

FENÒMENS DE MEROMIXIS A L'ESTANY DE BANYOLES

X. Casamitjana i E. Roget

Departament de Física i Institut d'Ecologia Aquàtica. Col·legi Universitari de Girona (UAB).
Hospital, 6. 17071 - Girona.

RESUM

Aquest article forma part d'un treball més ampli de limnologia física i vol ser una primera contribució per explicar els diferents fenòmens meromíctics que es donen a l'estany de Banyoles. Fins l'actualitat s'han descobert vuit cubetes per on entra l'aigua i manté un sediment en suspensió. Aquestes cubetes presenten uns peculiars perfils de temperatura i conductivitat donat el fet que l'aigua que entra pel subsòl és més salada que la de les capes superiors. En aquest article s'expliquen els primers resultats obtinguts, així com les seves interpretacions teòriques.

RESUMEN

Este artículo forma parte de un trabajo más amplio de limnología física y es una primera contribución para explicar los diferentes fenómenos de meromixis que tienen lugar en el lago de Banyoles. Hasta hoy se han encontrado ocho cubetas por donde el agua que entra mantiene un sedimento en suspensión. Estas cubetas tienen unos perfiles de temperatura y conductividad muy peculiares, debido a la mayor salinidad del agua entrante, comparada con la de las capas superiores. En este trabajo se presentan los primeros resultados obtenidos, así como sus interpretaciones teóricas.

ABSTRACT

This article is part of a wider essay and it is meant to be a first contribution to explain meromictic phenomena in Banyoles lake. There are 8 basins where the incoming water keeps the particles in suspension. These basins present particular profiles of temperature and conductivity due to the fact that the incoming water from the underground is saltier than the one above. In this article an attempt to explain the preliminary results obtained as well as their theoretical explanations is presented.

Key words: Limnology, basin, sediment, Banyoles lake.

INTRODUCCIÓ

El perfil tèrmic típic d'un llac o embassament en època d'estratificació ve caracteritzat per l'epilimnion, regió superior d'aigua a temperatura constant, per raó de la barreja produïda sobretot per efecte del vent; la termoclina, zona de disminució acusada de la temperatura, i finalment l'hipolimnion, també a temperatura constant i inferior a la de l'epilimnion.

En els llacs meromíctics, en els quals a la part inferior hi trobem una capa d'aigua més salada, aquest perfil tèrmic pot veure's alterat i presentar algunes divergències respecte a l'esquema anterior. L'aigua més salada té també més estabilitat hidrodinàmica, és menys susceptible a la barreja i, com a conseqüència, reté el calor amb més facilitat. Així, en aquests tipus de llacs hi pot haver una pujada de la temperatura en arribar a la regió on hi ha la capa d'aigua salada. A la literatura *limnològica* podem trobar-ne un bon exemple en el llac de Ulmener Maar (Ruttner, 1953).

La mesura de la conductivitat de l'aigua és un paràmetre de gran importància en els llacs meromíctics, ja que caracteritza les variacions de densitat d'aquesta. Així en certes zones d'aquests llacs podem constatar l'existència d'una regió superior on la conductivitat és constant (mixolimnion), seguida d'un fort augment d'aquesta (quemoclina), a una certa fondària, i finalment una regió de conductivitat més alta (monimolimnion), que coincideix amb la capa salada a la que ens referíem en el paràgraf anterior.

A l'estany de Banyoles fins avui s'han trobat vuit cubetes sorgents (Brunet *et al.* 1985), per les quals l'aigua que entra manté un sediment en suspensió format, sobretot, per lim i sorra. La fracció de sorres està formada per cristalls de calcita, guix i fragments fòssils. A la fracció de les argiles hi han filosilicats en associació (illites i clorites), (Bastida i Sanz, 1979).

La densitat del conjunt aigua amb sediment, i també la porositat, es mantenen pràcticament constants amb la fondària. L'estudi de les velocitats de sedimentació de les partícules que formen aquest sediment ha permès conèixer els cabals d'entrada d'aigua a cada cubeta, i per tant els cabals d'entrada a l'estany (Roget, 1987). A la Taula 1 reproduïm el valor de la porositat, velocitat de sedimentació, i cabal d'entrada, per cada cubeta i a diferents èpoques de l'any.

