

Resum

Diferents estudis realitzats als embassaments de Sau i Boadella ens permeten de veure com la hidrodinàmica pot influir de manera significativa en la qualitat de l'aigua. Estudiarem primerament les ones internes que es produeixen en aquests embassaments com a conseqüència dels patrons dominants del vent, i que donen lloc a una estructura oscil·latòria força complexa, anomenada *tercer mode d'oscil·lació*. La simulació de l'estructura tèrmica mitjançant un model numèric unidimensional ens permet de veure la variació del perfil de temperatura segons diferents polítiques d'extracció de l'aigua; veurem com apareix una termoclina molt pronunciada en el punt on es troba la boca d'extracció. Finalment, mitjançant la utilització d'un mesurador làser de diàmetres de partícules a l'aigua, veurem com es pot quantificar la resuspensió de partícules de les capes del fons de l'embassament de Boadella segons la velocitat del vent i la fortalesa de l'estratificació.

Abstract

Different studies that have been carried out in Sau and Boadella reservoirs show how hydrodynamics greatly influences water quality. Firstly, the work deals with internal waves produced in these reservoirs as a response to the prevailing wind patterns and with the rather complex oscillating structure, known as 'third mode of oscillation', that they have. The simulation of the thermal structure by means of a one-dimensional numerical model allows us to predict the variation of the water temperature profile depending on different water withdrawal policies, and a sharp thermocline close to the water outlet is noticed. Finally, using a laser meter that measures the diameter of suspended particles, the resuspension of the particles from the bottom boundary layer in the Boadella reservoir is quantified as a function of the wind velocity and the stratification strength.

L'objectiu d'aquest treball és veure com diferents processos hidrodinàmics que tenen l'origen en la interacció de les variables meteorològiques —vent, radiació solar— amb un fluid estratificat —l'aigua d'un llac o un embassament— i que determinen patrons de circulació d'aquesta aigua, poden influir de manera significativa en la qualitat d'aquesta. Per a veure això ens basarem en estudis que hem realitzat en dos embassaments catalans —Sau i Boadella (vegeu la figura 1)— prou coneguts de tothom i de gran importància, ja que subministren aigua potable a ciutats com Barcelona o Figueres. Aquests estudis han estat publicats en revistes especialitzades de reconegut prestigi (Casamitjana *et al.*, 2002; Casamitjana *et al.*, 2003; Pérez *et al.*, 2003).

L'embassament de Boadella està situat a 106 m per sobre del nivell del mar. Té una capacitat màxima de 62 hm³, i una superfície màxima de 364 ha. A l'embassament hi aboquen dos rius: la Muga i l'Arnera, que contribueixen aproximadament amb un 65 % i un 35 % respectivament al cabal d'entrada. Les boques d'extracció estan localitzades a 7 m (sortida 1), i a 18 m (sortida 2) de la base de la presa. La càrrega de nutrients no és gaire elevada, amb valors mitjans de 3,2 µg N l⁻¹ pel que fa al nitrogen i de 0,2 µg P l⁻¹ pel que fa al fòsfor total. En ser el quocient N/P petit poden aparèixer brotades (*bloom*) de cianobacteris (Baserba, 1999). La clorofil·la *a* pot arribar a valors màxims de 27,8 µg l⁻¹. Els cianobacteris, les diatomees i les algues verdes dominen el fitoplàncton de l'embassament. A l'estiu l'hipolimnion esdevé anòxic i diferents productes resultants de la fermentació contribueixen a la redissolució del fòsfor dels sediments (Baserba, 1999).

L'embassament de Sau està situat a 426 m per sobre del nivell del mar. Té una capacitat màxima de 168 hm³, i una superfície màxima de 580 ha. Les boques d'extracció estan localitzades a 21 m, 35 m i a 50 m de la base de la presa. Una de les característiques més significatives que té és la seva forma de canó, ja que es troba encaixonat al fons de la vall excavada pel Ter en el seu pas a través de la serralada prepirinenca (Armengol *et al.*, 1999). Aquest riu aporta una elevada càrrega de nutrients, amoni i fòsfor reactiu soluble. Si bé la càrrega de nutrients s'ha reduït en els darrers anys com a conseqüència de l'entrada en funcionament d'estacions depuradores, la càrrega tròfica de l'embassament és encara força elevada amb una abundant proliferació de fitoplàncton. Amb l'excepció d'alguns pics de clorofil·la *a* que poden arribar a ser de 200 µg l⁻¹, la variabilitat anual de la clorofil·la *a* no passa de 26,5 µg l⁻¹.

