

# INTERRELACIÓN ENTRE EL MIXOLIMNION Y EL MONIMOLIMNION EN LA LAGUNA COSTERA LA MASSONA (GIRONA)

A. Domínguez-Planella; X.G. Riera; L. Polo y C.A. Abellà

Institut d'Ecologia Aquàtica. Col·legi Universitari de Girona (Universitat Autònoma de Barcelona).

Palabras clave: Meromixis, coastal lagoons, phototrophic bacteria.

## ABSTRACT

### INTERRELATIONS BETWEEN THE MIXOLIMNION AND MONIMOLIMNION IN THE COASTAL LAGOON OF LA MASSONA (GIRONA, SPAIN)

La Massona is a meromictic coastal lagoon with a year around chemocline. There is a mixolimnion with phytoplanktonic populations and a monimolimnion with dense populations of phototrophic bacteria. The latter are selected mainly by the selective filtration of light by phytoplankton. The low redox potential of the sediment and monimolimnion assures a nutrient turn-over. The marine water intrusions, during October and February, change dramatically the evolution of the lagoon water column. During marine infalls, the monimolimnion becomes oxygenated and the presence of phototrophic bacteria is limited to the upper sediment of the lagoon.

## INTRODUCCIÓN

La laguna costera La Massona se encuentra situada en el Parque Natural "Els Aiguamolls de l'Empordà", en el golfo de Roses, Girona. La Massona, junto con la laguna de Cullera (Miracle y Vicente, 1985), representan un raro ejemplo de lagunas costeras meromícticas. Su meromixis deriva del doble origen de sus aguas, dulce por los ríos y salada por las intrusiones marinas causadas por vientos de levante. Esta condición determina la génesis de dos compartimentos no estancos en la columna de agua.

Los primeros trabajos publicados sobre La Massona fueron de Armengol et al. (1983) sobre parámetros físicos y comportamiento térmico. El

mixolimnion y monimolimnion evolucionan con cierta independencia y se desarrollan en cada una de estas capas poblaciones distintas, fitoplancton en una y bacterias fototróficas en la otra. Este hecho, junto con grandes diferencias en la química de las aguas (condiciones óxicas en el mixolimnion y anóxicas en el monimolimnion) determina las interacciones entre las dos partes de la columna de agua. En este trabajo se estudia el tipo y grado de interacción entre ambas partes en lo que concierne a los flujos de sedimentación y difusión de diferentes componentes químicos, y biológicos tratando de dar una visión integrada del comportamiento limnológico de La Massona.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Se ha estudiado la laguna costera de La Massona a lo largo de un ciclo anual comprendido entre los meses de mayo de 1985 y 1986. El muestreo ha sido efectuado mediante una bomba peristáltica en el punto de máxima profundidad (10,5 m) y en función de la situación de los gradientes en la columna de agua (termoclina y quimioclina).

Los análisis de fosfatos y nitritos se han efectuado según Strickland y Parsons (1968). La determinación de la concentración de amonio se ha efectuado con un electrodo selectivo Orion 95-12.

La determinación de clorofilas y bacterioplancton se ha realizado mediante extracción en acetona al 90%. Se filtraban entre 250 a 500 mL de agua según la densidad fitoplanctónica de la muestra (Stal et al. 1984). Las muestras destinadas al recuento de fitoplancton se fijaban con lugol, y el recuento se efectuaba con un microscopio invertido Union Optical Bi-6538 siguiendo los métodos clásicos. Las muestras destinadas al recuento del bacterioplancton se fijaban con formaldehído (4%). El número de microorganismos se determinaba mediante recuento directo por microscopía óptica de epifluorescencia previa tinción con naranja de acridina (Riera & Abellà, 1987).

Los valores del número total de células del fitoplancton y del bacterioplancton se integraban para cada muestreo; el fitoplancton se integraba entre 0 m y la quimioclina y el bacterioplancton desde la quimioclina hasta el fondo. Las integraciones se expresan como número de células por cm<sup>2</sup>.

