

Utilització de les aigües subterrànies a Catalunya i recuperació d'aqüífers: aspectes bàsics, implicacions econòmiques i integració

Emilio Custodio

Universitat Politècnica de Catalunya

1

Perspectiva històrica de les aigües subterrànies a Catalunya i marc regulador

A principis de la dècada de 1950 no es tenia cap coneixement general sobre les aigües subterrànies a Catalunya, fora d'alguns estudis locals. Bona part d'aquests estudis deriven d'estudis fets dins el Pla Nacional de Cartografia Geològica que havia engegat l'Institut Geològic i Miner d'Espanya a partir de 1849. Es tracta de parts de les memòries geològiques dels fulls a escala 1:50.000 que es van publicar (la perspectiva històrica es presenta a Custodio, 2009). Això no vol dir que en aquest àmbit no puguem trobar alguns treballs de detall pioners –amb ciència avançada pel temps en què es van fer–, com és el cas del treball de Moragas (1896) sobre la captació de la sèquia Comtal del Besòs, a Montcada, o el treball de Santa Maria i Marin (1910) sobre la vall baixa i el delta del Llobregat.

No és fins a la dècada de 1960 que l'oficina a Barcelona de l'ara extingit Servei Geològic d'Obres Públi-

ques (SGOP), llavors pertanyent al MOP, i la Comissaria d'Aigües dels Pirineus Orientals (CAPO), aleshores l'autoritat responsable de l'aplicació de la Llei d'aigües als Pirineus Orientals (PO), avui conques internes de Catalunya (CIC), van publicar i difondre un detallat estudi en quatre volums (MOP, 1966) sobre els recursos hídrics del Besòs i Baix Llobregat, en què es presentaven per primera vegada les estructures hidrogeològiques bàsiques d'ambdues unitats, el funcionament quantitatiu, les característiques hidrogeoquímiques de les aigües subterrànies i les bases per a l'ordenació dels recursos. Aquest treball, liderat per l'enginyer i geòleg M.R. Llamas i l'enginyer F. Vilaró, amb el suport de J.M. Llansó, aleshores comissari d'Aigües, és un precedent mundial. A partir d'aquest estudi s'han desenvolupat en diferents àrees estudis hidrogeològics i de gestió d'aigües subterrànies de referència a escala mundial.

A aquest estudi en seguí un altre, engegat per les dues mateixes institucions, per tal de conèixer les aigües subterrànies de tots els Pirineus Orientals. Aquest estudi fou codirigit per especialistes formats en l'etapa

anterior i és conegut amb l'acrònim REPO (1975) i també fou difós als organismes que hi estaven relacionats.

Amb això s'assolí un bon coneixement hidrogeològic dels Pirineus Orientals, que és la zona de Catalunya on es concentra gran part de la població, on hi ha la demanda dominant d'aigua subterrània i notables problemes de contaminació dels aqüífers, en especial a la costa. L'èmfasi és en les àrees més properes a la costa dels Pirineus Orientals. Al mateix temps, va començar la construcció de la central nuclear de Vandellòs I, a l'extrem sud dels Pirineus Orientals, que requeria una forta demanda d'aigua, i estudis aprofundits hidrogeològics per completar els estudis generals de l'entorn necessaris per aconseguir les llicències d'obra i, després, per fer efectiva l'explotació. Els treballs s'iniciaren el 1969 i després enllaçaren amb els que es van fer per a l'emplaçament de la central nuclear de Vandellòs II, que acabaren el 1975, amb alguns treballs addicionals per resoldre aspectes hidrogeològics específics a les centrals nuclears d'Ascó, sobre el riu Ebre, ja a les conques intracomunitàries de Catalunya.

A poc a poc el grau de coneixement es va anar incrementant amb estudis específics que serien llargs de numerar, molts d'ells fets pel Servei Geològic d'Obres Públiques (Costa Brava, Costa Daurada, modelització numèrica del Baix Llobregat i Delta, Baix Ebre), juntament amb la Comissaria d'Aigües dels Pirineus Orientals (avaluació i assaig per a una possible injecció en profunditat de les salmorres mineres produïdes al tram mitjà del Llobregat), per la mateixa Comissaria d'Aigües (Maresme, vall del Francolí-Tarragona, model numèric de simulació del marge dret del riu Francolí a Alcover) i també per l'Institut Geològic i Miner d'Espanya (Empordà i Camp de Tarragona).

En la dècada de 1980 cal destacar els estudis per contribuir al Pla Hidrològic dels Pirineus Orientals, un conjunt d'uns quaranta documents extensos que lamentablement gairebé no es van difondre per limitacions imposades des de l'Administració central. Encara que no aportaren grans novetats al coneixement de les aigües subterrànies al territori, ni reelaboraren

les dades que ja es tenien, n'aportaren de noves. Els comentaris generals es poden trobar a Custodio (1984). Fora d'aquest intent, l'Administració de l'aigua va perdre empenta quant a avançar en el coneixement sobre les aigües subterrànies. Part dels seus especialistes engegaren estudis de primera planta o avençats, o els donaren suport, a Mallorca i a altres illes de les Balears, als aqüífers del sud de Catalunya, inclòs el Baix Ebre, i a les Illes Canàries, com a llocs més significatius. La situació s'ha redreçat des de la dècada de 1990, en què un nou i potent equip hidrogeològic s'ha anat formant a l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA), l'organisme de gestió que ha succeït les institucions anteriors, amb prou empenta i objectius per assolir.

Malgrat tot, la producció de persones formades en hidrologia subterrània i hidrogeologia no es va aturar. El 1966 el que és ara la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), empreses privades de distribució d'aigua i administracions de l'aigua van organitzar el Curs Internacional d'Hidrologia Subterrània, d'àmbit primer espanyol, per formar experts propis, i més tard el Curs es va obrir a tothom i esdevingué de caràcter internacional. Es tracta d'un curs de sis mesos de durada molt intensius, que porta a l'obtenció d'un títol de postgrau reconegut per la UPC. El primer curs s'inicià el gener de 1967 i avui se'n fa la 43a edició ininterrompuda, organitzada per una fundació formada per ens acadèmics (UPC), de l'Administració pública (ACA, Generalitat de Catalunya, IGC i IGCC), privats (AGBAR) i de recerca (IGME). La importància que té per a les aigües subterrànies de Catalunya no és solament pel que fa a la formació de professionals –alguns dels quals avui ocupen càrrecs d'importància en l'Administració, l'empresa privada, la docència i la recerca–, que formen un ampli entramat d'experts que treballen en empreses de serveis de coneixement o com a autònoms, sinó també d'acumulació de coneixements reflectits als més de mig miler de treballs de fi de curs, d'accés públic, i de nombroses publicacions i informes dels seus professors i col·laboradors.

La hidrologia subterrània havia estat pràcticament absent de les matèries docents de ciències i enginyeria que es cursaven tradicionalment. La situació va canviar

dràsticament cap a mitjan dècada de 1980, quan la importància dels problemes d'enginyeria plantejats –que fins i tot requerien desenvolupament científic– menà a introduir-los en l'especialitat d'enginyeria del terreny de la titulació d'Enginyer de Camins, Canals i Ports (UPC), amb una part bàsica i una altra d'optativa. També estan presents en les titulacions d'Enginyeria Geològica i d'Obres Públiques. Així mateix, s'introdiren assignatures amb cert contingut hidrogeològic en les titulacions de Geologia i Enginyeria Agrònoma, i més tímidament a Biologia. Això ha estat un gran canvi, encara en consolidació, per a la ciència i l'enginyeria a Catalunya, que ha estat pionera.

El Grup d'Hidrologia Subterrània del Departament d'Enginyeria del Terreny de la UPC, associat amb l'Institut Jaume Almera d'Estudis Geològics del CSIC, és un grup format per cinc professors, amb dedicació a temps complet, deu investigadors i un elevat nombre de doctorands. Té una notable producció científica i és un dels grups més reconeguts arreu d'Europa i mundialment en l'àmbit de la hidrologia subterrània.

El nombre de tesis doctorals llegides dins el grup d'Hidrologia Subterrània, o en relació amb aquest grup, o precedint-lo utilitzant en part dades dels treballs oficials anteriors o aportant-ne de noves, s'apropen a cinquanta, nombre que continua creixent. El benefici de disposar d'infraestructura humana i de coneixement ha quedat ben palès durant la notable sequera de 2008 i en els estudis i les solucions proposades sobre l'afecció per aigua subterrània en infraestructures soterrades (túnels de metro i ferrocarril, passos soterrats, estacionaments subterranis...), ben coneguts a Barcelona des de 1980 (Custodio i Bayó, 1986). En la dècada actual del 2000 han adquirit grans proporcions (Vázquez-Suñé *et al.*, 2005) i han dut a solucions relacionades amb l'aprofitament dels cabals que se n'extreuen.

El marc legislatiu general d'aquesta evolució parteix de la Llei d'aigües estatal de 1866, la que aviat fou substituïda per la de 1879 a causa de pressions polítiques. Aquesta darrera llei considera les aigües subterrànies de domini privat, és a dir, cosa de ningú fins que són apropiades mitjançant l'extracció, moment en

què passen a ser propietat de l'extractor. La llei es limita a marcar distàncies de protecció de les captacions existents registrades a les oficines dels caps de mines provincials de l'aleshores Ministeri d'Indústria, contra mines de cabal produïdes per captacions properes noves.

Això incloïa les afectacions de les aigües públiques de les lleres naturals i dels canals, amb una franja de protecció de 100 m a cada banda, o es declaraven les aigües sota les lleres (aigües subàlvies) del domini públic. Aquestes disposicions estaven molt orientades al que succeïa al Llevant espanyol, on la litigiositat era elevada malgrat els relativament petits cabals que hi estaven involucrats. Això comportà que l'Administració pública de l'aigua ignorés les aigües subterrànies a la pràctica i concentrés els esforços en gairebé exclusivament les aigües superficials. Aquesta predisposició naixia dels mateixos estudis cursats pels enginyers que acabaven tenint responsabilitat pública, en una actitud que ha estat qualificada des de fa anys com d'hidroesquizofrènia (Llomas, 1974), ja que ambdues aigües existeixen i no es poden divorciar. La situació va ser suportable mentre la captació i apropiació de l'aigua subterrània en general es mantenia en quantitats petites i era relativament difícil. Cap als anys 1930 –i en especial després dels anys quaranta– va començar a canviar dràsticament el panorama en inventar-se la bomba centrífuga submergible amb motor elèctric exterior –i encara s'agreuja molt més amb els grups motobomba submergibles–, amb el fàcil accés a l'energia elèctrica o a produir-la de manera relativament econòmica, i la bona disponibilitat de maquinària de perforació mecànica de pous, que permetia penetrar en el terreny cada vegada a més profunditat –en algun cas s'han assolit 1.000 m, de 100 a 200 metres són valors freqüents– i amb una bona tècnica per reduir ineficiències.

D'aquí neix una ràpida intensificació de les extraccions d'aigua subterrània, de forma molt distribuïda en el territori, difícilment controlable administrativament, com una “revolució silenciosa” nascuda de baix a dalt (Llomas, 2005), que ha modificat en molts indrets la circulació de l'aigua pels aquífers i les relacions

amb les aigües superficials, tant en aspectes de quantitat com de qualitat. Això va deixar obsoleta la Llei d'aigües estatal de 1879 i va agafar desprevinguts, amb escassa capacitat de reacció, sense eines de coneixement, els enginyers i administradors públics de l'aigua, encara que només fos pel que fa a la protecció de les aigües superficials i la seva qualitat.

