Balance térmico anual de la laguna de La Massona (Alt Empordà, Girona)

Joan Armengol, Francisco A. Comín y Pilar López

Departamento de Ecología. Facultad de Biología. Universidad de Barcelona

SUMMARY

ANNUAL THERMAL BUDGET OF "LA MASSONA" LAGOON (ALT EMPORDA, GIRONA, NE SPAIN).

La Massona is a perpendicular to the coast lagoon with a maximum depth of 11 m. The water column remains stratified all the year round as a consequence of the accumulation of salt water in the deep levels. In these conditions it is possible for the denser water to be heated by solar radiation reaching these levels. The heat budget was 11.1675 calories-gram cm^2 in 1981. However the accumulative heat in the deep levels was low and almost constant throughout the year. The most important reason for this pattern was the high eutrophy of surface waters which reduced its transparency and prevented the passage of light.

INTRODUCCION

Los lagos heliotermales, con un calentamiento diferencial de las capas de agua profundas y salinas, han constituido durante mucho tiempo una "curiosidad limnológica" con más interés teórico que práctico.

Pese a su escasa abundancia han merecido, desde hace algún tiempo, la atención de los limnólogos (KALECZINSKY, 1901; SCHAFFARCZIK, 1908). En los últimos años se han multiplicado los estudios de los pocos casos conocidos en todo el mundo, como el lago Hot (ANDERSON, 1958), el lago Boney en la Antártida (ANGINO *et al*, 1964), Green Pond (COLE *et al*, 1967) en

Estados Unidos, el lago Mahega en Uganda (MELACK & KILHAM, 1972), e incluso un lago artificial en Panamá (BOZNIAC *et al*, 1969). Por su intensidad y detalle son dignos de destacar los estudios realizados en el lago Solar en Israel (POR, 1969; ECKSTEIN, 1970; COHEN *et al*, 1977) en el que se ha seguido durante varios años el ciclo hidrológico y físico-químico, y que ha sido la base de un interesante proyecto de aprovechamiento de la energía calorífica acumulada por este tipo de lagos. Tanto es así que actualmente se cuenta con lagos artificiales destinados a la producción de energía eléctrica e incluso se ha llegado a pensar en la utilización del mar Muerto con idéntica fi-

Fig. 1. Mapa morfométrico de la Massona. (En la proyección vertical se ha exagerado la escala de profundidades).

nalidad (GAT & STILLER, 1981). El propósito del presente trabajo se centra en el ciclo térmico y de salinidad de la laguna de la Massona (Girona, NE España), y en determinar su balance anual como un ejemplo de funcionamiento de un lago de este tipo en nuestro país.

MATERIAL Y METODOS

Durante el período de octubre de 1980 a noviembre de 1981 se recogieron muestras cada tres semanas (excepto en el mes de febrero de 1981) en dos estaciones de la laguna: una situada en la zona de mayor profundidad; y la otra en la mitad de su eje longitudinal (fig. 1). En cada muestreo se midieron los perfiles verticales de temperatura y salinidad (que se realizaron siempre la misma hora; entre las 11 y las 12 h) a cada 20 cm. de profundidad desde la superficie al fondo, con un salinómetro Yellow Springs modelo YSI-33. En tres ocasiones, coincidiendo con los cambios climáticos y ambientales más marcados, se efectuaron mediciones en 20

estaciones situadas a lo largo del eje longitudinal de la laguna para determinar la existencia de posibles diferencias horizontales como consecuencia de la entrada muy localizada de agua dulce o salada.

Para el cálculo del calor acumulado (Q) en una columna de agua de 1 cm^2 de sección, que comprende desde la superficie al fondo de la laguna de la Massona en su punto más profundo, se han integrado las temperaturas del agua según la ecuación:

$$Q = \sum_1^n \frac{(T_i + T_{i+1})}{2} (Z_{i+1} - Z_i)$$

en donde Z_i son las profundidades en las que se midió la temperatura expresadas en cm., y T_i es la temperatura a la profundidad Z_i . Se ha considerado que el calor acumulado por cm^3 de agua a la profundidad Z_i (Q_i) es igual a la temperatura en esta profundidad (T_i) expresado en calorías-gramo.

