

## LIMNOLOGÍA DE LA ALBUFERA DE MENORCA (MENORCA, ESPAÑA)

J.L. Pretus

Departament d'Ecologia, Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona. Avda. Diagonal, 645, 08028 Barcelona, Spain.

Palabras clave: coastal lagoon, eutrophication, hydrodinamism, *Nannochloris*, *Chaetomorpha*, Spain

### ABSTRACT

#### LIMNOLOGY OF THE ALBUFERA OF MINORCA (MINORCA, SPAIN)

Physico-chemical and plankton analysis in the coastal lagoon called Albufera of Menorca during 1983-84 allow us to characterize its waters as meso-polyhaline non meromictic, with a characteristic mediterranean hydrologic cycle. Phosphate, Secchi disc and chlorophyll shows a marked hypereutrophic period included in the normal evolution of the annual cycle. Phytoplankton and zooplankton characterize a differential period of low machophitic growth. Human intervention and *Chaetomorpha* sudden decomposition, coinciding with a rather minimum renewal of water mass, initiate eutrophication. A small green algae called *Nannochloris*, flourishes in conditions of high nutrient waters during 6 months of the period between fall 1983 and winter 1984. Only when stable temperature gradients form in the water column, a decrease of superficial water phosphates takes place. Depper waters remain dark. Despite having hardly 3 meters of maximum depth, vertical segregation of both, light and nutrients, seems to mark the beginning of trophic normalization of water and of the ecological succession.

### INTRODUCCIÓN

En este trabajo se dan a conocer algunos de los principales parámetros físicos, químicos y biológicos que permiten caracterizar limnológicamente la laguna costera de la Albufera de Menorca, situada al NE de la isla. Durante el ciclo de muestreo se sucedieron una serie de cambios o irregularidades relacionados con una proliferación extraordinaria de fitoplancton, y algunos períodos con mortandades masivas de peces. Tales fenómenos no pueden entenderse sin tener en consideración la evolución de la comunidad de macrófitos, y quizás, en última instancia, el efecto perturbador de la actividad humana sobre los mecanismos de renovación de la laguna. A este respecto hay que tener en cuenta los posibles efectos de dos operaciones de dragado del canal de comunicación de la laguna con el mar, efectuados

en julio de 1983 y abril de 1984, respectivamente.

Hay un sólo antecedente en el estudio limnológico de esta laguna (MARGALEF, 1952), donde se describe la flora sumergida, correspondiente a la asociación *Chaetomorpheto-Polysiphonietum*, y el plancton, muy escaso en estas condiciones climáticas, formado principalmente por dinoflagelados, con *Prorocentrum scutellum* como especie predominante.

### MATERIAL Y MÉTODOS

El período de trabajo de campo más importante se ha extendido de enero de 1983 hasta agosto de 1984, con una periodicidad de visita a la laguna aproximadamente mensual. Se tomaban muestras de las aguas superficiales de dos puntos, situados a 1/3 y 2/3 del recorrido principal de la laguna. En cada salida se fijaba con cloroformo

(análisis químicos), lugol (fitoplancton), o, filtrado y guardado en tubos de vidrio, con acetona pura (clorofila), un volumen de agua recogido a 20 cm de profundidad, y se realizaban diversas medidas *in situ* en el perfil vertical: temperatura, pH y visibilidad del disco de Secchi. Se tomaban muestras de agua para la determinación del contenido de oxígeno por el método Winkler. Asimismo, se anotaba la altura de la columna de agua mediante un listón graduado.

El contenido de la botella Niskin (6 l) se filtra sobre una malla de 42  $\mu\text{m}$  para el recuento de zooplancton, arrastrándose además una red de 250  $\mu\text{m}$  de poro durante 15 minutos para su estudio cualitativo. Se anotó el estado de cobertura y composición de la flora bentónica, y se tomaron muestras del sedimento y de su fauna.

En el laboratorio, los análisis químicos y los recuentos se realizaron por métodos habituales en limnología (MARGALEF *et al.*, 1976; APHA, 1975). La concentración de clorofila total se calculó mediante la expresión  $\text{Chl } (\mu\text{g/l}) = 12,6 \text{ D665}$  (MARGALEF, 1974).

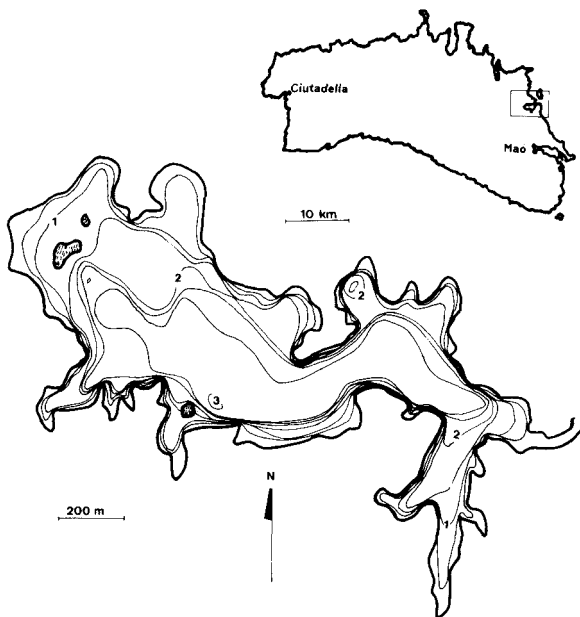


Figura 1.- Localización y diagrama batimétrico de la Albufera de Minorca.  
Situation of the Albufera of Minorca and bathimetric map.

## RESULTADOS

### Características de la laguna

La Albufera de Menorca se encuentra ubicada en la costa E de la mencionada isla, encajada en un sistema de colinas de apenas medio centenar de metros de altitud, formadas por areniscas impermeables, del Carbonífero prioritariamente. Su eje principal (fig. 1) mide 1,7 km, y la profundidad máxima, en el período de inundación (invierno) supera escasamente los 3 m. La profundidad relativa (0,312 %) es característica de las lagunas costeras (tabla 1). El desarrollo del volumen ( $3z/Z_m = 1,37$ ) se ajusta al de la sinusoide elíptica (1,39), que corresponde al modelo geométrico promedio de los lagos (NEUMANN, 1959, en WETZEL, 1981), siendo el volumen teórico de la misma

$$V = 4(1-2/\pi)abZ_m = 1,456 A/\pi Z_m = 1,008 \text{ hm}^3,$$

donde a y b son los ejes de la elipse que forma la superficie del lago y A su área, siendo  $A = \pi ab$ . El volumen real de la laguna, calculado a partir de las áreas de las curvas de nivel y la profundidad, se estima, por otra parte, en  $1,0 \text{ hm}^3$ . El contorno rocoso de la laguna favorece la formación de calas que confieren un desarrollo del perímetro relativamente elevado, de 3,164.