Tot plegat va forçar la redacció de la Llei d'aigües estatal de 1985, que va arribar més d'un segle després de l'anterior. Aquesta nova llei declarava públiques totes les aigües superficials i subterrànies, i objecte de regulació i planificació per part de les autoritats de l'aigua. La promulgació conté una falla important, ja que la conversió a públiques de les aigües subterrànies que estaven inscrites com a béns privats suposava canviar-ne l'estatus legal i podia comportar un gran cost en indemnitzacions econòmiques i en litigiositat. Es va pensar que la possible solució era oferir una situació transitòria en què es podia optar a diferents solucions i, per tant, no es tenia dret a indemnitzacions. D'una banda, hi havia el que s'anomenava "protecció administrativa", en què en acceptar l'aigua passava a domini públic, cosa que poca gent va fer, en contra del que s'esperava. D'altra banda, hi havia l'opció de mantenir el règim privat –la preferida a la pràctica–, que calia inscriure en un catàleg i sense que hi hagués possibilitat de modificar les captacions, aspecte molt indefinit i controvertit. Molts usuaris i explotadors no van respondre, preferien la protecció que els donava el Codi civil respecte d'una propietat registrada, o bé continuar en la clandestinitat o al·legalitat a l'espera de nous esdeveniments i de successives amnisties previsibles. Això és l'origen d'un caos legal i de coneixement sobre l'explotació i els drets sobre les aigües subterrànies, i també administratiu a causa del poc personal que hi havia disponible en les autoritats de l'aigua –confederacions hidrogràfiques– per instruir un procés complex i dilatat en el temps, i susceptible que s'hi interposin recursos i contrarecursos, durant els quals no s'han aturat les extraccions d'aigua subterrània. Els notables esforços fets a Catalunya malgrat l'interès encara no han arribat a bon port, en

especial a les conques intercomunitàries, dominantment agrícoles i ramaderes, encara que s'hi han fet progressos.

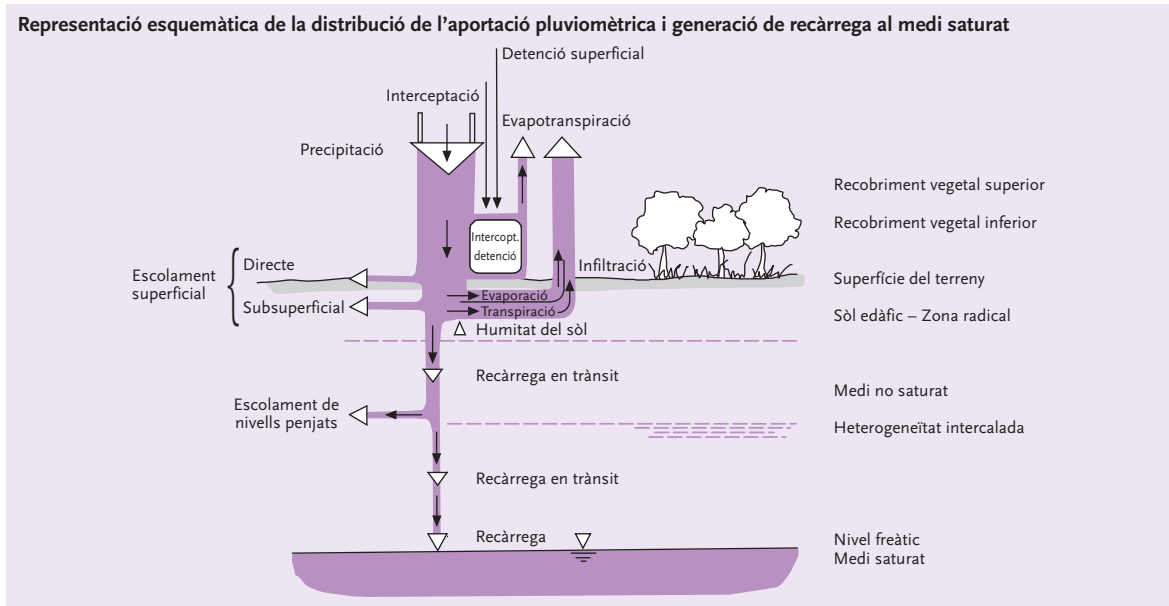
Dins de tot aquest context, la Unió Europea va promulgar l'any 2000 la Directiva marc de l'aigua (DMA), de compliment obligatori a tot el territori de la Unió, i que els diferents països membres ja han incorporat a les legislacions d'aigües pròpies (principi de subsidiarietat), amb els canvis necessaris i amb les restriccions addicionals que s'han considerat oportunes i justificades a cada país.

Això ha traslladat a l'Administració de l'Aigua a Catalunya (ACA), totalment a les conques internes i de manera compartida a les conques intercomunitàries, noves responsabilitats que cal assolir en termes temporals fixats. La DMA essencialment s'orienta al bon estat qualitatiu i quantitatiu dels cossos (masses) d'aigua del territori, de cara a conservar el seu paper ecològic o a adoptar mesures per frenar tendències evolutives negatives i a invertir-les fins a arribar a un raonable bon estat quantitatiu i qualitatiu (químic).

La DMA –i la seva Directiva de l'aigua subterrània (DAS) que se'n deriva, promulgada el 2006 com a complement a la mateixa directiva i amb idèntics principis– representa un seriós repte per a Catalunya, atès l'elevat grau local d'explotació intensiva i de degradació de la qualitat de les aigües subterrànies que hi ha en aquest territori, fet que demana un decidit esforç per part de l'ACA. Des d'un punt de vista social es podria dir que la DMA ha estat una benedicció per als ciutadans, en separar el que s'ha de fer dels avatars polítics i conjunturals, encara que a curt termini el cost sigui elevat.

Pel que fa a la reutilització de les aigües residuals tractades –fora d'usos incontrolats agrícoles– les primeres normes per a cultius es van preparar a Israel el 1965. La Unió Europea va promulgar el 1991 –transposada a llei espanyola– la Directiva sobre aigües residuals urbanes (91/271/CEE) i al territori de l'Estat hi ha el Reial decret 1620/2007, sobre la reutilització d'aigües residuals, en què es marquen límits de continguts segons els diferents usos.

Gràfic 1



Font: modificat de Candela *et al.*, 1998.

2

Característiques essencials de l'aigua subterrània en el cicle de l'aigua

El cicle de l'aigua a la naturalesa és el continu moviment d'aigua entre l'oceà i el continent –branca d'aportació– i des del continent cap a l'oceà –branca de retorn–, amb nombrosos bescanvis d'aigua entre elles, tant a escala local com general. La branca de retorn es divideix en dues grans subbranques de característiques prou diferents, però amb nombrosos bescanvis entre elles. La subbranca superficial és l'aigua que flueix pels rius cap al seu punt terminal, el mar –però també cap a una conca endorreica–, procés en què es guanya o se cedeix aigua a la part subterrània segons el cas, i se n'evapora en llacs terminals, aiguamolls closos i àrees d'expansió de l'aigua al peu de monts i planades.

La subbranca subterrània és de flux molt més lent i sobre una superfície territorial molt més gran, però

bona part d'aquest flux abans d'arribar al mar o a una conca endorreica sol ser transferit a les aigües superficials per qüestions de distàncies per recórrer. Una part d'aquesta aigua es pot evaporar –evapotranspirar– directament en àrees de nivell freàtic o en àrees extenses de plantes freatofítes.

Entre la superfície del terreny i el nivell freàtic –nivell de l'aigua sota el qual el terreny és saturat– s'estén el medi no saturat –on conviuen el material sòlid, l'aigua i l'aire. A la part superior –zona radical– hi ha les arrels actives de les plantes que evapotranspiren l'aigua de precipitació que s'hi acumula amb les pluges. L'excedent no evapotranspirat baixa i es converteix en recàrrega en trànsit cap al nivell freàtic, on finalment arriba (gràfic 1). Aquesta aigua del medi no saturat, o aigua vadosa, forma part també del cicle de retorn de l'aigua, però no es considera pròpiament aigua subterrània. El seu paper és essencial per a la vegetació, els cultius i la recàrrega, i té un paper clau en la qualitat de l'aigua subterrània.

Quadre 1

Diferències essencials succintes entre les aigües superficials i les aigües subterrànies			
Característica	Aigües superficials	Aigües subterrànies	Comentaris
Existència	A les lleres del riu i als llacs, aiguamolls, a les acumulacions nivals.	Als medis porosos permeables saturats.	
Extensió territorial	Petita, amb grans interfluvius.	Gran, ocupant bona part del territori, amb gruixos verticals de metres a centenars de metres, i fins i tot milers de metres.	
Velocitat de flux	Gran, de 0,1 m/s a 2 m/s.	Molt petita, des de menys d'1 mm/dia fins a pocs m/dia.	
Temps mitjà de renovació (τ)	Curt, de dies a algunes setmanes si s'elimina el cabal de base (descàrrega gairebé contínua dels aqüífers o de la fusió de peus).	Molt gran, rarament menys d'un any, fins a centenars d'anys, fins i tot molts milers d'anys.	$\tau = \frac{\text{volum circulant}}{\text{recàrrega o aportació}}$
Taxa de canvi	Ràpida, tret del cabal de base, amb fluctuacions diàries.	Lent i suau davant els esdeveniments atmosfèrics, fins al punt que de vegades pot ser imperceptible.	
Composició mineral	Bona en general, però amb possibilitat que hi hagi un nivell elevat de matèria en suspensió.	Més mineralitzades que les aigües superficials locals, hi manquen la transpiració al sòl i les reaccions al terreny.	
Contingut biològic patogen	Pot ser alt si hi ha focus pròxims. Massa petit. Temps de permanència	En general, exemptes pel llarg període de permanència en el medi no saturat i saturat, per sobre dels cent o dos-cents dies recomanables per a la desinfecció natural.	

Les grans característiques bàsiques diferencials que caracteritzen les aigües superficials i les subterrànies –malgrat ser part del cicle hídric de retorn i d'intercanvi entre elles– queden reflectides al quadre 1, de manera simplificada i succinta.

3

Les aigües subterrànies en la natura: paper hidrològic

Les aigües subterrànies tenen un importantíssim paper en la natura, en bona part lligat a la seva petita variabilitat temporal, àmplia distribució territorial i possible aflorament concentrat en llocs concrets. La humitat del sòl, encara que no és aigua subterrània,

és l'encarregada de mantenir les funcions biològiques de les plantes mentre no s'esgoti la seva reserva edàfica dins la franja radical. Quan la franja capil·lar s'apropa a la zona radical local, s'assegura un subministrament mantingut d'humitat que fa que la vegetació no arribi a l'estrès hídric en cap moment. Això explica l'existència de taques de vegetació, de vegades molt extenses, de bosc i petits boscos de freatòfits, de llargues franges de boscos de ribera al llarg del riu, allà on descarreguen normalment les aigües subterrànies, i d'aiguamolls. La producció vegetal, la riquesa biològica i la diversitat d'espècies d'aquests indrets és força elevada, de les més grans possibles, en especial en climes àrids i semiàrids.

La descàrrega d'aigua subterrània en rius manté els cabals de base entre episodis de pluja, i manté l'aigua

corrent durant tot l'any o bona part de l'any, excepte en àrees càlides a l'estiu, on l'evaporació del bosc de ribera pot superar la descàrrega, de manera que no queden excedents temporals que vagin a parar al riu. Quelcom semblant succeeix en la descàrrega en llacs i llacunes.

