sin embargo para establecer los inicios y finales de la interface en este trabajo se ha usado el número de Richardson de gradiente, debido principalmente a que además de tener en cuenta el gradiente de la salinidad por medio de las densidades incorpora la presencia del gradiente de velocidades quien es directamente el responsable de la mezcla en la interface y con ella la estabilidad de la estratificación. En todo el desarrollo de este trabajo cuando se hace referencia a la presencia de capas, se refiere al resultado cuantitativo del uso de este criterio. Otro buen indicador físico puede ser la escala del tiempo característico del empuje en la capa de mezcla también conocido como la frecuencia de Brunt-Väisälä ( $N$ ).

Los tres criterios evaluados dan resultados similares debido principalmente a la escala con la que se usa en la evaluación de los inicios y finales de la capa de mezcla. Dado que la densidad ( $\rho$ ) en el estuario depende principalmente de la salinidad el criterio de la pendiente  $m = \Delta sal / \Delta z$  podemos escribirlo de la siguiente forma:

$$m \approx \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (6.1)$$

Por lo que la expresión de la frecuencia de Brunt-Väisälä puede ser escrita de la manera:

$$N = \left( \frac{gm}{\rho} \right)^{1/2} \quad (6.2)$$

Y a la vez el número de Richardson de gradiente corresponde con:

$$Ri_g = \frac{N^2}{S^2} \quad (6.3)$$

Donde  $S$  es la cizalladura en la capa de mezcla. Puede observarse la dependencia directa del empuje de las capas respecto del gradiente de la densidad ( $m$ ) y que  $Ri_g$  para una cizalladura constante también tiene una dependencia directa del empuje y a la vez del gradiente de densidades. Por lo anterior se propone un valor crítico de  $N$  de  $0.05s^{-1}$  que corresponde con el criterio establecido por Legović (1991) de la pendiente  $5.0gkg^{-1}m^{-1}$  y el establecido experimentalmente por varios autores para  $Ri_g$  de 0.02.

### Capas en el estuario.

La visualización de la cuña en el estuario para condiciones de fuerte estratificación (§4.2) evidencia la presencia de tres capas a lo largo del estuario similares a las descritas para un estuario ideal de Dyer (1997), estas son claramente:

1. Capa superficial compuesta principalmente por agua dulce.
2. Capa inferior principalmente formada por agua del mar Mediterráneo.
3. Capa de mezcla resultado del contacto y la mezcla entre las dos primeras.

No se cuentan con medidas a la escala adecuada para poder establecer la presencia de subcapas dentro de la capa de mezcla, pero no puede descartarse que estas puedan estar presentes.

### Ambientes de mezcla.

El estuario en estudio es un estuario angosto en el que se hace en primer término un análisis de la estabilidad de la capa de mezcla en la columna de agua por medio del número de Richardson de gradiente (§4.3), del cual se destaca la presencia de las zonas de inicio y final del estuario como áreas en las que la estabilidad de la capa de mezcla permite la presencia fuerte de la mezcla; estas áreas son la cabeza

y la pluma respectivamente. Sin embargo la mayor parte del estuario posee una buena estabilidad en el cuerpo del mismo. Por lo anterior longitudinalmente pueden establecerse tres zonas dentro del estuario:

1. La cabeza es la zona en la que el estuario inicia (de acuerdo al sentido del flujo del río que lo forma en esta zona los números de Richardson de gradiente son lo suficientemente bajos para permitir una fuerte mezcla.
2. La pluma también es una zona con un bajo número de Richardson de gradiente y al igual que la cabeza existen fuertes procesos de mezcla.
3. El cuerpo del estuario, donde las condiciones de la capa de mezcla son estables de acuerdo a los números de Richardson de gradiente.

### **Profundidad y anchura de la capa de mezcla a lo largo del estuario.**

La profundidad y la anchura de la capa de mezcla a lo largo de el estuario estratificado que el presente trabajo analiza, presenta las zonas que se han destacado para los ambientes de mezcla, en la cabeza la profundidad de la capa de mezcla por supuesto inicia en el fondo y rápidamente alcanza una profundidad de tres metros, posteriormente a lo largo del cuerpo del estuario la posición de la interface se aproxima a la superficie respecto de la distancia de la desembocadura ( $x$ ) como  $D = 0.1607x + 0.0932$  para luego en los últimos tres kilómetros hundirse hasta los tres metros y medio de profundidad.

### **Por qué relacionar las mediciones con los caudales locales de las secciones?.**

La razón principal de relacionar las medidas hechas durante los experimentos de campo respecto a otra variable es la característica discreta de los datos que se obtienen en estas campañas. El referir medidas discretas respecto de variables como series de tiempo de velocidades de la columna de agua o del viento nos permite obtener valores para las variables que hemos medido en situaciones para las cuales no lo hemos hecho.

La velocidad característica de la capa superior del estuario, se relaciona directamente con los caudales del río, y como se presenta en este trabajo es la velocidad característica de la capa superior la que maneja la mezcla en gran parte del estuario. Sin embargo estos valores no son extrapolables a la serie de tiempo de los caudales horarios reportados por CHEBRO (2000) (§4.4.6) mostradas en la figura 4.39 y la y la tabla 4.7 respecto de las mediciones hechas para las campañas de muestreo (tabla 4.5). Las inciertas relaciones que se presentan entre las descargas locales y las descargas reportadas para el embalse de Mezquinenza, pueden ser explicadas posiblemente por:

- Cuando los caudales son menores de  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , existe una ambigüedad en el valor real de el caudal que puede estar entre 0 y 99. Esta situación no nos permite evaluar la relación de los caudales locales medidos para valores menores de  $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , aunque estos valores han sido medidos localmente.

- Para las situaciones de lluvia, no puede tomarse en cuenta el aporte hecho en la cuenca posteriormente del punto del embalse de Mezquinenza, esto puede explicar las grandes diferencias entre los caudales máximos reportados y los medidos localmente.
- La mezcla ocurrida en el estuario debe tener un componente añadido a la variación del caudal local, sobre todo para los caudales menores de  $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  donde la mezcla ocurre en una distancia mayor. Este efecto será mayor mientras el caudal del río disminuya.
- El desfase en el tiempo de los caudales reportados y medidos.
- Probablemente la marea presente un componente añadido a pesar de ser escasa en esta zona, sobre todo para los caudales bajos.

Lo anterior nos lleva a recomendar el no uso de las serie de tiempo de los caudales reportados en el caso de poder calcular caudales locales, sobre todo para análisis de caracter cuantitativo. Sin embargo si no es posible establecer caudales locales, el uso de los caudales reportados debe hacerse con sumo cuidado y solo a modo orientativo.

### 6.1.2 Determinación los valores de las variables de acuerdo a los caudales de las diferentes capas que intervienen en la mezcla a lo largo del estuario.

El cálculo eficiente de los valores de la mezcla en el estuario depende en buena medida de una buena estimación de las variables a partir de las cuales se calculan estos valores. Dado la dificultad de la obtención de los datos en el campo y el carácter discreto de los mismos, es necesario el extrapolar estos con el fin de establecer los valores de la mezcla para situaciones que no han sido medidas.

#### Validación las velocidades en la columna de agua.

Una variable que puede darnos suficiente información de la velocidad característica que maneja la mezcla, es el caudal local medido en cada una de las secciones, este corresponde a la relación simple del área local de la capa por la velocidad media de la capa de la manera:  $Q = A\bar{u}$ . La estructura de las velocidades en la columna de agua (ver sección §4.2.3) presenta una buena relación de la forma:

$$\bar{u}_h = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \quad (6.4)$$

Donde  $h$  es la distancia entre el centro de la capa de mezcla y la posición donde la velocidad media es medida,  $k$  es la constante de von Karman 0.41 y  $h_0$  el origen virtual del perfil logarítmico. Estas observaciones son congruentes con las relaciones encontradas para fluidos tanto atmosféricos como oceánicos.

Lo anterior nos permite incluir dentro de la capa que se desee las variaciones por efectos de fricción de viento en la capa superficial y del fondo en la capa inferior. Por ello el uso de medidas locales de los caudales referidas a las velocidades son una relación lo suficientemente conocida como para establecer las relaciones de las medidas de las variables que se usan para calcular la mezcla respecto a los primeros.

