DINAMICA DE LA MEROMIXIS EN LA LAGUNA COSTERA DE LA MASSONA (ALT EMPORDA, GIRONA). CICLO ANUAL E INTRUSIONES MARINAS.

Xavier RIERA, Assumpció DOMINGUEZ-PLANELLA, Lluís POLO, Ramon MORENO-AMICH y Carles A. ABELLA.

Institut d'Ecologia Aquàtica, Col·legi Universitari de Girona.
Universitat Autònoma de Barcelona. Hospital, 6. 17071 Girona.

Palabras clave: Lagunas litorales, ciclo anual, limnología física, ecosondación, meromixis.

SUMMARY

MEROMIXIS DYNAMICS IN LA MASSONA COASTAL LAGOON (ALT EMPORDA, GIRONA). ANNUAL CYCLE AND MARINE INTRUSIONS.

Key Words: Coastal lagoons, annual cycle, physical limnology, ecosounding, meromixis.

In this work a description of the dynamics of meromixis in La Massona coastal lagoon is presented. The sporadic marine water intrusions changes dramatically the normal evolution of the lagoon water column. A new bathymetric map is presented at its role on the dynamics of the whole lagoon is discussed. The chemocline does not disappear during the annual cycle but oscillates from 1 to 6 meters of depth produced by the interaction between marine and fresh waters. The monimolimnion remains anoxic except during marine infalls. Water transparency, density and O_2/H_2S dynamics among others are discussed.

INTRODUCCION

La laguna de La Massona, forma parte de un conjunto de lagunas litorales situado en la desembocadura del río Muga, en la Reserva Integral del Parque Natural de los "Aiguamolls de l'Empordà" (Girona).

El primer trabajo publicado sobre esta laguna es el de ARMENGOL et al. (1983). En él se describe básicamente el comportamiento térmico de la laguna, considerada en este caso como no heliotérmica. Se efectúa también una primera aproximación de la batimetría y se describe el ciclo de algunos parámetros físico-químicos durante el año 1981. Durante el mismo período se realizaron estudios sobre diversos parámetros físico-químicos i componentes del sedimento (LOPEZ et al. 1984; LOPEZ, 1986). Posteriormente, Garcia-Merchan (comunicación personal), sigue un ciclo anual de algunos parámetros seleccionados durante 1981-82.

IV CONGRESO ESPAÑOL DE LIMNOLOGIA
Actas : 55-64

El presente trabajo se inscribe en un estudio pluridisciplinario sobre el sistema lagunar de l'Alt Empordà que efectúa el Institut d'Ecologia Aquàtica del Col·legi Universitari de Girona y que incluye estudios sobre la dinámica del zooplankton, fitoplancton, bacterioplancton además del estudio sobre las poblaciones de peces y de la cartografía de la vegetación.

Las lagunas litorales son un ejemplo de condiciones intermedias entre las de un río que desemboca al mar o un estuario y las de las aguas estancadas de un lago. En estos ambientes costeros se producen grandes fluctuaciones que, según su frecuencia, intensidad y amplitud, las caracterizan (MARGALEF, 1969). Las condiciones meteorológicas locales junto con el tipo y forma de desembocadura del sistema fluvial al mar determinan el tipo de fluctuación a que están sometidos estos ambientes. Este hecho es, en muchos sentidos, mas significativo que los valores de diferentes parámetros físico-químicos en diferentes profundidades y momentos del año.

Otra de las características generales de las lagunas litorales es su escasa profundidad. En la laguna estudiada esto se cumple tan solo en la parte de la laguna que no supera los 3 m de profundidad. La Massona combina las características de lagunas litorales poco profundas con las de lagunas más profundas. Por ello, se ha creído de interés el estudio detallado de este tipo mixto de laguna costera.

Hay que destacar que La Massona se encuentra separada del mar tan sólo por una barra de arena de 150 m de anchura. Esta circunstancia favorece que los temporales de levante provoquen frecuentes intrusiones de agua marina en esta laguna, así como la filtración de agua marina a través de la barra de arena.

Así pues para comprender la dinámica del funcionamiento de La Massona, es necesario conocer la influencia de la batimetría sobre la distribución de las masas de agua de diferente densidad y por ende sobre la evolución de la meromixis. Por otro lado hay que determinar la frecuencia, intensidad y efectos de las intrusiones de agua marina causadas por los temporales de levante en la zona.