El flux de l'aigua subterrània transporta minerals dissolts cap als rius, que procedeixen de l'evapoconcentració de la deposició atmosfèrica i de reaccions aigüaterreny en el sòl –on la pressió parcial de CO₂ pot ser molt més alta que en l'atmosfera– i al llarg del recorregut subterrani. En la descàrrega es poden precipitar minerals, cosa que origina entapissats de la llera del riu i fins i tot la creació de barreres a la circulació de l'aigua. Si el riu acaba en una conca totalment endorreica (és a dir, sense sortida superficial ni subterrània) les sals aportades romanen al fons de la depressió (platja) i s'acumulen fins a donar lloc a salines d'interès paisatgístic i fins i tot mineral.

4

Les aigües subterrànies com a font d'aigua per a la demanda humana

Les aigües subterrànies s'han utilitzat des de l'antiguitat més llunyana per beure, per a serveis domèstics, per cultivar, per abeurar ramat i fins i tot per accionar molins fariners que utilitzaven directament o amb petites modificacions les surgències naturals (fonts, deus, brolladors). Es tracta d'un ús petit de les descàrregues d'aigua subterrània i que afecta poc els recursos superficials a què aboquen, excepte en casos en què es produeixen problemes de qualitat per vessaments o per l'excessiva acumulació de minerals. Aquest ús va ser molt important en climes àrids i semiàrids, en què les deus eren lluny i calia captar l'aigua amb seguretat, sense que s'evaporés i de manera que resultés poc susceptible a interrupcions en cas que es produïssin conflictes bèl·lics. Així, al segle v aC a l'antic Imperi persa es van dissenyar llargues construccions soterrades en túnel –conegudes amb el nom de *khanats* i amb altres designacions al llarg de

l'Orient Mitjà i el nord d'Àfrica. A la península Ibèrica i a les Illes Balears es coneixen amb el nom de *mines d'aigua* i també de *galeries d'aigua*.

La tecnologia de les mines d'aigua entrà a la península Ibèrica i les Balears possiblement de la mà dels fenicis, després van ser desenvolupades pels romans i més tard els àrabs s'encarregaren d'estendre-la. Les mines o galeries d'aigua són relativament abundants a Catalunya, algunes són antigues (segle I) i d'altres són més modernes, fins a mitjan segle XIX, com les de Tortosa, les del Baix Camp de Tarragona (en especial als voltants de Reus) i les de la mateixa Barcelona, on abastien les fonts públiques de la ciutat primitiva, com ara la font de Canaletes (Custodio i Llamas, 1976; 1983). A poc a poc, aquestes mines s'han anat ensorrant per falta de manteniment, pel fet que la gran ciutat ja disposa d'abastament públic d'aigua provinent de les valls del Llobregat i el Besòs. Però avui encara queden algunes mines operatives a Pedralbes (la font del Lleó) i Sant Just Desvern, o altres que van existir fins fa poc, com la font del Carbó, al peu del Parc Güell.

Aquest tipus d'aprofitament produeix quantitats petites o moderades d'aigua subterrània. La gran revolució de l'aprofitament de les aigües subterrànies començà a Barcelona a finals del segle XIX amb la perforació de pous surgents (“artesianes”) als voltants del Prat de Llobregat (Custodio, 2009). La introducció de la nova tecnologia de perforació menà extraccions importants d'aigua subterrània ja als anys trenta del segle passat, accelerada als anys quaranta, i que va culminar en les dècades de 1960 a 1970 a Barcelona, i uns deu anys més tard a altres indrets de Catalunya (la Muga, Baix Ter, al·luvials i delta de la Tordera, Maresme, Pla de Barcelona, Vallès, Baix Gaià i Camp de Tarragona).

La destinació d'aquestes aigües ha estat molt diversa i canviant al llarg del temps, des de l'abastament urbà, passant per l'abastament industrial –inicialment dominat pels grans consums de les indústries del “ram de l'aigua”, papereres i tèxtils, i cada vegada destinada a usos més eficaços i reduïts, o de contingut alimentari– fins a una notable demanda agrícola al Baix Camp de Tarragona i la vall del Francolí, marge dret de la vall

del Llobregat i del límit intern del delta del Llobregat, Maresme, Baix Tordera, etc. A altres indrets domina la demanda agrícola i ramadera, però la procedència més freqüent de l'aigua és superficial, encara que hi ha àrees en què l'extracció d'aigües subterrànies és un important complement estacional o ocasional a l'explotació que es fa mitjançant canals fluvials, com ara al Segrià.

5

Explotació de les aigües subterrànies: beneficis i costos ambientals associats

L'existència de descàrregues naturals d'aigua subterrània representa en la natura un flux de béns i serveis per a l'home en forma de vegetació, fauna piscícola, transport i eliminació de residus, paisatgisme i altres. Els canvis en les quantitats, la qualitat i el règim poden comportar modificacions importants respecte de l'estat natural, així doncs, una part dels beneficis que se n'obtenen s'haurien d'utilitzar per compensar els costos que hi estan associats, tots i no pas únicament els directes, i tant els actuals com els futurs. Part d'aquests costos són intangibles i per tal de poder-los considerar es fa necessari introduir conceptes ètics.

Però a molts llocs de Catalunya, en especial els llocs propers a la costa, l'extracció d'aigua subterrània ha esdevingut intensiva –fins i tot amb etapes de mineria de l'aigua dolça, quan a mitjà termini se n'extreu un cabal més gran del que es recarrega naturalment o artificialment. Tot això ha comportat i comporta la modificació profunda del funcionament dels aquífers i de les relacions amb les aigües superficials, fet que constitueix fer-ne un ús intensiu (Llamas i Custodio, 2003).

Cal ressaltar que les aigües superficials i les aigües subterrànies no són recursos distints i independents, tot i tenir característiques temporals i d'ubicació molt diferents. Representen un únic recurs procedent de la precipitació atmosfèrica. L'aigua subterrània no és un nou recurs posat a disposició,

però sí que representa una alternativa per poder utilitzar més eficientment i amb menys cost aquest recurs total, que cal gestionar conjuntament. Aquest és l'objectiu de la gestió integrada dels recursos d'aigua que, a més, ha d'incloure altres recursos d'aigua, com la dessalinització d'aigües marines i salines, la dessalinització d'aigües amb un excés de salobre, la recuperació d'aigües usades mitjançant el tractament adient i la conversió mitjançant el tractament adequat d'aigües contaminades en aigües útils per a certs usos.

L'explotació intensiva dels aquífers a Catalunya ha produït, entre altres efectes, descensos mantinguts de nivells freàtics i piezomètrics, fet que ha comportat el següent:

- Minva o desaparició del cabal de base de rius, de llacs, de surgències subterrànies naturals i de descàrregues en aiguamolls i en zones prop del litoral, incloses les que es fan mar endins.
- Reducció de la superfície d'aiguamolls i àrees de freatòfits, fins a la seva desaparició.
- Encariment de les extraccions pel cost energètic més elevat que comporten, i de vegades pel fet d'haver de fer més profunds els pous, d'adquirir noves bombes i d'augmentar la potència de la línia d'abastament d'energia i dels transformadors.
- Pèrdua de qualitat, tal com s'explica a l'apartat següent.

A Catalunya no es coneixen seriosos problemes de subsidència i col·lapse del terreny, encara que tot apunta a una lenta i poc percebuda subsidència al delta del Llobregat, d'aproximadament de 0,5 a 1 metre, que no ha afectat visiblement el territori continental pel fet que es tracta d'un terreny agrícola i de pendents suaus, amb canals que transporten molts sediments i que cal netejar periòdicament. Però s'hi pot apreciar una important pèrdua d'espai costaner, no estudiada ni valorada. La major taxa de subsidència es va produir probablement en els anys seixanta, quan el nombre d'infraestructures que hi havia era mínim, però si el fenomen continua caldrà tenir present la gran presència actual d'infraestructures, i el

possible impacte en la drenabilitat de l'aeroport i el risc d'inundació del ja extens territori urbà del Prat de Llobregat.

Tot això comporta costos ambientals, i també costos sobre els habitants, que no han estat compensats. Aquests costos són molt difícils d'avaluar i sovint es paguen en forma d'intervencions freqüents en el territori per fer-hi reparacions o modificacions.

6

Qualitat i contaminació de les aigües subterrànies

Les aigües subterrànies són, en general, de bona a molt bona qualitat, estan exemptes de gèrmens patògens si les captacions estan ben fetes, operades i mantingudes, tot i que de vegades poden tenir una certa duresa, un xic de salinitat i poden dur ferro i manganès dissolts, de vegades poden dur amoni d'origen natural i en ocasions també poden presentar excessos d'arsènic i fluor. A Catalunya hi ha alguns casos, no greus, en què l'aparició legal de rebaixar el límit de potabilitat de 50 a 10 mg/l d'arsènic pot haver comportat haver de prendre precaucions, fer algunes inversions o abandonar captacions.

Les aigües subterrànies estan relativament ben protegides contra contaminants procedents de l'exterior, a causa de les barreres reactives que representen el sòl i el llarg temps de permanència en el terreny. Però aquestes barreres es poden arribar a superar –i a molts indrets de Catalunya s'han superat– per càrrega excessiva de contaminants, perquè aquests contaminants són poc o gens degradables, per remoció de les barreres o per canvis en el sistema de flux, de manera que s'escurcen dràsticament els temps de permanència en el terreny. Es tracta d'efectes locals molt difícils de controlar, en especial en àrees urbanes i periurbanes.

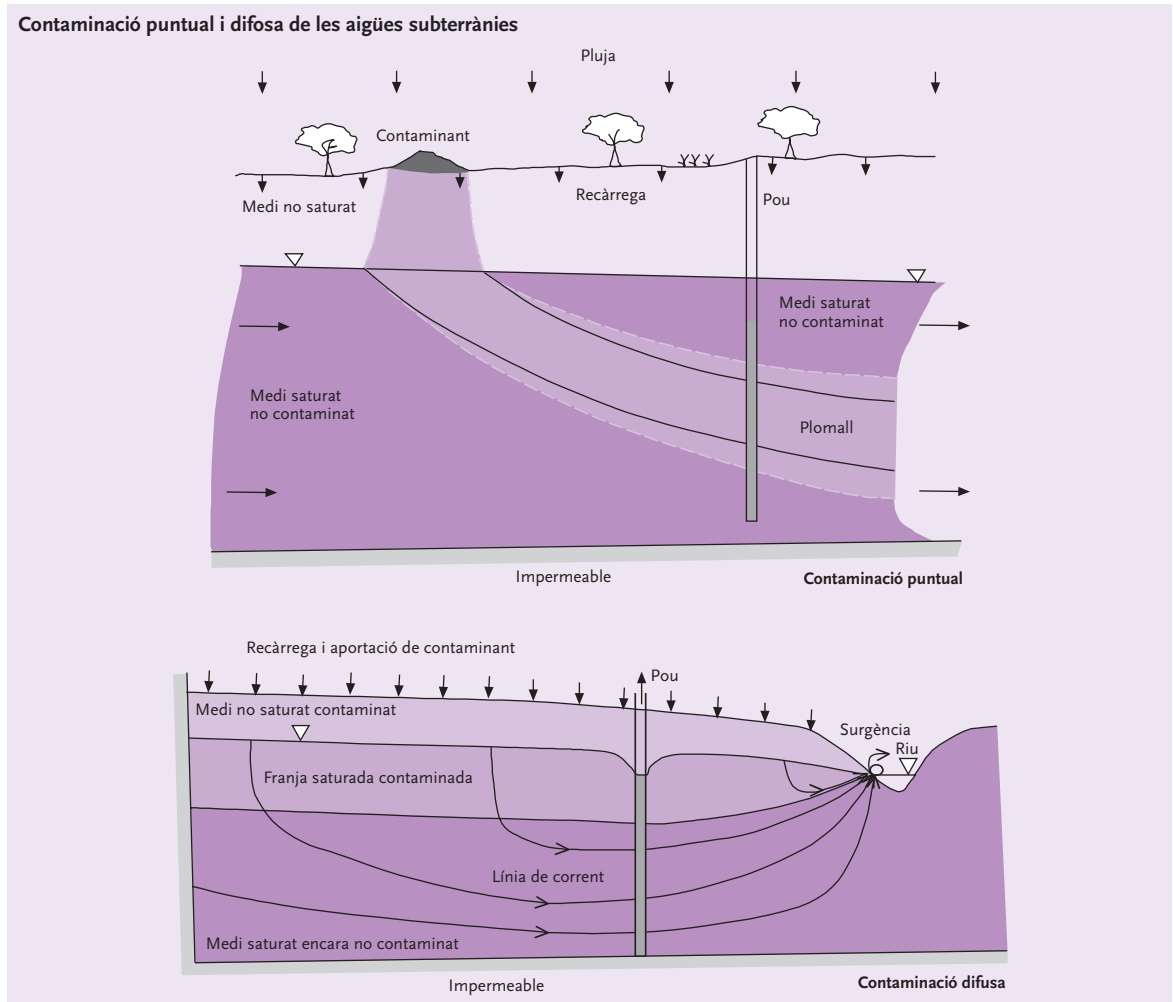
Bona part de les causes de contaminació de les aigües subterrànies no estan lligades necessàriament a la seva explotació, sinó que són el resultat d'activitats territorials molt diverses, com ara la reforestació o