Gran parte de las oscilaciones de nivel observadas durante el período de estudio (51 cm en 1983; 57,5 cm en 1984) (fig. 3) fueron provocadas por los dragados del canal de evacuación que, por otro lado, dieron lugar a una importante entrada repentina de agua marina, en julio de 1983;

Tabla 1.- Parámetros morfométricos de la Albufera de Menorca.

Morphometric characteristics of the Minorca coastal lagoon.

Superficie (ha)	72,46
Longitud máxima (m)	1.700
Anchura máxima (m)	880
Anchura media (6) (m)	426
Volumen ( $\text{hm}^3$ )	1,0
Profundidad máxima (m)	3,00
Profundidad media (z) (m)	1,37
Profundidad relativa ( $z_r$ ) (%)	0,312
Perímetro (m)	9.550
Desarrollo del perímetro (Di)	3,164
Desarrollo del volumen (V.)	1,37

tras la misma, la extensa pradera de *Chaetomorpha crassa* que había ido desarrollándose durante la primavera hasta alcanzar a principios de verano un recubrimiento de prácticamente el 100 % de la superficie de la laguna, sucumbió por entero, descomponiéndose durante agosto de 1983 hasta su total desaparición.

### Temperatura

La temperatura del agua es similar o ligeramente inferior a la media mensual atmosférica, desde noviembre a febrero, y está por encima de aquella el resto del año, comprendida entre la máxima y la media atmosférica. La oscilación térmica es cercana a los 20°C. Las temperaturas mínimas se dieron en febrero, con 8,5°C, y las máximas en julio, con 27,9°C, ambas para 1984. En lo referente al perfil vertical, la temperatura de superficie no supera en más de dos décimas de grado la de las capas profundas la mayor parte del año. La diferencia térmica máxima se observó en agosto de 1983, con 0,6°C/m de gradiente promedio y 1°C/m de gradiente máximo. En abril de 1984 se dan también gradientes máximos de 1,2°C/m. No hay, por tanto, fenómenos regulares estacionales de estratificación térmica (termoclina), dada la escasa profundidad de la cubeta; los gradientes máximos observados se corresponden con mínimas en el número de días de viento por mes o en la velocidad promedia mensual del viento de los histogramas meteorológicos. Estos dos períodos de calma excesivamente largos (de julio a noviembre de 1983, abril de 1984) parecen determinar el sentido de la evolución de la comunidad planctónica y bentónica al afectar los niveles tróficos de las aguas superficiales de la laguna, y la oxigenación de las capas profundas.

### Mineralización

Los límites de oscilación del contenido de cloruros del agua (fig. 2a) son siempre superiores a 7 g/l, con los mínimos situados en marzo o abril. Los máximos se dan en otoño, y superan los 15 g/l. Las aguas pasan de ser mesohalinas en primavera a polihalinas en verano, siendo el resto del año de régimen poco predecible. Crecidas

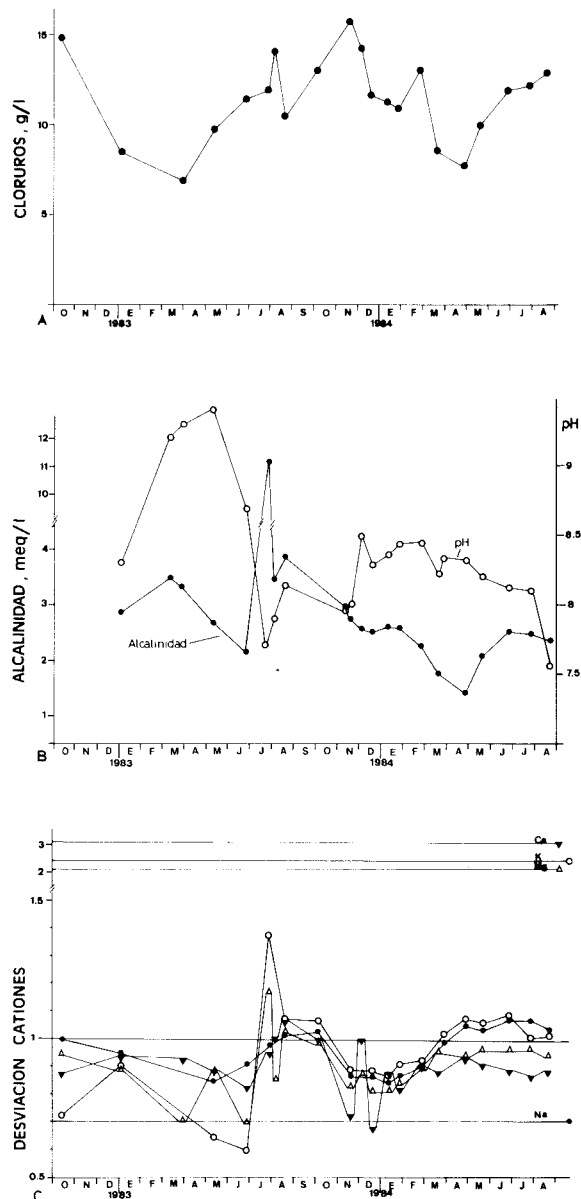


Figura 2.- A) Concentración de cloruros en aguas superficiales. B) Variación estacional de pH y Alcalinidad. C) Desviación del cociente catión/cloruro respecto a la proporción marina. Las líneas horizontales marcan el valor de dicha relación para las aguas afluentes continentales.

A) Seasonal fluctuations of chloride in upper waters. B) Seasonal fluctuations of pH and Alkalinity. C) Differences from the marine ratio between the major cations versus chloride concentration along the sampling period. The marine ratio for each cation is 1. Also depicted is the ratio for the lagoon tributaries.

ocasionales del contenido de cloruros se observan tras evaporaciones intensas en días de viento fuerte (más de 90 km/h). Los gradientes verticales de cloruros, medidos esporádicamente, marcaban unas diferencias entre superficie y fondo no mayores que un 10 % de la concentración, aumentando hacia el fondo. La diferencia este-oeste, medida en dos puntos del eje de las aportaciones hídricas, no era nunca superior al 15 %.

El contenido en sulfatos osciló entre 1,2 y 2,75 g/l. La alcalinidad (fig. 2b) se encontró entre 1,42 y 3,88 meq/l, a excepción de julio de 1983, cuando se superaron los 11 meq/l; este ascenso es atribuible a la descomposición global del fitobentos, con incremento del metabolismo respiratorio, el cual conlleva la redisolución de carbonatos y otras sales, dado el fuerte descenso correlativo del pH (fig. 2b), que alcanza los valores más bajos. Al mencionado aumento de la alcalinidad pueden atribuirse tanto el previsible aumento de cationes ( $\text{NH}_4^+$ ) que aparecen en la mineralización de la materia orgánica, como al aumento de cationes alcalinotérreos debido a la redisolución de las sales de la pared de *Chaetomorpha crassa*, de elevado residuo inorgánico: un 47,73 % y 47,50 % de cenizas respecto al peso seco total, en dos muestras analizadas (Delgado y Vidal, com. per.).