Cabe tomar en cuenta que las estimaciones de los caudales tal y como se realizan en este trabajo no toma en cuenta las variaciones en el sentido del eje  $y$  dado que seria necesario una toma mayor de perfiles de velocidades en este sentido. Sin embargo tomando en cuenta que las velocidades y las escalas de la turbulencia generadas en la interface tiene una relación directa con la velocidad característica  $U$  o la cizalladura  $\Delta U$  y la profundidad a la que se encuentra la capa de mezcla  $D$ ; los aportes turbulentos a la capa de mezcla debidos a la anchura de la sección  $W$  pueden ser despreciados si la relación (Kantha et al (1977) y French (1988)):

$$\frac{D}{W} < \frac{2}{3} \quad (6.5)$$

Esta relación se satisface para todos los casos bajo estudio en este trabajo. En todo caso la turbulencia generada por las paredes para condiciones experimentales realizadas por Gartshore et al. (1989) pueden ser amplificadas por efectos turbulentos, pero esta contribución es menor del 10% del total de la cizalladura por stress por lo que la mayor contribución a a la mezcla interfacial proviene de efectos turbulentos locales.

### **Determinación la fuente principal de la mezcla.**

La dinámica de circulación general del estuario apesar de aproximarse a la de un estuario ideal posee variados eventos que controlan la mezcla. Sin embargo la principal fuente de energía que la producira será la energía proveniente de a) la capa superficial, b) la capa del fondo y c) eventos locales producidos en la capa de mezcla. Estas fuentes pueden ser realizadas por medio de meticulosas mediciones de las variaciones de la velocidad en cada una de las capas. Sin embargo al no contar con el tipo de mediciones adecuadas, es necesario identificar estas fuentes por medio de las velocidades medias medidas en la columna de agua, y los resultados empíricos de los experimentos de laboratorio.

Dadas las estructuras de las velocidades próximas a las relaciones establecidas de la transferencia de energía por cizalladura, y al establecimiento de los caudales locales como una buena medida de esta. Se busca una relación que represente mejor la forma en la que evoluciona la capa de mezcla por medio de su posición en la columna de agua. Las relaciones naturales en este caso son los caudales locales de las diferentes capas. Las regresiones realizadas para los caudales locales medidos en las diferentes capas a lo largo de todas las campañas *pionner* de muestreo (§4.4.6) muestran una mejor relación de la profundidad de la interface

respecto de los caudales locales superficiales que los presentados para los caudales locales de la capa de mezcla y los caudales locales de la capa inferior, de la misma manera las correlaciones de los caudales respecto de la profundidad de la interface son mejores (0.61) para la capa superior que las calculadas para las capas de mezcla en inferior (-0.4 y -0.6 respectivamente). Se hizo además una aproximación de la posición de la interface respecto de los caudales superficiales locales de la forma tangente hiperbólica, pero los resultados de las regresiones no se aproximan a la forma de las estaciones  $R4$ ,  $R5$  y  $R6$ .

Básicamente puede ser explicado por que al tener poco influencia mareal el estuario bajo estudio, la capa inferior presenta una baja influencia sobre la posición de la capa de mezcla y la capa de mezcla al ser el resultado del efecto combinado de las capas superior e inferior logicamente presenta variaciones con menores influencias locales.

El control de la mezcla en una columna de agua estratificada a través de la interface, depende básicamente de la cizalladura en la columna de agua expresada como el gradiente de la velocidad en la interface de densidades. El mismo hecho que los resultados de la eficiencia de mezcla estén dentro de los rangos experimentales reportados por varios autores para experimentos con estratificación y cizalladura inducida por la capa superior, nos da soporte al argumento que la fuente principal de energía turbulenta del estuario del delta del Ebro es la cizalladura inducida por la velocidad característica de la capa del río en el estuario. Por lo que es importante mencionar que los valores de las profundidades de las capas se calcula a partir de el caudal superior, pero los indicadores como  $Ri$ ,  $Rib$  y  $Re$  se calculan de acuerdo a el gradiente de la velocidad en la capa de mezcla  $\Delta u$ .

### **Batimetría.**

Dado que se hacen regresiones de variables respecto de caudales locales en secciones de diferente anchura, es necesario tomar en cuenta esta variable. Por ello se ha probado de referir las regresiones de la posición de la interface para un rango de caudales a lo largo del estuario respecto de la batimetría medida con varios métodos (§4.4.2). Sin embargo el  $\Delta u$  controla la mezcla en el estuario y esta primera visión se ha dejado de lado y se usa para observar las singularidades de la batimetría.

Otra medida que nos sirve para representar de manera gráfica adecuada los resultados de las variables medidas y las relaciones calculadas de estas, es la batimetría. En muchos casos este es un valor sólo orientativo para poder localizar medidas o cálculos a lo largo del estuario, pero si se desea representar estos valores, es necesario una buena representación de la batimetría.

Existen diferencias entre la batimetría medida desde una embarcación y las batimetrías calculadas a partir de las secciones del río, ya que es evidente que al navegar dentro del cauce no se controla la posición de la embarcación de acuerdo al canal principal, muestra de ello son las variaciones abruptas en determinados

puntos de la gráfica que representa el fondo del estuario; sin embargo es destacable la facilidad con la que estos datos pueden ser tomados.

Las variaciones de las profundidades máximas y medias de las secciones, no representan una diferencia muy grande dentro del comportamiento general de la batimetría a lo largo del estuario, en general solo varia la escala, pero la tendencia entre máximos y mínimos a lo largo del estuario se mantiene. Sin embargo la circulación de la capa inferior en el estuario, puede llevarse a cabo muy cerca del fondo y son las profundidades máximas las que reflejan la presencia de barreras debidas a la posición del fondo en el estuario.

La batimetría resultante de la normalización de la profundidad de las secciones resalta que la tendencia del volumen de las secciones a lo largo del estuario es el de ir aumentando sin embargo cerca de la desembocadura este disminuye, probablemente por la acción de aporte sedimentario a nivel de la desembocadura por los procesos costeros locales que se desarrollan en la zona.

Este tipo de presentación de los datos batimétricos resalta los puntos donde existen barreras generadas por bajos en la batimetría que pueden presentarse como barreras potenciales al avance de la cuña. Respecto de la batimetría normalizada pueden destacarse los puntos potenciales donde la cuña puede tener un límite morfológico debido al lecho del río (tabla 6.1), mostrados en la figura 4.37.

Tabla 6.1: Puntos que se presentan como barreras potenciales a la penetración de la cuña salina. Tomando como referencia la distancia a la desembocadura. \* Indica puntos por describir.

Distancia a la desembocadura [km]	Descripción
32.67	Barranco de la galera
27.26	*
22.06	*
19.96	Isla de Sapinya
17.38	Isla de Gracia
14.51	*
10.88	*
06.96	*

### Velocidades respecto del caudal local.

En la porción del estuario para el que se realizaron campañas para las estaciones fijas (§4.4.2), se observa que la anchura de las secciones locales en estudio se mantiene en las estaciones fijas *R3* a *R6* y son mayores en las estaciones fijas *R1* y *R2*, es lógico entonces que para un mismo caudal a lo largo de esta porción del

estuario conforme nos aproximamos a la desembocadura las velocidades deberían mantenerse estable y cerca de ella la velocidad característica será mayor que la medida en las estaciones anteriores. Esta situación en general se cumple para la regresiones obtenidas, sin embargo se hace evidente que en la estación fija  $R4$  la profundidad de la sección disminuya, el área de la capa superficial sufra de igual manera una disminución y por ello la velocidad local aumente para un mismo caudal.

### **Profundidad y anchura de la interface respecto del caudal local.**

La profundidad del inicio y final de la capa de mezcla así como su anchura pueden indicar el estado de la mezcla de acuerdo a los diferentes caudales.