MATERIAL Y METODOS

El muestreo se ha efectuado cada 20 días en la columna de agua del punto de máxima profundidad. En el punto de muestreo se efectuaron las siguientes mediciones: % de penetración de la luz (con célula fotoeléctrica de selenio Megatron), temperatura (mediante termistor de campo CRISON T-637), salinidad (con conductímetro YSI 33), oxígeno (con oxímetro YSI 57) y pH (con pHímetro CRISON 506).

La batimetría ha sido elaborada a partir de múltiples perfiles obtenidos mediante ecosondador FURUNO FE-450 de 50 KHz de frecuencia. Las concentraciones de H_2S se han medido en el laboratorio con un electrodo selectivo ORION, y el potencial red-ox mediante un electrodo METROHM 6.0401.100. Los valores de la densidad se han calculado a partir de la ecuación de BÜHRER y AMBÜHL (1975) en función de la conductividad y temperatura del agua.

Tabla 1. Parámetros limnológicos de la laguna de La Massona según Hutchinson (1957).

Parámetro	Parte CIRCULAR	LENGUA
A (m ²)	9435,5	36084,2
V (m ³)	36262,1	73464,0
z _m (m)	10,5	3,0
z (m)	3,84	2,04
l (m)	128,5	775,0
b (m)	90,2	58,0
L (m)	346,3	2006,6
D _L	1,006	2,98
z _r (m)	9,58	1,4
DV	1,097	2,04
E (°)	9,4	-
z/z _m	0,36	0,68

Fig. 1. Mapa batimétrico de La Massona: a) laguna completa y b) parte circular en detalle (2X). Bathymetric map of La Massona: a) the entire lagoon and b) circular part in detail (2X).

RESULTADOS

1. La batimetría de la laguna de La Massona

En la figura 1 se presenta el nuevo mapa batimétrico efectuado mediante ecosondación de 25 transectos de la laguna. Se pueden apreciar dos partes bien diferenciadas, una circular profunda y cercana al mar, y otra, en forma de lengua menos profunda que se extiende perpendicular a la línea de costa. Se han calculado los parámetros de HUTCHINSON (1957) para ambas, ya que corresponden a dos zonas con distinto comportamiento limnológico. En la tabla 1 se presentan los resultados de los parámetros citados.

En la parte circular, el valor de D_L pone de manifiesto su alto grado de aproximación a una circunferencia y el cociente $\bar{z}/z_L$ indica que la forma de la cubeta se aproxima a un cono. En la lengua, el valor de D_L corresponde a una elongación subrectangular y el cociente indicado señala la forma plana de su fondo.

2. Penetración de la luz

Los máximos de penetración de la luz (figura 2) ocurren durante la estación invernal, ya que la menor llegada de radiación solar viene compensada por el aumento en la transparencia del agua. A mediados de invierno (22-02-86) y coincidiendo con el segundo período de mezcla vertical, el 0,1% de la luz incidente llega hasta los 10 m. Se observa que la pendiente a lo largo del perfil presenta pocas fluctuaciones (el coeficiente de extinción oscila entre 0,5 y 1,0); concretamente $n=1$ entre 0 y 0,75 m, $n=0,5$ entre 0,75 y 3,25 y $n=0,7$ entre 3,25 y 10 m. Se observa que los perfiles correspondientes al período entre mezclas (11-01-85) y posterior a la segunda mezcla (03-05-86) son muy similares, con un cambio bastante pronunciado del coeficiente de extinción entre 2,5 y 3 m. Concretamente, en el perfil del 11-01-86 se detecta un $n=0,5$ entre 0 y 3 m y un $n=2,3$ entre 3 y 6 m (extinción hasta el 0,01%). En el perfil del 03-05-86 tenemos un $n=0,6$ entre 0 y 2,5 m y un $n=1,6$ entre 2,5 y 7 m (extinción hasta el 0,01%).

3. Evolución de la temperatura

En la figura 3 se resumen las variaciones de la temperatura de la columna de agua a lo largo del ciclo anual. Desde mayo hasta octubre del 1985, una termoclina muy marcada avanza desde 4 hasta 6,5 m, a partir del que se produce la mezcla vertical. En el mixolimnion la temperatura oscila entre 17 y 24 °C (a mediados de agosto) mientras que el monimolimnion se mantiene entre 14-14,5 °C hasta la mezcla otoñal.