1. Règim d'ones internes

Les figures 2 i 3 ens donen una idea de l'estructura tèrmica dels embassaments de Boadella i Sau. A cada una d'aquestes figures s'hi representa la velocitat del vent mesurada en una estació meteorològica del Servei Meteorològic de Catalunya (Agullana, per Boadella, i Vilanova de Sau, per Sau) propera a cada embassament i la temperatura a diferents fondàries, obtinguda

mitjançant una cadena de registre de temperatura. La direcció del vent no s'ha representat a la figura, però en el cas de Boadella hi predomina la marinada (direcció 90°, aproximadament), encara que a vegades també la tramuntana, i en canvi en el cas de Sau hi predomina el vent de ponent (direcció 270°, aproximadament). Atesa l'orientació relativa dels embassaments (figura 1) i les seves preses, en el cas de Boadella la marinada genera una circulació superficial que allunya l'aigua de la presa riu amunt, mentre que a Sau es dona el cas contrari, és a dir, l'aigua va cap a la presa (figura 4). Aquest tipus de circulació és visible a l'estructura tèrmica. A mesura que passa el dia, la temperatura de les capes superficials, en zones properes a la presa, disminueix a Boadella per l'aflorament (*upwelling*) provocat pel vent i, en canvi, augmenta a Sau per l'enfonsament (*downwelling*) originat (figura 4). Tenim, per tant, un primer exemple en què la hidrodinàmica determina patrons diferents en embassaments que, d'altra banda, tenen morfologies similars.

En els espectres obtinguts a partir de les dades de temperatura de les figures 2 i 3 (figura 5), hi veiem un mode predominant de vint-i-quatre hores. Aquest mode forçat pel vent (Pérez *et al.*, 2003) és el més important en ambdós embassaments, de manera que eclipsa altres modes propis, com el de dotze hores a Boadella o cinc hores i mitja a Sau. L'anàlisi dels modes propis que hem efectuat, en què utilitzàvem tant models 1-D com 2-D (Baeuerle, E., comunicació personal), ens corrobora que, a l'embassament de Boadella, el mode de cinc hores i mitja es correspon amb el primer mode longitudinal si prenem com a ventres els punts situats a les estacions S1 i S2 (figura 1). A la figura 6 hem representat les fluctuacions de la isoterma de 18 °C en aquestes dues estacions, situades als extrems de la part més àmplia de l'embassament de Sau. Podem veure com en aquests dos extrems es troben ventres d'oscil·lació, mentre que a la part central hi hauria un mode. El node existent a l'estació S2 és segurament induït per la pròpia morfologia de l'embassament, ja que el revolt sobtat afavoreix la reflexió de l'aigua.

Els embassaments de Sau i Boadella poden presentar una estructura oscil·latòria prou complexa. Això es deu al fet que, en una bona part del període d'estratificació, la columna d'aigua està contínuament estratificada i l'embassament no es pot assimilar al model típic de dues capes (epilímnion i hipolímnion), ni tan sols al de tres capes (epilímnion, termoclina i hipolímnion). A Boadella, per exemple, hem detectat la presència d'almenys un tercer mode d'oscil·lació, i la formació de quatre capes diferents.

A la figura 7 veiem representada una estructura de quatre capes, primer en una posició estable, i, després, el resultat de l'oscil·lació produïda pel vent. Quan el vent comença a bufar, les isoterms s'inclinen i les temperatures dels punts P1, P2 i P3 experimenten els canvis indicats a la figura 7. La temperatura a P1 decreixerà de T1 a T2, a l'estació P2 creixerà de T3 a T2, i, a P3, decreixerà de T3 a T4. Aquest tipus de comportaments no han estat gaire sovint observats en llacs, però es poden comparar amb resultats d'experiments efectuats al laboratori, com per exemple els realitzats per Koseff i Street (Koseff i Street, 1985). Aquests autors van veure que el nombre de cel·les de circulació que s'obtenien en una cubeta depenia del nombre de Richardson