L'estudi sistemàtic dels perfils de temperatura i conductivitat a les cubetes és el primer pas necessari per estudiar els fenòmens propis de la meromixis crenogènica, tasca iniciada per Planas (1973), Abella (1980), Julià (1980), entre d'altres, estudiant els cicles de barreja de la columna d'aigua en el curs de l'any.

En aquest treball estudiarem els perfils de temperatura i conductivitat de sis de les vuit cubetes existents a Banyoles, tot assenyalant les característiques més importants de cada una d'elles; ens fixarem especialment en les diferents estratificacions que es produeixen, així com en els seus temps de renovació. També estudiarem des d'un punt de vista més quantitatiu la disminució de conductivitat que es dona a la regió on hi ha el sediment en suspensió, per efecte d'aquest.

Taula 1. Àrea, porositat, velocitat de sedimentació i cabal a les cubetes de Banyoles, a diferents èpoques de l'any.

	22 de maig	19 de setembre	5 de novembre	1986
B I				
Àrea	65.225 ± 613	55.175 ± 580	64.575 ± 560	m ²
ε	0,96 ± 0,02	0,95 ± 0,02	0,95 ± 0,02	--
v _{sm}	0,65 ± 0,005	0,471 ± 0,003	0,483 ± 0,002	mm/min
Cabal	678,3 ± 25,1	411,5 ± 15,7	493,8 ± 16,8	l/s
B II				
Àrea	21.200 ± 288	21.200 ± 288	21.200 ± 288	
ε	0,88 ± 0,02	0,79 ± 0,02	0,77 ± 0,02	
v _{sm}	0,19 ± 0,003	0,019 ± 0,001	0,023 ± 0,002	
Cabal	59,1 ± 3,1	5,3 ± 0,5	6,2 ± 0,1	
B III				
Àrea	669 ± 256	474 ± 220	699 ± 256	
ε	0,88 ± 0,02	0,77 ± 0,02	0,86 ± 0,02	
v _{sm}	0,57 ± 0,003	0,020 ± 0,001	0,700 ± 0,006	
Cabal	5,6 ± 2,3	0,1(2) ± 0,0(5)	7,0 ± 2,8	
B IV				
Àrea	3.061 ± 653	3.046 ± 645	3.149 ± 701	
ε	0,93 ± 0,02	0,85 ± 0,02	0,91 ± 0,02	
v _{sm}	0,59 ± 0,003	0,206 ± 0,012	0,392 ± 0,008	
Cabal	28,0 ± 6,7	8,9 ± 2,4	18,7 ± 5,0	
B V				
Àrea	490 ± 160	321 ± 141	490 ± 160	
ε	0,83 ± 0,02	0,71 ± 0,02	0,75 ± 0,02	
v _{sm}	0,04 ± 0,001	0,007 ± 0,002	0,025 ± 0,005	
Cabal	0,3 ± 0,1	0,0(3) ± 0,0(2)	0,2 ± 0,1	
B VI				
Àrea	402 ± 170	360 ± 154	375 ± 156	
ε	0,89 ± 0,02	0,83 ± 0,02	0,82 ± 0,02	
v _{sm}	0,16 ± 0,001	0,140 ± 0,003	0,105 ± 0,001	
Cabal	1,0 ± 0,5	0,7 ± 0,3	0,5 ± 0,2	
B VII				
Àrea	1.106 ± 310	1.219 ± 318	1.106 ± 310	
ε	0,96 ± 0,02	0,93 ± 0,02	0,94 ± 0,02	
v _{sm}	0,84 ± 0,001	0,497 ± 0,003	0,721 ± 0,007	
Cabal	14,9 ± 4,5	29,0 ± 8,4	12,5 ± 3,9	
TOTAL	787,2 ± 42,3	455,5 ± 11,6(7)	538,9 ± 29,6	l/s

MATERIAL I MÈTODES

El suport experimental d'aquest treball està basat en l'estudi sistemàtic dels perfils de temperatura i conductivitat, iniciat el maig del 1986.

La temperatura i la conductivitat s'han llegit directament mitjançant un termistor i un conductímetre CRISON, amb sondes incorporades. La correcció de la conductivitat a 20 °C s'ha fet construint per cada cubeta i en el rang de temperatures habituals en ella, la corba temperatura —conductivitat per una mostra d'aigua. Aquesta corba es pot ajustar a una exponencial creixent.