En invierno, durante el período comprendido entre las dos mezclas, se observa una cierta estratificación inversa del perfil con 2-5 °C en superficie y 15-17 °C a partir de los 3 m. A partir de mayo de 1986 se restablecen progresivamente las condiciones de estratificación térmica con una termoclina incipiente a partir de los 4 m.

La temperatura máxima se registró a mediados de agosto con un valor de 24 °C y la mínima a principios de diciembre con 2 °C, ambas en superficie. Entre noviembre y febrero, en superficie, se desarrolló una capa de hielo de 1,5-2 cm de espesor.

Fig. 2. Penetración de la luz (%) en tres épocas representativas del ciclo anual. Light penetration (%) in three representative seasons of annual cycle.

Fig. 3. Variación de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) a lo largo del ciclo anual. Temperature ($^{\circ}\text{C}$) variation during the annual cycle.

Fig. 4. Variación de la salinidad ($^{\circ}/\text{oo}$) a lo largo del ciclo anual. Salinity ($^{\circ}/\text{oo}$) variation during the annual cycle.

Las dos mezclas tuvieron lugar en los meses de octubre-85, con una temperatura de $16-17^{\circ}\text{C}$ en todo el perfil, y febrero-86, con una temperatura de $10-11^{\circ}\text{C}$ en todo el perfil. En el período comprendido entre las dos mezclas, se observa que la temperatura del monimolimnion es superior a la que el mismo tenía antes de la mezcla.

4. Evolución de la salinidad

La evolución de la salinidad en la columna de agua viene reflejada en la figura 4. A lo largo de todo el ciclo la columna se mantuvo siempre estratificada por una quimioclina más o menos marcada, que separaba un agua salobre por encima de una marcadamente salina. Los valores de salinidad oscilan entre 2-10 o/oo en el mixolimnion, 20-37 o/oo en la quimioclina y 37-39 o/oo en el monimolimnion. Se puede considerar a la isolinea de 33 o/oo como separadora del mixolimnion y monimolimnion a lo largo del ciclo, oscilando desde 1 hasta 6 m.

En La Massona, la quimioclina coincide siempre con la termoclina, en presencia de ésta.

5. Evolución de la densidad

Los perfiles de densidad (figura 5) se han realizado en las cinco épocas más características del ciclo anual. En los perfiles del 12-08-85 y 03-05-86 se observa una fuerte estratificación coincidiendo el gradiente de densidad con el térmico y el salino. El monimolimnion anóxico es mucho más denso ($1,03-1,035 \text{ g.cm}^{-3}$) que el mixolimnion aerobio ($1,002-1,005 \text{ g.cm}^{-3}$). Asimismo, se observa que a finales de la primavera se estratifica cerca de los 3 m, nivel que irá descendiendo a lo largo del verano hasta los 5-6 m antes de la mezcla otoñal debido a los aportes de agua dulce. Estas

Fig. 5. Perfiles verticales de densidad (g.cm^{-3}) en cinco épocas características. Vertical profiles of density (g.cm^{-3}) in five characteristic seasons.

diferencias de densidad tan acusadas entre monimolimnion y mixolimnion explican porque no se mezclan espontáneamente.

En los perfiles del 01-11-85 y 22-02-86, coincidiendo con los dos periodos de mezcla, se observa una homogenización del perfil de densidad. Este se mantiene en valores elevados ($1,03 \text{ g.cm}^{-3}$), excepto en el primer metro, donde la densidad es menor al tratarse de agua dulce o ligeramente salina.

El perfil del 11-01-86 refleja claramente la situación entre mezclas, con una incipiente estratificación. El monimolimnion anaerobio presenta una densidad uniforme y elevada ($1,03 \text{ g.cm}^{-3}$) mientras que el mixolimnion aerobio presenta un aumento gradual de la densidad en profundidad ($1,005 \text{ g.cm}^{-3}$ - $1,03 \text{ g.cm}^{-3}$).

6. Concentración de oxígeno y sulfhídrico

En la figura 6 se puede apreciar la distribución complementarias del oxígeno y el sulfhídrico. Desde mediados de noviembre hasta mediados de enero se observan unos máximos de O_2 de $17\text{-}18 \text{ mg.L}^{-1}$ en superficie debido a la disminución de la temperatura y a la fotosíntesis algal. A mediados de agosto aparecen máximos de H_2S de 6 mM a 8 m y 4 mM a 6 m . Durante la primera mezcla se alcanzan valores de 4 mg.L^{-1} de O_2 en el fondo mientras que en la segunda mezcla se alcanzan hasta 10 mg.L^{-1} .