desforestació, activitats agràries –o el seu abandonament–, l'ús excessiu de fertilitzants, d'adobs naturals i fitosanitaris, les activitats agropecuàries, les fuites d'hidrocarburs i altres procedents dels vehicles als voltants de les grans línies viàries, els abocaments domèstics i industrials, les concentracions industrials amb fuites diverses –inclosos els hidrocarburs i dissolvents orgànics– i un llarg seguit d'accions que hi poden estar associades. El gràfic 2 mostra esquemàticament la contaminació puntual (concentrada), amb la formació d'un plomall tridimensional i la creixent i insidiosa contaminació difosa.

La contaminació de les aigües subterrànies –que a la curta o la llarga acaba arribant a la xarxa fluvial– encara que en general no és crítica a Catalunya, sí que representa un problema seriós a mitjà i a llarg termini, molt costós de redreçar i que requereix accions al llarg de moltes dècades, sense saber si arribaran a ser prou efectives. En realitat, al territori s'assoleixen, o poc falta per assolir, alguns “rècords” mundials de contaminació, com la produïda per vessaments en excavacions de deixalles industrials de dicromat al delta del Llobregat, i l'encara més insidiosa contaminació per nitrats, majoritàriament d'origen agrícola i ramader, que representa un gran repte social i per a l'acompliment de la DMA. El límit sanitari de 50 mg/l NO_3 s'assoleix a molts llocs, ja coneguts fa temps (Custodio, 1982), i augmenten. Hi ha llocs al Maresme on se superen els 500 mg/l (Custodio, 1983) i fins i tot poden arribar a 1.000 mg/l, concentracions que també són tòxiques per a les plantes que es reguen amb aquestes aigües. L'excés d'abonament n'és la causa, però també la inadequada eliminació de purins a les granges animals intensives, tant a les conques internes com a les conques intercomunitàries de Catalunya. Al mapa 1 es mostren les principals àrees de Catalunya on són freqüents els excessos de nitrats.

Es coneixen o s'han conegut episodis importants de contaminació d'hidrocarburs a la desembocadura del riu Francolí, a la vall baixa del Llobregat com a conseqüència d'un atemptat que va trencar un oleoducte, i als voltants de l'Estació de França a Barcelona, davant l'Hospital de Santa Maria del Mar, per fuites

Gràfic 2



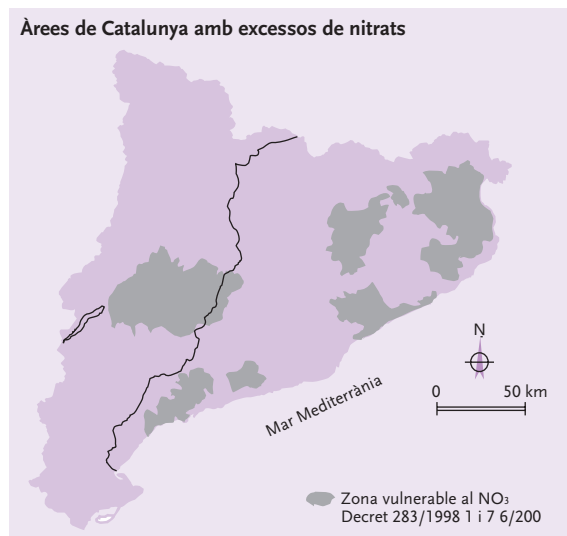
El gràfic superior mostra la formació d'un plomall per contaminació puntual (concentrada), que descendeix verticalment al medi no saturat i després segueix un desplaçament lateral tridimensional al medi saturat. El gràfic inferior mostra la formació d'una capa extensa descendent d'abast territorial per contaminació difusa (agricultura extensiva o deposició atmosfèrica), en un moment en què encara solament afecta un cert gruix de l'aqüífer freàtic, s'atenua en el pou i la surgència fluvial en barrejar-se amb altres parts de l'aqüífer, però que és en creixement.

durant la manipulació de combustible per a locomotores i que van provocar un accident durant la construcció de la línia del metro que travessa aquell indret.

Al delta del Llobregat i a Alcober (vall del Francolí, Tarragona) hi ha contaminacions persistents de dissolvents orgànics clorats i són recurrents també a la vall baixa del Llobregat com a conseqüència d'antics

rebliments amb materials "inerts" de profundes excavacions d'àrids que s'hi van produir. En l'excavació del canal de rem olímpic de Castelldefels, el 1991, es van travessar rebliments amb escombraries domèstiques de Barcelona que es van fer en la dècada dels anys setanta a moltes sorreres. A l'àrea de Reus i Vila-seca, la contínua infiltració d'aigua contaminada de les rieres locals, amb una forta càrrega orgànica, va crear un

Mapa 1



Principals àrees de Catalunya on es localitzen part de les captacions d'aigua subterrània amb continguts elevats de nitrats superiors a 50 mg/l NO_3 . Modificat de la informació de l'ACA. L'any 2007 el 62% dels més de 1.100 punts considerats superaven els 25 mg/l de NO_3 , el 50% els 37,5 mg/l i el 40% els 50 mg/l, amb un increment entre l'any 2003 i el 2007 en més del 50% dels llocs i amb disminucions en el 35% dels pous.

medi reductor on l'aigua subterrània soma va adquirir elevades concentracions de ferro reduït i d'amoni, i mal sabor i olors.

7

Problema de les aigües subterrànies a Catalunya: aquífers intensivament explotats i contaminants

Catalunya és geològicament i tectònicament complexa. Els materials van des del Paleozoic fins a l'actualitat. Segons l'edat estan profundament afectats per les successives orogènies, amb orientacions tectòniques unes vegades E-O i altres vegades paral·leles a la costa. Les diferents serralades estan formades amb materials en general poc permeables en el nucli, però poden incloure materials carbonatats ben fracturats i carstificats, més desenvolupats prop de la costa i cap a les àrees del sud, però també als Prepi-

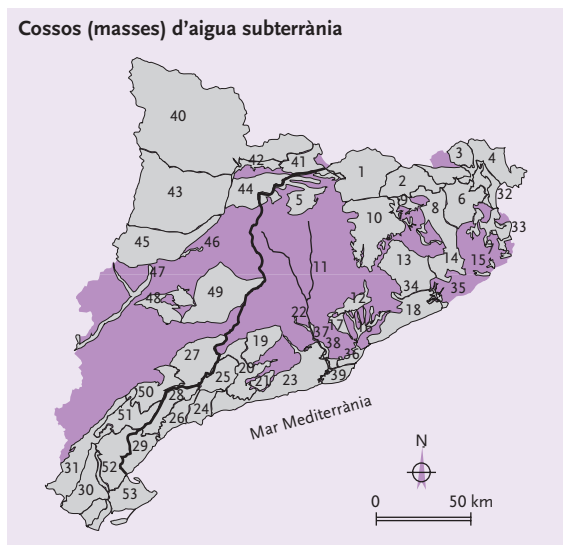
rineus i les serres d'Àger. Entre les serralades s'hi troben depressions tectòniques, grans conques sedimentàries reblertes de materials que poden ser dominantment argilosos, com passa al Vallès-Penedès o la gran conca central de l'Ebre, que penetra fins a l'est de Vic. A les depressions de l'Empordà, del Camp de Tarragona i del Baix Ebre - Montsià es poden trobar materials més permeables, o fins i tot molt permeables al peu de les serralades (Custodio, 1995). Vegeu el mapa geològic de Catalunya (IGC, 2008), i per al delta del Llobregat, el mapa hidrogeològic (IGC, 2006).

El resultat de tot això és que no hi ha grans aquífers continus, sinó més aviat relativament petites unitats, encara que de prou interès general i local. La mida dels aquífers creix cap al sud. En conjunt, bona part dels aquífers consisteixen en formacions carbonatades, de vegades amb gruixos d'uns quants centenars de metres, i en sediments recents de depressions, amb sorres o amb peu de mont i ventalls al·luvials, com al Camp de Tarragona i Baix Ebre, de vegades ben potents. També hi ha formacions aquíferes petites holocenes al voltant de les lleres dels rius, bé com a cubetes, bé com a rebliment de valls baixes, bé com a deltes millor o pitjor desenvolupats. Això és en bona part el resultat de diversos mil·lennis en què el nivell del mar va romandre sota els 100 m respecte al nivell actual, i això ha succeït més d'una vegada durant les glaciacions quaternàries, amb una ràpida recuperació del nivell del mar al final de cada època glacial. Els dos elements més significatius són el delta del Llobregat i el més extens delta de l'Ebre, en especial pel que pertany a la part holocena.

L'ACA, en els treballs per anar complint els requisits de la DMA, ha identificat tres cossos (masses) d'aigua subterrània –parts d'aqüífers o agrupacions d'aqüífers– com a referència per a actuacions posteriors (vegeu el mapa 2), encara que fora d'aquestes àrees hi ha aquífers menors que poden tenir força interès local.

La gran demanda d'aigua dolça per a destinació urbana, industrial i agrícola –que pot no coincidir

Mapa 2



Cossos (masses) d'aigua subterrània definits per l'ACA el 2004, amb els criteris de la DMA. Es tracta de 53 cossos, 39 dels quals són a les conques internes i 14 a les conques intercomunitàries. La línia gruixuda és el límit entre ambdues conques.

geogràficament—, com ja s'ha explicat abans, ha fet que en molts indrets l'explotació de l'aigua subterrània, a més de ser caòtica i no planejada, sigui força intensiva i que de vegades hagi arribat a consumir reserves per descens de nivells o per substitució de l'aigua dolça per aigües salines, com succeeix a la costa amb la intrusió marina en els aqüífers. Els problemes d'intrusió marina —no totes les salinitzacions ho són, encara que dominen les d'aquest tipus— són greus localment i es produeixen en diverses àrees des de la frontera francesa fins a la província de Castelló. El delta del Llobregat és un cas molt ben estudiat i conegut arreu del món (Custodio, 1976; 1981; 2007; Niñerola *et al.*, 2009).