Les mostres de sediment s'han extret amb una ampolla limnològica de Ruttner (tipus Hydro-Ex Upsala), i la porositat d'aquest s'ha mesurat evaporant l'aigua de la mostra a 115 °C i utilitzant l'expressió:

$$\epsilon = [1 - (m_s / m_t)] \cdot s_r$$

on m_s és la massa de sòlid obtinguda després d'haver eliminat l'aigua, m_t la massa total utilitzada i s_r la densitat relativa del sediment en suspensió respecte de l'aigua.

Les anàlisis químiques de la Taula 2 s'han realitzat mitjançant mètodes volumètrics i gravimètrics.

Taula 2. Concentració de diferents espècies iòniques a la cubeta I i a la cubeta III. Mostres recollides el dia 5-11-86.

	CUBETA I		CUBETA III		
mm/l	23m	40 m	15 m	20 m	30 m
SO ₄ ⁻²	9,289	8,398	9,117	15,11	18,15
CO ₃ ⁻²	4,209	4,281	3,511	4,457	5,099
Ca ⁺² +Mg ⁺²	7,014	6,804	7,35	14,74	17,09

RESULTATS I DISCUSSIÓ

Primerament es descriuran en línies generals els diferents tipus d'estratificació, tant tèrmica com química, que es poden donar a les cubetes de l'estany de Banyoles. S'estudiarà després l'efecte aïllant del sediment en suspensió i finalment es concretarà a cada cubeta en particular.

Estratificació tèrmica

El perfil de temperatura de la columna d'aigua a cada cubeta pot presentar fins a tres gradients d'aquesta magnitud.

El primer d'aquests —la termoclina— se sol trobar entre els 4 i els 8 metres, a l'època d'estratificació de l'estany, que va de la primavera fins a la tardor. L'aparició i desaparició de la termoclina té una periodicitat anual,

i és comuna a cada cubeta. En aquest sentit, podem parlar de règim monomíctic.

L'aigua freàtica que arriba a cada cubeta és molt rica en sulfats com a conseqüència del seu pas pel sistema càrstic que hi ha sota l'estany. Aquesta aigua, en barrejar-se amb la que prové de la pluja i dels rierols que hi aboquen les seves aigües, dóna lloc en algunes cubetes a la meromixis abans esmentada. Un segon gradient de temperatura pot tenir lloc a les cubetes meromíctiques, en arribar al *monimolimnion*, degut al major poder retentiu de la calor que té l'aigua salada, com ja hem explicat a la introducció. Aquest fenomen és exclusiu d'algunes cubetes.

El tercer gradient tèrmic coincideix amb la regió on hi ha la interfase aigua —aigua amb sediment en suspensió, i és comú a totes les cubetes de l'estany. Aquest gradient oscil·la entre els 4 °C i 8 °C, i es deu al fet que l'aigua que entra pel subsòl està més calenta que la de la resta de l'estany.

Estratificació química

El perfil de conductivitat pot presentar fins a dos gradients clarament diferenciats.

El primer consisteix en la pujada de conductivitat —i per tant salinitat— en arribar al monimolimnion, a les cubetes meromíctiques. En el segon, la conductivitat disminueix per l'efecte aïllant del sediment. Aquesta disminució de conductivitat es dóna a totes les cubetes i és explicada quantitativament a l'apartat següent.

Aquest segon gradient, en algunes cubetes queda camuflat, perquè coincideix amb el primer. Així, la interfase aigua - aigua amb sediment coincideix amb el monimolimnion. La conductivitat puja per raó de l'aigua salada, però baixa per l'efecte aïllador del sediment. De les dues contribucions, la més important és la primera, i per tant, la conductivitat augmenta.

Efecte aïllador del sediment en suspensió

La conductivitat elèctrica es una propietat que ha estat molt utilitzada per caracteritzar l'estructura d'un medi porós saturat d'un líquid conductor. Archie (1942) ja va proposar una llei basada en els resultats obtinguts en un gran nombre d'experiències amb roques poroses saturades d'aigua salada:

$$\tau/\tau_f = 1/F = A\epsilon^m$$

on τ és la conductivitat del medi porós, τ_f la conductivitat del fluid, A és una constant que Archie va prendre igual a 1, i m és una altra constant, el valor de la qual depèn del grau de consolidació dels grans. Atkins i Smith (1961) i Atlan *et al.* (1969) determinaren un valor de m comprès entre 2,5 i 5,4 per argiles. Manhein i Waterman (1974) trobaren valors de F a diferents profunditats en sediments marins. Les seves dades suggereixen que per a un gran nombre de porositats (entre 0,2 i 0,7) m es pot prendre igual a 2.