Para todos los casos en las estaciones fijas con excepción de la estación  $R3$ , un aumento en el caudal representa la disminución de la anchura de la capa de mezcla, este resultado es comprensible debido a que el aumento del caudal produce dos efectos en la capa de mezcla:

1. El aumento de la anchura de la capa debido a la mezcla producida entre la capa de agua dulce y la capa de agua salada, este hecho se observa claramente en algunos de los perfiles de velocidades para la campaña de *pionner1* (§4.2.3), donde se destacan máximos de velocidades en la columna de agua a la profundidad de la capa de mezcla.
2. La disminución de la anchura de la capa de mezcla producido por la mezcla de la interface y la capa de agua dulce, este efecto es conocido como desgaste de la capa de mezcla.

El resultado conjunto de estos dos fenómenos representa el aumento de la posición del inicio de la interface (o la disminución de la profundidad) en la columna de agua, por definición a este efecto le llamamos entrañamiento. El resultado del incremento del ancho de la interface para los cálculos de la estación  $R3$ , representa una evidencia del efecto de la batimetría, ya que la disminución de la profundidad en la estación  $R4$  impone una barrera a el recorrido de la marea lo produce dos efectos de mezcla: a) La disminución de la profundidad en  $R4$  incrementa la velocidad de la capa superior y genera mezcla en la sección comprendida entre  $R4$  y  $R3$  y b) la presencia misma de la barrera genera un límite a el recorrido de la marea en esta sección incrementando la mezcla que tiene como fuente la cizalladura producida por el fondo.

La profundidad de inicio y final de la capa de mezcla nos dan una buena idea de la distancia de penetración de la cuña salina bajo diferentes regímenes de caudal. El conjunto de estas dos variables nos indica que para caudales de  $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  la cuña salina solo estará presente hasta la estación  $R3$  y que para caudales entre 500 y 400, el final de la capa de mezcla estará muy proxima a el fondo para la misma estación. Para estos últimos caudales el grosor de la capa de mezcla en  $R3$  es mayor que los calculados para las demás estaciones, estas condiciones son similares a las mostradas en la cabeza de la cuña salina para las condiciones de

una gran penetración de la cuña salina (Sierra et al. (2002) reporta para el mismo período una cuña de 32 km de longitud consistente con los resultados reportados en este estudio) donde el grosor de la interface en la cabeza es mayor que de el resto del cuerpo del estuario.

### Tiempo de residencia respecto del caudal local.

El tiempo promedio ( $\Delta t$ ) que pasa para un mismo caudal entre la escena generada en la sección  $a$  y la resultante para la sección  $a'$ , la hemos medido como:

$$\Delta t = \frac{\bar{u} + \bar{u}'}{2dist} \quad (6.6)$$

Donde  $\bar{u}$  y  $\bar{u}'$  son las velocidades características de las secciones  $a$  y  $a'$  respectivamente y  $dist$  la distancia que las separa. Con la estimación del tiempo promedio que pasa entre las escenas  $a$  y  $a'$  podemos calcular valores como la velocidad de entrañamiento y el entrañamiento entre las diferentes escenas para cada caudal. Estos tiempos serán una función directa de las velocidades medias y de la distancia que separa a las estaciones fijas para las cuales se hacen los cálculos en la porción del estuario bajo estudio.

### 6.1.3 Establecer los valores de los principales parámetros hidrodinámicos que manejan la mezcla en el estuario.

La descripción de la mezcla pudo haberse logrado haciendo estudios sobre fluidos naturales, sin embargo el aislamiento de fenómenos específicos es una tarea que se encuentra en la frontera de lo infrecuente y lo caótico. Afortunadamente estudios de laboratorio específicos para fluidos estratificados con cizalladura inducida por la capa superior han sido llevado a cabo y el proceso en el que se desarrolla la mezcla esta bien definido hasta el momento, pudiendo incluso separar las diferentes fuentes de la cizalla de las diferentes capas, sin embargo estas condiciones tan controladas y las medidas específicas para ello no son el caso de nuestro trabajo; debido sobre todo a que desde el primer momento estos no eran los objetivos de este trabajo ni del proyecto gracias al cual se han generado los datos experimentales de campo.

No todo son malas noticias, al contrario con el conocimiento de la mezcla en fluidos estratificados es posible establecer los valores de los indicadores y la eficiencia de la mezcla que se desarrolla bajo diferentes regímenes en el estuario que es uno de los objetivos principales de este escrito.

#### Entrañamiento.

Dado que la medida del entrañamiento supone la relación del cambio de la posición de la capa de mezcla en el tiempo respecto a la velocidad característica como  $E = V_e/U$ , o con otras palabras la relación que existe entre el cambio de la posición de la interface respecto de la velocidad. Es una manera de medir la

mezcla en la columna de agua por medio de observaciones simples en las que no es necesario tener mediciones precisas de las variaciones de la velocidad.

Un nutrido grupo de autores entre ellos Ellison y Turner (1959), Kato y Phillips (1969), Kantha et al (1977), Deardorff y Willis (1982) y Turner (1986) diseñaron estudios experimentales dirigidos a desarrollar la ley del entrañamiento.

Stephenson y Fernando (1991), Sullivan y List (1993, 1994) enfocaron un grupo de experimentos para moldear la ley de entrañamiento respecto de parámetros gobernantes de la mezcla como el número de Richardson global para fluidos estratificados con cizalladura; definiendo de esta manera la relación entre el entrañamiento en función de  $Ri_b$ .

$$E = aRi_b^{-n} \quad (6.7)$$

Donde  $a$  y  $n$  son constantes. Las relaciones experimentales resultantes para este trabajo, son congruentes con las establecidas por Christodoulou (1986) en donde los valores de la constante  $a$  son 0.007, 0.002, 0.007 y  $n$  son  $-1/2$ ,  $-1$  y  $-3/2$  respectivamente para los rangos de  $Ri_b$  pequeño intermedio y grande.

La sola medida del entrañamiento respecto de los caudales (figura 4.51) en las diferentes estaciones, nos ofrece una visión de las diferencias generales del comportamiento de la mezcla. Podemos observar que el mayor entrañamiento para las estaciones fijas en estudio corresponde a  $R3$  y que el menor es para la estación  $R1$ .

### Relaciones de los números de Richardson global y de flujo.

El cálculo de los valores del número de Richardson de gradiente y global mostrados en la figura 4.53, muestra zonas de inestabilidad de la capa de mezcla en las que encontramos valores de números de Richardson de gradiente por debajo del valor crítico cerca de los valores de los caudales en los que la cuña salina abandona la sección como es el caso de  $R4$  y  $R6$  y apartir de estos caudales el valor de  $Ri$  se incrementa, estos efectos son debido a que de acuerdo a los valores de las regresiones las profundidades de los inicios y finales de la capa de mezcla se invierten. Esta relación nos da una idea de la buena representación del cálculo de un indicador de acuerdo a la morfología de la capa de mezcla ya que dentro de este rango de valores la capa de mezcla no esta presente.

Continuando con el trabajo experimental enfocado a establecer relaciones de efectos turbulentos que provocan la mezcla respecto de relaciones de los descriptores de la misma, Redondo (1989) y Strang y Fernando (2001) investigan las principales estructuras presentes para diferentes relaciones de los número de Richardson global y de flujo y establecen zonas en las que se observan inestabilidades dominantes del tipo ondas K-H, asimétricas, Hölmböe y simétricas (§2.5.2 y figura 4.54). Estas mismas zonas son observadas siguiendo la misma relación de los datos experimentales de campo por lo que puede asumirse que estos efectos son dominantes en los rangos establecidos.

La figura 4.56 muestra las zonas de los valores de  $Ri_b$  en las que se espera encontrar estas inestabilidades, los valores de los caudales deberán ser mayores a  $250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  para ondas de tipo asimétricas, caudales por debajo de este valor promoverán la presencia de ondas K-H.

### **Eficiencia de mezcla.**

La eficiencia de mezcla ( $\eta$ ) o número de Richardson de flujo calculada como función del número de Richardson global y del entrañamiento, corresponde por definición a:

$$\eta = CRi_b^{1-n} \quad (6.8)$$

De esta manera y usando las relación para estuarios mencionada en Dyer (1988) como:

$$\eta = \frac{\alpha Ri_b}{(1 + \beta Ri_b)^n} \quad (6.9)$$

Donde  $\alpha$  es el valor de la relación de la producción en la capa de mezcla respecto de la producción por cizalladura ( $P_{int}/P_c$ ).