## RESULTADOS

Los valores de la concentración de fosfatos (fósforo reactivo soluble) a lo largo del ciclo estudiado (Fig. 1) oscilan desde indetectable hasta 180  $\mu\text{M}$ . Normalmente los valores más elevados se encuentran en el monimolimnion, mientras que en el mixolimnion los valores oscilan entre indetectable y 20  $\mu\text{M}$ .

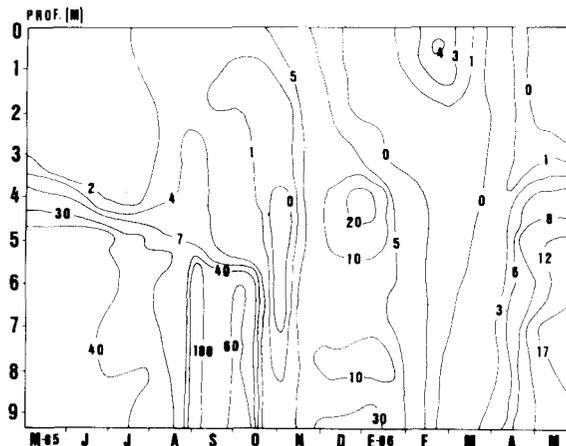


Figura 1. Distribución en el espacio y el tiempo de la concentración de fosfatos (fósforo soluble reactivo) en  $\mu\text{M}$  durante el ciclo estudiado (mayo 1985-mayo 1986).

Temporal and spatial distribution of the phosphate concentration (SRP,  $\mu\text{M}$ ) during the annual cycle (may 1985-may 1986).

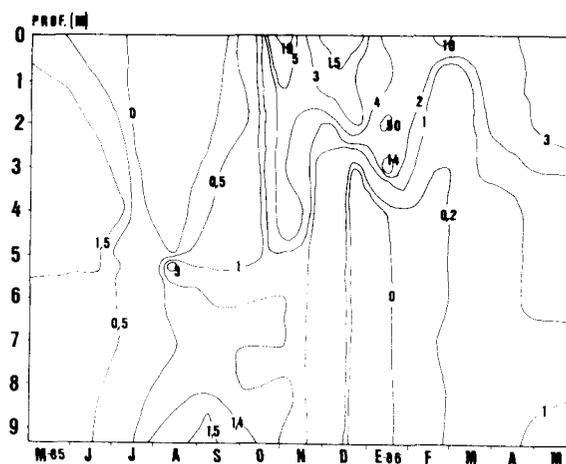


Figura 2. Distribución en el espacio y el tiempo de la concentración de nitritos ( $\mu\text{M}$ ) a lo largo del ciclo anual estudiado. Temporal and spatial distribution of nitrites concentration ( $\mu\text{M}$ ) during the annual cycle (1985-1986).

Respecto a los compuestos de nitrógeno, se dispone sólo de los datos de nitritos en La Massona a lo largo del ciclo anual (Fig. 2), y de algunos datos de amonio tomados en momentos representativos del ciclo.