A tot això cal afegir el problema de la contaminació natural i antròpica abans comentada, en bona part deguda a activitats territorials que no tenen res a veure amb l'explotació de les aigües subterrànies. És especialment insidiosa la presència de continguts elevats de nitrats per sobre del límit sanitari, i la seva gran dispersió territorial, en funció de les pràctiques agrí-

coles i ramaderes, o deficiències de sanejament urbà, com ja s'ha comentat abans. S'han definit tot un seguit d'àrees de protecció especial a causa de l'excés de nitrats, menys de les requerides a causa de pressions politico-socials, quan possiblement caldria declarar zona sensible als nitrats bona part del territori català. Malgrat tot, una mesura agosarada com aquesta podria deixar grans àrees del territori sense poder utilitzar com a font d'abastament públic humà, o obligar a fer mesclades amb aigües baixes en nitrats o tractaments cars i poc experimentats per disminuir el contingut de nitrat.

Atès que bona part del nitrat és en el sòl i en trànsit cap a l'aqüífer pel medi no saturat, les quantitats emmagatzemades són prou grans —i poc quantificades— perquè el contingut en nitrat pugui continuar augmentant encara que s'arribi a suprimir-ne la font que l'origina. És molt difícil assolir l'eliminació o notable disminució de les entrades de nitrats en un temps curt, ja que això comporta haver de prendre decisions socials fortes i que potser només es poden abordar en part.

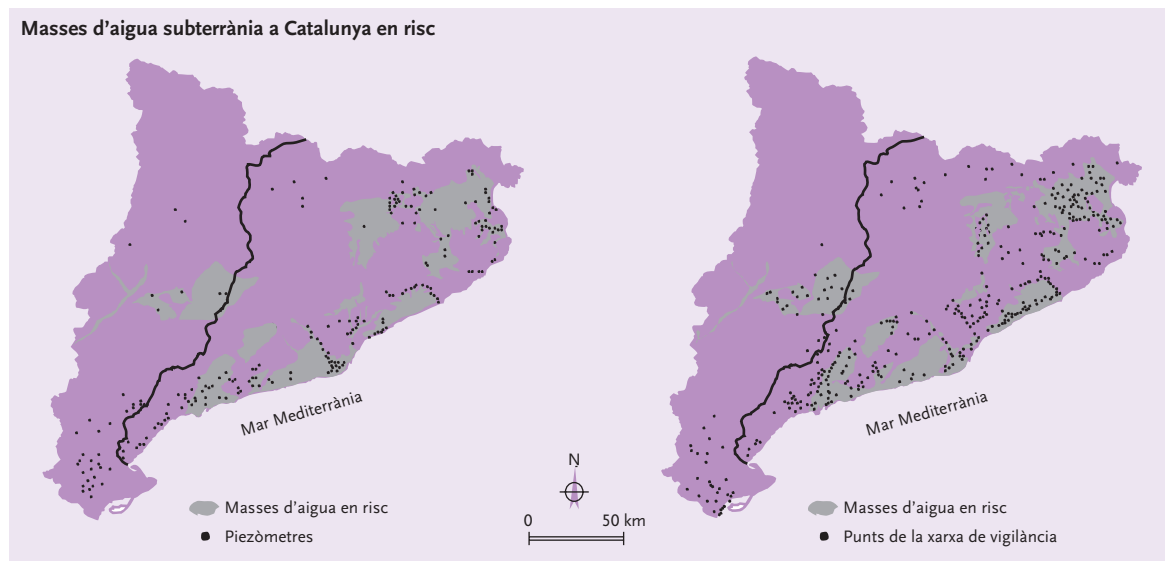
La DMA exigeix als estats membres assolir el bon estat quantitatiu i qualitatiu (químic) dels aqüífers el 2015 o argumentar i demanar un ajornament quan hi hagi risc de no assolir-lo, com a màxim fins al 2027. El mapa 3 mostra els casos d'aigua subterrània de Catalunya en risc de no assolir el termini de 2015.

8

Gestió, manteniment i observació dels aqüífers: experiència a Catalunya

L'apropiació de les aigües subterrànies no es fa a cost zero, encara que moltes vegades es consideri que és així. La detracció d'aigua subterrània de la natura i la disminució del flux de béns i serveis que en són la conseqüència requereixen una compensació que, si no la fa qui extrau l'aigua, l'haurà de fer un algú altre d'aquesta generació o de generacions futures, de la mateixa manera que ara estem pagant el que no van compensar els qui ens van precedir.

Mapa 3



Cossos (masses) d'aigua subterrània que l'ACA considera que estan en risc de no assolir el 2015 els requisits qualitius i quantitius de la DMA. El 2004, dels 53 cossos d'aigua subterrània, 29 (55%) estaven en risc, 11 dels quals (21%) ho estaven per estat quantitatiu i 27 (51%) ho estaven per estat químic.

Per aconseguir l'explotació de les aigües subterrànies equitativa amb el medi ambient i ordenar-la perquè l'ús d'aquestes aigües sigui sustentable, cal gestionar-la, és a dir, cal ordenar les actuacions cap a unes determinades finalitats. Aquesta gestió comporta un seguit d'intervencions públiques i dels mateixos usuaris per preservar el que és un bé comú i respectar al mateix temps drets legalment adquirits, però que s'han de supeditar a l'interès general, amb les compensacions adequades en els casos en què es produeixin perjudicis singulars.

Per assolir això cal observar, mesurar i controlar les aigües subterrànies mitjançant xarxes d'observació de la quantitat i la qualitat, de les quals es dedueixen línies d'actuació a través d'eines d'anàlisi apropiades, que poden ser senzilles o bé relativament complexes, com ara els models numèrics de flux i transport de massa. Tot això és, a més, una exigència de la DMA, que fixa uns mínims que cal assolir i obliga a fer públics els resultats. L'operació d'aquestes xarxes pot ser pública, privada o mixta, encara que els resultats han de ser a l'abast de tots els interessats.

El disseny de xarxes no és un problema elemental, ja que comporta despeses constructives i d'operació que cal minimitzar, sense perdre capacitat d'informar sobre els trets essencials i els particulars de situacions especials. D'aquestes xarxes es dedueixen les característiques essencials de funcionament dels aqüífers. No es tracta de reunir un seguit de pous abandonats o que els propietaris autoritzin que s'incorporin a les xarxes, sinó que un punt d'observació de nivells ha de ser un accés puntual a una certa fondària, ben aïllat d'altres zones d'aigua subterrània a la vertical, amb tub sense esquerdes i juntes ben segellades, construït de manera que es tingui un bon contacte amb la part de l'aqüífer objectiu, i revestit d'un material perdurable.

Segons les característiques dels aqüífers i del caràcter tridimensional que puguin tenir pot caldre més d'un tub d'observació (piezòmetre) en un mateix lloc, de vegades en són necessaris fins a quatre o cinc. Cal comprovar que el funcionament sigui correcte al llarg del temps; si fa falta cal fer manteniments periòdics i, fins i tot, cal obtenir un perfil vertical de

Quadre 2

Xarxa de control de les aigües subterrànies 2007 (ACA, 2008)				
Xarxa de control	Analítica	Punts de control	Freqüència	Tipologia
Vigilància	Anions i cations, compostos del nitrogen, metalls i paràmetres de camp (conductivitat elèctrica, Eh, pH, temperatura i oxigen dissolt).	664	Anual	
Control operatiu de salinitat	Conductivitat elèctrica, clorurs, pH i paràmetres de camp (conductivitat elèctrica, Eh, pH, temperatura i oxigen dissolt).	160	Anual	
Control operatiu de zones vulnerables	Nitrats, nitrits, amoni i paràmetres de camp (conductivitat elèctrica, Eh, pH, temperatura i oxigen dissolt).	760	Semestral	Qualitat
Control operatiu de plaguicides	Plaguicides amb clor, organofosforats, triazines, conductivitat elèctrica, Eh, pH, temperatura i oxigen dissolt.	106	Semestral	
Control operatiu d'episodis de contaminació	En funció de l'episodi de contaminació que es vol controlar.	150	Anual	
Piezometria	Nivell piezomètric.	396	Mensual	Quantitat

temperatura cada dos o tres anys per conèixer possibles problemes de funcionament i com s'han de resoldre.

La xarxa de qualitat és més complexa –encara que només es tracti de components químics majoritàriament–, ja que l'aigua dins els tubs –que han de ser de material inert– s'altera progressivament per interacció amb el tub, possibles cimentacions i difusió de l'aire des de l'exterior. Per això cal renovar l'aigua a l'interior del tub per bombament, a petit cabal, per tal de renovar l'aigua del tram que s'ha de mostrejar –s'ha de comprovar que està lliure de sediments– i assegurar que s'ha assolit la renovació, o almenys s'ha de prendre la mostra del tram renovat amb un mostrejador submergible en cas que es calculi que l'operació serà llarga. La durada de l'operació pot comportar un cost i un temps d'equip que pot no ser assolible en mostrejos ordinaris, per això mateix és essencial que hi hagi un bon disseny (Condesso de Melo *et al.*, 2007).

Alternativament es pot mostrejar l'aigua de pous en funcionament amb reixetes allà on es vol prendre la mostra. A la pràctica, molts pous en operació són

multireixetes, amb la qual cosa el que s'obté és una mescla d'aigües de diferents fondàries, que de vegades són difícils d'interpretar i que poden comportar certes reaccions químiques en l'aigua mateixa. També el bombament freqüent o continu crea una pertorbació local del flux d'aigua subterrània, en captar aigües de diverses procedències. Això explica que a la part de l'aquífer profund del delta del Llobregat en què hi ha hagut la intrusió d'aigua marina cap dels pous en bombament assoleixi la salinitat marina, si bé un tub de mostreig estàtic possiblement ho faria.

Queda clar, doncs, que tot això és costós i poques vegades s'ha fet de manera mínimament correcta, amb la qual cosa les dades obtingudes s'han d'interpretar amb certa cura. Part de la xarxa piezomètrica de Doñana, a Huelva i Sevilla, es va dissenyar de la manera indicada (Custodio i Palancar, 1995).

A Catalunya hi ha una xarxa d'uns 400 punts de mesura de nivell i més de mil de mostreig (ACA, 2008). Vegeu el quadre 2. La primera xarxa es va construir entre 1965 i 1972 a la vall baixa i al delta del Llobregat en bona part encara subsisteix tot i que hi ha alguns punts al delta del Besòs ja desapareguts. Es va dissenyar

hidrogeològicament, i els piezòmetres són senzilles entubacions d'acer o PVC dels sondeigs de reconeixement, amb reixetes fetes amb talls de serra. Això requeria extreure periòdicament la sorra fina que hi penetrava, en especial als tubs sotmesos a grans i freqüents oscil·lacions piezomètriques, fins que molts han quedat definitivament colgats. Malgrat que els nivells són una aproximació raonable a les fluctuacions piezomètriques, no es poden fer servir per mostrejar l'aqüífer. En els darrers temps, la xarxa s'està renovant a poc a poc com a conseqüència d'altres estudis.

Així mateix, es van instal·lar altres xarxes com a conseqüència dels treballs fets pel Servei Geològic d'Obres Públiques en diferents indrets de Girona, la Tordera, el sistema aquífer de l'Anoia, el Baix Gaià i el Camp de Tarragona, a les quals s'han ajuntat les que es van crear per a la vigilància de l'abastament de l'emplaçament nuclear de Vandellòs. A poc a poc s'han anat completant, però gran part d'aquestes xarxes són a la zona costanera de les conques internes de Catalunya, i estan molt menys desenvolupades a les conques intercomunitàries.