$$Ri_b = g(\Delta\rho/\rho)D/U_b^2, \quad (1)$$

on g és l'acceleració de la gravetat, $\Delta\rho$ és la diferència de densitats als extrems de la cubeta, ρ és una densitat de referència, D és la fondària de la cubeta i U_b és la velocitat induïda a la part superior de la cubeta. Quan $Ri_b \gg 1$, a més de la cel·la primària apareixen dues cel·les secundàries. Quan $Ri_b \sim 1$ una cel·la única domina tot el flux. Quan $Ri_b \ll 1$ hi ha una barreja gairebé total.

Per a comparar aquests resultats amb els nostres podem utilitzar $\Delta\rho/\rho = 1,6 \cdot 10^{-3}$, que correspon a una diferència de densitats entre la superfície i el fons d'uns 8°C i $D = 25$ m. Com a U_b , podem prendre el valor de la velocitat de la capa de barreja, U , calculat a partir del balanç següent:

$$d/dt(hU) = u_*^2, \quad (2)$$

on h és la fondària de la capa de barreja, $u_* = (\rho_A/\rho C_D)^{1/2} U_w$ és la velocitat de cisalla, ρ_A és la densitat de l'aire, $C_D = 1,3 \cdot 10^{-3}$ és un coeficient aerodinàmic i, U_w la velocitat del vent. L'equació (2) és vàlida durant el primer quart del període de l'oscil·lació principal que domina el camp d'ones internes del llac. La integració de (2) ens dona $U = u_*^2 t/h$. Suposant que el valor màxim d' U es dona per $t = 6$ h, és a dir, a la quarta part del període de l'oscil·lació principal, trobem que quan $U_w = 3$ m/s, un valor típic de vent de marinada $Ri_b = 40 \gg 1$, i per tant hem d'esperar l'existència de modes d'oscil·lació elevats. En canvi, quan $U_w = 7$ m/s, un valor típic de la tramuntana, $Ri_b = 1,3$ i ja no s'observen aquests modes d'oscil·lació. Fixem-nos en la figura 2, i veurem que, el dia 16, es produeix la uniformització de la columna d'aigua després de bufar vents d'aquesta magnitud.

A l'embassament de Sau la persistència del vent de ponent també origina una estructura oscil·latòria semblant a Boadella. A la figura 8 presentem dades obtingudes mitjançant un correntòmetre d'efecte Doppler (ADCP). Aquest instrument serveix per a realitzar perfils de velocitat i treballa a una freqüència de 500 MHz. Mesura els tres components de la velocitat amb un rang de 10 m/s, una freqüència de 2 Hz i una precisió de 0,5 cm/s. Als dos gràfics de la figura 8 es poden apreciar clarament dos corrents de direccions oposades. Això es deu a la inversió dels corrents que té lloc per l'estructura oscil·latòria que hem explicat abans.

2. Modelització de l'estructura tèrmica

A l'apartat anterior hem estudiat fenòmens clarament bidimensionals. No obstant això, la diferència entre els coeficients de transport verticals, molt més petits que els horitzontals, fa que moltes vegades puguem considerar l'embassament des d'un punt de vista unidimensional. El model DLM és un model unidimensional de simulació de l'estructura vertical de la temperatura i salinitat per a llacs i embassaments (Imberger i Patterson, 1981; Casamitjana i Schladow, 1993; Casamitjana *et al.*, 1993; Han *et al.*, 2000). En aquest model, el perfil vertical del llac es representa amb un conjunt de fins a cent capes que es poden moure verticalment,

contraure's o expandirse en resposta als cabals fluvials, a les extraccions i als fluxos superficials. Els fluxos superficials de moment, calor latent i calor sensible es calculen a partir de fórmules aerodinàmiques. La dinàmica de la capa superficial es computa a partir d'un model integral segons el qual es tenen en compte diferents processos: la barreja del vent, la convecció, la producció de cisalla i els remolins de Kelvin-Helmoltz a través d'un balanç d'energia:

$$\frac{C_k^f}{2} \rho q^3 dt + \frac{C_s}{2} \rho (\Delta u)^2 dh = \frac{C_T}{2} \rho dh q^2 + \Delta \rho g dh \frac{h}{2}, \quad (3)$$