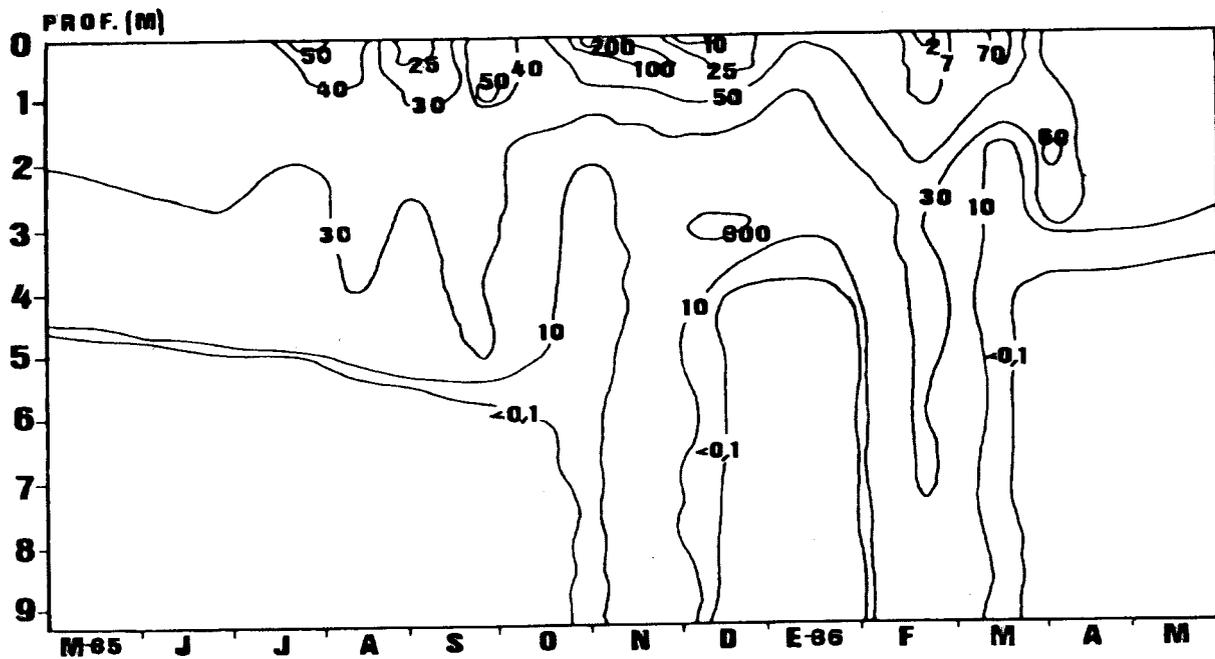


Figura 3. Distribución en el espacio y el tiempo de la concentración de clorofila a ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a lo largo del ciclo estudiado, Temporal and spatial distribution of chlorophylla ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) during the annual (1985-1986).