Para calcular la radiación media mensual, se ha hecho a partir de los valores medios de insolación para cada período de tiempo según los datos obtenidos en la estación me-

tereológica de Figueres (Girona) que es la más cercana a la laguna estudiada.

RESULTADOS

CARACTERÍSTICAS MORFOLOGICAS E HIDROLOGICAS

La Massona es una pequeña laguna de 1.100 m. de longitud con 106 m. de anchura máxima y 31 de anchura mínima. Se encuentra orientada perpendicularmente a la línea de costa, de la que está separada por una franja de playa arenosa de 175 m. (fig. 1). En la tabla I pueden verse las características morfométricas más importantes de la laguna. Con respecto a la forma y profundidad de la laguna hay que destacar su carácter fuertemente asimétrico. En la mayor parte de su extensión la cubeta es estrecha y de fondo casi plano, con una ligera pendiente descendiente en dirección al mar, y una profundidad entre poco menos de 1 m. y 2,25 m. En el extremo próximo al mar la cubeta es de forma cónica, con una profundidad de 10 m. y de forma casi circular en superficie.

La Massona forma parte de un sistema de lagunas litorales, todas ellas perpendiculares a la costa y situadas entre las desembocaduras de los ríos Muga, al norte, y Fluviá, al sur sistema localizado en el NE de España. La circulación del agua en la Massona, y en general en todas las lagunas de la zona, viene determinada principalmente por los aportes de agua que provienen de los ríos, el drenaje de los campos de cultivo próximos, y la entrada de agua marina en algunos momentos del año. La circulación del agua dulce se produce a través de un canal lateral que comunica los mencionados ríos con las lagunas, y sólo es importante cuando hay una crecida en uno o ambos ríos. En la actualidad la comunicación de las lagunas con el río Muga se ha interrumpido debido a la regulación del caudal producida por el embalse de Boadella y la canalización del tramo final del río. Por ese motivo puede considerarse que sólo existe comunicación con el río Fluviá.

TABLA I. Características morfométricas de la laguna la Massona.

Superficie A_o (m^2)	66300
Volumen V (m^3)	148274
Profundidad máxima z_m (m)	10
Profundidad media $\bar{z}$ (m)	2,23
Longitud (m)	1000
Anchura b_x (m)	106
Anchura media $\bar{b}_x$ (m)	66,3
Perímetro L (m)	2287
Desarrollo de la orilla D_L	2,5
Desarrollo del volumen D_v	0,66

Un segundo tipo de aportes proviene del drenaje de los campos de cultivo próximos, cuya agua es recogida por una red de canales que desaguan a las lagunas. Estos aportes son proporcionalmente más importantes dentro del balance hídrico en los años más secos, como 1981, durante los cuales el caudal de los ríos es pequeño y se intensifican los regadíos. Estas aguas son a la vez una de las causas de la intensa eutrofia de las lagunas, ya que transportan una parte de los nutrientes que se utilizan en el abonado de los campos.

La circulación de agua marina se produce a través de la desembocadura de los ríos y por medio de la laguna de la Rogeda que está comunicada directa e intermitentemente con el mar. En situaciones de temporal o de fuerte viento de Levante el agua del mar es empujada hacia la costa y penetra en las lagunas.

No se ha estudiado la importancia de la evaporación ni de las entradas de agua freática por el fondo de las lagunas más profundas como la Massona (10 m.) o la Rogeda (4 m.). A pesar de ello las fluctuaciones de nivel no son importantes por la comunica-

Fig. 2. Distribución estacional y vertical de la salinidad (S ‰) desde Octubre de 1980 a Noviembre de 1981.

ción directa con el mar. Por el contrario las lagunas menos profundas pueden llegar a secarse en los meses de verano cuando los aportes de agua disminuyen considerablemente.