Las eficiencias de la mezcla descritas por esta función para las secciones de las estaciones fijas muestran claramente tres zonas diferentes en el estuario que se analiza:

1. La zona comprendida entre las estación  $R4$  y  $R3$  que tiene los valores mayores de eficiencia de mezcla (figura 4.57) obtenidos para todas la demás estaciones fijas; probablemente son debidos a el aporte de producción generada por el fondo y a que esta es la zona final del estuario para caudales entre 300 y  $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  además del atrapamiento de agua que se genera para caudales mayores donde la cuña no esta presente, generando como lo muestra la figura 4.48 la mayor variación de los gradientes de densidad respecto de los caudales locales.
2. La zona entre  $R2$  y  $R1$  donde las eficiencias de mezcla medidas fueron por mucho las menores, debido primordialmente a que en estas zona el ancho del río disminuye, de tal manera que la la velocidad característica superficial se incremente y el entrañamiento se mantiene constante; explicado por un proceso de relaminarización o por el aporte continuo de agua salada de la capa inferior que mantiene la columna de agua muy estable por medio de un gradiente con poca variación respecto de los caudales locales.
3. La zona de las estaciones que generalmente forman parte del cuerpo del estuario cuando la cuña salina esta presente, donde las eficiencias de mezcla son intermedias entre las medidas para  $R3$  y  $R1$ .

Otra variable que controla la eficiencia de la mezcla es el número de Reynolds, este relacionado con el número de Richardson nos ofrece información del desarrollo de la mezcla, en esta tesis se han comparado los resultados desarrollados en laboratorio respecto de los valores medidos en el estuario y existe una buena concordancia con los valores estimados y los medidos en el laboratorio las figuras 4.57 y 4.58 solo puede indicarnos un par de cosas, que las características del flujo bajo estudio puede ser bien caracterizado por medio de estos descriptores desarrollados en laboratorio y son perfectamente extrapolables a las condiciones de este trabajo. De acuerdo a la compilación de experimentos hecha por Redondo (1987) dentro del área paramétrica estudiada por varios autores nos encontramos en flujos con números de Reynolds y de Richardson altos, este hecho puede observarse en la figura 6.1.

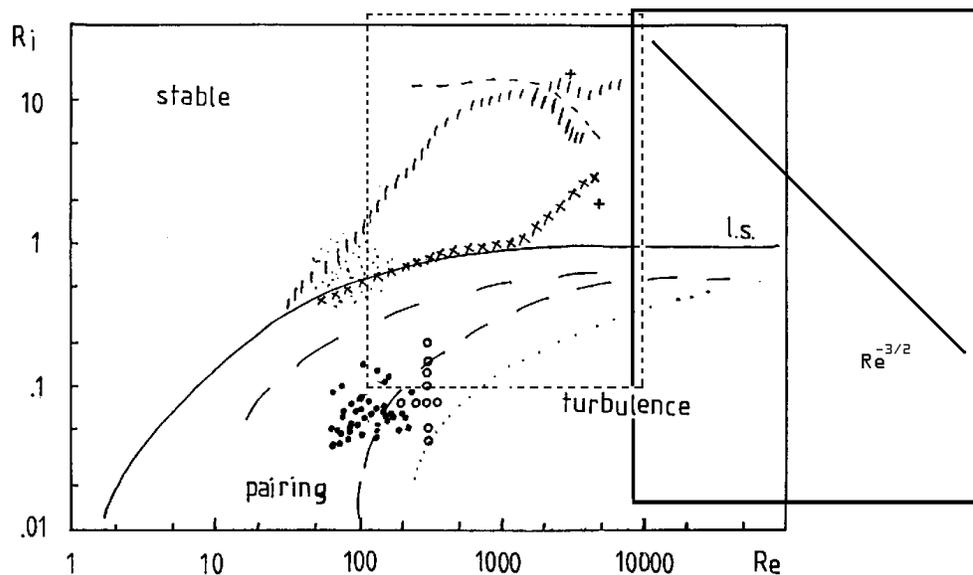


Figura 6.1: Localización de las condiciones paramétricas de las estaciones de muestreo durante las campañas de *Pionner* y los experimentos de otros autores. El área dentro de la línea punteada indica los experimentos realizados por Redondo (1987) y el área dentro de la línea continua delimita la zona de los valores medidos en el campo para el estuario del Ebro.

#### 6.1.4 Determinar la distancia de penetración de la cuña respecto de las densidades superficiales.

La presencia de una cuña estable así como las densidades máximas y mínimas en la columna de agua dependerán de la mezcla producida a lo largo del estuario, por lo que las densidades de la capa superior dependerán a su vez de la distancia a la que se encuentre el inicio de la mezcla para esta capa. De la misma manera la densidad de la capa superior tendrá una relación similar respecto del inicio de la

mezcla en el estuario; como el inicio de la mezcla propiamente dicho se encuentra fuera de la desembocadura del estuario, y su posición es un tanto incierta el análisis de las densidades de la capa inferior se hará respecto de la distancia a la desembocadura. El poder establecer el inicio de la mezcla para la capa superior con mayor precisión que el de la capa inferior es el factor por el cual en este trabajo se usan las densidades mínimas para el cálculo empírico de la distancia a la cabeza de la cuña.

Una cuña estable y completa se analiza en la sección §4.3, donde se destacan características como la profundidad del inicio y final de la capa de mezcla, la anchura de la misma y se establecen relaciones empíricas para las densidades máximas y mínimas a lo largo del estuario.

### **Funciones de las densidades.**

Las densidades máximas y mínimas de las estaciones para la campaña bajo condiciones de fuerte estratificación a lo largo de todo el estuario (§3.1.1) muestran en una primera aproximación un ordenamiento de las diferencias de las densidades respecto de la distancia de la desembocadura, de tal forma que presentan un punto de inflexión en donde las diferencias de las densidades pasan de una relación lineal a un no ordenamiento respecto de la distancia. Este ordenamiento simple solo nos indica que se ha alcanzado un punto determinado en la longitud del estuario en este caso 16.4478 km de la desembocadura muy proximo a la mitad de la distancia de la penetración total de la cuña salina, geoméricamente este resultado es sencillo de apreciar debido a que en un estuario ideal, la capa de agua dulce se diluirá continuamente desde la cabeza hasta la desembocadura y el agua salada presentará las mismas características desde la desembocadura hacia la cabeza. Bajo este esquema la mayor diferencia de densidad se presentaría en el centro del estuario. Para conocer la posición de la cabeza del estuario respecto a la desembocadura, sólo sería necesario establecer puntos de muestreo a lo largo del estuario desde la desembocadura e ir midiendo la diferencia de densidades, cuando esta diferencia comience a perder una tendencia lineal, estaremos en la mitad del estuario.

Este tipo de evaluación requeriría bastantes medios logísticos y analíticos para procesar en tiempo real las mediciones hechas. Por ello se buscan funciones de las densidades máximas y mínimas a partir del punto ya conocido del inicio de la mezcla, en este caso la cabeza del estuario. Las funciones de las salinidades máximas y mínimas obedecen a funciones del tipo tangente hiperbólica y seno hiperbólico respectivamente (§4.3.3). Partiendo de la función de las densidades mínimas representada en la figura 4.30 (§4.3.4), se han calculado las distancias a las que la cabeza de la cuña salina para una cuña estable presentadas en la tabla 4.2, el uso de esta nos permite calcular la distancia de la cabeza aguas arriba de la sección en la cual se mide la densidad mínima.

Este razonamiento empírico puede ser usado de modo orientativo para los caudales locales menores de  $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ya que para estos valores las eficiencias de

la mezcla y el entranamiento en el cuerpo del estuario son bastante similares; cabe mencionar que también es necesario hacer un análisis con mayor profundidad para caudales en los que nos es posible conocer la posición de la cabeza en la porción del estuario que se encuentra bajo estudio.

## 6.2 Organismos trazadores.

Se ha intentado 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.

