

UNIVERSIDAD DE BARCELONA

Departamento de Ecología

*MODELADO DE LA CUÑA SALINA Y DEL
FLUJO DE NUTRIENTES EN EL TRAMO
ESTUARINO DEL RÍO EBRO*



Ocean. Enrique Movellán Mendoza

Memoria de tesis



Programa de doctorado en Ciencias del Mar.

Bienio 1994/1996

Memoria de Tesis para optar al título de:
Doctor en Biología

Directores

Dr. Joan Pau Sierra P.

Dr. Julio González del Río

Tutor

Dr. Felipe Fernández

Octubre 2003

RESUMEN

Se han realizado diferentes campañas en el tramo estuarino del Río Ebro para estudiar las condiciones estacionales del estuario y la pluma (CyTMAR, Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología, proyecto MAR96-1856, 1997) y (PIONEER, U. E., contrato No. MAS3-CT98-0170, 1999-2000). Los resultados de este trabajo corresponden principalmente a las campañas PIONEER y sus muestreos en el tramo estuarino. Se tomaron muestras de agua para su posterior análisis en el laboratorio a diferentes profundidades del estuario para caracterizar las condiciones de la capa dulce y salada, además se tomaron datos de parámetros físicos e hidrodinámicos, con el uso de un Hydrolab y un correntímetro Doppler ADP, se contó con datos de caudales medios horarios (Confederación Hidrográfica del Ebro) y de situación meteorológica. Con los datos obtenidos se procedió a calibrar un modelo de advección dispersión (MIKE 12), para estudiar la variabilidad de la penetración de la cuña salina a lo largo del periodo de estudio, encontrándose que el modelo describe la dinámica de la cuña de una forma satisfactoria. Se encontró, con los resultados de las simulaciones, que el caudal ecológico propuesto por el PHN de $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ es insuficiente para controlar la posición de la cuña salina, por lo que se propone un caudal ecológico de $130 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, ya que de acuerdo con los resultados, con caudales menores a éste, la cuña puede llegar hasta Amposta. Posteriormente se estudió la dinámica de la cuña salina en el caso hipotético de un aumento de nivel del mar de 0.50 m y sus posibles efectos, encontrándose que el cambio climático provoca una mayor penetración de la cuña (cerca de Amposta) y un mayor tiempo de permanencia de ésta dentro del estuario. También se realizó un calibrado del modelo usando valores de concentraciones de Nutrientes (NT, PSR y Ac. Ortosilícico) para estudiar el flujo de estos componentes a lo largo del año en el tramo estuarino. Sin embargo, la falta de muestreos más continuos a lo largo del año y de los coeficientes adecuados hace que los resultados del modelado de la dispersión de nutrientes a lo largo del estuario no sean totalmente satisfactorios. Existe una diferencia importante entre los valores de los flujos calculados por los datos obtenidos en las muestras y mediante el modelo, por lo que se considera que este no es el adecuado para el modelado de los nutrientes.

A mi madre y a mis hermanas

Agradecimientos.

En primer lugar quiero agradecer al CONACYT, por darme la oportunidad de realizar estos estudios de postgrado.

También quiero agradecer a mis directores de tesis, los Doctores Joan Pau Sierra (UPC-LIM) y Julio González del Río (UPV-LTMA) por su apoyo y por la ayuda que me brindaron para la realización de este trabajo, así como a todo personal del LIM, y de la UPV (Inma, Silvia, Miguel, Guillermo y demás) por su ayuda y amistad durante las campañas y durante todo este tiempo.

Gracias a toda mi familia, que nunca ha dejado de apoyarme para poder conseguir finalizar mi trabajo, siempre me dieron ánimos y siempre que necesité algo ellos hicieron lo posible por ayudarme, no los nombro a todos porque cada vez son más y seguro me faltará el nuevo.