on C_k^f , C_s , C_T i η són coeficients d'eficiència, $q = (w_*^3 + \eta^3 u_*^3)^{1/3}$ és l'escala de velocitat de l'energia cinètica turbulenta, on u_* ja ha estat definida anteriorment, w_* és la velocitat induïda per la convecció nocturna (MacIntyre *et al.*, 2002), h és la fondària de la capa de barreja, t és el temps i $\Delta \rho$ és la diferència de densitats entre la capa de barreja i la capa inferior. Per a modelitzar les contribucions fluvials s'ha de tenir en compte que quan un riu penetra en un embassament aquest empeny l'aigua fins a l'anomenat *punt d'immersió*. Aquí el riu es comença a submergir fins que, segons la diferència de densitat, queda inserit a l'embassament. Les extraccions d'aigua es modelitzen tenint en compte tant el cabal d'extracció com l'estratificació. Finalment la barreja a l'hipolímion es modelitza amb un coeficient de difusió que és directament proporcional a la dissipació d'energia cinètica turbulenta i inversament proporcional a l'estratificació.

Hem utilitzat el model DLM a l'embassament de Sau amb l'objectiu de poder veure les conseqüències de l'extracció d'aigua a l'estructura tèrmica de l'embassament (Casamitjana *et al.*, 2003). Les simulacions que presentem es comencen el dia 1 de juny del 2000, per a un període de cent cinquanta dies. Les dades meteorològiques, les hem agafades de l'estació meteorològica d'Agullana, situada a uns sis quilòmetres de l'embassament. Com que no teníem mesures de cabals entrants, les hem deduïdes a partir del nivell de l'embassament i dels cabals d'extracció. La temperatura dels rius entrants, l'hem deduïda a partir de la temperatura de l'aire els darrers quatre dies, utilitzant el procediment suggerit per Armengol (Armengol *et al.*, 1999). Durant el període simulat es va extreure una gran quantitat d'aigua per la sortida 1, que es va destinar sobretot a usos agrícoles (figura 9).

A la figura 10 es comparen els resultats experimentals amb els resultats del model. Fixem-nos com, a causa de la forta extracció d'aigua, el nivell de l'embassament va decreïxer des de 37 m l'1 de juliol (figura 10a) fins a 27 m a l'octubre (figura 10d). El dia 1 de juliol (figura 10a) es pot veure una estructura de tres capes (epilímion, metalímion i hipolímion) tant en el perfil simulat com en l'experimental. D'altra banda, el dia 2 d'agost veiem un perfil contínuament estratificat; també podem apreciar la formació d'una termoclina a uns 7 m, coincidint amb la sortida 1 (figura 10b). Durant tot el període es veu una capa d'aigua freda per sota de la sortida 1. Durant els mesos de setembre i octubre la capa d'aigua per damunt de la sortida 1 es barreja completament i llavors s'hi aprecia una estructura de tres capes, amb una termoclina situada

prop de la sortida 1. Encara que la utilització d'un model unidimensional com el DLM per al cas de l'embassament de Boadella pot ser discutible, les temperatures experimentals segueixen la mateixa tendència que les temperatures predites. Òbviament hi ha processos 2-D que el model no té en compte i que poden explicar algunes de les diferències observades a les fondàries mitjanes de l'embassament. Amb tot, el model prediu correctament la formació de la termoclina a la sortida 1.

Atès el grau d'acord entre els perfils experimentals i els simulats podem utilitzar el model per a predir altres escenaris possibles. Per exemple, a la figura 11 es comparen els resultats mesurats amb els que prediria el model en cas que no hi hagués hagut extraccions d'aigua. Els perfils simulats són del tipus d'un llac amb una capa de barreja que s'enfonsa amb el temps. La simulació ens mostra que el perfil contínuament estratificat del 2 d'agost (figura 11b) es deu clarament a l'extracció d'aigua per la sortida 1. La temperatura global de l'embassament és més baixa, ja que en aquest cas no s'extreu l'aigua més freda de l'hipolímnion.