En cuanto a los cationes mayoritarios (fig. 2c), se detectaron aumentos en las proporciones de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y  $\text{Ca}^{++}$  del agua, que se atribuyen a la liberación de estos elementos por parte del alga, ya sea ligada a la reserva alcalina ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ) o a otras sales ( $\text{K}^+$ ). El  $\text{K}^+$  juega un papel decisivo en la regulación osmótica de *Chaetomorpha linum*, con una concentración intracelular de 743 a 9 de  $\text{K}^+$  respecto al medio externo, cuando la salinidad es del 30 ‰ (Kessler, en REMANE & SCHLIEPER, 1971). El establecimiento de condiciones anóxicas en el fondo puede haber facilitado la redisolución de sales desde el sedimento, incidiendo también en la alcalinidad.

### Transparencia del agua

La profundidad a la que se dejaba de ver el disco de Secchi (fig. 3a) permite distinguir tres períodos: una primera etapa de gran transparencia, hasta agosto de 1983; otra posterior de baja visi-

bilidad, entre noviembre de 1983 y abril de 1984, con valores entre 31 y 60 cm, que luego da paso progresivamente al tercer período de retorno a una mayor transparencia, con la entrada de los meses cálidos de 1984.

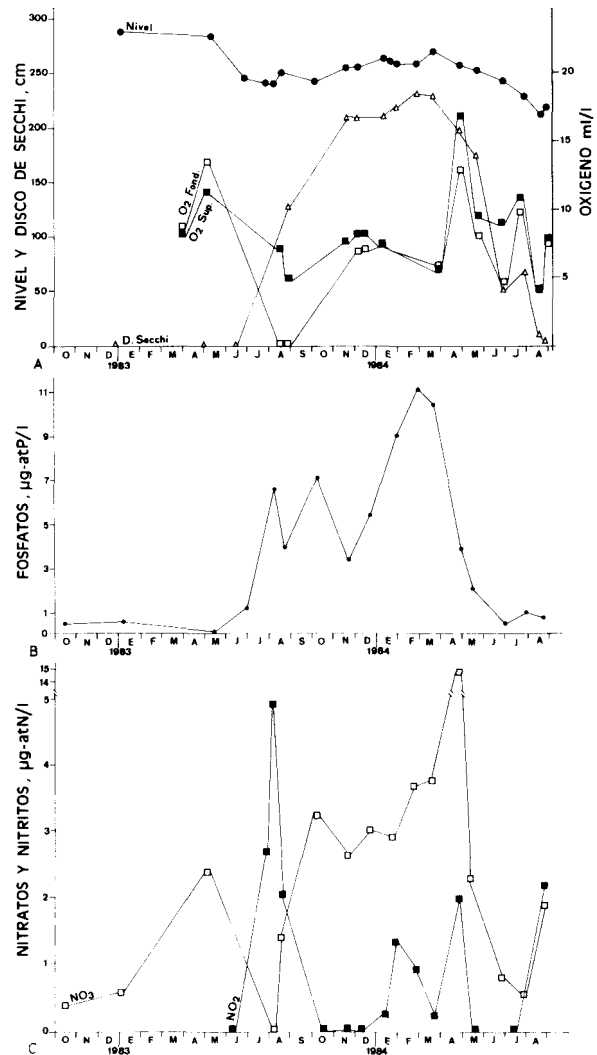


Figura 3.- A) Evolución del nivel de la columna de agua, visibilidad del disco de Secchi y del contenido en oxígeno en superficie y fondo. B) Cambios en la concentración superficial de fosfatos solubles. C) Cambios en la concentración de nitratos y nitritos.

A) Changes in water level, Secchi disc depth and oxygen content in surface and bottom waters. B) Seasonal fluctuations in soluble phosphates from surface waters. C) Seasonal fluctuations in nitrate and nitrite from surface waters.

## Oxígeno

El contenido de oxígeno en superficie osciló entre 4,56 y 16,24 ml/l; y en el fondo, entre 0 y 13,17 ml/l. Ambos mínimos se dieron en agosto de 1983, llegando los fondos a ser anóxicos (fig. 3a). El porcentaje de saturación raramente era inferior al 100 %. El gradiente vertical de oxígeno se intensificó a finales de primavera de 1984, cuando aún no se habían desarrollado importantes poblaciones de macrófitos, pero la distribución se hizo uniforme cuando el oxígeno procedía del fondo, siendo la fluctuación diaria (mayo, 1983) de mayor amplitud que la mayor variación vertical. En invierno de 1984 el oxígeno de superficie y el de fondo variaban paralelamente, con fuerte oscilación diaria, del orden de 2 a 1 entre tarde y mañana.

## Nutrimiento

La concentración de fósforo reactivo soluble (fig. 2b) varía muy en concordancia con los diferentes estadios de la laguna. Mientras domina el plocon, se encuentra menos de 1 pg-atll de fosfato en superficie, con mínimos de 0,075 pg-atll en mayo de 1983. En agosto de 1983 se llega a 6,58 µg-at/l, y a partir de aquí se mantienen niveles muy altos, de hasta 11 pg-atll, en febrero de 1984, y llega durante el verano de este año a menos de 1 pg-atll nuevamente.

En cuanto a las formas de nitrógeno (fig. 2c), se observa una fuerte caída de nitratos en verano de 1983, relacionable con el déficit de oxígeno anotado en este período. Al mismo tiempo se observan las máximas concentraciones de nitritos de todo el ciclo, de hasta 5 pg-atll.