Operar tots aquests punts arreu del territori, de vegades ben dispersos, té un cost elevat, més encara si s'han de mantenir i refer els que deixen de funcionar, però és necessari fer-ho si es volen mantenir els beneficis de les aigües subterrànies. El cost és podria estimar entre el 0,5% i l'1% d'aquest benefici, potser fins al 2% si s'inclou el manteniment i els costos de les anàlisis químiques ordinàries que cal fer segons la normativa.

Els aquífers són, a més d'elements clau de l'aigua en la natura, infraestructures naturals d'obtenció d'aigua dolça –i també d'aigua salobre i salina per a la dessalinització– i d'evacuació de sals i contaminants territorials cap a les xarxes fluvials i el mar. Aquestes infraestructures naturals no són paleses per als gestors territorials i de recursos hídrics, i encara menys per al públic en general, que, en tot cas, posen l'atenció en el que està construït i es veu. Aquesta és una de les raons per les quals se les ignora o subvalora, i no es té cura per conservar-ne la qualitat i les funcions. Quan s'argumenta que cal conservar aquests recursos, ges-

tionar-los i recuperar-los, poques vegades s'aporten dades –encara que siguin grolleres– del valor econòmic que tenen. Una forma de valorar-los és calcular el cost de construir o posar a disposició del públic objectiu una nova infraestructura hídrica –la més barata possible– que permeti assolir les mateixes funcions i proporcionar d'aigua amb un cost semblant. Aquestes funcions no són sols les de proporcionar un cert cabal anual, sinó que també es refereixen a donar qualitat i proveir de capacitat de regulació, adequació a puntes de demanda, rapidesa d'entrada en funcionament, possibilitat de resiliència a sequeres, acceptació pública... Basant-nos en un cost d'establiment de 150 M€ (projecte) d'una planta dessalinitzadora d'aigua de mar al delta del Llobregat, que produeix en continu 60 hm³/anuals d'aigua, si considerem una producció anual de 60 m³ als aquífers de la vall baixa i del delta del Llobregat, amb millor qualitat operacional, el seu cost mínim és de 150 M€, i segurament cal doblar aquesta xifra si considerem les capitalitzacions dels costos d'explotació, ja que l'aigua dessalinitzada és molt més cara per a l'usuari (de 0,7 a 1,0 €/m³ contra un cost total, inclòs l'ambiental, de les aigües subterrànies de menys de 0,1 a 0,2 €/m³), en les actuals situacions de profunditat dels nivells d'aigua.

Deixant de banda altres valors ambientals, el sistema aquífer del Baix Llobregat es pot valorar econòmicament entre 200 i 300 M€. Destinar el 5% o el 10% (de 10 a 30 M€/any) a la vigilància, conservació i gestió d'aquest sistema s'hauria de considerar raonable, socialment aquesta xifra seria admesa en el cas que es tractés d'infraestructures hídriques construïdes.

9

Integració dels aquífers en el conjunt dels recursos hídrics: experiències i possibilitats a Catalunya

Com ja s'ha dit, les aigües subterrànies són part del cicle hidrològic, encara que tenen grans trets diferencials amb les aigües superficials. Això fa que es

puguin derivar avantatges de considerar-les conjuntament, i també amb els altres possibles recursos d'aigua. Quant a la quantitat d'aigua, això vol dir l'ús de les grans reserves d'aigua associades a l'aigua subterrània com a volant regulador que permeti adaptar les fluctuacions del conjunt, o els requisits de producció, a la temporalitat de la demanda i les variacions estacionals que comporta l'ambient, d'acord amb els requisits de la DMA, que s'han de respectar. Aquestes idees ja es van avançar en la dècada de 1960 (Llamas, 1969; Custodio, 1977; 1983).

Aquesta situació s'ha tractat habitualment mitjançant embassaments d'aigua superficial, però cada vegada és més difícil fer-ho atès el progressiu esgotament dels llocs possibles on es poden ubicar, llocs que, a més, cada cop esdevenen més costosos –atès que hi ha més demanda sobre el territori–, fet al qual s'afegeixen les dificultats socials i ambientals que comporten –en especial quan la ubicació d'un embassament comporta haver de desplaçar poblacions i vies de comunicació– i, també, les pèrdues notables d'aigua per evaporació.

La recàrrega induïda, afavorida o artificial de les aigües superficials als aquífers, encara que pot ser una tasca ni fàcil ni barata, presenta avantatges respecte del que s'ha dit abans; ara bé, hi ha d'haver la condició que hi hagi espai subterrani no saturat i que el temps de retenció a l'aquífer sigui prou gran respecte de les extraccions temporals que es preveu fer, per tal que les possibles fuites de l'emmagatzematge siguin raonablement petites i s'aprofitin.

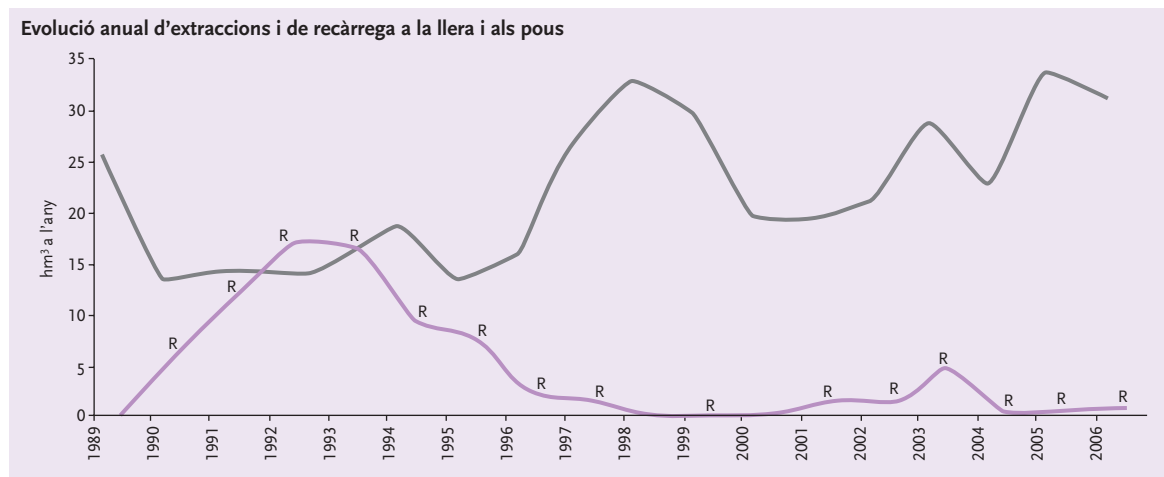
Hi ha una certa experiència a escala mundial relativament positiva, en especial a Califòrnia, Arizona, Alemanya... (Custodio, 1986) i també a Espanya, concretament a l'entorn de Barcelona (Custodio, 1973; 1979), experiències majoritàriament dissenyades i operades per la Societat General d'Aigües de Barcelona al Baix Llobregat, encara que l'aigua recarregada passa a integrar-se en el conjunt dels recursos d'aigua subterrània accessible als altres usuaris. D'una banda, es tracta d'afavorir la infiltració de l'aigua que circula pel riu a la seva llera reduint els sediments poc permeables sobre la llera mitjançant una acurada escari-

ficació amb maquinària que opera dins el riu; es practica des de l'any 1948. D'altra banda, després que es construís l'estació potabilitzadora d'aigües fluvials a Sant Joan Despí - Cornellà, i encara més quan al sistema d'abastament s'hi va sumar la portada d'aigües tractades del Ter el 1973, de tant en tant es produeixen excessos d'aigua depurada que normalment haurien retornat al riu. Aquesta aigua s'aprofita i és injectada a l'aquífer, localment potent i molt permeable, i amb nivells deprimits a causa de l'explotació intensiva del sistema d'aigües subterrànies. Es fa mitjançant pous duals –que poden injectar i extreure– o per recàrrega. D'aquests pous se'n fa un manteniment acurat per evitar el reblliment per materials fins. Hi ha anys en què no hi ha excessos per injectar, mentre que altres anys han estat disponibles fins a 20 hm³. El gràfic 3 mostra l'evolució anual d'extraccions i de recàrrega a la llera i als pous.

La combinació d'aigües superficials i aigües subterrànies, amb l'ajut de la recàrrega afavorida i artificial, integrada amb altres recursos –importació des del Ter– és el que ha permès superar diverses sequeres prolongades.

Aquesta pràctica, amb les variants que calgui, es podria estendre a altres aquífers de Catalunya en què és possible de fer aquesta recàrrega d'aigua, i que tenen una mida prou gran per emmagatzemar volums significatius d'aigua al medi no saturat, d'origen natural o a causa de l'explotació. Preliminarment es podrien considerar els aquífers del Baix Penedès, el Baix Gaià, el Camp de Tarragona i les planes de peu de mont dels ports de Beseit, al Baix Ebre. Les aigües per recarregar correspondrien a les procedents de l'escolament de tempestes –amb elements estructurals de retenció temporal– o dels excedents del “minitransvasament” Ebre-Tarragona, i hi hauria d'haver un programa d'extraccions que assegurés que hi haurà prou espai no saturat. La finalitat seria utilitzar aquesta aigua en llocs urbans o agrícoles d'alta demanda en èpoques de sequera. Això suposa disposar d'una infraestructura de transport i d'interconnexió de xarxes adient, a més d'un model numèric d'operació.

Gràfic 3



Extraccions anuals dels aquífers de la vall baixa i del delta del Llobregat i quantitats recarregades per escarificació de la llera del riu i injecció en pous. Dades d'AGBAR.

10

Recuperació d'aqüífers: aspectes bàsics i econòmics

Recuperar un aquífer vol dir retornar-lo a una situació propera a la natural, en quantitat o qualitat. Si l'aquífer té unes reserves consumides en una part important, la recuperació comportarà restablir la recàrrega i, si cal, incrementar-la mitjançant accions en superfície i recàrrega artificial. És el que s'ha descrit a la secció anterior per al Baix Llobregat. En la mateixa línia, hi ha la construcció de basses d'infiltració d'aigua del riu, laterals a la llera, que inicialment s'havien previst per compensar la superfície de recàrrega eliminada per ocupació territorial de línies viàries i de ferrocarril. Ara s'amplien els objectius cap a una recàrrega artificial més tecnificada. No se'n coneixen altres accions a Catalunya, fora d'actuacions a escala molt local. Si la superfície d'infiltració disponible per a una càrrega hídrica determinada és menor, per exemple de 0,2 a 1,2 m/dia, millor ha de ser l'aigua aportada, en especial pel que fa a terbolesa, de manera que en obres intensives l'aigua de recàrrega pot requerir pretractament. S'ha de garantir un temps

de permanència de l'aigua en el terreny per tal que quedi depurada i se n'eliminin gèrmens patògens i virus, en general més de 50 dies, tot i que és desitjable que siguin més de 200 dies, la qual cosa és possible que no es pugui assolir de cap manera en molts indrets de Catalunya, per l'escassetat d'espai disponible i la proximitat de les captacions. En aquests casos, l'aigua recuperada, si es destina a l'abastament humà o a usos alimentaris, ha de ser tractada complementàriament, amb la qual cosa augmenta notablement el cost de l'operació.