SALINIDAD

Las variaciones temporales de la salinidad en la Massona son un reflejo del tipo de circulación del agua que se está produciendo en cada momento. Durante todo el período estudiado el agua se mantuvo estratificada. La picnoclina siempre fue muy marcada (50 cm. de espesor aproximadamente) y estuvo situada entre 0,5 y 4,5 m. de profundidad. En los momentos en que la entrada de agua marina era importante, la salinidad del agua más profunda aumentó considerablemente haciendo ascender la picnoclina hacia la superficie. Esta situación fue particularmente importante en noviembre de 1980 y marzo de 1981 debido a los temporales marinos que se produjeron en la zona del golfo de Rosas. En estos momentos la picnoclina llegó a estar a 50 cm. de la superficie, mientras que la salini-

dad del agua profunda aumentó hasta 32‰. A partir de abril el efecto fue contrario al entrar agua dulce. La picnoclina fue descendiendo lentamente hasta 4,5 m., y la salinidad en superficie se estabilizó entre 0 y 0,5 ‰. Las variaciones anuales de la salinidad del agua de las diferentes capas fueron de 0 a 4‰ en el epilimnion; 4 a 20‰ en la picnoclina; y 12 a 32‰ en el hipolimnion (fig. 2).

Las diferencias horizontales de salinidad fueron mínimas durante todo el año (fig. 3), debido a que el gradiente de densidad vertical permite una circulación más fácil del agua en sentido horizontal.

TEMPERATURA

Las variaciones anuales de la temperatura del agua en la estación 1 se resumen en la figura 4. Como puede observarse, las variaciones más acusadas se produjeron siempre cerca de la superficie, con valores extremos de 5 a 5,5 °C en los meses de diciembre a enero y 31 °C en junio. Por debajo de 5 m.

las diferencias fueron muy pequeñas y oscilaron entre los 10 °C de octubre de 1980 y los 14 °C de noviembre de 1981.

La mayor parte del año el agua de la Massona presentó estratificación térmica, coincidiendo generalmente la termoclina con la pycnoclina, pero en marzo se produjo la uniformización de todo el perfil (12 °C), sin que esto significase que el agua se estaba mezclando ya que la pycnoclina siguió persistiendo. La igualación de las temperaturas en todo el perfil se debe al calentamiento del agua superficial después del invierno, proce-

so que continuó hasta el verano. A partir de marzo se inició la formación de una nueva termoclina.

La inversión térmica del perfil se produjo en los meses de invierno y afectó principalmente al agua situada entre los 4 y 8 m. de profundidad. En el momento en que la inversión era más acusada la temperatura iba en aumento desde la superficie (5 °C) hasta 8 m. (14 °C) disminuyendo después lentamente hacia el fondo (11 °C).

Horizontalmente las diferencias de temperatura, entre profundidades similares en toda

Fig. 3. Salinidad del agua a lo largo del eje longitudinal de la Massona en tres momentos diferentes del año.

Fig. 4. Distribución estacional y vertical de la temperatura (°C) desde Octubre de 1980 a Noviembre de 1981.

la laguna, fueron mínimas (fig. 5), al igual que ocurrió con la salinidad.

BALANCE TERMICO

El balance térmico se ha obtenido por la diferencia entre los valores extremos, máximo y mínimo, de calor acumulado en el agua a lo largo del año lo que representa, por lo tanto, la cantidad de calor que la laguna de la Massona gana y pierde en este período. La integración en cada muestreo se hizo de acuerdo con la metodología explicada anteriormente. Estos valores extremos han sido de 19.320 calorías-gramo cm^{-2} el 16 de junio y 8.152,5 calorías-gramo cm^{-2} el 16 de enero, lo que arroja un balance de 1.167,5 calorías-gramo cm^{-2} año⁻¹. (fig. 6 y tabla II).

Si tenemos en cuenta que la energía solar total que llega a la superficie del agua en el período más cálido del año (1 de abril-1 de agosto) es de 41.591,52 calorías-gramo cm^{-2} (tabla III) el balance térmico de la Massona representa el 26,85% de dicha cantidad.

Para determinar el calor acumulado en profundidad se ha dividido la columna de agua en dos secciones, la superior desde 0 m. a 4 m., y la inferior desde 4 m. a 10 m., y se ha calculado el balance térmico de cada una (fig. 6 tabla II). En la capa superior el balance ha sido de 9.370 calorías-gramo cm^{-2} año⁻¹ (22,52% de la energía total recibida) y para la más profunda ha sido 2.782,5 calorías-gramo cm^{-2} año⁻¹ (6,69%).