## Fitoplancton

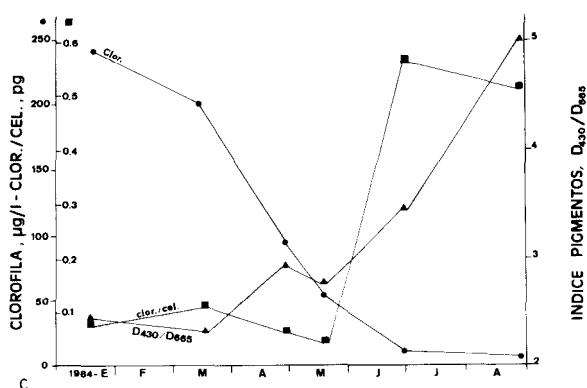
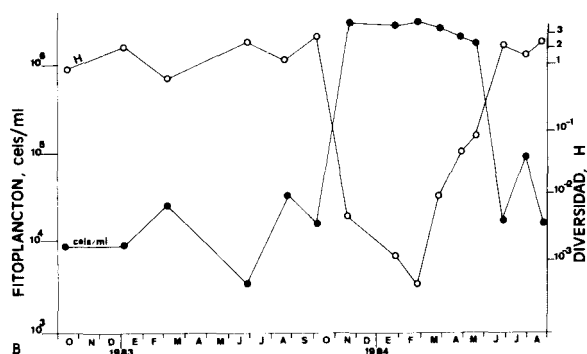
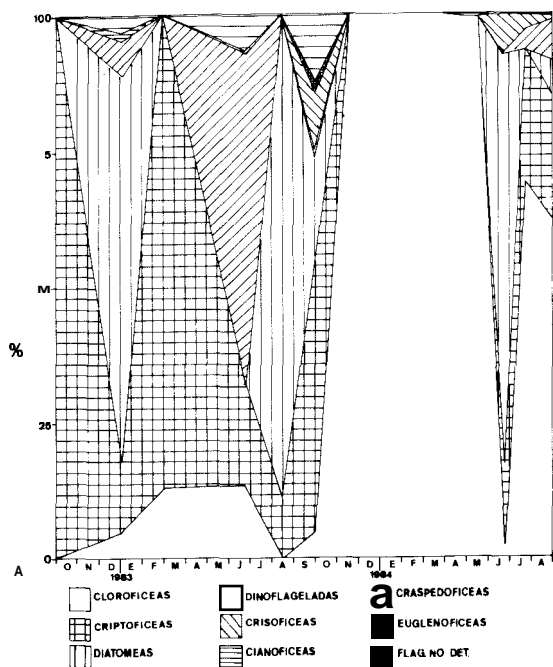
Se ha identificado un total de 50 taxones. Por la importancia relativa de cada grupo (fig. 4a) y por la densidad total (fig. 4b) se pueden identificar los dos períodos definidos por las condiciones de nutrimento: (a) noviembre de 1983 a mayo de 1984, con  $1-3,3 \times 10^6$  células/ml de una pequeña euclorofícea, probablemente *Nannochloris sp.*, dominante; (b) fases previas y posteriores a esta

proliferación, con  $3-100 \times 10^3$  células/ml, donde el fitoplancton está formado por diatomeas céntricas, criptofíceas y dinoflageladas propias de aguas meso y polihalinas. Las cianofíceas son escasas. Las dinoflageladas aparecen predominantemente entre junio y agosto, pero son sustituidas por diatomeas (*Chaetoceros ssp.*) tras fertilizaciones estivales. La situación típica a finales de verano correspondería a un estado avanzado de la sucesión, con aguas empobrecidas en nutrimento, habitadas por *Prorocentrum scutellum*, *Gymnodinium sp.* y *Ceratium cf. contrarium*. Las criptofíceas son importantes durante todo el año, con *Hemiselmis rufescens*, *Cryptomonas acuta*, *Rhodomonas sp.*, *Chroomonas sp.*, y, en verano, *Leucocryptos marina*. Las diatomeas más representativas son *Chaetoceros muelleri* y *Ch. wighami*, siguiendo *Cyclotella compta*, *Nitzschia closterium*, *Melosira, sp.* y *Gyrosigma sp.*

## Clorofila y factores de producción

El seguimiento de la proliferación de fitoplancton mediante la medición de la clorofila total (fig. 4c) permite observar que el descenso más brusco ocurre en abril de 1984, al mismo tiempo que asciende el índice D430/D665, lo que indica una reducción en la tasa de renovación del fitoplancton, aun manteniéndose células pequeñas, antes de iniciarse la sucesión. Esta caída de clorofila coincide con la mayor caída de fosfatos en superficie. En junio de 1984, la clorofila y la concentración de fitoplancton llegan a valores bajos, suficientes para favorecer la colonización del fondo por la flora bentónica.

Por otra parte, a partir de los balances de cloruros realizados en momentos especialmente idóneos para el control de las entradas y salidas de agua de mar (PRETUS, 1985) puede estimarse la tasa de renovación promedia diaria para varios momentos del año, que llevan a una tasa anual de renovación de 1,87/año. Esta reducida renovación puede explicar el mantenimiento de grandes concentraciones de fosfatos en la columna de agua, turbulenta, sin necesidad de un aporte continuo de nutrientes desde el exterior u otros compartimento~, bastando el mismo efecto de sombra sobre el fondo para automantenerse y dominar sobre la expansión bentónica. La acumulación



de biomasa planctónica ocurre sin que sea necesaria una elevada producción primaria para mantenerla, dada la escasa dispersión o «explotación» del fitoplancton hacia el exterior de la laguna, faltando igualmente la posibilidad de pérdida por sedimentación, por la reducida profundidad de la laguna.

Tanto como la tasa de renovación, la velocidad media del viento por mes juega un papel importante en cada momento de la dinámica plancton/bentos (tabla 3). Considerando que la profundidad de compensación es aproximadamente 2,7 veces la visibilidad del disco de Secchi (MARGALEF, 1983), puede deducirse que la luz se extinguiría totalmente para fondos de hasta dos metros de profundidad con concentraciones de clorofila de hasta 35 µg/l, o 16 µg/l para la totalidad de la laguna. Por debajo de estos niveles es de esperar el dominio de la flora bentónica sobre el plancton, y corresponde a niveles de fosfato alrededor de 1-2 µg-at/l.

### Zooplancton

Se han identificado 22 taxones en el zooplancton de la laguna, encontrándose además elementos ticoplanctónicos con asiduidad (tabla 2).

Aparecen esporádicamente ciclópodos arrastrados desde las aguas continentales: *Diacyclops bissetosus*, *D. bicuspidatus* odessanus y *Eucyclops serrulatus*. *Ergasilus sieboldii*, parásito de peces, *Halicyclops negectus*, de afinidades bentónicas, y *Euterpina* sp., de origen marino, aparecen irregularmente en las pescas con red. Solamente el calanoide *Acartia latisetosa* se presenta de forma regular y censable. Entre los rotíferos, dominan *Brachionus plicatilis* y *Synchaeta* sp., siguiendo en frecuencia de aparición *Hexarthra fennica*, Colu-

Figura 4.- A) Porcentaje de células de fitoplancton para los diferentes grupos taxonómicos a lo largo del período de muestreo. B) Densidad de fitoplancton y diversidad medida con el índice de Shannon. C) Evolución de la clorofila total, clorofila por célula e índice de pigmentos durante el período de extinción del máximo fitoplanctónico.

A) Relative abundance of phytoplankton taxa during the sampling period. B) Seasonal fluctuation of density and diversity (Shannon index) of phytoplankton. C) Changes in total chlorophyll contents; chlorophyll-cell content and D430/D665 pigmentary index during 1984, for the period of extinction of highest phytoplankton levels.



Tabla 3.- Regresiones logarítmicas y coeficientes de correlación entre la velocidad media mensual del viento (V, km/h), fosfatos (P,  $\mu\text{g-at/l}$ ), clorofila (Chl,  $\mu\text{g/l}$ ) y disco de Secchi (D, m) durante el período de hipereutrofia.

Relationships between mean monthly wind velocity (V, km/h), phosphorous (P,  $\mu\text{-at/l}$ ), chlorophyll (Chl,  $\mu\text{g/l}$ ), and Secchi disc depth (D, m) during the period of hypereutrophic conditions.