La figura 12 compara els perfils mesurats amb els simulats si l'extracció d'aigua s'hagués efectuat per la sortida 2. Al juliol, els perfils experimental i el teòric no difereixen gaire (figura 12a). En canvi, quan l'estratificació està completament desenvolupada la termoclina se situa al nivell de la sortida 2 fins al final del període d'estratificació (figura 12c i 12d). És, per tant, força clar que la termoclina es determina pel punt d'extracció de l'aigua. Aquest fet és força habitual en embassaments mediterranis, ja que a l'estiu estan sotmesos a uns nivells d'extracció molt elevats. Pensem, per exemple, que l'any 2000, cap al final de l'estiu, s'havia extret un 47 % de l'aigua embassada al principi de l'estació. Un altre possible escenari seria l'extracció combinada d'ambdues sortides. Per exemple, si l'extracció es fes una setmana per la sortida 1 i la setmana següent per la sortida 2 obtindríem uns perfils de temperatura com els representats a la figura 13. En aquesta figura es poden comparar els resultats experimentals a l'agost i a l'octubre en els tres diferents casos d'extracció. Es veu com, en el cas de l'extracció combinada, la termoclina es debilita considerablement.

El model presentat ens serveix per a especular sobre les possibles conseqüències de canvis en la política d'extracció de l'aigua. Evidentment caldria disposar d'un model de qualitat de l'aigua ben calibrat per a poder elaborar conclusions més precises. L'actual política d'extracció, per la sortida 1, contribueix a confinar l'hipolímnion a la part més profunda de l'embassament; el volum d'aquest es redueix fins a 0,6 hm³ aproximadament. En canvi, l'extracció d'aigua per la sortida 2, en el cas que tècnicament fos possible, augmentaria el volum de l'hipolímnion fins a uns 5 hm³ i es trobaria a una profunditat inferior. En aquest cas la llum podria arribar a l'hipolímnion i afavoriria les brotades (*bloom*) de fitoplàncton. A més, com que a l'embassament de Boadella el quocient N/P és petit també es podria presentar, en aquest cas, una brotada (*bloom*) de cianobacteris, amb les conseqüències negatives per a la salubritat de l'aigua que això podria representar.

3. Resuspensió de partícules de la capa del fons

A l'embassament de Boadella, l'existència d'una termoclina prop del fons (figura 10) afavoreix l'acumulació de diferents tipus de partícules (Casamitjana *et al.*, 2002). Per a poder mesurar els diàmetres d'aquestes partícules utilitzem l'instrument Liss-100, que utilitza la tècnica de la difracció làser. L'avantatge d'utilitzar aquest instrument és que no destrueix els agregats, ja que els diàmetres es mesuren *in situ* (Serra *et al.*, 2001; Serra *et al.*, 2002). Les concentracions més elevades es donen a la superfície, al principi de l'estiu i al fons, prop de la sortida 1, sobretot cap al final de l'estiu. Com que els valors de la concentració de partícules prop de la superfície es corresponen amb valors alts de la clorofil·la *a*, podem atribuir aquestes partícules a una brotada (*bloom*) de fitoplàncton (Colomer *et al.*, 2002). D'altra banda, l'elevat nombre de partícules de la capa del fons coincideix amb la termoclina; l'observació al microscopi ens permet determinar l'origen de les partícules de la capa del fons (figura 14). Les de diàmetre més petit de 3 µm són partícules inorgàniques i restes de partícules orgàniques; les partícules de diàmetre 5 µm i 15 µm respectivament es corresponen amb cel·les mortes de diatomees i d'algues verdes respectivament. Les partícules amb diàmetre comprès entre 30 µm i 100 µm estan formades per una mescla d'agregats de partícules inorgàniques, colònies de fitoplàncton, zooplàncton, detritus, etc.