Un objectiu important en relació amb això és afinar i cloure el tractament d'aigües usades prou tractades mitjançant el pas pel terreny i la seva retenció. Es tracta d'aconseguir la depuració addicional i la desconexió entre l'aigua usada tractada i la captació per a abastament. L'aigua que s'ha d'introduir ha de ser almenys de salinitat i qualitat similars a la de l'aquífer, i prou tractada per no contenir substàncies nocives ni entarquinar les obres de recàrrega artificial, en especial si es fa mitjançant pous. Com s'ha esmentat abans, per garantir una desinfecció suficient en el terreny normalment es demanen més de 50 dies de permanència en cas d'aqüífers ubicats en zones formades per materials fins, i fins a més de 200 dies en cas de ma-

terials grollers. Quan no es poden assolir aquestes detencions, cal fer un tractament curós de l'aigua captada si es per a abastament humà o usos alimentaris. Prop de Montcada, davant Santa Coloma de Gramenet, al Besòs, el 1954 es va dissenyar un pou especial (després duplicat) per recuperar cabals de bona qualitat del rec Comtal, però amb terbolesa i materials en suspensió, amb neteja diària del pou mitjançant un dispositiu especial i una operació acurada. L'aigua es recuperava a 60 m de distància, amb una permanència força curta en el terreny, per la qual cosa requeria tractament final. Els dos pous van funcionar fins a la dècada de 1980, quan es van aturar per manca de cabals disponibles al canal.

És freqüent que les autoritats sanitàries demanin que es desinfecti l'aigua abans de la recàrrega, cosa que no és estrictament necessària i que pot comportar inconvenients. Si la desinfecció es fa amb clor –o compostos que en porten– hi ha el perill de generar compostos organoclorats nocius per a la salut i d'organobromats si les aigües contenen bromurs, que en condicions normals són naturalment presents si la salinitat és una mica elevada. Per evitar-ho caldria desinfectar amb peròxid d'hidrogen, que no genera aquests problemes, però és car.

Algunes experiències temporals molt primitives es varen fer en la dècada de 1980 aigües avall de Sant Pere de Ribes (Custodio i Galofré, 1977), per evitar que aigües prou contaminades de la riera de Vilafranca arribessin a les platges de Sitges.

Està previst utilitzar aigua prou depurada de les estacions depuradores d'aigües residuals del Baix Llobregat per alimentar les basses de recàrrega abans esmentades. Segons l'ACA es preveu invertir a les basses de Santa Coloma de Cervelló uns 9,5 M€ per a la construcció i d'altres 0,5 M€ per a estudis i projectes.

Regenerar un aquífer també vol dir aconseguir que l'aigua que conté, salina o contaminada, torni a ser de bona qualitat. La reducció o eliminació de la salinització d'aquífers costaners es va assajar en la dècada de 1970 prop de la costa del Besòs, en injectar, en un pou profund i durant tres mesos, aigua usada tractada

secundàriament, filtrada i clorada (Custodio *et al.*, 1981). L'experiència va acabar amb l'entarquinament del pou. A finals de la mateixa dècada es va construir un pou profund al delta del Llobregat, recarregat amb l'aigua de l'aquífer superficial local, que va acabar tenint problemes de generació de partícules de ferro per reacció química dins l'aigua. En l'actualitat s'ha iniciat l'operació en tres de quatre pous profunds al delta del Llobregat, recarregats amb aigua residual amb tractament terciari avançat, ozonització, microfiltració i dessalinització per osmosi inversa de la meitat del cabal, més cloració. Fins ara els resultats han estat bons quant a l'operació de recàrrega, tot i que el volum total injectat encara és petit per assolir modificacions importants en la distribució de salinitat a l'aquífer profund. Es treballa en l'extensió fins a disposar d'una línia de catorze pous d'injecció (Niñerola *et al.*, 2009), amb un total de 12 a 16 sondeigs d'observació i mostreig. El cost de l'operació s'estima entre 0,7 i 0,9 M€/any (dades de l'ACA).

També s'ha fet una acció similar amb aigua dessalinitzada per osmosi inversa al delta de la Tordera, en materials arcòsics grollers i relativament nets, amb ràpides reduccions de salinitat del que sembla que és una salinització per con ascensional salí des de formacions més profundes. Aquesta és una línia oberta per a la regeneració d'aquífers costaners, encara que costosa, al voltant de 0,3 €/m³ de nou espai d'aigua dolça generat, segons l'ACA. Aquests costos només són assolibles per a certs usos urbans i industrials, però difícilment per a usos agrícoles, llevat dels molts intensius. També es transporta l'aigua residual depurada a la costa, riu amunt, on s'infiltra a l'aquífer.

Quan l'aigua de l'aquífer ha estat malmesa per contaminació dominantment industrial, en especial la procedent de fuites o de lixiviació de rebliments, la situació és molt més complexa, difícil, costosa i a llarg termini. En molts casos, la neteja i regeneració de l'aquífer és responsabilitat legal i econòmica de qui ha produït la contaminació, cosa que cada vegada serà de compliment més estricte, en especial quan hi hagi danys a tercers o s'hagi de valorar el preu dels terrenys per a la venda, ja que el comprador hauria de fer-se

responsable de la neteja obligatòria. En aquests casos, la natura miscible o immiscible del contaminant i la sorció al terreny, en medis normalment prou heterogenis en detall, requereix llargs temps i tecnologia apropiada no sempre disponible ni prou demostrada. Hi ha certa experiència a Catalunya, però roman en el món privat, que normalment no n'autoritza la difusió, ni dels resultats assolits, que no sempre són prou definits ni definitius. En el cas del vessat accidental d'uns 70 m³ d'hidrocarbur lleuger a la vall baixa del Llobregat per la ruptura de l'oleoducte que hi havia com a conseqüència d'un atemptat el 1991, es va fer una despesa –estimació molt grollera– d'una desena de milions d'euros, i es va reduir raonablement el nivell d'hidrocarburs a l'aigua subterrània, però sense cloure el problema i sense garantia que la neteja feta fos permanent.

El gran cost i la lentitud associats a fuites accidentals fa que sigui preferible una ràpida intervenció per retirar el volum de terreny afectat i tractar-lo després –tractament també costós i que requereix un abocador–, que fer després la neteja *in situ*, excepte en el cas que hi hagi substàncies que es degraden ràpidament. Quan es tracta de contaminació procedent de reblliments de graveres i excavacions de fa anys, la neteja natural és molt lenta i, encara que sembla que s'aturi, amb el temps es produeixen episodis de transferència incrementada de contaminants a l'aqüífer i elevacions del nivell freàtic o després d'èpoques d'intensa recàrrega, com és el cas de la vall baixa i del delta del Llobregat i del Besòs mitjà. La regeneració pot demanar tornar a extreure i tractar els materials de reblliment quan es poden localitzar i el cost de fer-ho és prou elevat. És l'herència d'actuacions inadmissibles en la dècada de 1960 i 1970, amb efectes encara actius al 2009. En aquests casos, si el grau de contaminació residual no és excessiu, es pot regenerar l'aigua de l'aqüífer, no pas el mateix aqüífer, mitjançant un tractament addicional ben dissenyat, com s'està fent a la vall mitjana i baixa del Besòs, per a usos industrials i urbans, i fins i tot potables. Representa un cost notable per a l'actual generació a causa de males pràctiques anteriors.

Moltes situacions semblants es produeixen a molts altres indrets de Catalunya, en especial a la zona costanera de les conques internes, que encara no s'han abordat, però que podrien permetre afegir recursos locals si és que la infraestructura de captació i distribució roman operativa.

De les nombroses plantes de tractament d'aigües residuals de Catalunya concentrades a les àrees poblades, se n'han identificat més de cinquanta amb cabals entre 500 i 25.000 m³/dia. La recuperació d'aquestes aigües per recàrrega artificial als aqüífers locals és una possibilitat, però costosa, per a aqüífers de vegades massa petits per obtenir un tractament addicional en el terreny que sigui suficient i amb un temps de trànsit pel medi subterrani en general de curt a molt curt. En principi, això fa poc viable aquestes operacions, encara que localment es poden trobar situacions favorables.

11

Evolució esperable dels recursos d'aigua subterrània a Catalunya com a conseqüència del canvi climàtic i global

El canvi climàtic és un fenomen natural que ha estat present al llarg de la història geològica i també de la humanitat, i ha modificat l'evolució de les poblacions i la seva migració. No és un fet nou, tot i que és molt complex i té mecanismes no prou ben coneguts. Des de la Revolució Industrial, i encara més en les darreres dècades, als canvis naturals se suma l'impacte antròpic, que ha anat modificant la composició atmosfèrica i el territori d'una manera accelerada i preocupant. Tot apunta a l'escalfament, que és possible que s'hagi iniciat ja fa temps, superposat a l'evolució mal coneguda i incerta del fons natural, malgrat els grans esforços per simular-la acoblant el sistema Sol-atmosfera-oceà-biosfera. Aquests models globals, amb una malla de 200 a 300 km de costat, donen marcs variables d'altres models i, fins i tot, de models contradictoris.

Quant a Catalunya tot apunta cap a un probable escalfament mitjà, amb estius més càlids i més varia-

bilitat estacional, sense que sigui possible definir prou l'evolució de la precipitació. La majoria de models apunten que decreixerà, i que hi haurà fenòmens extrems més acusats cap al final del segle XXI, però altres models indiquen el contrari. Estudis millors i més aprofundits poden reduir les incerteses, però no eliminar-les, ja que la incertesa és una característica inherent al clima i a la hidrologia. Però els aspectes hidrològics s'han de considerar amb més detall que el que proporcionen els models globals –procés de detall o *downscaling*–, procés que incrementa les incerteses.

Com a conseqüència no hi ha cap tipus de previsió segura de com serà el clima en un futur. S'ha de treballar amb possibles escenaris que cobreixin un ventall de situacions sobre les quals analitzar els resultats i engegar línies de solucions, tot tenint present que són molt incertes i que a mesura que s'avança en el coneixement i en les dades, és possible que calgui fer-hi grans rectificacions. El que no és pot fer és esperar els esdeveniments sense invertir en el que sembla més probable trobar, atesa l'evolució poblacional i de matèries primeres i energètiques. Però l'acció antròpica pot tenir –i actualment té– un impacte territorial més gran que l'estrictament climàtic. Ambdós s'han de considerar conjuntament.

En el cas que minvin els recursos d'aigua i que siguin més irregulars, les aigües subterrànies locals i del territori, amb les interconnexions i xarxes de transport que calguin, han de tenir un paper més important com a reserva reguladora, en especial a les àrees del territori més intensament ocupades. Aquest aspecte és molt rellevant quant a la conservació i regeneració d'aqüífers i cal reprendre'l tan aviat com sigui possible, atesos els llargs terminis temporals que hi ha involucrats.

Encara s'ha fet poc a Catalunya en aquest sentit. L'ACA ha estudiat possibles efectes sobre les conques de la Muga i el Francolí, i és un dels objectius a la conca del Llobregat del projecte Water Change, del programa LIFE, que acaba d'engegar la Fundació CETaqua (UPC+CSIC+AGBAR) i el CRAI (Dept. d'Enginyeria del Terreny de la UPC). Uns primers intents

relatius a un possible canvi climàtic a les aigües subterrànies es varen aplicar en la dècada de 1990 al sistema aquífer carbonatat de l'Anoia, intents que van donar com a resultat una davallada de la recàrrega proporcional a la possible minva de la precipitació (Younger *et al.*, 2001). En altres indrets de Catalunya cal esperar una manca de linealitat amb decreixements de la recàrrega superiors a la disminució de la precipitació. Però tampoc no es pot descartar que localment la precipitació augmenti, encara que en un medi més càlid i, per tant, més evapotranspirant, cosa que redueix l'escolament i la recàrrega.

12

Conclusions

Catalunya té una llarga tradició d'utilització de les aigües subterrànies, però molt variable en el territori. Es concentra en les zones costaneres i en especial al voltant de Barcelona, on les extraccions importants daten de finals del segle XIX, encara que no van ser intensives fins a les dècades de 1950 i 1960 i no van culminar fins a la dècada de 1970; des d'aleshores s'han anat reduint, en part de manera pactada pels usuaris a través de la comunitat d'usuaris i l'Administració de l'aigua, actualment l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA).