$P = 0,00295 \cdot V^{2,727}$	$r = + 0,929$	$p < 0,01$
$\text{Chl} = 17,714 \cdot P^{1,135}$	$r = + 0,983$	
$D = 6,446 \cdot \text{Chl}^{-0,525}$	$r = + 0,998$	

*rella adriatica* y *Polyarthra sp.* La leptomedusa *Ei-rene viridula* aparece entre junio y agosto (1984), con un tamaño medio de 5 mm, menor que las correspondientes formas marinas, de 20 mm de diámetro. Los ciliados están representados por *Tintinnopsis beroidea*, *Favella azorica* y *Euplotes sp.*, con densas poblaciones de vorticélidos en agosto de 1983.

Los recuentos (fig. 5) descubren cambios parejos a los del fitoplancton. Los protozoos dominan durante la mayor parte del ciclo, pero desaparecen con la proliferación de *Nannochloris*, momento en que se observan elevadas densidades de *Brachionus plicatilis*, en compañía de *Acartia latisetosa*, único par de especies ligadas a los máximos de fitoplancton.

### Organismos bentónicos

La comunidad con *Chaetomorpha crassa* cubría todas las áreas de menos de 275 cm de profundidad en enero de 1983, y en mayo del mismo año colonizaba toda la laguna. Tras el incremento del fitoplancton, la comunidad se restablece en verano de 1984, con unas fases previas invernales con la rodofícea *Gracillaria verrucosa*, y, a partir de abril, con *Ulvaria oxysperma*, *Polysiphonia sp.* y *Ruppia marina*. A finales de verano el plocon está densamente recubierto de diatomeas epífitas, con *Nitzschia closterium*, *Licmophora sp.*, *Cocconeis scutellum*, *Navicula sp.* y *Pleurosigma sp.* La fauna de este período queda caracterizada por altas densidades de *Corophium cf. acherusicum*, *Mesopodopsis slabberi*, crustáceos, y el quironómido *Halocladus varians*, raspador. En las aguas salinas de verano prosperan entre la vegetación los harpacticoides *Mesochra heldtii*, *Tisbe longicornis*

y *Nitocra lacustris*. Sobre el plocon abundan *Hidrobia acuta* y *Cyprideis littoralis*.

Con la descomposición de la vegetación en verano de 1983 el sedimento litoral se cubre de un tapiz de cianofíceas, que no invaden el plancton, con *Oscillatoria tenuis*, *Phormidium tenue* y *Oscillatoria sp.* Durante todo el invierno de 1983-84 la vegetación del sedimento es muy escasa, concentrándose en los primeros decímetros litorales, dada la baja visibilidad del agua. En este período el sedimento expuesto aparece colonizado por el quironómido sedimentívoro *Chironomus salinarius*, que se encuentra bajo la proliferación fitoplanctónica, desplazando a *Halocladus varians*.

Quedan también en este período los crustáceos más resistentes, *Sphaeroma hookeri* y *Gammarus aequicauda*.

### DISCUSIÓN

Si atendemos a una tipología de las zonas húmedas litorales del mediterráneo español (MIRACLE, 1981) basada en los rangos de salinidad, tipo de cubeta y régimen hidrológico, la Albufera de Menorca puede caber en el espacio ocupado por las lagunas costeras de influencia marina, más que en las albuferas propiamente dichas, de aguas dulces. Con las primeras comparte la presencia de es-

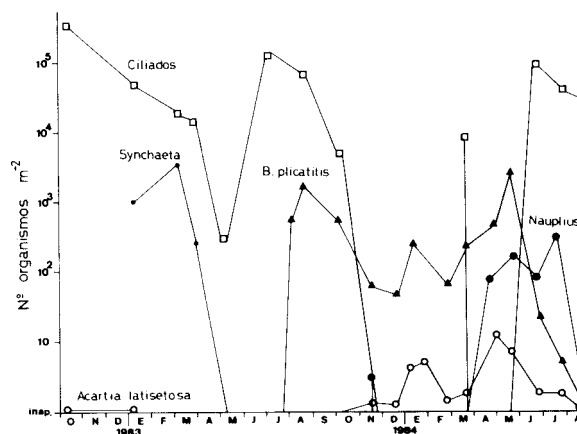


Figura 5.- Evolución estacional del zooplankton. Seasonal changes in zooplankton.



pecies de origen marino, y la del poliqueto *Mer-ciarella* en el bentos. Sus aguas son, en general, menos eutróficas que las albuferas de agua dulce, en parte por el menor aporte que reciben de aguas continentales polucionadas.

No es posible, a nuestro entender, intentar ahora un esfuerzo de sistematización, tipificación y clasificación de la laguna en cuanto a sus comunidades biológicas se refiere, ya sea por la falta de un conocimiento taxonómico más exhaustivo de ciertos grupos muy importantes del nano y microplancton, como por el desbordamiento de las características hidrológicas y tróficas de la laguna en el período de estudio, que intuimos repercute en un empobrecimiento quizá demasiado inusual de su poblamiento y evolución estacional. Dos aspectos, sin embargo, merecen ser resaltados, por el interés que su conocimiento pudiera despertar en el desarrollo de ciertas cuestiones referentes a la hidrodinámica, los mecanismos de mezcla y renovación y su influencia en la biología del ecosistema.

### Aspectos hidrológicos

Tanto por ubicarse en los márgenes de un mar sin apenas mareas como por estar alejada del mismo por un canal estrecho y sinuoso de más de 300 m de longitud, la importancia cuantitativa del intercambio con el mar en la renovación del volumen lagunar es muy escasa (aunque no cualitativamente). El papel más importante en la renovación del agua afecta a los aportes continentales, y su comportamiento al llegar a la laguna es del mayor interés, pues determina sus niveles de salinidad, turbiedad y valores críticos de oxígeno (fig. 6). En este sentido, la combinación del efecto diverso del viento según sea su dirección, y la entrada torrencial, a pulsos, de aguas continentales hacia la albufera proporciona, gracias a la elevada profundidad relativa de la misma (tabla 4), la posibilidad de diferentes patrones hidrológicos, desde la mezcla casi total hasta el deslizamiento superficial de las aguas torrenciales hacia el mar (fig. 6a-c). La profundidad relativa relaciona la profundidad máxima con el diámetro medio del espejo de agua, y por tanto con el recorrido medio del viento sobre la laguna, factor del que depende directamente la profundidad de mezcla al-

canzada por el mismo. Con unas dimensiones de apenas 3 m de profundidad y un recorrido de menos de 2 km de longitud, los modelos de compartimentación por estratificación salina pueden en cambio ser variados, afectando diferentemente una misma tasa instantánea de renovación (del orden de duración de 5 días), los niveles de salinidad, según la fuerza del viento y su oportuna dirección respecto al eje determinado por los afluentes de la laguna. Estos niveles, entre períodos dilatados de lluvias, se mantienen homogeneizados en toda la columna por mezcla hasta el fondo, hasta la entrada de la estación seca (fig. 7).