Lemaître *et al.* (1985) donen per dissolucions diluïdes, suspensions de petites esferes un valor $m = 1,5$, mentre que per dissolucions més denses $m = 1,15$.

Un dels models teòrics que més bé descriu aquest tipus de fenòmens és el de Berryman (1983) basat en la teoria fenomenològica de Biot sobre la propagació d'una ona acústica en un medi poròs saturat de fluid, i que dona una relació de conductivitats:

$$\tau/\tau_t = \varepsilon (1 + \varepsilon) / 2$$

En el nostre cas utilitzarem la llei d'Archie, essent τ la conductivitat total del conjunt aigua-aigua amb sediment en suspensió i τ_t la conductivitat de l'aigua, després d'haver deixat sedimentar la mostra. El valor de m és un paràmetre que dependrà del tipus de sediment, del seu estat de consolidació, etc. A l'estany de Banyoles hem fet estimacions del seu valor a algunes cubetes i a diferent fondària i hem obtingut un valor global que oscil·la entre 1 i 2. Estimarem el valor de m a diferents cubetes a l'apartat següent.

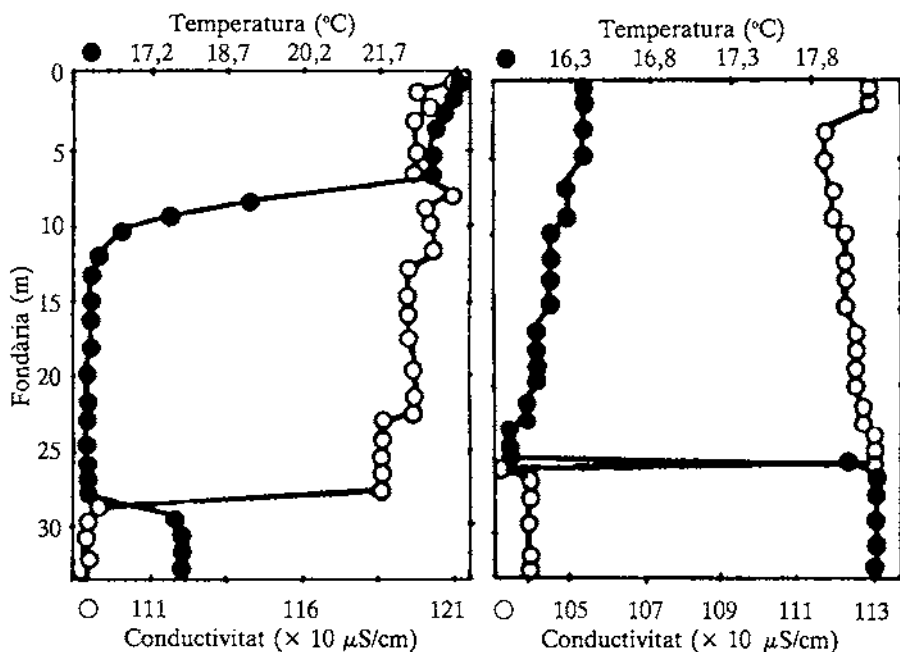


Figura 1. Perfils de temperatura i conductivitat de la cubeta I. A l'esquerra del dia 19-9-86, a l'època d'estratificació. A la dreta del dia 5-11-86, quan aquesta ja ha començat a minvar.

Descripció de les diferents cubetes

Cubeta I

A la figura 1, a l'esquerra, podem veure el perfil tèrmic i de conductivitat de la cubeta I a l'època d'estratificació, i a la dreta, quan aquesta ja ha començat a minvar. Aquesta cubeta és la que té la superfície més gran i per on entra més cabal de tot l'estany; l'aigua que penetra per la cubeta es barreja sense dificultat amb la resta d'aigua de l'estany, tot donant lloc a una cubeta no meromíctica, de manera que l'únic gradient apreciable de conductivitat és l'originat per l'efecte del sediment en suspensió.