### 6.2.1 Cuantificar la presencia de organismos nativos de ambientes de río y mar dentro del estuario.

En las áreas costeras marinas como el estuario del delta del Ebro donde la presencia de pequeñas mareas promueve la permanencia de un ambiente estratificado, donde confluyen organismos de los dos diferentes ambientes que forman el sistema marino costero y dulceacuícola. En años recientes, se ha prestado atención a el picofitopláncton ( $0.2 - 2\mu m$ ) (Ray et al. (1989); Iriarte (1993) y Sin et al. (2000) entre otros), primordialmente porque esta fracción del fitopláncton contribuye con al menos el 10% del total de la productividad orgánica primaria (Raven, 1998). Particularmente en años recientes en el delta del Ebro varios autores han hecho estudios fitopláctonicos, sobre sucesión dinámica (Sabater y Muñoz, 1990) y estudios de grupos de especies dentro del delta del Ebro (Comin (1984); López y Arté (1973); Delgado et al. (1990, 1995, 1996)).

El procesamiento de las muestras biológicas no puede ser hecho de una manera automatizada como por ejemplo los análisis de los nutrientes o de las densidades. Los resultados biológicos son muy costosos respecto a las horas hombre usadas para procesarlas, el hecho de que se este planteando además del necesario trabajo de microscopio análisis avanzados de DNA para identificar especies por ejemplo de *Cyanobium sp.* con plena seguridad (Komárek (1996), Komárek et al. (1999)). Presenta una amplia gama de posibilidades para las que es posible dedicar una vida de estudio.

El objetivo de este trabajo no es el de hacer un análisis concienzudo ni un informe de las especies presentes en el estuario para la campaña de muestreo, sino el de usar los descriptores de la mezcla para explicar la presencia de los organismos típicos de las aguas dulces y marinas a lo largo de la columna de agua y de el estuario.

### Densidades de los organismos.

Las densidades de las picocianobacterias (pcb) observadas para para los días de estudio, son similares a las reportadas para otros ambientes estuarinos Mediterráneos por diversos autores, la tabla 6.2 muestra las abundancias reportadas para

este grupo en zonas del Mediterráneo y otras áreas geográficas. Por la parte de las especies de *Scenedesmus sp.* Muñoz (1990) reporta abundancias significativamente menores para este grupo de especies en el mes de febrero de 1987 ( $0.52 \times 10^5$  cel/l) para muestras subsuperficiales de 20-30 cm de profundidad en la desembocadura del estuario.

### 6.2.2 Relacionar su presencia en la columna de agua de acuerdo a las características hidrodinámicas de las misma.

La abundancias de los organismos típicos de ambiente marino pcb observadas a lo largo de la zona de estudio (§4.6) respecto de la profundidad y la salinidad (figura 4.65), muestra al ser encontrados en la capas de agua agua salobre e incluso dulce; indica que al menos en el tiempo de estancia en el estuario son capaces de vivir bajo estas condiciones. Sin embargo el carácter marino de las especies que conforman este grupo muestra una relación directa de las abundancias celulares respecto de la salinidad.

Comparando las distribuciones de los organismos respecto de los perfiles de salinidad, podemos ver que la mayor parte de estos se encuentra alrededor de la interface que con el movimiento local de la entrada del agua salina al estuario el día 5 donde en la zona acaba de entrar agua salada del Mediterráneo a pesar de las fuertes descargas del río. Estas condiciones de recuperación de la cuña salina con descargas importantes en la capa superficial y máximos números de células cerca y en la capa de mezcla puede significar:

1. Que existe suficiente energía para suspender a estos organismos a las capas menos profundas de la capa salina cerca de la capa de mezcla, pudiendo incluso estar presentes en la capa superior.
2. Que los organismos quedan atrapados por el entrañamiento del agua salina en la capa de mezcla o presentan una respuesta con tal de permanecer en estas condiciones, con una salinidad adecuada y altos nutrientes.
3. El ambiente de la capa de mezcla es mejor que el de la capa salada dado que las mayores abundancias presentes en la capa de mezcla así lo indican, probablemente por una mejor cantidad de nutrientes y luz.

Sin embargo la relación lineal de las abundancias de los organismos que puede observarse para las pcb respecto de la salinidad, parece estar fuertemente influenciada por el número de Reynolds asociado a la descarga local del río Ebro ya que claramente los organismos se encuentran bajo dos zonas diferenciadas de este parámetro (6.2 derecha); aunque es probable que el caudal de los días anteriores modificando el aporte de nutrientes sea responsable de la variabilidad mostrada en la figura 6.2 derecha, o una combinación de estos aspectos.

Las relaciones de las abundancias de pcb mostradas respecto de la salinidad para condiciones de una cuña salina estable, aporta una componente biológica como es el hecho de que los organismos se adecúan al carácter energético ambiental conforme con el número de Reynolds (figura 6.3).

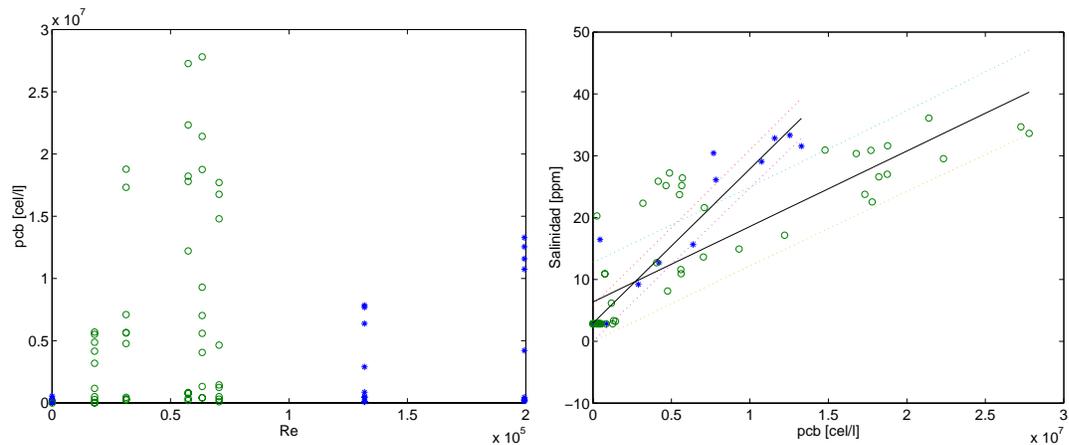


Figura 6.2: Abundancias de pcb en el estuario del río Ebro bajo diferentes condiciones de número de Reynolds (izquierda) y salinidad (derecha), para los días 3 (\*) y 5 (o) de febrero de 2000. Las regresiones de la salinidad respecto de las abundancias son:  $y = 2.49 \times 10^{-6}x + 2.93$  para el día 3 de febrero y  $y = 1.22 \times 10^{-6}x + 6.36$  para el día 5 de febrero.

Donde las distribuciones de los organismos responden probablemente a la historia de la mezcla por la que se encuentran mientras avanzan aguas arriba en el estuario, buscando o sobreviviendo en un ambiente propicio (figura 6.4), lo que resalta a la zona cercana a la interface con mejores condiciones de vida para organismos típicamente marinos, esta claro que la escala de la abundancia es menor para las estaciones de dentro del estuario que las cercanas a la desembocadura, lo que las relaciona directamente con la mezcla, en este sentido podemos hacernos eco de la teoría de Gibson (1980) relacionando la respuesta de los organismos a la historia de la turbulencia.

Debido a el alto número de organismos representativos del grupo de especies de pcb, las abundancias del fitopláncton total en cuanto a número de células se presenta controlado por la abundancia de pcb, lo que se puede observar claramente por el similar comportamiento del fitopláncton total y las pcb.