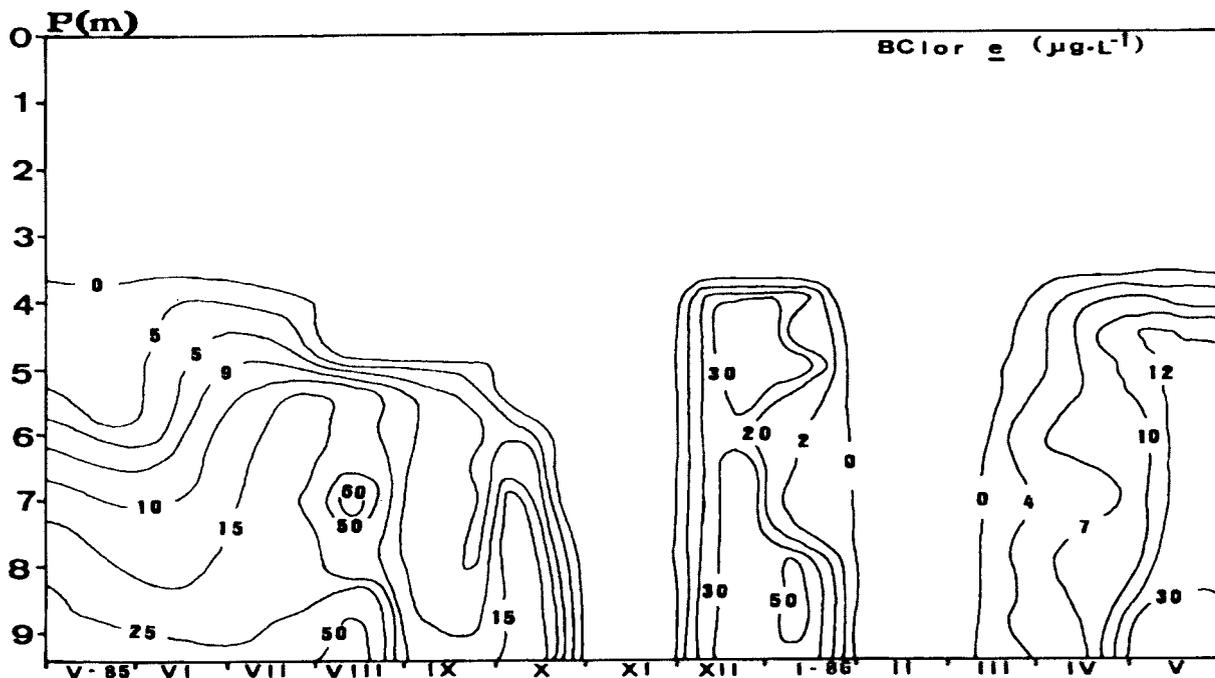


Figura 4. Distribución en el espacio y el tiempo de la concentración de bacterioclorofilae ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a lo largo del ciclo anual. De Riera y Abellà (1986). Spatial and temporal distribution of concentration of Bacteriochlorophyll  $\epsilon$  ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) during the annual cycle. From Riera & Abellà

La concentración de amonio a finales de noviembre de 1985 (durante la primera intrusión marina) osciló entre 0,05 y 2  $\mu\text{M}$ , siendo bastante constante a lo largo de todo el perfil vertical. A mitad de marzo de 1986 (inicio de las condiciones de estratificación después de la segunda intrusión marina), las cantidades totales de amonio son inferiores, y van desde niveles indetectables entre 0 y 1 m hasta valores de  $10^{-2} \mu\text{M}$  a partir de 1 m de profundidad.

La concentración de clorofila a (Fig. 3) en La Massona a lo largo del ciclo estudiado varía normalmente entre valores inferiores a los 0,1  $\text{mg. m}^{-3}$  y valores de 50  $\text{mg. m}^{-3}$ , registrándose algún valor puntual más elevado, como el de 632  $\text{mg. m}^{-3}$  en diciembre entre 2 y 3 m de profundidad.

En la Figura 4 se esquematiza la variación de la bacterioclorofila e (Bclor e) a lo largo del ciclo anual. Se observa una total desaparición de la Bclor e durante los dos períodos de intrusión marina, momentos en que la columna de agua permanece aerobia. Durante el resto del ciclo, los valores oscilan entre los 10 y los 30  $\text{mg. m}^{-3}$ , presentándose dos máximos de 50-60  $\text{mg. m}^{-3}$  en los meses de agosto (estratificación estival) y de febrero (estratificación incipiente después de la primera mezcla).

El número total de células del fitoplancton se mantiene a lo largo del ciclo entre 105 i 106  $\text{cél. cm}^{-2}$ . Mientras que el número total de bacterias, si bien se mantiene cerca de 106  $\text{cél. cm}^{-2}$  en las épocas de estratificación, desaparecen de la columna de agua quedando un remanente estimado en el sedimento de 103  $\text{cél. cm}^{-3}$ .

### **Nutrientes y poblaciones algales del mixolimnion**

La dinámica de la concentración de fosfatos está estrechamente relacionada tanto con la dinámica de las poblaciones planctónicas presentes en la laguna como con la propia de los parámetros físico-químicos. La concentración de fosfatos en el mixolimnion es normalmente menor que en el monolimnion, debido al consumo de este nutriente por parte de las algas y a la propia precipi-

tación del fosfatocálcico. De hecho, las concentraciones de fosfato presentes en la Massona no son limitantes para el crecimiento del fitoplancton y, por tanto, su variación no está estrictamente ligada a la concentración de este nutriente. El sedimento actúa como reservorio de fosfato, del que se libera en condiciones reductoras, pasando por difusión al monolimnion. El fosfato tampoco es pues un nutriente limitante para las poblaciones de bacterias fototróficas a las concentraciones encontradas en el monolimnion de la Massona.