Si mesurem la conductivitat de l'aigua intersticial del sediment i la comparem amb la de l'aigua de la zona superior a la interfase aigua - aigua amb sediment en suspensió, obtenim que la primera és uns 20-40 micro S / cm més baixa que la segona, segons les diferents èpoques. Aquesta diferència s'explica pel fet que, a la regió superior a la interfase hi ha una certa acumulació de ions procedents, segurament, d'altres cubetes, per a les quals l'aigua que entra té una conductivitat més alta. A la taula 2 podem veure com l'aigua als 23 m de profunditat és més rica en sulfats que no pas als 40 m.

La porositat d'aquesta cubeta és la més gran de totes les de l'estany (veure la taula 1), mantenint-se el seu valor constant amb la fondària, i també en el transcurs del temps. El coeficient m de la llei d'Archie es pot prendre com $m = 1,0 \pm 0,2$ pràcticament constant amb la fondària.

Cubeta II

El comportament d'aquesta cubeta és semblant a la I, no presentant tampoc meromixis. És la segona en superfície de l'estany i la més profunda.

En èpoques d'estratificació pot arribar a presentar fins a dues termoclines a causa que, als 26 m, l'aigua d'aquesta cubeta es barreja amb la de la I (Fig. 2).

La conductivitat de l'aigua a la regió del sediment és pràcticament la mateixa que a les regions superiors, o algunes vegades una mica més gran, per raó que l'aigua provinent de l'aqüífer és molt rica en sulfats i aquests es difonen amb més facilitat en sortir del sediment, disminuint per tant la seva concentració. Aquest fet serà molt més obvi a la cubeta III.

Cubetes III i IV

Aquestes cubetes són típicament meromíctiques, amb un monimolimnion persistent pràcticament durant tot l'any, i mantenint-se a una temperatura lleugerament superior a la de l'aigua del seu damunt. El seu comportament és molt semblant, i només ens fixarem amb la III. A l'època d'estratificació el seu perfil és el representat a la figura 3.

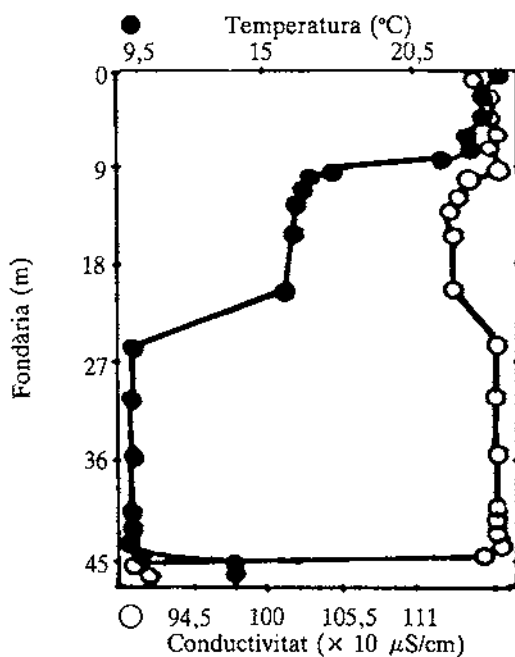


Figura 2. Perfils de temperatura i conductivitat de la cubeta II del dia 5-11-86.

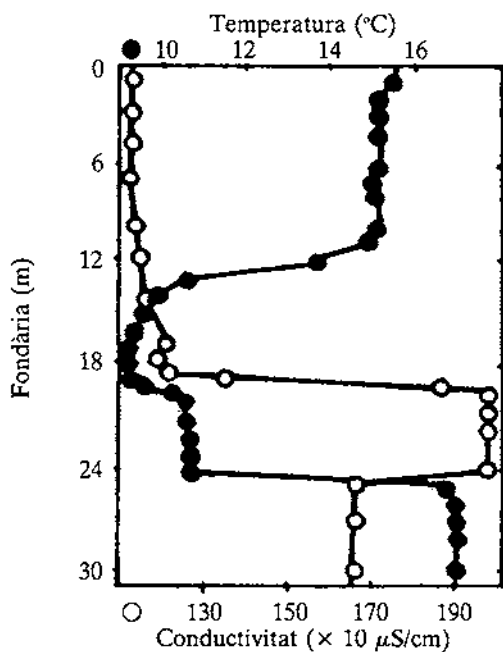


Figura 3. Perfils de temperatura i conductivitat de la cubeta III el dia 5-11-86.