### 6.3 La pluma del Ebro.

También se considero importante **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.**

El uso de modelos experimentales es muy importante para la validación y rectificación que debe hacerse con los parámetros que utilizan los modelos numéricos, esto es más importante en casos donde se representa situaciones muy complejas como son los ambientes naturales. No debe pasarse por alto el validar a la vez el

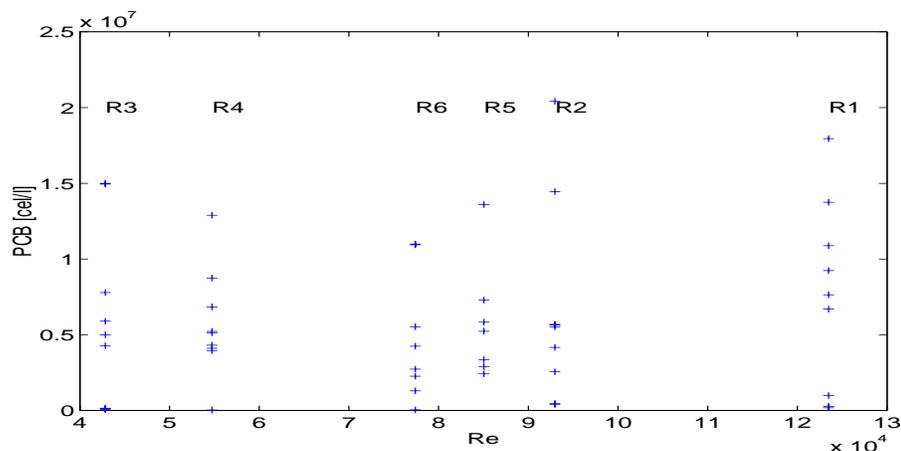


Figura 6.3: Abundancias de pcb en el estuario del río Ebro bajo diferentes números de Reynolds para el día 12 de junio de 1999.

modelo experimental con observaciones naturales in situ o remotas.

### 6.3.1 Efecto de la variación del caudal.

Hemos tomado los promedios de los caudales locales 121.27, 114.33, 287.00 y  $635.70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  medidos respectivamente bajo condiciones de primavera, verano, otoño e invierno, pero es evidente que estos caudales pueden presentarse durante todo el año bajo diferentes condiciones ambientales. Estos caudales pueden servir para estudiar la dinámica estacional y aportar un punto de vista complementario para la interpretación de datos biológicos, químicos y de carácter ecológico.

La dinámica de las corrientes estudiadas en el modelado de laboratorio descrito en §3.3.6, cumplen con las similitudes Froude-Rossby, dado que las escalas básicas son interpretadas de acuerdo a la ley de Froude que es también consistente con la ley de Rossby cuando las escalas de tiempo están limitadas a la vorticidad planetaria como es nuestro caso, por lo que los resultados del modelo experimental pueden ser tomadas como representativas del caso natural para las condiciones experimentales llevadas a cabo. Evaluaciones en el área a la escala experimental realizadas por de León (2002) de mediciones *in situ* muestran estructuras del orden de los 80 km a la profundidad de 10 metros para el mes de julio de 1997. Aunque es evidente que en la naturaleza las condiciones de modelado y experimentales sólo se presentan en situaciones poco frecuentes donde no haya viento o que este sople con una baja intensidad. Como se ha visto en zonas con características similares a la de estudio, el factor de forzamiento por viento es muy importante, sin embargo el objetivo de este trabajo es el comparar las escalas resultantes de la experimentación física y un modelo matemático ya contrastado en esta zona (Durand et al., 1998) y comparar las longitudes características de la pluma que forma el río Ebro en su delta al descargar su agua sobre aguas del Mediterráneo occidental.

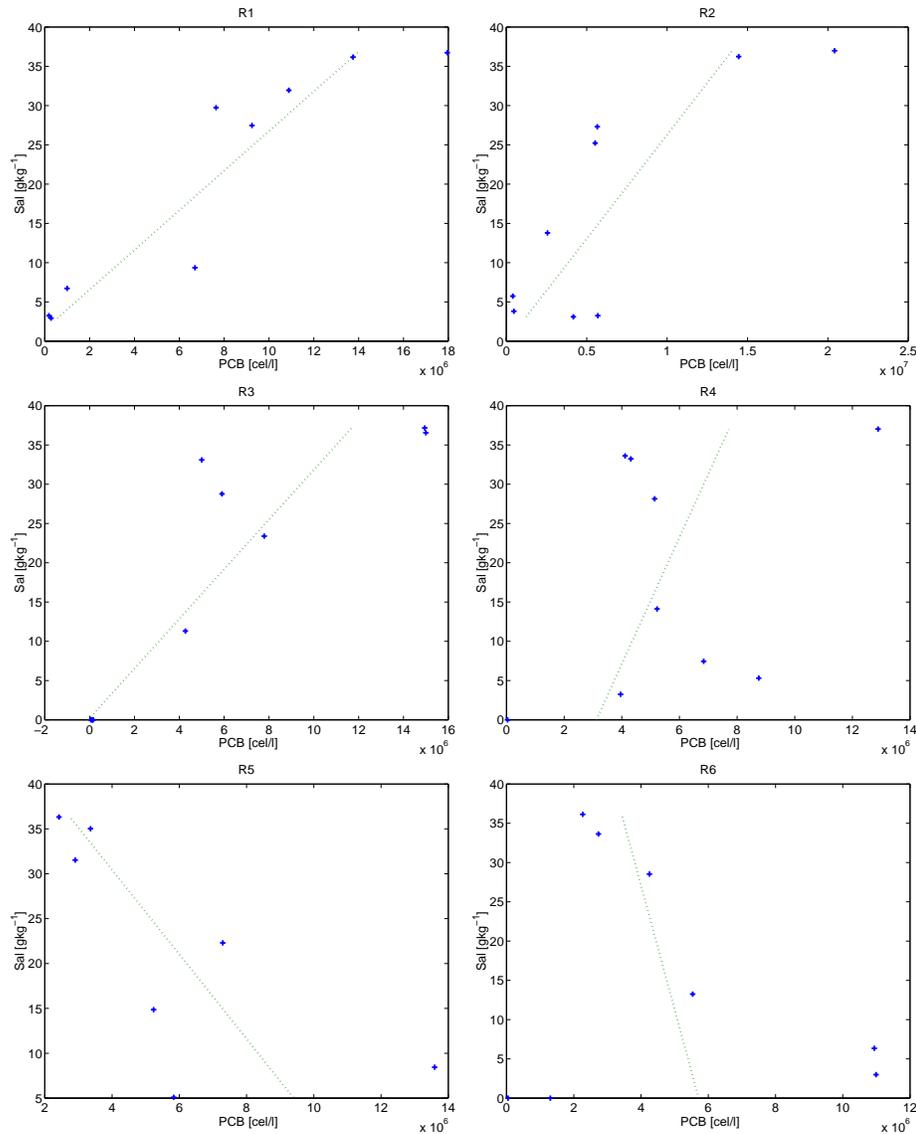


Figura 6.4: Relaciones lineales de abundancia de organismos y salinidad de acuerdo a las diferentes estaciones fijas para el día 12 de junio de 1999.

Respecto a los efectos de la fricción podemos asumir que para algunas de las escalas grandes son de importancia secundaria. El aspecto más importante de la fricción local son los efectos de la cizalla del viento, estos pueden dominar en algunas regiones someras y presentan fuertes efectos sobre las corrientes que se desarrollan sobre una batimetría con pendiente acusada (Li y McClimans, 1998). Este es otro de los factores que el modelo matemático puede reproducir y debe ser tomado en cuenta en futuros trabajos de este estilo para la comparación del modelo con el forzamiento del viento ya que como se ha mencionado este factor tiene un importante papel en la dinámica morfológica de la pluma.

### 6.3.2 Diferencias entre los tratamientos.

Es también importante tener en cuenta las características de los dos métodos con los que evaluamos la zona que puede ser impactada bajo las condiciones de inicio de los dos métodos. Mientras los resultados experimentales nos dan evaluaciones de carácter cuantitativo, ya que no se presentan medidas de dispersión por que las características de experimentación sólo permiten evaluar las dimensiones de la envoltura de la pluma resultante, pero no hacer mediciones puntuales de los valores de salinidad. Los resultados de la simulación con el modelo numérico muestra resultados de carácter cualitativo y cuantitativo aceptables.

La pluma calculada en el modelo muestra una fuerte sensibilidad a la profundidad del agua dulce, que sale por la desembocadura del delta del Ebro debido básicamente a que al calcular la velocidad local de la desembocadura por medio del caudal, podemos tener la misma velocidad para dos caudales diferentes solo con cambiar la profundidad de la interface es decir el grosor de la capa superior del estuario. Sin embargo estos valores de alimentación son los adecuados debido a que son los valores observados bajo las condiciones modeladas experimentalmente y llevadas a la experimentación numérica.