Sin embargo la concentración de fosfato está muy influenciada también por otros factores externos. Durante las intrusiones marinas, se produce un aporte importante de agua salina, ocasionando una mezcla y un recambio de la columna de agua. Los resultados ponen de manifiesto la correlación existente entre la desaparición de los fosfatos de la columna de agua y las épocas de intrusión, manifestándose la pobreza del agua marina en este nutriente.

Después de las intrusiones marinas, el fosfato difunde desde el monolimnion mixolimnion a través de la quimioclina, la cual no llega nunca a desaparecer debido al carácter marcadamente meromítico de la laguna (Riera et al. 1987). En épocas de fuertes lluvias, se produce un aporte importante de agua dulce gracias a la comunicación de la laguna con el río Fluvià; asimismo, la laguna actúa de cuenca de recepción del drenaje de los campos de cultivo próximos (Riera et al. 1987; Riera y Abellà, 1986). Estos dos factores explicarían la presencia de pequeñas cantidades de fosfato en el mixolimnion (agua dulce o salobre) de la laguna durante las épocas de mezcla. En la Figura 6 se esquematizan los diferentes tipos de aportes que puede recibir la laguna en función de la climatología.

El proceso de sedimentación al cual se ven sometidas las poblaciones de fitoplancton y bacterioplancton representan los principales aportes de nitrógeno al sedimento. Los procesos fermentativos que tienen lugar en dicho sedimento en condiciones reductoras (amonificación), ocasionan una acumulación de amonio en el monolimnion. Dicho compuesto llega al mixolimnion por difusión a través de la quimioclina. El amonio presente en el mixolimnion, es oxidado por los mi-

croorganismos nitrificantes a nitrito y nitrato. El nitrato es consumido principalmente por el fitoplancton, cerrándose así el ciclo. Los valores máximos de nitritos observados en el mixolimnion són debidos a los aportes externos, al igual que sucedía con el fosfato.

Ambos nutrientes (nitrato y fosfato) retornan al monimolimnion basicamente por dos procesos. Uno de ellos, constante a lo largo del tiempo, es el proceso de sedimentación al que estan sometidas las células del fitoplancton. Otro, muy puntual pero no menos importante, son los temporales de levante, que homogenizan la columna por intrusión marina a la vez que provocan la entrada de nutrientes y agua dulce por vía fluvial y por escorrentia superficial procedente de los campos de cultivo circundantes.

Las poblaciones de algas planctónicas, además de sucederse en el tiempo, se distribuyen diferencialmente en el perfil vertical. Un primer tipo de poblaciones con *Peridinium* sp., se encuentran cercanas a la interfase oxígeno-sulfhídrico, probablemente ligadas al aumento de nutrientes que se da en estas zonas a causa de los fenómenos comentados anteriormente y muchas veces cerca del punto de compensación respecto de la luz (1%). Un segundo tipo de poblaciones, se sitúan cerca de la superficie, menos condicionadas por la luz que por la irregular entrada de nutrientes desde el exterior de la laguna. Durante la mayor parte del ciclo el grupo dominante lo constituyen los cianófitos (ocianobacterias), siendo cuantitativamente importante la presencia de *Synechococcus* y *Synechocystis*. Los clorófitos constituyen también un grupo importante, dándose una alternancia de los valores relativos con los cianófitos. Es notable la presencia de especies marinas (varias especies de *Chaetoceros*, *Ditylum brightwellii*, *Skeletonema costatum* entre otras) después de las intrusiones que se dieron en La Massona en los meses de noviembre y febrero a lo largo del ciclo estudiado.

#### Poblaciones bacterianas del monimolimnion

Las poblaciones de bacterias fototróficas generalmente són poco diversas. Las poblaciones de

clorobiaceas marrones son las predominantes a lo largo de todo el ciclo (*Chlorobium phaeovibrioides*, *Prosthecochloris phaeoasteroidea*), presentándose después de las mezclas junto con pequeñas poblaciones de clorobiaceas verdes (*Prosthecochloris aestuarii*, *Chlorobium vibrioforme*) que desaparecen al avanzar la estratificación (Rieray Abellà, 1986). Estas poblaciones se sitúan en el mismo límite de la interfase oxígeno-sulfhídrico, donde la concentración de sulfhídrico y la intensidad de luz son suficientes. Es precisamente el efecto de filtrado de la luz por parte del fitoplancton el principal factor selectivo de las diferentes poblaciones de bacterias fototróficas.