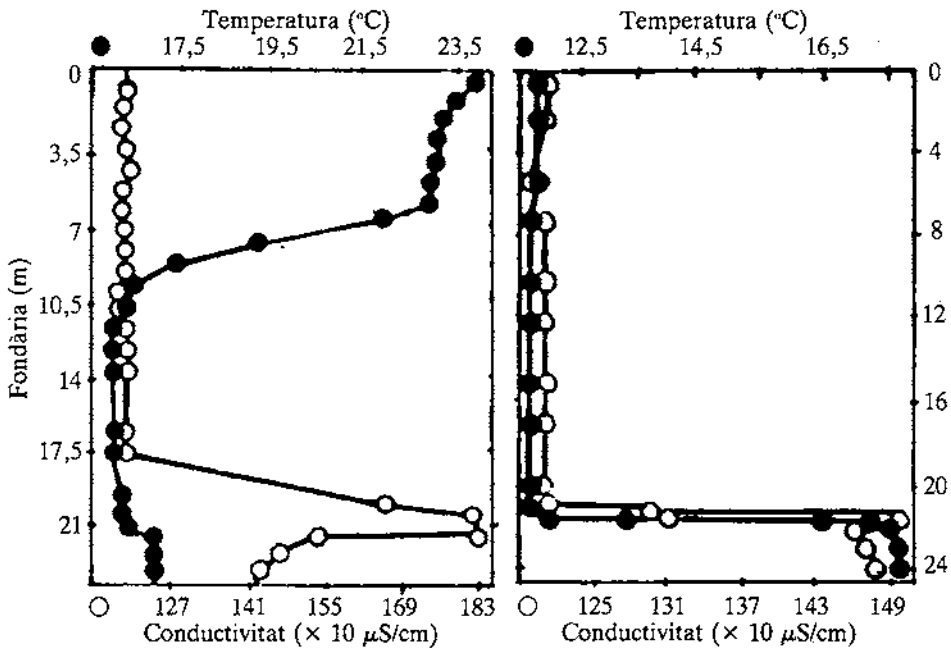


Figura 4. Perfils de temperatura i conductivitat de la cubeta VI. A l'esquerra del dia 18-9-86, durant l'època d'estratificació. A la dreta del dia 17-12-86.

El monimolimnion d'aquesta cubeta és calentat per l'aigua del sediment, i no per radiació solar (Casamitjana, en premsa). La conductivitat de l'aigua intersticial del sediment és sempre més gran que la del monimolimnion, uns 150-200 micro S./cm segons les diferents èpoques, degut a un major nombre de sulfats en aquesta regió (veure taula 2).

A la cubeta III, el valor de m , mesurat a diferents fondàries es pot prendre igual a $1,4 \pm 0,2$. A la figura 6 podem veure un gràfic $\varepsilon - \tau_f/\tau$ obtingut en variar la porositat d'una mostra, extraient-ne l'aigua. El valor habitual de la porositat a la cubeta està comprès entre l'interval de porositats que hem escollit a la figura 6.

Cubetes VI i VII

Aquestes cubetes són meromíctiques, però sovint la interfase del sediment coincideix amb l'entrada al monimolimnion. Així, a la figura 4, a la dreta, constatem un augment de la conductivitat en arribar al sediment. Com ja hem indicat anteriorment, la pujada de conductivitat intrínseca al monimolimnion és més gran que la disminució d'aquesta per culpa del sediment. En canvi, a l'esquerra, hi ha uns dos metres de separació entre el monimolim-

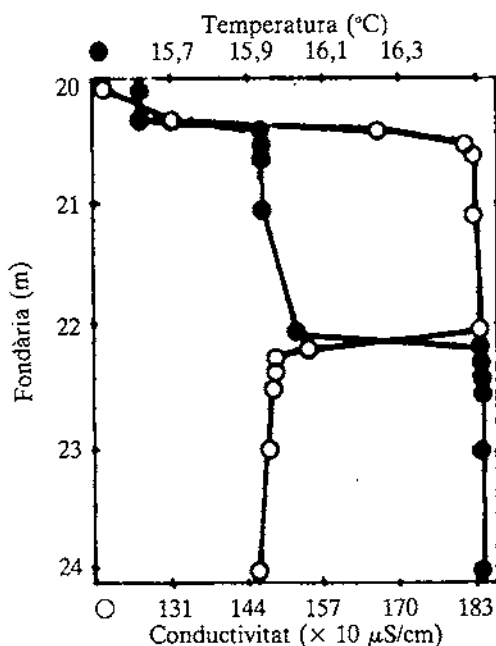


Figura 5. Detall dels perfils de temperatura y conductivitat de la cubeta VI, del dia 18-9-86.