Per a estudiar la resuspensió de les partícules de la capa del fons, que es produeix cap al final de la tardor, vam deixar el Liss-100 prenent dades en continu a uns 7 m del fons de l'embassament entre el 28 de setembre i el 17 d'octubre del 2000. A la figura 15 podem veure la concentració de partícules de diàmetre més petit de 3 µm i les de diàmetre comprès entre 30 µm i 100 µm, així com els perfils de temperatura per als dies 28 de setembre i el 17 d'octubre del 2000. Fixem-nos com el dia 28 de setembre les partícules més petites estaven concentrades a la termoclina i tenien el seu màxim a 6 m del fons (figura 15a). La velocitat de sedimentació de les partícules amb diàmetre 3 µm i densitat de 2.500 kgm⁻³ és de 0,25 m/dia. Aquesta velocitat tan petita i la reducció conseqüent a causa de l'arrossegament causat per la diferència de densitat (Srdic-Mitrovic *et al.*, 1999) expliquen l'acumulació de partícules a la termoclina. Les partícules més grans, en canvi, tenen un comportament diferent; el 28 de setembre, la majoria estaven situades en els primers 15 m de la columna d'aigua (figura 15b). La concentració que tenia era quasi constant (~ 2 µl/L) a causa de la barreja. Entre el 28 de setembre i el 17 d'octubre la termoclina es va endinsar uns 2 o 3 m i l'aigua de la capa de barreja es va refredar uns 4 °C. Una part important de les partícules situades prop de la termoclina es va resuspendre i el 17 d'octubre el màxim d'aquestes partícules estava situat a 5 m del fons (figura 15c).

A les figures 16a, 16b i 16c podem veure les fluctuacions de la temperatura i de la concentració de partícules de diàmetre menor a 3 µm i de les de diàmetre comprès entre 30 µm i 100 µm. Al principi del període estudiat, les partícules de diàmetre inferior a 3 µm eren prop del Liss-100 (figura 15a). D'altra banda, el màxim de les partícules entre 30 µm i

100 μm era més amunt del Lisst-100 (figura 15b). Durant les primeres cent quaranta-quatre hores que va durar l'experiment, les fluctuacions de la temperatura i de la concentració a les partícules petites era més gran (figures 16a i 16b). En canvi, després de cent quaranta-quatre hores el Lisst 100 era lluny de la termoclina, d'acord amb els perfils de les figures 15c i 15d. Per tant, les fluctuacions de les partícules petites van créixer de manera substancial. D'altra banda, el paper jugat per les partícules grans va ser l'invers.

D'acord amb els resultats anteriors, podem parametritzar la resuspensió de les partícules mitjançant la cisalla causada a la termoclina i la força de l'estratificació; així podem definir el paràmetre adimensional

$$\Pi = \frac{\rho u_*^2 L}{\Delta\rho gh^2}, \quad (4)$$

on ρ és la densitat de l'aigua, L és una escala horitzontal, $\Delta\rho$ és la diferència de densitat a la termoclina i h és una escala vertical per a la resuspensió. Podem calcular u_* de la mateixa manera que ho fèiem a (2). Escollim els següents paràmetres d'escala: $L = 1,5$ km i $h = 5$ m, coincidint amb la longitud de la capa de barreja. El paràmetre Π és similar al nombre de Wedderburn (Imberger, 2001); encara que aquest es feia servir com a indicador de l'aflorament de l'aigua del metalímnion cap a la capa de barreja. A la figura 16d veiem que el primer cop que $\Pi > 1$ va ser cap a l'hora número 96, quan va haver-hi un episodi de barreja important. Posteriorment, Π es va fer més gran d'1 diverses vegades, de manera que indicava una forta resuspensió. Per tant, aquest paràmetre adimensional és un bon indicador per a la resuspensió de les partícules del fons.

4. Agraïments

Els treballs que es presenten en aquest article de revisió han estat realitzats pels membres del grup de sistemes aquàtics del Grup de Física Ambiental de la UdG, format per Jordi Colomer, Teresa Serra, Elena Roget, Joaquim Pérez-Losada, Marianna Soler, Javier Vidal i Xavier Casamitjana. La realització d'aquests ha estat possible sobretot gràcies als ajuts HID97-0833 i REN2001-2239/HD atorgats pel Ministeri de Ciència i Tecnologia i al suport infraestructural de l'Agència Catalana de l'Aigua. Voldria agrair el suport del professor Joan Armengol per les nombroses facilitats donades en l'estudi de l'embassament de Sau i de Carles Baserba en el de Boadella. També voldria agrair el suport d'Aigües Ter-Llobregat (ATLL) i del Consorci de la Costa Brava.