No quiero dejar de mencionar a los amigos que compartieron conmigo todos estos años de doctorado y que la mayoría ya han terminado su trabajo, Aramis, los Güeros, Alejandro, los Chapises, Hugo, Enrique Isla, y César (seguro olvido a alguien), con todos ellos he compartido buenos momentos y algunos malos, pero así es la amistad, si no, pues uno se aburre. Un abrazo a todos. Además, a una persona que ha aparecido en estos últimos meses y me ha dado alegría y devuelto la ilusión, Tatiana.

También quiero recordar a la familia Bigorra en su totalidad, agradezco su amistad y su cariño, sobre todo cuando la salud me falló y ayudaron a mis padres en todo lo posible cuando vinieron a verme y cuidarme.

Al ahora Dr. Roberto Martínez, también conocido como el Carnalillo, mi gran amigo, con el he compartido muchos años con muy buenos momentos, y algunos difíciles también, hemos compartido charlas, cervezas, problemas y alegrías, pero sobre todo, siempre ha estado la amistad, he aprendido mucho de él y agradezco mucho su amistad y confianza durante todos estos años.

Quiero agradecer muy especialmente a la gente que me ha recibido en su casa y me ha dado su amistad en los momentos más difíciles, cuando estuve a punto de dejar todo y olvidarme, ellos me ayudaron. Definitivamente, sin su hospitalidad y amistad este trabajo no lo hubiera terminado. En Santander: Mi tío Demetrio (q.e.p.d), mi tía Conchi, Inma, Nelson y sus hermanos, Nicole, Anthony y Diego, Amelia, Demetrio (Metrín), Sonia, César, en fin, toda la familia Vinagrero Movellán. En Barcelona: Jose

María, Gorka, Andrés, Carles, Rodolfo y César. A todos ellos les estaré siempre agradecido.

No quiero olvidar mencionar al personal administrativo que siempre ha estado dispuesto a echarme una mano para solucionar cualquier problema que hubiera surgido en este tiempo. De la UPC: Marisol, Emilia, Genoveva e Isabel. Y de la UB, Montserrat Fresco, por su ayuda para realizar todos los trámites necesarios para que esto llegara a buen puerto, y por supuesto por su amistad.

*Y, quizás, la mejor victoria
sobre el tiempo y la gravitación...
es pasar sin dejar huella,
pasar sin dejar sombra
sobre los muros...*