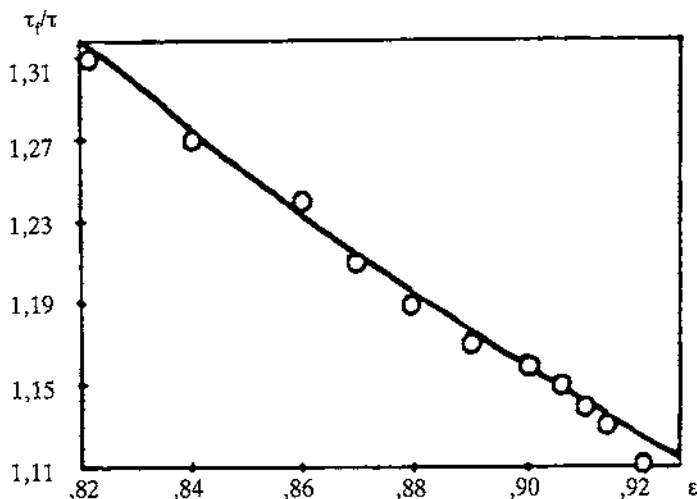


Figura 6. Variació del quocient τ_f/τ amb la porositat ϵ a la cubeta II. Els punts corresponen a resultats experimentals; la corba és: $\tau_f/\tau = \epsilon^m$

nion i la interfase del sediment, detall que s'observa millor a la figura 5. A la cubeta VIII l'efecte és similar.

El valor de m de la llei d'Archie, a la cubeta VI és de $m = 1,55 \pm 0,2$.

Bibliografia

- ABELLA, C. (1980). *Dinàmica poblacional comparada de bacterias fotosintéticas planctòniques*. Tesis Doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona.
- ARCHIE, G. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *A.I.M.E.* 146: 54-62.
- ATLAN, Y.; BARDON, C.; M INNSIEUX, M.; QUINT, M. i DELVAUX, P. (1969). Conductivité en milieux poreux argileux. *3rd. Colloq. Assoc. Rech. Tech. Forage. Prod.* Paris Ed. Tech.
- ATKINS, E.R. SMITH, G.H. (1961). The significance of particle shape in formation of resistivity factor porosity relationships. *J. Pet. Technol.* 13: 285-91.
- BASTIDA, J. SANZ, M. (1961). Contribución a la dinámica y sedimentología del lago de Banyoles. *Comunicación en las jornadas científicas de la sociedad española de cerámica y vidrio*. 11-13 de junio, Barcelona.
- BERRYMAN, J.P. (1983). Effective conductivity by fluid analogy for a porous insulator filled with a conductor. *Phys Rev. B.* 27, 7789-7792.
- BRUNET, R.C.; GARCIA GIL, J. i ABELLA, C. (1985). Noves cubetes sorgents a l'estany de Banyoles. *Scientia Gerundensis.* 11: 91-99.
- JULIÀ, R. (1980): La conca lacustre de Banyoles - Besalú. *Monografies del centre d'estudis comarcals de Banyoles.* 188 pp.
- LEMANTRE, J.; TROADEC, J.P.; BIDEAU, D. i SARRAZIN, j. (1985). Conductivité dans l'espace des pores d'un empilement de sphères. *C.R.Acad. Sc. Paris*, t. 301 Série II, 14.
- MANHEIM WATERMAN (1974): Diffusimetry on sediment cores by resistivity probe. *Initial Rep Deep Sea Drilling Proj.* 22: 663-670.
- PLANAS, M. D. (1973). Composición, ciclo y productividad del filoplancton del lago de Banyoles. *Occologia Aquática* 1, 3-306.
- ROGET, E. (1987). *Càlcul dels cabals d'entrada a l'estany de Banyoles*. Tesina de llicenciatura. Universitat Autònoma de Barcelona.
- RUTTNER, F. (1953). *Fundamentals of limnology*. University of Toronto Press. 295 pp.