Es posible explicar este fenómeno por tres hechos: el agua causante de la primera mezcla estaba 7°C más caliente y tenía 4 g.L^{-1} más de sal que la causante de la segunda mezcla, con lo cual la solubilidad del O_2 en la columna de agua era menor durante la primera mezcla que durante la segunda; y el más importante es el hecho que durante la primera mezcla una gran parte del oxígeno se consumió por reacción química con los $3,76 \text{ mmoles H}_2\text{S.m}^{-2}$ presentes en la columna de agua. En cambio antes de la segunda mezcla se detectaban solamente $2,7 \text{ mmoles H}_2\text{S.m}^{-2}$. Los dos periodos en los que el monimolimnion presenta carácter aerobio coinciden con los periodos de mezcla.

7. Evolución del pH

Las isolíneas de pH (figura 7) confirman la dinámica expuesta hasta el momento. Se observa que el mixolimnion tiene siempre un pH más elevado que el monimolimnion como resultado de la elevada incorporación de CO_2 via Ciclo de Calvin por parte del fitoplancton presente en el mixolimnion y por la presencia de sulfhídrico en el monimolimnion.

El pH más elevado se presenta en superficie con valores de $8,8$ desde marzo hasta mayo. El pH más bajo se da a mediados de agosto con valores de $7,0$ a partir de 5 m . Las dos mezclas se esquematizan por sendas isolíneas verticales con valores de $7,9\text{-}8$.

Se observa que esta verticalidad no es manifiesta más que a partir del primer metro de profundidad. A pesar de la uniformización del perfil de temperatura, siempre quedan dos masas de agua bien separadas, la superior más alcalina y menos salina y la inferior más neutra y de mayor salinidad.

Fig. 6. Variación de las concentraciones de oxígeno ($mg.L^{-1}$) y sulfídrico (mM) a lo largo del ciclo anual; la zona sombreada corresponde al H_2S . Variation of oxygen ($mg.L^{-1}$) and sulfide (mM) concentrations during the annual cycle; the shaded area belongs to H_2S concentrations.

Fig. 7. Variación del pH a lo largo del ciclo anual. pH variation during the annual cycle.

Fig. 8. Variación del potencial red-ox (mV) a lo largo del ciclo anual. Red-ox potential (mV) variation during the annual cycle.

8. Potencial de óxido-reducción

En la figura 8 se esquematiza la evolución del potencial red-ox de la columna de agua durante el ciclo estudiado. El sedimento presenta siempre valores de $E_h < 0$ mV excepto en dos épocas: +30 mV entre octubre y noviembre y +90 mV entre febrero y marzo. Ambas corresponden a períodos de mezcla. En los restantes períodos se detectan valores mínimos de -300 y -400 mV (a mediados de septiembre).

Los valores máximos absolutos se presentan a mediados de agosto cuando alcanzan valores de +260mV hasta los 4 m. Las dos mezclas vienen indicadas por sendas isoclinas verticales de E_h cercanas a 0 mV (entre -50 y +50mV). En el período comprendido entre mezclas, toda la columna de agua se mantiene a $E_h < 0$ mV oscilando entre -40 y -300 mV.

DISCUSION

Los valores observados de salinidad y temperatura, y por tanto de densidad, así como la persistencia de una quimioclina durante todo el ciclo anual (incluso después de las mezclas de otoño y de finales de invierno), ponen de manifiesto el carácter marcadamente meromítico de La Massona.

Las mezclas tienen lugar en períodos en que los temporales de levante provocan frecuentes intrusiones marinas en la laguna. Estas intrusiones de agua marina son, sin duda, las principales responsables de las mezclas.

La quimioclina persiste debido a la presencia permanente de una masa de agua de origen continental sobre otra masa de agua de origen marino en profundidad. Su posición en profundidad viene condicionada por el equilibrio dinámico entre ambos tipos de aportes. Las intrusiones marinas acercan la quimioclina a la superficie sin llegar a alcanzarla debido a que los aportes continentales son constantes. Por el contrario un aumento de estos últimos la remiten a mayor profundidad.