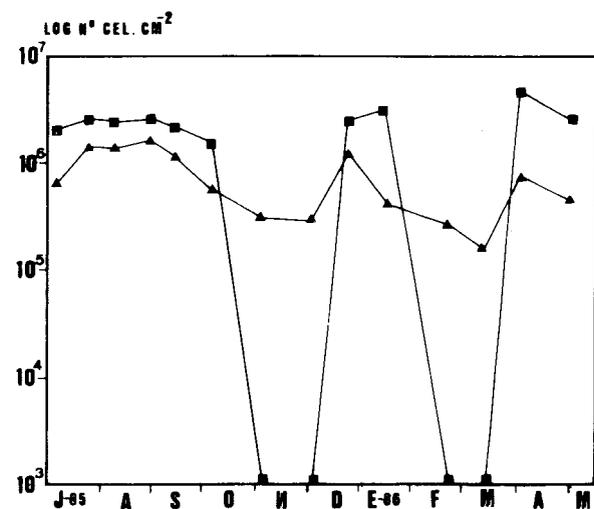


Figura 5. Representación logarítmica combinada del número total de células del fitoplancton (cel. cm<sup>-2</sup>) integradas entre 0 y la quimioclina (triángulos) y número total de células del bacterioplancton desde la quimioclina hasta el fondo (cél. cm<sup>-2</sup>) (cuadrados). Los valores representados son el resultado de la integración realizada para cada muestreo.

Combined logarithmic representation of total number of the cells of phytoplankton (cell. cm<sup>-2</sup>) integrated between 0 and chemocline (triangles) and total number of cells of bacterioplankton between chemocline and bottom (cell. cm<sup>-2</sup>) (squares). Values are expressed as the result of the integration for each sampling date.

## DISCUSIÓN

### Variación de los valores integrados del fitoplancton y bacterioplancton

El número total de células del fitoplancton integrado para toda la columna no experimenta fluctuaciones importantes a lo largo del ciclo (Fig. 5); además, estos valores se mantienen a niveles altos. Estos resultados vienen a confirmar el hecho de que en la columna de agua de la Massona la concentración de nutrientes no limita nunca de forma importante el crecimiento de las poblaciones fitoplanctónicas.

Durante la mayor parte del ciclo, no se llega a mayores concentraciones de clorofilas debido a la relativa periodicidad de las intrusiones marinas con el efecto de lavado y dilución que comportan, ya que se eliminan de la columna de agua la mayoría de los fosfatos y gran parte de la biomasa acumulada en la misma.

De forma parecida a la evolución del número de algas, el número total de bacterias se mantiene a niveles elevados pero con dos discontinuidades importantes. En las épocas de mezcla, el monimolimnion se torna aerobio y la interfase oxígeno-sulfhídrico coincide con la agua-sedimento. Las poblaciones de bacterias fototróficas que se desarrollaban en la parte anaerobia de la interfase

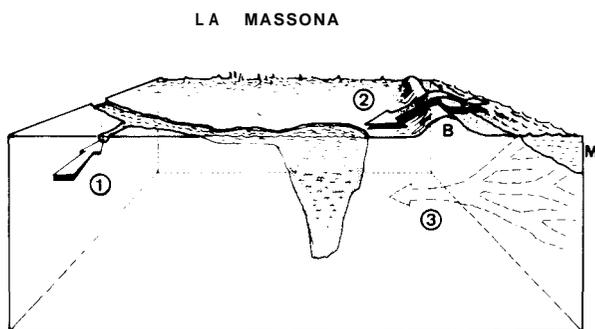


Figura 6. Localización de las principales entradas de agua a La Massona. (1) entrada de agua dulce desde el río Fluvia. (2) entrada de agua marina durante las intrusiones. (3) entrada de agua marina por filtración a través de la barra de arena. B: barra de arena. M: mar.