Las condiciones favorables de la laguna para los estudios hidrológicos se acrecientan al tener en cuenta no sólo su profundidad relativa, que permite picnoclinas de corta duración, mas también el carácter impermeable de su cubeta, circunstancia que proporciona una mayor posibilidad de control sobre los balances hídricos de la laguna, y por ende sobre los ciclos de los elementos nutritivos.

### Aspectos tróficos: una crisis distrófica no cultural

La introducción forzada de agua de mar en la laguna causada por dos dragados del canal de desagüe (10.06.83 y 18.07.83), junto a la escasez de vientos en julio y agosto (6 y 8 días de viento, respectivamente) facilitaron el establecimiento de una picnoclina desde el primer metro de profundidad hasta el fondo de la laguna. Por otra parte, la masiva descomposición de una extensa pradera de *Chaetomorpha crassa* en ese momento, quizá inducida por una perturbación osmótica y térmica al entrar el agua marina tras el dragado, provocó la extinción del oxígeno disuelto en la laguna, llegando la anoxia a los últimos 25 cm de profundidad (fig. 3a). Esta situación perduró al menos cuatro días (15-19.08.83). Al romperse la estratificación y llegar las condiciones otoñales, con aguas turbulentas, una rápida fertilización de la columna de agua desencadenó la proliferación de *Nannochloris sp.*, con 1-3 millones de células por mililitro. La reducida tasa de renovación de la masa de agua por falta de aportes continentales facilitó la acumulación de biomasa planctónica, manteniéndose esta situación por efecto de sombra sobre el sedimento, e imposibilitando la re-

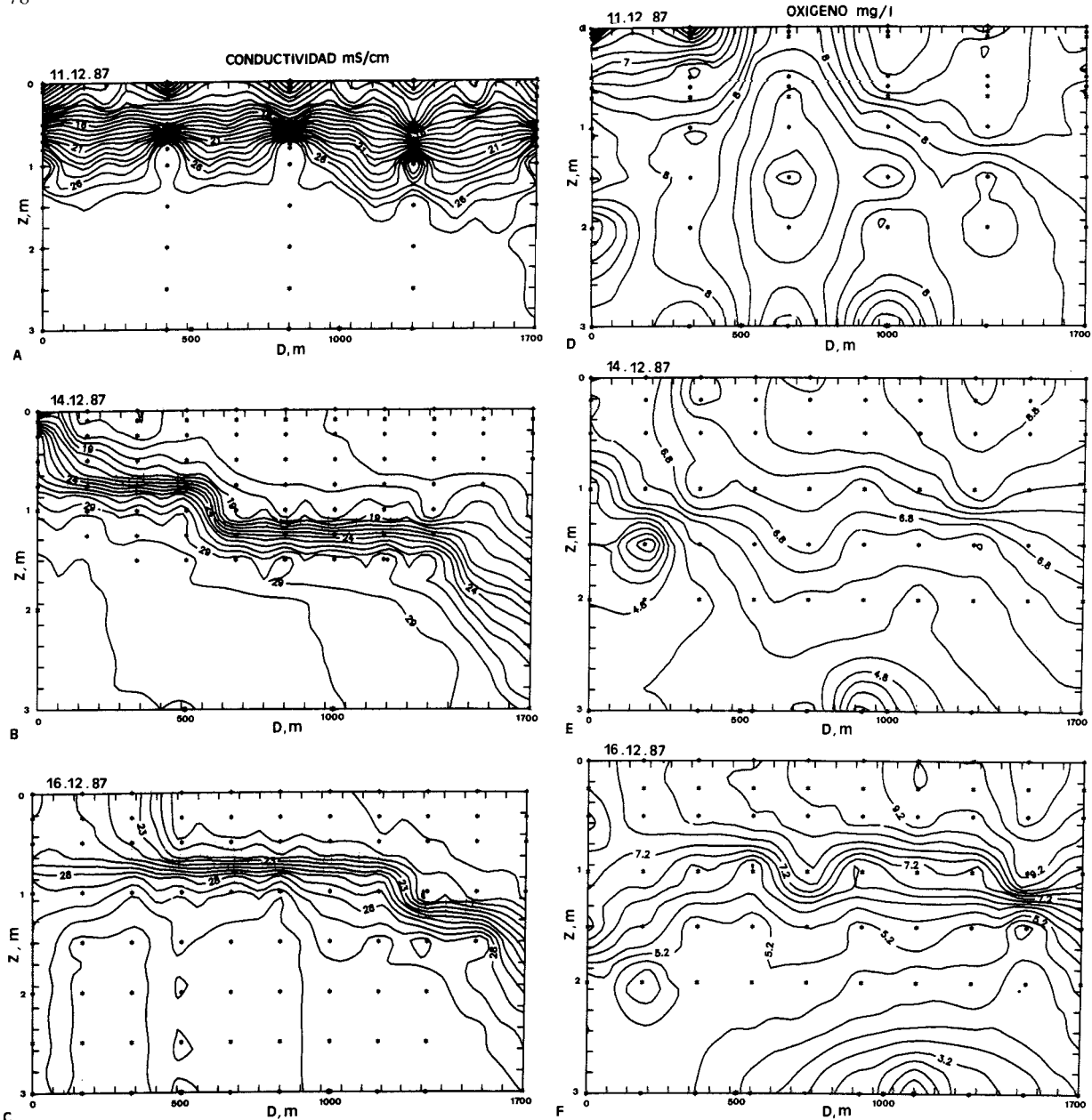


Figura 6.- A-C) Isolíneas de conductividad en un diagrama profundidad (Z)-eje lagunar (D) para tres días después de la caída de lluvias (61 mm, del 7 al 10 de diciembre) y aparición de viento del W de 20-30 km/h (días 12 al 15). La dirección de los aportes de agua dulce y del viento es paralela al eje de abscisas, y ambos en sentido de izquierda a derecha. Se observa la formación de una piconclina, que emerge finalmente hacia el W por el efecto prolongado del viento, llegando a expulsar al mar gran parte de las aguas dulces, sin beneficio de mayor dilución por parte de la laguna. D-F) Evolución del contenido en oxígeno en el período descrito. Se aprecia una disminución paulatina en las aguas del hipolimnion, falto de luz a causa del contenido en arcillas en suspensión del epilimnion. (Datos de Moyá, Martínez y Pretus, inéditos).

A-C) Depth (Z)-Length (D) diagram showing the conductivity isolines described for 3 different days after the rainfalls (61 mm, from 7 to 10 December) and during the occurrence of western winds (20-30 km/h, days from 12 to 15). Freshwater inputs and wind direction run parallel to X axis and go from left to right. A piconcline is formed, emerging finally towards the West. The upper freshwaters run down into the sea with no important mixing with the brackish waters of the lagoon. D-F) Dissolved oxygen evolution during the study period. A gradual decrease can be noticed toward the bottom. The light extinction is produced by the great amount of suspended clays in the upper waters. (Data after Moyá, Martínez & Pretus, unpublished).