M. Tsvietaieva

Índice de contenido

| | | |
|--------|---|-----|
| 1. | Introducción | 1 |
| 2. | Los nutrientes. generalidades y su modelado..... | 5 |
| 2.1. | Aportes de nutrientes en los estuarios..... | 5 |
| 2.2. | Ciclos de los nutrientes..... | 6 |
| 2.2.1. | Ciclo del nitrógeno | 7 |
| 2.2.2. | Ciclo del Silicio..... | 13 |
| 2.2.3. | Ciclo del Fósforo..... | 14 |
| 2.2.4. | El Fósforo en los estuarios..... | 16 |
| 2.2.5. | El mecanismo de tamponización del Fosfato..... | 18 |
| 2.2.6. | Limitación de los nutrientes..... | 21 |
| 2.3. | Modelos de nutrientes | 23 |
| 2.3.1. | Modelos de nutrientes y su aplicación. Procesos de difusión | 23 |
| 2.3.2. | Antecedentes de modelos de nutrientes..... | 31 |
| 2.3.3. | Modelo MIKE 12..... | 34 |
| 2.4. | Flujos de Nutrientes | 45 |
| 3. | El Estuario del Ebro. Campañas realizadas..... | 51 |
| 3.1. | Clasificación de los Estuarios | 51 |
| 3.1.1. | Clasificación por mareas..... | 51 |
| 3.1.2. | Clasificación topográfica..... | 52 |
| 3.1.3. | Clasificación morfológica | 53 |
| 3.1.4. | Clasificación por la salinidad | 55 |
| 3.1.5. | Clasificaciones cuantitativas..... | 59 |
| 3.2. | El Estuario del Ebro. Condiciones Hidrodinámicas | 62 |
| 3.3. | Estudios realizados en el Ebro | 66 |
| 3.3.1. | Medidas Hidrodinámicas | 68 |
| 3.3.2. | Medidas de calidad de agua..... | 68 |
| 3.3.3. | Datos meteorológicos | 70 |
| 3.4. | Descripción de las campañas | 71 |
| 3.5. | Parámetros físicos y químicos | 88 |
| 3.6. | Parámetros biológicos..... | 99 |
| 4. | Dinámica de la cuña salina..... | 103 |
| 4.1. | Factores que afectan a la dinámica de la cuña salina..... | 103 |
| 4.1.1. | Caudal del río..... | 104 |
| 4.1.2. | Morfología del lecho fluvial | 107 |
| 4.1.3. | Nivel del mar..... | 109 |
| 4.1.4. | Factores meteorológicos | 110 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 4.1.5. | Importancia relativa de los distintos factores..... | 111 |
| 4.2. | Dinámica de la cuña salina del río Ebro | 112 |
| 4.2.1. | Antecedentes | 112 |
| 4.2.2. | Campañas del LIM (UPC) y el LTMA (UPV) | 117 |
| 4.2.3. | Análisis del PHN..... | 128 |
| 4.2.4. | Análisis de los datos disponibles..... | 129 |
| 4.2.5. | Efectos de la cuña salina | 130 |
| 4.3. | Modelo Hidrodinámico de la cuña salina..... | 131 |
| 4.3.1. | Batimetría | 131 |
| 4.3.2. | Condiciones de contorno | 135 |
| 4.3.3. | Calibrado del modelo mediante la salinidad | 140 |
| 4.4. | Análisis de la dinámica de la cuña salina | 150 |
| 4.4.1. | Dinámica en función de los datos disponibles..... | 150 |
| 4.4.2. | Dinámica en función de las simulaciones..... | 157 |
| 4.5. | Posibles efectos del cambio climático (CC) en la cuña salina | 164 |
| 4.6. | Barrido de la cuña..... | 169 |
| 4.7. | Efecto de las reducciones de caudal sobre la dinámica de la cuña salina | 170 |
| 4.7.1. | Efecto de las reducciones debidas a presas de regulación | 170 |
| 4.7.2. | Efecto de las reducciones de caudal previstas en el PHN | 173 |
| 5. | Modelado de la distribución de los nutrientes en el Tramo estuarino del ebro | 175 |
| 5.1. | Dificultades para desarrollar un modelo ecológico en el estuario del Ebro | 175 |
| 5.2. | Relación Salinidad-Nutrientes | 176 |
| 5.3. | Estimación de la distribución de nutrientes..... | 178 |
| 5.3.1. | Nitrógeno total | 179 |
| 5.3.2. | Fósforo soluble Reactivo (PSR) | 184 |
| 5.3.3. | Ácido Ortosilícico (SiO ₄) | 189 |
| 5.3.4. | Diagramas Salinidad - Nutriente. | 194 |
| 5.4. | Flujos de nutrientes | 199 |
| 5.4.1. | Resultados por Diagramas de Salinidad – Nutriente | 200 |
| 5.4.2. | Resultados por el método de los flujos medios | 202 |
| 5.4.3. | Flujos de nutrientes obtenidos de los resultados del modelo | 206 |
| 5.4.4. | Comparación entre los flujos obtenidos en campaña y el modelo | 208 |
| 6. | Discusiones y conclusiones..... | 211 |
| 6.1. | Dinámica de la cuña salina..... | 211 |
| 6.2. | Flujos de nutrientes | 215 |
| 6.2.1. | Nitrógeno Total. | 215 |
| 6.2.2. | Fósforo soluble reactivo..... | 216 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 6.2.3. Ácido Ortosilícico | 217 |
| 6.3. Conclusiones generales..... | 218 |
| 6.4. Recomendaciones | 219 |
| 7. Literatura Citada..... | 221 |