Al territori català no hi ha grans i extensos aquífers, ateses les condicions geològiques, però hi ha un bon conjunt d'importància regional, en especial cap al sud i als trams baixos i els deltes, a més dels d'importància local. Mentre que a les conques internes de Catalunya es concentra la població, les activitats industrials, les demandes turístiques i una agricultura respectable, amb notable contribució de les aigües subterrànies, a les conques intercomunitàries dominen les aigües superficials per a regadiu –encara que amb alguns gens menyspreables desenvolupaments d'aigües subterrànies– i importants contribucions dels aquífers als abastaments locals. A molts indrets –en especial als voltants de Barcelona i la costa– l'extracció d'aigua subterrània és intensiva,

amb grans canvis en el funcionament natural dels aqüífers, problemes de descens de nivells i intrusió marina.

La contaminació de les aigües subterrànies pot arribar a ser important localment. El contaminant més difós, encara que no necessàriament el més insidiós localment, és el nitrat, majoritàriament d'origen agrícola i ramader, que es troba tant a les conques internes com a les intercomunitàries. Això ha obligat a declarar grans àrees com a sensibles als nitrats, amb vigilància i actuacions adients, malgrat que les àrees afectades encara són més externes.

Les aigües subterrànies tenen un paper important com a font d'aigua dolça, i encara més en les sequeres i els episodis de contaminació ambiental, paper que es podria potenciar amb una millor i més extensa xarxa d'interconnexions territorials.

És possible utilitzar els aqüífers que disposen de prou espai no saturat per emmagatzemar aigua, o per tractar aigües de qualitat pobra a causa de la contaminació, o que requereixen la desconnexió entre les plantes avançades de tractament d'aigües residuals i la captació, en afegir un afinament al terreny si és possible assolir temps de permanència en l'aqüífer de més de 200 dies. En molts casos això és difícil, atès que l'extensió superficial de bona part dels aqüífers és petita. Però el que no es pot aconseguir en un indret es podria assolir transportant l'aigua disponible a altres indrets.

Als voltants de Barcelona hi ha una dilatada experiència en recàrrega afavorida i artificial amb aigües fluvials, i s'estan engegant actuacions per regenerar aigües subterrànies que pateixen contaminacions antigues o residuals amb un tractament avançat i amb millores complementàries. És el cas de la injecció que s'està estenent al llarg d'una línia paral·lela a la costa, al delta del Llobregat, per frenar i reduir la intrusió marina.

El valor econòmic dels aqüífers en justifica l'estudi, observació, conservació, gestió i regeneració, a més de ser legalment obligatori segons la Directiva marc de l'aigua europea. Però el valor econòmic i la necessitat d'invertir-hi és quelcom del que encara no estan prou

conscienciats els gestors territorials i de l'aigua, i el públic en general.

13

Referències

ACA (2008). L'Agència, memòria 2007. Agència Catalana de l'Aigua. Barcelona, pàg. 1-169.

CANDELA, L.; CUSTODIO, E.; NAVARRO, A. (1998). *El sòl i les aigües subterrànies*. Medi Ambient i Tecnologia: Guia Ambiental de la UPC. Politext 1-3. Edicions UPC. Barcelona, pàg. 69-85.

CONDESSO DE MELO, M.T.; CUSTODIO, E.; EDMUNDS, W.M.; LOOSLI, H. (2007). *Monitoring and characterization of natural groundwater quality. The Natural Baseline Quality of Groundwater* (ed. W.M. Edmunds; P. Shand). Blackwell Publ., Oxford. Capítol 7, pàg. 155-177.

CUSTODIO, E. (1973). *Recharge artificielle dans le delta du Llobregat*. Barcelona. Acti del 2º Convegno Internazionale sulle Acque Sotterranee. Palerm (Itàlia), pàg. 720-723.

CUSTODIO, E. (1976). *Études géohydrochimiques dans le delta du Llobregat. Barcelona (Espagne)*. International Association of Scientific Hydrology. Gentbrugge Publ. 62, pàg. 134-155.

CUSTODIO, E. (1979). *Artificial recharge in the coastal aquifers near Barcelona (Spain)*. *Selected Water Problems in Islands and Coastal Areas, with Special Regard to Desalination and Groundwater*. Pergamon Press, pàg. 465-472.

CUSTODIO, E. (1981). *Sea water encroachment in the Llobregat and Besòs areas, near Barcelona (Catalonia, Spain)*. *Intruded and Fossil Groundwater of Marine Origin*. Sveriges Geologiska Undersökning. Uppsala. Rapport och Meddelanden 27, pàg. 120-152.

- CUSTODIO, E. (1982). *Nitrate buildup in Catalonia coastal aquifers. Impact of Agricultural Activities on Groundwater*. Intern. Assoc. Hydrogeologists. Memoires. Praha. XVI(1), pàg. 171-181.
- CUSTODIO, E. (1983). *El uso conjunto en el Pirineo Oriental: problemas de calidad. Utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas*. SGOP-UP. València. Valencia Sec. E-8, pàg. 1-22.
- CUSTODIO, E. (1984). *Los estudios hidrológicos del Pirineo Oriental. El agua en Aragón*. Universidad de Zaragoza - Grupo de Trabajo de Hidrogeología. Saragossa, pàg. 516-536 (828-851 en edició preliminar).
- CUSTODIO, E. (1986). *Recarga artificial de acuíferos: avances y realizaciones*. Bol. Serv. Geol. Obras Públicas núm. 45. Madrid, pàg. 1-134.
- CUSTODIO, E. (1994). *Endurecimiento del agua del Valle Bajo del Llobregat por cambios en los procesos de recarga. Análisis y evolución de la contaminación de las aguas subterráneas*. Alcalá de Henares. Asociación Internacional de Hidrogeólogos: Grupo Español. II, pàg. 123-140.
- CUSTODIO, E. (1995). *Las aguas subterráneas en Cataluña. El Agua en Cataluña*. ETSICCP-UPC. Barcelona, pàg. 257-279.
- CUSTODIO, E. (2005). "Consideracions sobre la contaminació de les aigües subterrànies a Catalunya: un problema de sostenibilitat". *L'Aigua a Catalunya. Una perspectiva per als ciutadans*. UPC-AGBAR-Càtedra AGBAR, Barcelona, pàg. 81-87.
- CUSTODIO, E. (2007). "Acuíferos detrítics costeros del litoral mediterráneo peninsular: valle bajo y delta del Llobregat. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra". Monográfico: Las Aguas Subterráneas. Rev. Assoc. Española Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. Madrid, 15(3), pàg. 295-304.
- CUSTODIO, E. (2009). "History of hydrogeology in Spain". *History of Hydrogeology* (ed. J. Mather). Intern. Assoc. Hydrogeologists (in press).
- CUSTODIO, E.; BAYÓ, A. (1986). *Interactions between land-use and aquifer behaviour in the surroundings of Barcelona (Spain). Integrated Land Use Planning and Groundwater Protection Management in Rural Areas*. Karlovy Vary Mém. Intern. Assoc. Hydrogeologists, pàg. 90-97.
- CUSTODIO, E.; CACHO, F.; SUÁREZ, M.; ISAMAT, F.J.; MIRALLES, J.M. (1977). *Combined use of surface and groundwater in Barcelona Metropolitan Area (Spain)*. Memoires Intern. Assoc. Hydrogeologists. Birmingham. XIII(1), C-14-27.
- CUSTODIO, E.; COROMINAS, J. (1981). *Contaminación por nitratos e intrusión marina en el acuífero costero del Maresme (Barcelona). Análisis y evolución de la contaminación de aguas subterráneas en España*. CIHS. Barcelona, pàg. 537-552.
- CUSTODIO, E.; GALOFRÉ, A. (1977). *Basin recharge in the Sitges plain (Barcelona, Spain) to eliminate temporarily municipal waste water*. Memoires Inter. Assoc. Hydrogeologists. Birmingham. XIII(1), F-41-57. (sin ISBN)
- CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. (1976; 1983). *Hidrología subterránea*. Ediciones Omega, Barcelona, 2 vol. pàg. 1-2350.
- CUSTODIO, E.; PALANCAR, M. (1995). "Las aguas subterráneas en Doñana". *Revista de Obras Públicas*. Madrid. 142 (3340), pàg. 31-53.
- CUSTODIO, E.; TOURIS, A.; BALAGUÉ, S. (1981). *Behaviour of contaminants after injection of treated urban waste water in a well. Studies in Environmental Sciences*. Elsevier. 17, pàg. 395-401.
- IGC (2006). *Mapa geològic del tram baix del Llobregat i el seu delta 1:30 000*. Institut Geològic de Catalunya.

Institut Cartogràfic de Catalunya - Comunitat d'Usuaris d'Aigües del Delta del Riu Llobregat, Barcelona.

IGC (2008). *Mapa geològic de Catalunya 1:300 000*. Institut Geològic de Catalunya i Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona.

LLAMAS, M.R. (1969). *Combined use of surface and groundwater for the water supply of Barcelona (Spain)*. Bull. Intern. Assoc. Sci. Hydrol., 14(3), pàg. 119-136.

LLAMAS, M.R. (1974). *Hacia la política hidrológica sin hidroesquizofrenia*. Bol. Geol. Min., Madrid, 86(1), pàg. 93-98.

LLAMAS, M.R. (2005). *La revolución silenciosa de uso intensivo del agua subterránea y los conflictos hídricos en España*. Libro Homenaje al Profesor D. Rafael Fernández Rubio. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, pàg. 79-86.

LLAMAS, M.R.; CUSTODIO, E. (ed.) (2003). *Intensive use of groundwater: challenges and opportunities*. Balkema, Dordrecht, pàg. 1-365.

MOP (1966). *Estudio de los recursos hidráulicos totales de las cuencas de los ríos Besós y Bajo Llobregat*. Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental/Servicio Geológico de Obras Públicas, Barcelona, 4 vol.

MORAGAS, G. (1896). "Corrientes subálveas: estudio general del régimen de las aguas contenidas en terrenos permeables que ejercen los alumbramientos por

galerías y pozos y especial del régimen de la corriente subterránea en el delta acuífero del Besós (Barcelona)". Anales de la Revista de Obras Públicas, Madrid, pàg. 1-133.

NINEROLA, J.M.; Queralt, E.; Custodio, E. (2009). *Llobregat delta aquifer. Case Studies for Groundwater Assessment and Monitoring in the Light of EU legislation* (ed. Ph. Quevauviller). Wiley (in press).

REPO (1975). *Estudio de los recursos hidráulicos totales del Pirineo Oriental*. Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental/Servicio Geológico de Obras Públicas, Barcelona, 7 vol.

SANTA MARIA, L.; MARIN, A. (1910). *Estudios hidrológicos en la Cuenca del río Llobregat*. Bol. Com. Mapa Geológico de España, Madrid, pàg. 31-52.

VÁZQUEZ-SUNÉ, E.; SÁNCHEZ-VILA, X.; CARRERA, J. (2005). "Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with referencia to Barcelona, Spain". *Hydrogeology Journal*, 13, pàg. 522-533.

YOUNGER, P.L.; TEUTSCH, G.; CUSTODIO, E.; ELLIOT, T.; MANZANO, M.; SAUTER, M. (2001). *Assessments of the sensitivity to climate change of flow and natural water quality in four major carbonate aquifers of Europe. Sustainable Groundwater Development* (Ed. K.M. Hiscock, M.O. Rivett, R.M. Davidson). The Geological Society (London) Special Publication 193, pàg. 303-323.