CALOR ACUMULADO POR PENETRACION DE LA LUZ EN EL AGUA

El calentamiento de las capas de agua profunda y más densas propio de los lagos helio-termales sólo es posible a través de la luz que llega a estos niveles y que se degrada en forma de calor. Como se acaba de ver el balance térmico del agua profunda de la Massona es muy bajo, lo que se debe en gran parte a la escasa transparencia del agua que impide la penetración de la luz.

Fig. 5. Temperatura del agua a lo largo del eje longitudinal de la Massona en tres momentos diferentes del año.

Aunque no se han efectuado mediciones reales de la cantidad de luz que llega a las diferentes profundidades, se ha realizado una aproximación a esta información a través de la profundidad de visión del disco de Secchi y de la cantidad de energía solar que llega a la superficie.

La extinción de la luz en el agua viene determinada por la ecuación de Lambert-Beer $I_z = I_0 e^{-kz}$, en donde I_0 e I_z son las inten-

sidades de la luz en la superficie y en la profundidad z , y k es el coeficiente de extinción global. Dicho coeficiente se calcula empíricamente a partir de la relación $k = 1,7/D_s$, en la que D_s es la profundidad de visión del disco de Secchi. Sustituyendo en cada muestreo I_0 por la radiación media mensual que llega a la superficie del agua tomando como referencia los valores del observatorio de Figueres y conocido k a través de la relación con

TABLA II. Calor acumulado (calorías-gramo cm^{-2}) en las diferentes mediciones efectuadas en la Massona: A) en todo el perfil (0-10 m.); B) desde la superficie hasta 4 m. de profundidad; C) desde 4 m. hasta el fondo.

Fecha	A:0-10 m	B:0-4 m	C:4-10m
2-10-80	16931,25	8068,75	8862,50
16-10-80	13740,00	5897,50	7842,50
4-11-80	12956,25	5255,00	7701,25
21-11-80	13058,75	5243,75	7815,00
16-12-80	9135,62	2270,00	6865,62
16-01-81	8152,50	2050,00	6102,50
12-03-81	11611,25	5176,87	6434,37
1-04-81	12708,75	5530,62	7178,12
15-04-81	14506,25	6922,50	7583,75
6-05-81	14737,50	7125,00	7612,50
28-05-81	15498,75	7706,25	7792,50
16-06-81	19320,00	11420,00	7900,00
21-07-81	16438,75	8380,00	8058,75
19-08-81	18206,25	9625,00	8581,25
27-08-81	17365,00	8857,50	8507,50
15-09-81	18116,25	9340,00	8776,25
13-10-81	16558,75	7673,75	8885,00
4-11-81	14805	6001,25	8803,75

Fig. 6. Calor acumulado en todo el perfil de la estación 1, en la zona superficial (0-4 m.) y en la profunda (4-10 m); así como energía solar recibida en la superficie del agua (calorías-gramo $\text{cm}^{-2} \text{mes}^{-1}$).

Fig. 7. Energía solar que llega a las distintas profundidades de la Massona.

el disco de Secchi se puede calcular la energía que llega a los diferentes niveles del agua. El resultado para el período estudiado puede verse en la fig. 7. La penetración de la luz es máxima en invierno, cuando la energía solar que llega a la superficie es la más baja del año, lo que se compensa por la mayor transparencia del agua. En cualquier caso la cantidad de energía que llega por debajo de los 4 m. nunca es superior a las 10 calorías-gramo $\text{cm}^{-2} \text{mes}^{-1}$, lo que es una cantidad extraordinariamente pequeña y más aún si consideramos que se ha hecho una estima por exceso ya que no toda la energía solar que llega a la superficie del agua corresponde a longitudes de onda de la zona visible del espectro. La causa más importante de la escasa penetración de la luz se debe principalmente al carácter fuertemente eutrófico de la Massona. Como dato significativo hay que señalar que la concentración de clorofila a

TABLA III. Energía solar recibida en la superficie del agua (calorías-gramo $\text{cm}^{-2} \text{mes}^{-1}$). Datos calculados a partir de las medias mensuales de insolación despejada diaria (años 1978-1981) facilitados por la estación meteorológica de Figueras (Latitud $42^{\circ} 12' \text{N}$).