Las variaciones en el área de salida del estuario al cabo de un tiempo establecido puede compararse tanto para el modelo de laboratorio como para el numérico, esta variación puede representarse a partir de los valores de las tablas, donde se muestra que las dimensiones del radio mayor la la pluma modelada numéricamente varia de forma similar a los radios mayores calculados para las plumas experimentales, aumentando de forma monótonica con el caudal. Existe mayor diferencia entre las longitudes de los radios de la pluma a caudales pequeños que a grandes en ambos modelos, pero se observa mas claramente una tendencia asintótica para el modelo de laboratorio, debido sobre todo a los dominios de las longitudes características de tal manera que mientras el modelo numérico trabaja dentro de la parte baja de la mesoescala, el modelo de laboratorio representa las estructuras entre los límites de la meso y la gran escala.

Este amortiguamiento en las diferencias de los radios mayores de las plumas evidencia que existe la posibilidad de que la zona de influencia de la pluma modelada este condicionada por las dimensiones de la malla externa que se le impone o por los propios limites en la escala de los experimentos de laboratorio.

### 6.3.3 Calcular el área de impacto de la pluma bajo los diferentes caudales estacionales medidos.

#### Procesos transitorios en la pluma.

El cálculo numérico de la pluma para el caudal menor utilizado se realizó de forma sistemática y se presenta su evolución con el fin de observar el comportamiento de la pluma modelada en el tiempo, y la influencia de factores como el empuje local y la influencia de la propia descarga en la difusividad turbulenta modelada. Como podemos evaluar el área sobre la que se mide el impacto de la pluma

hasta los 35ppm de salinidad y determinar la dependencia del área con el tiempo  $A(t)$ . Considerando el área proporcional a la variancia de la separación promedio lagrangiana, se puede evaluar el coeficiente de difusión horizontal y su evolución en el tiempo como:

$$\bar{k}_{h(t)} = \frac{1}{2} \frac{\partial A(t)}{\partial t} \quad (6.10)$$

De la observación que la dispersión en los márgenes de la pluma para tiempos iniciales, es mayor que el de los tiempos mayores podemos concluir que para tiempos menores las condiciones de dispersión estarán influenciadas principalmente por la velocidad local característica y que para tiempos mayores, la dispersión dependerá principalmente de las características ambientales como se ha evidenciado en la experimentación para el avance de un frente turbulento. Por lo que la figura 5.13 destaca que al tiempo modelado la dispersión es influenciada por la velocidad local de la pluma generada por la descarga del río.

#### 6.3.4 Comparar los resultados para los diferentes escenarios experimentales de laboratorio, con las observaciones experimentales de campo, experimentaciones numéricas y observaciones remotas.

Las primeras observaciones en el campo de la dinámica de la pluma resultaron un poco desconcertantes, debido sobre todo a la presencia de una fragmentación de esta (figura 5.15), cuando se esperaba una pluma de manera continua y formando un penacho claro sobre todo después de un día de tormenta. Por este motivo se definió rápidamente una estrategia de muestreo con el fin de observar esta dinámica, el resultado se muestra en la figura 5.14.

Las observaciones remotas por medio de imágenes SAR ayudaron a esclarecer la presencia tanto de estructuras como de interacciones entre vórtices y el jet de la desembocadura, sin embargo esta técnica tiene una desventaja y esta es la poca disposición de imágenes de calidad y cantidad para poder realizar un seguimiento meticuloso de las condiciones de circulación en la zona de estudio. En este sentido el trabajo experimental es un magnífico complemento como el realizado en los laboratorios del SINTEF en Trondheim Noruega, este ha supuesto una buena aplicación de las interacciones dinámicas de estas estructuras en la superficie (experimentos con partículas) y en la columna de agua (con colorante). No puede dejar de mencionarse que el alcance de este tipo de trabajo puede ser beneficioso tanto para la evaluación de los impactos de los contaminantes vertidos por el río como del aprovechamiento de los nutrientes que a su vez porta el agua continental a la zona costera.

En cuanto a las dimensiones de las estructuras observadas experimentalmente a escala, son del orden de las decenas de kilómetros muy similares a las observadas por medio de imágenes de satélite (tablas 5.4 y 5.5). Pueden observarse estructuras biológicas importantes en la zona del Mediterráneo que alcanzan e incluso afectan las costas Alicantinas, de la misma manera un potencial contaminante

puede ser transportado por las aguas marinas. La figura 6.5 muestra medidas de clorofilas realizadas mediante percepción remota, puede verse la influencia de los aportes del agua continental del río Ebro en la costa, este hecho puede significar una buena productividad en la zona costera que repercutiría tanto en organismos céciles como ostras o macroalgas y móviles como peces; con una influencia directa sobre el organismo que explota esta biomasa como depredadores y el hombre.

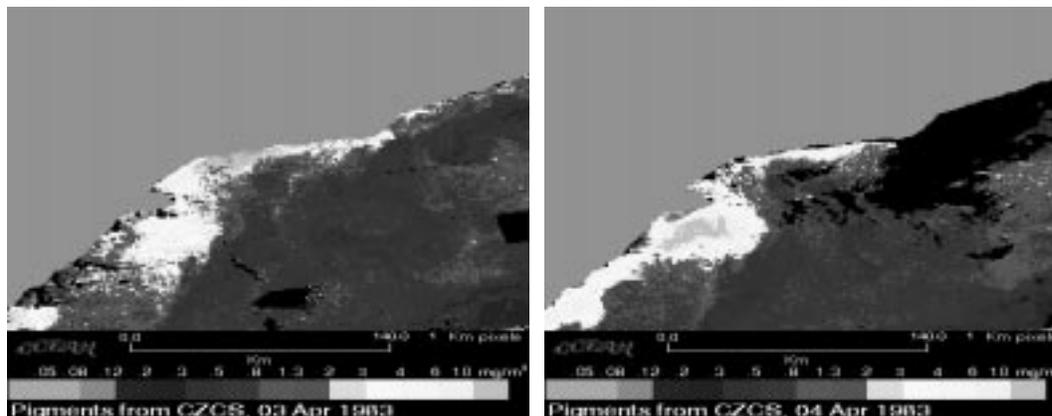


Figura 6.5: Imágenes (tipo) de la influencia de la pluma del delta del Ebro en la productividad orgánica primaria para costas del Mediterráneo oriental, de acuerdo a los pigmentos observados los días 3 (izquierda) y 4 (derecha) de abril de 1983.

## 6.4 Conclusiones finales.

*No importa que ganes o pierdas, sino el modo en que juegas. Dicho de otro modo: El fin no justifica los medios.* -Amonestación (Kessel, 1987).

La evaluación de los descriptores de la mezcla en el estuario y su interpretación permiten elaborar una serie de conclusiones que se han alcanzado gracias a la realización de este trabajo.

### Dinámica de la mezcla en el estuario.

- Se han parametrizado y descrito tres áreas típicas dentro del cuerpo del estuario, comenzando por la cabeza hacia agua abajo estas son:
  1. La cabeza como una zona con un bajo número de Richardson, lo que supone una zona de mezcla alta entre las capas que forman el estuario.
  2. El cuerpo del estuario donde el flujo es estable y dependiente de la anchura del cauce por tratarse de un estuario estrecho. La mezcla en esta zona se mantiene contenida.