Por otra parte, la temperatura después de la mezcla otoñal del monimolimnion es netamente superior a la que tenía antes de la misma, de lo que se deduce que la mezcla en este período no se produce por enfriamiento del mixolimnion sino por calentamiento del monimolimnion (la temperatura del agua marina en otoño es superior a la de éste). Esto no ocurre en la mezcla invernal, en que el agua marina presenta una temperatura netamente inferior a la del monimolimnion.

En síntesis, La Massona presenta una fuerte estratificación a finales de primavera y durante el período estival. A partir del otoño y hasta la primavera siguiente, la dinámica de la laguna esta sujeta a la imprevisible acción de los temporales de levante que, como bien reflejan los datos, alteran profundamente las características físico-químicas de la laguna. Sin embargo, y debido a su naturaleza meromítica, la mezcla no llega a ser total y subsiste siempre una quimioclina que separa el agua salobre de la claramente salina.

Es pues la persistencia de la quimioclina lo que provoca la mezcla independiente del mixolimnion y monimolimnion, y por tanto la existencia de una meromixis. Este comportamiento se ajusta perfectamente al concepto de inestabilidad de las lagunas costeras expresado por MARGALEF (1969), COMIN y FERRER (1979).

La meromixis aquí estudiada podría definirse como una meromixis-mixta, ya que según HUTCHINSON (1937), se trataría de una combinación de meromixis crenogénica, ya que recibe continuamente aportes de agua marina por filtración a través de la arena desde el mar, y de meromixis ectogénica, ya que en períodos de fuertes temporales de levante sufre fuertes intrusiones de agua marina que alteran, tal como se ha descrito, profundamente su dinámica físico-química. Posteriores revisiones de la mencionada clasificación (WALKER y LIKENS, 1975), consideran a la crenogénesis y a la ectogénesis anteriores como tipo III (subsistencia) y Ib (intrusión marina) de meromixis ectogénica. Según CARTER (1967), las lagunas costeras deberían dividirse en lagunas aisladas del mar y lagunas con conexión periódica con el mar (caso de La Massona).

La estructura morfométrica que posibilita la aparición de condiciones meromícticas es la existencia de una cubeta de 10,5 m de profundidad máxima en la parte más cercana al mar, que contrasta con el carácter marcadamente somero del resto de la misma laguna y de la mayoría de las lagunas costeras de su entorno. El origen de dicha cubeta es aun motivo de discusión, siendo necesario un estudio geológico exhaustivo para dilucidarlo.

BIBLIOGRAFIA

- ARMENGOL, J.; COMIN, F.A. & LOPEZ, P. 1983. Balance térmico anual de la laguna de La Massona (Alt Empordà, Girona). **Actas del Primer Congreso Español de Limnología**. Ed. Univ. Barcelona.
- BÜHRER, H. & AMBÜHL, H. 1975. Einleitung von Abwasser in Seen. **Schweiz. Hydrol.** 37:347-369.
- CARTER, J.H.C. 1967. The meromictic environment. En: D. F. Jackson (ed.) **Some aspects of meromixis**. Dept. Civil Eng., Syracuse Univ. N.Y. 1-15.
- COMIN, F.A. & FERRER, X.P. 1979. Les llacunes litorals. **Quad. Ecol. Apl.** 4: 51-68.
- HUTCHINSON, G.E. 1937. A contribution to the limnology of arid regions primarily founded on observations made in the Lahontan basin. **Trans. Conn. Acad. Arts Sci.** 33: 47-132.
- HUTCHINSON, G.E. 1957. **A treatise on limnology**. Vol.1. Part 1. Geography and physics of lakes. John Wiley & Sons.
- LOPEZ, P. 1986. Calcio, fósforo y metales del sedimento de la laguna de La Massona (Girona). **Butll. Inst. Cat. Hist. Nat.** 53:45-50.
- LOPEZ, P.; ARMENGOL, J. & COMIN, F.A. 1984. Variación anual de las características químicas en la laguna de La Massona. **Limnética**. 1:1-8.
- MARGALEF, R. 1969. Comunidades planctónicas en lagunas litorales. **Mem. Simp. Intern. Lagunas Costeras**. UNAM-UNESCO. México, D.F. 545-562.
- WALKER, K.F. & LIKENS, G.E. 1975. Meromixis and a reconsidered typology of lake circulation patterns. **Verh. Internat. Verein. Limnol.** 19:442-458