Enero	3738,41
Febrero	4030,31
Marzo	6631,20
Abril	7644,91
Mayo	9987,00
Junio	10556,62
Julio	13402,99
Agosto	11578,49
Septiembre	8996,51
Octubre	6671,18
Noviembre	4744,93
Diciembre	2961,58

desde 0 a 4 m. ha oscilado a lo largo de todo el año entre 73,76 y 255,21 mg/m^2 (Se con-

sidera que una concentración de 300 mg/m² absorbe el 99% de la luz incidente). Además del efecto absorbente de la clorófila hay que considerar el que pueden ejercer partículas en suspensión (como organismos y partículas minerales).

CONCLUSIONES

El balance térmico global de la Massona es del mismo orden que el de lagos situados en latitudes y altitudes similares. Como dato comparativo el lago de Banyoles, relativamente próximo a la zona, tiene un balance

térmico de 19.120 calorías-gramo cm⁻² año⁻¹ (34,33% de la energía solar recibida) (PLANAS, 1973). Datos del mismo orden se recopilan en HUTCHINSON (1957).

La cantidad de calor acumulado en la zona más profunda de la Massona es muy pequeña y fluctúa poco a lo largo del año, contrariamente a lo que sucede en los lagos heliothermales. (ANDERSON, 1958; COLE *et al*, 1967; COHEN *et al*, 1977). La causa más importante de este diferente comportamiento de nuestra laguna se debe a la escasa transparencia del agua, que no permite el paso de la radiación luminosa que llega a la superficie.

BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON, G.C. 1958. Some limnological features of a shallow saline meromictic lake. *Limnol. Oceanogr.*, 3: 259-270.
- ANGINO, E.E., ARMITAGE, B. & TASH, J.C. 1964. Physico-chemical limnology of lake Bonney, Antartica. *Limnol. Oceanogr.*, 9: 207-217.
- BOZNIAK, E.G.; SHANEN, N.S.; PARKER, B.C. & KEENAN, C.M. 1969. Limnological features of a tropical meromictic lake. *Hydrobiologia*, 34: 524-532.
- COHEN, Y.; KRUMBEIN, W.E.; GOLDBERG, M. & SHILO, M. 1977. Solar lake (Sinai). 1 Physical and chemical limnology. *Limnol. Oceanogr.*, 22: 597-608.
- COLE, G.A.; WHITESIDE, M.C. & BROWN, R.J. 1967. Unusual monomixis in two saline Arizona ponds. *Limnol. Oceanogr.*, 12: 584-591.
- ECKSTEIN, Y. 1970. Physicochemical limnology and geology of a meromictic pond on the Red Sea shore. *Limnol. Oceanogr.*, 15: 363-372.
- GAT, J. & STILLER, M. 1981. El mar Muerto. *Mundo Científico*, 1 (9): 956-965.
- HUTCHINSON, G.E. 1957. *A treatise on Limnology. I. Geography, Physics and Chemistry*. John Wiley and Sons. New York. 1.015 pp.
- KALECZINSKY, A. 1901. Über die ungarischen warmen Rochsalz-Seen als natürliche Wärmeaccumulatoren, sowie über die Herstellung von warmen Salzseen und Wärmeaccumulatoren. *Z. Gewaesserk.*, 4: 226-248.
- MELACK, J.M. & KILHAM, P. 1972. Lake Mahega: A mesothermic, sulfatochloride lake in western Uganda. *J. Trop. Hydrobiol. Fish.*, 2: 141-150.
- PLANAS, D. 1973. Composición, ciclo y productividad del fitoplancton del lago de Banyoles. *Oecologia aquatica.*, 1: 3-106.
- POR, F.D. 1969. Limnology of the heliothermal Solar lake on the coast of Sinai (Gulf of Elat). *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 17: 1.031-1.034.
- SCHAFFARCKIK, F. 1908. Über die geologischen, hydrographischen und einige physikalische Verhältnisse der durch Isolation erwärmten Salzseen, insbesondere des heissen Medvetosses bei Szovata. *Foldt. Kozl.*, 38: 437-455.