3. La desembocadura, una zona donde nuevamente el número de Richardson disminuye de acuerdo a el gradiente en la interface por la influencia de factores importantes como el viento y el oleaje.
- Se ha utilizado el criterio empírico de Legović (1991) para desarrollar un criterio cuantitativo (criterio de Richardson de gradiente) con el fin de establecer de forma sistemática el inicio y final de una interface de densidades. A la vez que se recomiendan valores para el criterio de Brunt-Väisälä con idénticos resultados.
  - Las características de la mezcla expresadas por medio de números adimensionales de Richardson, Reynolds, Froude, Schmidt, Prandtl y Rossby representa un buen enfoque de un sistema para aplicar en fluidos medioambientales del tipo del estuario del Ebro.
  - Los valores de los caudales locales afectan directamente la mezcla en el estuario. Por ello es importante una buena evaluación de estos si se desea hacer estimaciones de tipo cuantitativo, no se recomienda el uso de los caudales medidos en los embalses para estas determinaciones y de ser necesario hacerlo de manera cautelosa.
  - Las medidas de las velocidades en la columna de agua se corresponden bien con los perfiles típicos logarítmicos de capa límite respecto a la capa de mezcla esperados por el poco prisma de mareas de la zona, sin embargo fue posible observar perfiles de diversos tipos.
  - La fuente principal de la mezcla en el estuario del Ebro corresponde a la cizalladura generada por la capa superior del estuario, y el gradiente de esta en la capa de mezcla lo que no excluye otras fuentes como la fricción por el viento. Los ajustes con datos experimentales de tipo cizalladura como fuente de transferencia de energía turbulenta en flujos estratificados así lo evidencia. Sin embargo no es un caso cerrado el tema de la determinación de las diversas fuentes turbulentas en el estuario.
  - Existen varios puntos reportados por la bibliografía que funcionan como barrera a la entrada de la cuña salina al estuario. La batimetría normalizada indica algunos otros puntos potenciales a las distancias: 27.26, 22.06, 14.51, 10.88 y 6.96 kilómetros aguas arriba de la desembocadura; además de los conocidos 32.67 (Barranco de la galera), 19.96 (Isla de Sapinya) y 17.38 (Isla de Gracia).
  - Las eficiencias de la mezcla medidas por las funciones descritas para estuarios y las evaluadas por las regresiones de las variables que intervienen en la mezcla, muestran claramente tres zonas diferentes en el estuario que se analiza:
    1. La zona comprendida entre las estación *R4* y *R3* que tiene los valores mayores de eficiencia de mezcla obtenidos para todas la demás estaciones fijas.

2. La zona entre  $R2$  y  $R1$  donde las eficiencias de mezcla medidas fueron las menores.
  3. La zona de las estaciones que generalmente forman parte del cuerpo del estuario cuando la cuña salina esta presente, donde las eficiencias de mezcla son intermedias entre las medidas para  $R3$  y  $R1$ .
- Se establece una relación empírica para una cuña estable, por medio de la cual es posible establecer la distancia aproximada de la cabeza de la cuña salina de acuerdo a la menor salinidad medida de la capa superior que corresponde a:

$$Dc = a \sinh((\rho_{mc} - \rho_{mintot})^{1/2}(\Delta\rho))4.8 \quad (6.11)$$

Donde:  $Dc$  es la distancia de la cabeza de la cuña,  $\rho_{mc}$  la densidad mínima de la columna de agua y  $\rho_{mintot}$  la densidad del agua del río antes de entrar en el estuario.

### Organismos planctónicos

- Las densidades de los organismos indicadores del agua de mar (pcb) fueron similares a los valores reportados para ambientes estuarinos Mediterráneos.
- La presencia en la columna de agua de los organismos de acuerdo a las características hidrodinámicas del medio, muestra una buena correlación con la salinidad y con el número de Reynolds, debido principalmente a que este es uno de los valores que controla la mezcla.
- se observaron organismos marinos y de agua dulce principalmente en la capa de mezcla del estuario durante condiciones de recuperación de la cuña salina lo cual puede evidenciar:
  1. Que existe suficiente energía para suspender a estos organismos.
  2. El ambiente de la capa de mezcla posee características adecuadas para la vida de estos organismos al menos durante el tiempo de recuperación de la cuña.
- La relación lineal de las abundancias de los organismos pcb respecto de la salinidad, parece estar fuertemente influenciada por el número de Reynolds asociado a la descarga local del río para condiciones de recuperación de la cuña.
- Para una cuña estable se presenta una relación inversa de la salinidad y la abundancia de las pcb en la estaciones  $R5$  y  $R6$ , lo que manifiesta que la zona salina cercana a la capa de mezcla es mejor para la sobrevivencia de organismos marinos del tipo pcb en el estuario; después de encontrarse en este ambiente por un tiempo. Lo anterior sigiere un comportamiento histórico de la mezcla turbulenta sobre la adaptación de los organismos al ambiente estuarino.

- El alto número de organismos representativos del grupo de especies de pcb influye directamente sobre las abundancias del fitoplancton total en el estuario para los días de campaña.

### La pluma del Ebro.

- Las evaluaciones de las longitudes características entre los experimentos con rotación y observaciones de campo muestran una similitud en el orden de magnitud.
- La dinámica del avance del frente de la pluma modelada numérica y experimentalmente muestran una relación similar aunque no en el orden de magnitud, principalmente se debe a que el modelo numérico por definición trabaja en la mesoescala, mientras que las estructuras observadas en el modelo de laboratorio se encuentran en la frontera de la meso y la gran escala. Por lo que la pluma calculada en el modelo muestra una fuerte sensibilidad a la profundidad del agua dulce, que sale por la desembocadura del delta del Ebro.
- Se determina la dependencia del área de la pluma modelada con respecto al tiempo  $A(t)$ . como:

$$\bar{k}_{h(t)} = \frac{1}{2} \frac{\partial A(t)}{\partial t} \quad (6.12)$$

- El uso coordinado de herramientas numéricas y experimentales nos ofrece una oportunidad de acortamiento del tiempo de trabajo en fluidos medioambientales, sin embargo es necesario el uso de datos *reales* para la validación de las observaciones indirectas.

## *Agradecimientos.*

La matrícula, créditos y manutención durante el desarrollo de este trabajo fúe cubierto por el *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* bajo el expediente 92739. La experimentación presentada en la mesa rotatoria de este trabajo fue realizada gracias al proyecto número HPRI-1999-CT00060 de la CE en los laboratorios del *SINTEF* en Trondheim y cofinanciada por el proyecto XT00-0016. La experimentación numérica fúe llevada a cabo con el apoyo del programa Socrates de movilidad internacional en el *Laboratoire de Sondages Electromagnetiques de l'Environnement Terrestre de l'universit'e de Toulon et du Var* con la ayuda del código OCKE3D del LSEET.

Tabla 6.2: Abundancias de pcb para diferentes áreas geográficas. DCM = Profundidad de máximo de clorofila (*deep chlorophyll maximum*), PPP = picofitoplácton, Syn = *Synechococcus*.

Lugar	Zona	Abundancia [cel/l]	Especies	Profundidad	Fecha	Referencia
Bcn - I. Baleares	NO Med.	1.7-	Syn.	sup.	ver. '95	Agawin and Agusti, 1997
		-13 x10 <sup>6</sup>				
		4 -	Syn.	DCM		
		-175 x10 <sup>6</sup>				
B. Villefranche	NO Med.	43 x10 <sup>6</sup>	Syn.	sup.	Jul. '96	Jacquet et al., 1998
Lag. Thau	NO Med.	3.5 x10 <sup>7</sup>	PPP	sup.	Nov. '91- - Feb. '94	Vàquer et al., 1996
L. Varano	O Adr.	0.7 - - 448.6 x10 <sup>6</sup>	PPP	sup. y fondo	Mar. '97- - Feb. '98	Caroppo, 2000
M. Báltico	Central	4.3-	Syn.	dif. prof.	Jul. '95	Albertano et al., 1997
		- 6.7 x10 <sup>8</sup>				
		1.8 - - 5.9 x10 <sup>8</sup>	Syn.	dif. prof.	Ago. '95	
B. San Fco	O. Pacífico	0.046 -	Syn.		Abr.-	Ning et al., 2000
		- 5.2 x10 <sup>8</sup>			- Ago. '98	
C. Mauritánia	NE Atlán. trop.	2.5 -	Syn.	0 - 30m	Jun. '92	Morel, 1997
		- 4 x10 <sup>8</sup>				
(400km a costa)	CN Pac.	5.8 x10 <sup>7</sup>	Syn.	20m	Ago. '90	Ishizaka et al., 1994
		(max.)				
Falkland Is. - I.	O. Atlántico	105 - 10 <sup>6</sup>	Syn.	sup.	Oct. '90	
		225 x10 <sup>6</sup>				
		(max.)	Syn.	sup.	Abr.- - May. '97	Zubkov et al., 2000