Main inflows in La Massona. (1) Fresh-water entrance from Fluvia river. (2) Marine water entrance during intrusions. (3) Marine seepage through the sand bar. B: sand bar. M: sea.

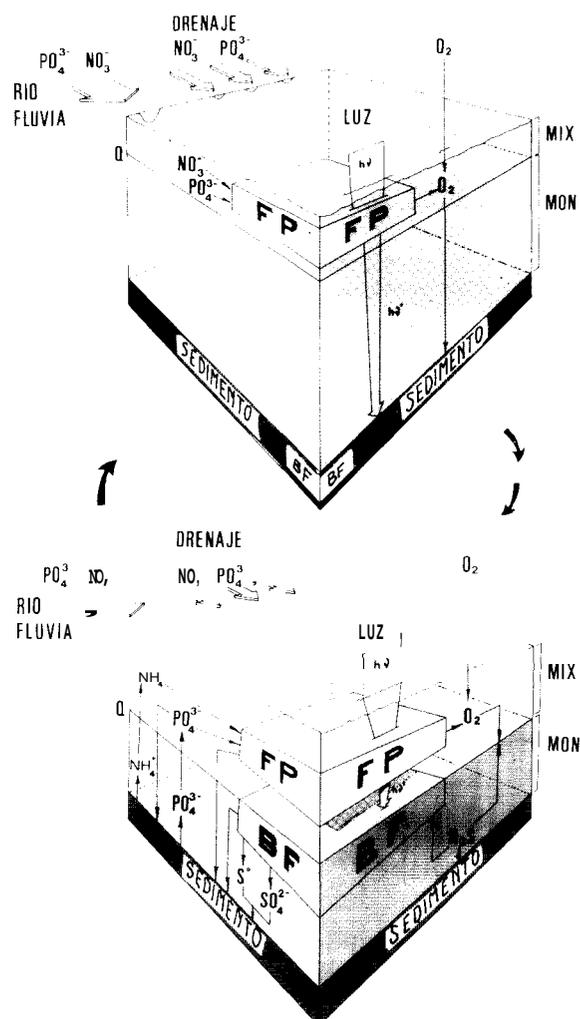


Figura 7. Representación compartimentalizada de la columna de agua de la laguna; indicando las relaciones físicas, químicas i biológicas entre ambos compartimentos. FP: Fitoplancton; BF: Bacterias fototróficas; MON: Monimolimnion; MIX: Mixolimnion. La trama densa corresponde al sedimento. La trama finamente punteada corresponde al monimolimnion anaerobio. (Los valores de oxígeno, sulfhídrico y % penetración de la luz han sido extraídos de Riera et al. (1987) y Riera y Abellà (1986).

Box model representation of the water column showing physical chemical and biological relations between both compartments. FP: phytoplankton; BF: phototrophic bacteria; MON: monimolimnion; MIX: mixolimnion. Shaded area represents sediments. Dotted area represents anoxic monimolimnion.

oxígeno-sulfhídrico quedan relegadas al sedimento, lugar donde queda un pequeño remanente. Al recuperarse la estratificación después de las mezclas, el sulfhídrico provoca la anoxia en el monimolimnion y este remanente del sedimento recolonizará rápidamente la columna, llegando nuevamente a valores cercanos a los máximos.

Respecto a la distribución de pigmentos, la concentración de bacterioclorofila sigue la misma dinámica que la del número total de bacterias, mientras que la clorofila *a* se mantiene más constante a lo largo del ciclo.