5. Referències bibliogràfiques

- ARMENGOL, J.; GARCIA, J. C.; COMERMA, M.; ROMERO, M.; DOLZ, J.; ROURA, M.; HAN, B. H.; VIDAL, A.; SIMEK, K. (1999). «Longitudinal Processes in Canyon Type Reservoirs: The case of Sau (N. E. Spain)». A: TUNDISI, J. G.; STRASKRABA, M. [ed.]. *Theoretical Reservoir Ecology and its applications*. Leiden (Holanda): Backhuys Publishers, p. 313-345.
- BASERBA, C. (1999). *Cicle anual i estat tròfic de l'embassament de Boadella*. Universitat de Girona. [Tesina de llicenciatura]
- CASAMITJANA, X.; ROGET, E.; SCHLADOW, G. (1993). «The seasonal cycle of a groundwater dominated lake». *Journal of Hydraulic Research*, núm. 31 (3), p. 293-306.
- CASAMITJANA, X.; SCHLADOW, G. (1993). «Vertical distribution of particles in a stratified lake». *Journal of Environmental Engineering*, núm. 119 (3), p. 443-462.
- CASAMITJANA, X.; SERRA, T.; BASERBA, C.; COLOMER, J.; PÉREZ-LOSADA, J. (2003). «Effects of the water withdrawal on the stratification patterns of a reservoir». *Hydrobiologia*, núm. 504, p. 21-28.
- CASAMITJANA, X.; SERRA, T.; SOLER, M.; COLOMER, J. (2002). «A study of the evolution of a particle boundary layer in a reservoir, using laser particle sizing». *Water Research*, núm. 36 (17), p. 4293-4300.
- COLOMER, J.; SERRA, T.; BASERBA, C.; SOLER, M.; CASAMITJANA, X. (2002). «Quantified distribution of diatoms during the stratified period in Boadella reservoir». *Hydrobiologia*, núm. 489, p. 235-244.
- HAN, B. P.; ARMENGOL, J.; GARCIA, J. C.; COMERMA, M.; ROURA, M.; DOLZ, J.; STRASKRABA, M. (2000). «The thermal structure of Sau Reservoir (NE: Spain): a simulation approach». *Ecological Modelling*, núm. 125, p. 109-122.
- IMBERGER, J. (2001). «Characterizing the dynamical regimes of a lake». A: CASAMITJANA, Xavier [ed.]. *Physical Processes in Natural Waters*. Girona: Servei de Publicacions de la Universitat de Girona, p. 77-92.
- IMBERGER, J.; PATTERSON, J. C. (1981). «A dynamic reservoir simulation model. DYRESM: 5». A: FISCHER, H. B. [ed.]. *Transport models for inland and coastal waters*. Nova York: Academic Press, p. 310-361.
- KOSEFF, J. R.; STREET, R. L. (1985). «Circulation Structure in a stratified cavity flow». *Journal of Hydraulic Engineering*, núm. 111 (2), p. 334-354.
- MACINTYRE, S.; ROMERO, J. R.; KLING, G. W. (2002). «Spatial-temporal variability in surface layer deepening and lateral advection in an embayment of Lake Victoria, East Africa». *Limnol. Oceanogr.*, núm. 47 (3), p. 656-671.
- PÉREZ-LOSADA, J.; ROGET, E.; CASAMITJANA, X. (2003). «Evidence of high vertical behaviour in a continuously stratified reservoir». *Journal of Hydraulic Engineering*, núm. 129 (9), p. 734-737.
- SERRA, T.; CASAMITJANA, X.; COLOMER, J.; GRANATA, T. (2002). «A laser analyzer for in situ

- determining the bottom and vertical particle size distribution and concentration in a coastal system». *Marine Technology Society Journal (MST)*, núm. 36 (1), p. 59-69.
- SERRA, T.; COLOMER, J.; CRISTINA, X. P.; VILA, X.; ARELLANO, J. B.; CASAMITJANA, X. (2001). «Evaluation of a laser *in situ* scattering instrument for measuring the concentration of phytoplankton, purple sulfur bacteria and suspended inorganic sediments in lakes». *Journal of Environmental Engineering* (novembre), p. 1023-1030.
- SRDIC-MITROVIC, A. N.; MOHAMED, N. A.; FERNANDO, H. J. S. (1999). «Gravitational settling of particles through density interfaces». *Journal of Fluid Mechanics*, núm. 381, p. 175-198.