Tabla 4.- Área, profundidad máxima y profundidad relativa de siete lagunas costeras sin criptodepresión y una laguna endorreica. La profundidad relativa en tantos por mil  $Z\text{‰} = Z_{\text{max}} \sqrt{\pi} 1000 / 2 \sqrt{A}$ . A = área. En base a COMÍN (1981), COMÍN *et al.* (1983) y BOUTIÈRE *et al.* (1982).

Area, maximum depth and relative depth of seven coastal lagoons and one endorheic lagoon. Relative depth in ‰  $Z = Z_{\text{max}} \sqrt{\pi} 1000 / 2 \sqrt{A}$ . A = area. Based in COMÍN (1981), COMÍN *et al.* (1983) and BOUTIERE *et al.* (1982).

Laguna	Tipo	Área (km <sup>2</sup> )	Z máxima (m)	Z relativa ‰
Encanyissada	costera	4,67	1,14	0,46
Tancada I	costera	0,89	0,65	0,61
Tancada II	costera	0,91	0,76	0,71
Buda I	costera	1,88	0,73	0,47
Buda II	costera	1,92	0,73	0,46
Salses-Lcucate	costera	46	3,50	0,45
Gallocanta	endorreica	14,30	2,50	0,58
Albufera des Grau	costera	0,72	3,00	3,12

colonización por la flora bentónica. Sólo la llegada de calmas prolongadas permitió la caída rápida del nivel de fosfatos, al rebajar la velocidad de circulación vertical del agua por mezcla. Así, al dificultar la renovación del volumen superficial de agua, expuesta a la luz y productiva pero de escasos centímetros de profundidad (visibilidad del disco de Secchi de 30 cm), se limita el crecimiento planctónico y se inicia la sucesión.

El efecto de una crisis distrófica ha sido presentado en el estudio del estanque de Salses—Leucata (Rosellón) (BOUTIERE *et al.*, 1982). Este estanque marisquero de 4600 ha de superficie y 2,1 m de profundidad media es de salinidad elevada (32-38 ‰), debido al dragado de canales evacuadores que facilitan la entrada de mar por el efecto de vientos favorables. Una crisis distrófica afectó el estanque durante 1979-1980, llegando a encontrarse 200.000 cels/ml del mismo grupo fitoplanctónico, *Nannochloris sp.* La reducción de la capa fótica hasta 1,2 m de espesor afectó la supervivencia de las praderas de macrófitos, por la falta de luz, y de los cultivos de lamelibranquios por exceso de partículas filtradas. Los autores atribuyen una entrada externa de materia orgánica a través de los afluentes como origen de la eutrofización, pero la duración del fenómeno les hace pensar en una segunda fase donde el sedimento y la degeneración de la pradera de macrófitos pone a disposición energía en forma de

materia orgánica oxidable. La capacidad de *Nannochloris* de utilizar derivados de la putrefacción bacteriana, amonio y urea, como fuente de nitrógeno, apoya la interpretación del fenómeno. Para estos autores, sólo un aporte antropogénico o cultural puede explicar la carga orgánica acumulada en la laguna, incapaz de mineralizar más allá de cierto límite máximo de entradas externas.

En el caso de la Albufera de Menorca, la aplicación de este modelo es plausible, tanto por el parecido biocenótico de ambas lagunas como por las características específicas de la proliferación algal y el nivel de clorofila alcanzado, y más aún por el rápido descenso de pH y ascenso brutal de alcalinidad en el inicio del proceso. Su desencadenamiento, por otra parte, obedece más a una alteración interna de la laguna que a descargas externas. El continuo crecimiento de *Chaetomorpha* desde otoño de 1982 a principios de verano de 1983 permitió acumular suficiente biomasa

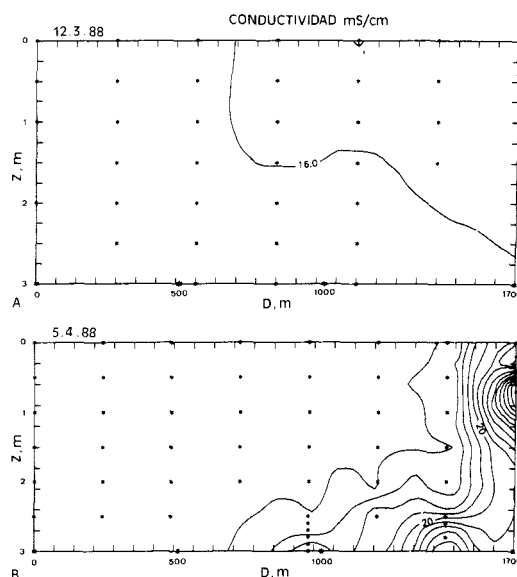


Figura 7.- A) Isolíneas de conductividad en diagramas profundidad (Z)-eje lagunar para dos situaciones alejadas de períodos lluviosos. La conductividad llega a ser homogénea para todo el perfil de la laguna. B) Entrada de agua de mar por el E, situándose, tras mezclarse parcialmente, en el fondo de la laguna. (Datos de Moyá, Martínez y Pretus, inéditos). A) Depth (Z)-Length (D) diagram showing the conductivity isolines described for two long dry periods situations. Conductivity becomes homogenous for all the profiles of the lagoon. B) Input of sea water from the East, settling on the bottom. (Data after Moyá, Martínez & Pretus, unpublished).

para al menos iniciar la crisis distrófica, una vez decidido el proceso de su descomposición. La estratificación del agua creó las condiciones de anoxia necesarias para activar el efecto fertilizante del sedimento, fase que era fácil que perdurase por la escasa renovación del agua de la laguna.

### Ordenación estadística de los parámetros ambientales

El estudio de la variabilidad de los parámetros físicos y químicos mediante un análisis de componentes principales (fig. 8) ordena grupos de variables correlacionadas en un espacio multidimensional cuyos ejes son nuevos factores, ortogonales, que absorben o explican porcentajes decrecientes de la información total contenida en las variables.

En la representación de los parámetros sobre el plano I/II, el primer factor (44,6 % de la va-

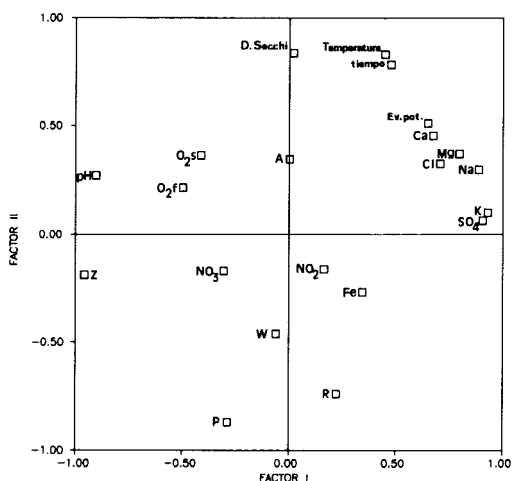


Figura 8.- Ordenación de los parámetros físicos y químicos de la laguna de la Albufera en el espacio definido por los dos primeros factores del análisis de componentes principales. P, fósforo; W, intensidad de viento por mes; Z, profundidad; R, precipitación mensual; O<sub>2</sub>f, nivel de oxígeno en el fondo; O<sub>2</sub>S, nivel de oxígeno en superficie; A, alcalinidad total; Ev. pot., Evaporación potencial mensual.