### **Compartimentalización de la columna de La Massona**

El mixolimnion y el monimolimnion son en realidad dos compartimentos separados por una quimioclina bien marcada a lo largo del ciclo. La diferencia de salinidad entre los dos compartimentos origina asimismo una diferencia de densidad, la cual impide la mezcla espontánea de las dos masas de agua. En la figura 7 se representa la evolución de esta compartimentalización en el tiempo. Como puede observarse, las diferencias de densidad no impiden un intercambio de gases en ambas direcciones ( $O_2$  y  $H_2S$ ), nutrientes ( $PO_4^{3-}$   $NH_4^+$ ) y materia orgánica, con un efecto importante sobre las poblaciones de fitoplancton y bacterioplancton. La calidad y la cantidad de estos intercambios depende de la época considerada y han sido discutidos anteriormente. Las condiciones de fuerte estratificación con monimolimnion anóxico son rápidamente cambiadas por el efecto traumático de las intrusiones marinas, quedando toda la columna aerobia.

De los resultados obtenidos cabe deducir una estrecha relación entre los ciclos biológico, químico y físico de la laguna. La presencia de factores externos de incidencia puntual a la vez que traumática sobre la laguna tiene un efecto decisivo

sobre el desarrollo de los ciclos anteriormente comentados. Las poblaciones monimolimnéticas de bacterias fototróficas, cuando los factores externos permiten su presencia, vienen seleccionadas por el filtro lumínico que representan las poblaciones de fitoplancton del mixolimnion. Las condiciones reductoras del monimolimnion se restablecen y mantienen después de las intrusiones marinas gracias a la presencia de materia orgánica y sulfato en concentraciones no limitantes para las poblaciones de bacterias sulfato reductoras del sedimento, las cuales mantienen elevada la concentración de sulfhídrico en el monimolimnion. La anaerobiosis del monimolimnion permite que, a pesar de la compartimentalización físico-química de la columna de agua, la materia orgánica y los nutrientes mantengan un cierto carácter cíclico. El aporte de nutrientes al mixolimnion provenientes de la mineralización que tiene lugar en el monimolimnion permite el desarrollo de importantes poblaciones de fitoplancton. Cerca de la superficie se desarrollan unas poblaciones ligadas a los aportes externos de fosfatos. A profundidades intermedias se dan las concentraciones de pigmentos más estables del ciclo estudiado, mientras que cerca de la quimioclina tiene lugar el desarrollo de poblaciones ligadas a la difusión de nutrientes desde el monimolimnion.

El efecto estocástico de los aportes externos altera puntualmente el ciclo, sin detenerlo.

### **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a Jesús García-Gil el haber podido utilizar su programa "Integración", así como la ayuda en la realización de algunas gráficas y esquemas.

## BIBLIOGRAFIA

- ARMENGOL, J.; COMÍN, F.A. y LÓPEZ, P. 1983. Balance térmico anual de la laguna de la Massona (Alt Empordà, Girona). Actas I Congreso Español de Limnología: 7-16.
- MIRACLE, R.M. y VICENTE, E. 1985. Phytoplankton and photosynthetic sulphur bacteria production in the meromictic coastal lagoon of Cullera (Valencia, Spain). Verh. Internat. Verein. Limnol. 22: 2214-2220.
- RIERA, X.G. y Abella, C.A. 1986. Dinàmica anual de les poblacions de bacteris fototròfics de la llacuna costanera de la Massona (Alt Empordà, Girona). Scientia gerund. 12:35-48.
- RIERA, X.G.; DOMÍNGUEZ-PLANELLA, A.; POLO, L. ; MORENO-AMICH, R.; ABELLÀ, C.A. 1987. Dinàmica de la meromixis de la laguna costera de la Massona (Alt Empordà, Girona). Ciclo anual e intrusions marines. Actas del IV Congreso Español de Limnología: 55-64. Sevilla.
- STAL, L.J.; VAN GEMERDEN, H. y Krumbein, W.E. 1984. The simultaneous assay of chlorophyll and bacteriochlorophyll in natural microbial communities. J. Microbiol. Meth. 2:295-306
- STRICKLAND, J.D.H. y PARSONS, T.R. 1968. A practical handbook of seawater analysis. Bull. Fish. Res. Board. Can. 167.