Arrangement of physical and chemical parameters of the lagoon in the space defined by the first two PCA factors. P, phosphorus; W, wind intensity per month; Z, depth; R, monthly rainfall; O<sub>2</sub>f, oxygen level at the bottom; O<sub>2</sub>S, oxygen level on the surface; A, total alkalinity; Ev. pot., monthly potential evaporation.

rianza) está ligado al grupo de variables que define la salinidad total del agua: componentes de la mineralización, a excepción de la alcalinidad, evaporación potencial, profundidad y pH. El segundo factor (17,9 % de la varianza) se asocia a variables relacionadas con el grado de eutrofia, como la transparencia del agua y el contenido en fósforo, así como con la variación estacional de la temperatura.

El contenido en oxígeno se opone, sobre el primer eje, al grupo de iones determinantes de la salinidad. Este hecho ha sido observado con frecuencia en los análisis de componentes principales efectuados sobre variables medidas a lo largo del año (SERRA *et al.*, 1984). Su interpretación depende del tipo de laguna, y, en nuestro caso, su poca correlación con la variación anual de temperatura le priva de una interpretación sencilla.

La mayor dependencia del segundo factor respecto al tiempo sugiere interpretarlo como incorporado al ciclo estacional, determinando la estructura de la columna de agua y su estado trófico. El primer factor, menos dependiente del tiempo y de las condiciones meteorológicas medias (precipitación y viento mensuales), y menos correlacionado con la temperatura del agua, denota variaciones más concretamente aleatorias de salinidad. Debería ligarse entonces a cambios impredecibles en la tasa instantánea de renovación del agua, debidos al efecto de fluctuaciones fortuitas de las condiciones climáticas, del nivel del mar, y de la misma acción del hombre en el dragado del canal de desagüe.

La eutrofización de la laguna, aunque generada por sucesos imprevisibles, está sometida al control del segundo factor, internalizada por tanto en los ritmos propios del ecosistema. La regresión de los niveles de fosfatos y clorofila en las aguas libres no obedece a controles externos impredecibles, como ocurre con la evolución de la eutrofización cultural extrema (MIRACLE, 1987), sino más bien internos (factor 2). El «restablecimiento» trófico de la laguna puede preverse, por tanto, con el ascenso estacional de temperatura y la reducción más o menos sincrónica de la fuerza media del viento.

Globalmente, la interpretación ecológica de los dos componentes como factores generadores del ciclo anual, comporta el solapamiento de dos contribuciones independientes. En principio, existe

una sucesión estacional de las condiciones físico-químicas y tróficas de la laguna: los veranos, secos, cálidos y con escasos vientos, conducen hacia la estabilidad vertical, la caída de nutrientes y la transparencia en la columna de agua, permitiendo la sucesión ecológica de las comunidades planctónica y bentónica, en favor del predominio de ésta. A este régimen previsible se interpone un factor aleatorio, las entradas de agua de mar en cualquier época del año, debidas a la evaporación intensa (viento) en la laguna, a ascensos irregulares del nivel del mar respecto a la laguna (depresiones atmosféricas, secas) y a la acción del hombre (dragado), que producen perturbaciones bruscas de la salinidad del agua. Este factor menos predecible responde del mayor porcentaje de variación de los parámetros ambientales considerados (casi el 50 %), identificando el carácter esencialmente fluctuante del ciclo anual en las lagunas costeras (MARGALEF, 1969), dominado por los cambios de salinidad.

#### AGRADECIMIENTOS

Los compañeros del Dpto. de Ecología de la Universidad de Barcelona han contribuido decisivamente a hacer posible este trabajo, al prestarme sus conocimientos y su tiempo. En especial a Francisco A. Comín le debo la identificación del fitoplancton. A Ramón Margalef le agradezco su orientación y apoyo. A Bernat Moll su disposición y ofrecimiento, y a Aurea Gómez, su incondicional ayuda.

#### BIBLIOGRAFÍA

- A.P.H.A. (American Public Health Association), 1975. Standard methods for the examination of water and waste water. New York. 14th ed.
- BOUTIERE, H., F. DE BOVEE, D. DELILLE, M. FIALA, C. GROS, G. JACQUES, M. KNOEPFFLER, J.P. LABAT, M. PANOUSE & J. SOYER, 1982. Effet d'une crise dystrophique dans l'étang de Salses-Leucate. *Oceanologica Acta n. sp., Proc. Int. Symp. coastal lagoons*, Bordeaux: 231-242.
- COMIN, F.A., 1984. Características físicas y químicas y fitoplancton de las lagunas costeras Encañizada, Tancada y Buda (Delta del Ebro). *Oecologia aquatica* 7: 79-162.
- COMIN, F.A., M. ALONSO, P. LÓPEZ & M. COMELLES, 1983. Limnology of Gallocanta Lake, Aragon, northeastern Spain. *Hydrobiologia* 105: 207-221.
- MARGALEF, R., 1952. Materiales para la hidrobiología de la isla de Menorca. *Publ. Ins. Biol. Apl.* 11: 5-112.
- MARGALEF, R., 1969. Comunidades planctónicas en las lagunas litorales. *Mem. Simp. Int. Lag. Cost.*, México: 545-562.
- MARGALEF, R., 1974. *Ecología*. Ed. Omega. Barcelona. 952 pp.
- MARGALEF, R., 1983. *Limnología*. Ed. Omega. Barcelona. 1010 pp.
- MARGALEF, R., D. PLANAS, J. ARMENCOL, A. VIDAL, N. PRAT, A. GUISET, J. TOJA & M. ESTRADA, 1976. *Limnología de los embalses españoles*. Dirección General de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas, Madrid. 422 pp.
- MIRACLE, M.R., 1981. Análisis ecológico del estado actual de degradación de los ecosistemas de agua dulce y salobre del Mediterráneo español. *Coloquio Hispano-Francés sobre Espacios Litorales*. Madrid. 213-223.
- MIRACLE, M.R., 1987. Human impact on aquatic ecosystem: the algal bowl (cultural eutrophication). *Academy of Environmental Biology*, India.
- PRETUS, J.L., 1985. *Limnología de l'Albufera des Grau (Menorca)*. Tesis de licenciatura. Universidad Barcelona. 79 pp.
- REMANE, A. & C. SCHLIEPER, 1971. *Biology of brackish water*. Die Binnengewasser, 25. Wiley, N. York. 371 pp.
- SERRA, M., M.R. MIRACLE, E. VICENTE, 1984. Interrelaciones entre los principales parámetros limnológicos de la Albufera de Valencia. *Limnética* 1: 9-19.
- WETZEL, R.G., 1981. *Limnología*. Ed. Omega. Barcelona. 679 pp.