

SISTEMES CÀRSTICS EXPERIMENTALS DE CATALUNYA:

UNITATS DE REFERÈNCIA PER A LA RECERCA I LA GESTIÓ HIDROLÒGICA

Antoni Freixes

*Junta d'Aigües de Catalunya,
Departament de Política Territorial
i Obres públiques*

Joan Ramoneda

*Junta d'Aigües de Catalunya,
Departament de Política Territorial
i Obres públiques*

Manel Monterde

*Departament de Geografia,
Universitat Autònoma de Barcelona*

Jean Pierre Morin

*Departament de Física de les Radiacions,
Universitat Autònoma de Barcelona*

Aquest article s'estructura en dues parts ben diferenciades. La primera tracta dels sistemes càrstics experimentals que actualment són objecte d'estudi per part de la Junta d'Aigües de Catalunya (equip que fins a l'any 1997 va estar al Servei Geològic de Catalunya): definició d'objectius, metodologia de treball i relació dels sistemes càrstics experimentals de Catalunya. De fet, els sistemes esmentats no són més que una mostra del gran nombre d'aqüífers de Catalunya desenvolupats en roques carbonatades. D'aquí que l'objectiu de la segona part del treball sigui posar de manifest la significació del patrimoni hídic càrstic del país, així com aportar informació en relació amb possibles estratègies de gestió adequades a les peculiaritats d'aquest tipus d'aqüífers. L'article s'acaba amb una reflexió sobre temes concrets per a la recerca i gestió dels aquífers càrstics de Catalunya que es consideren prioritaris de cara al futur immediat.

1

Concepte

Un sistema o aquífer càrstic es pot qualificar d'experimental sempre que s'hi desenvolupi un treball quantitatiu, sistemàtic i exhaustiu de recerca. Tot i que els objectius concrets poden ser diversos, en qualsevol cas la investigació ha de perseguir el coneixement dels processos hidrològics o ecològics (funcionament) que tenen lloc en el sistema, així com obtenir una bona aproximació de la seva estructura. En última instància, aquest coneixement és el que pot aportar les bases per a una gestió hidrològica òptima.

D'acord amb aquesta idea de sistema càrstic experimental, i per tal que la recerca es pugui desenvolupar amb una base de coneixement òptima, la conca (sistema càrstic) ha d'estar monitoritzada; és a dir, ha d'estar equipada amb instrumental per a l'enregistrament automàtic de determinats paràmetres bàsics. A més, és imprescindible fer mesures sistemàtiques d'uns altres paràmetres que puguin aportar informació complementària dels processos que tenen lloc en el sistema càrstic (marcadors hidrogeològics i ecològics).

Així, s'arriba, inevitablement, al concepte d'interdisciplina. Gairebé per definició, el treball de recerca desenvolupat en un sistema càrstic experimental ha de comptar amb la participació d'especialistes en diferents disciplines. Tal com es veurà més endavant, aquesta és l'única manera que el treball pugui abordar la complexitat del sistema amb un cert contingut.

2

Antecedents

A Catalunya la primera conca experimental en aigües subterrànies es va crear amb el suport del Servei Geològic de Catalunya (DPTOP) a principi dels anys vuitanta a l'aqüífer de les fonts de Rellinars, dins l'àrea del parc natural de Sant Llorenç del Munt, serra de l'Obac (Freixes, 1986). D'ençà d'aquests primers treballs, des del mateix Servei Geològic es va impulsar la creació de noves conques experimentals als Pirineus (Val d'Aran i capçalera del riu Llobregat). En els darrers anys l'equipament instrumental s'ha estès a aquífers (alguns no càrstics) de les serralades costaneres catalanes i de la depressió de l'Ebre.

L'experiència adquirida en aquestes conques ha possibilitat la participació del Servei Geològic en dos projectes de la Unió Europea, els quals han permès la utilització de nous marcadors hidrogeològics i la posada a punt de metodologies gairebé inèdites en l'estudi de les aigües subterrànies:

- "Exchange of matter and fluids motion in karstic media", que va tenir com a objectiu la utilització del radó i la radioactivitat natural com a paràmetres característics de la circulació de l'aigua en aquífers de diferent naturalesa.
- "A multidisciplinary global approach of groundwater flow in karstic areas and its consequences for water resources and environment studies", l'objectiu del qual és la utilització de diferents marcadors hidrogeològics (ions majoritaris, elements traça, radó, radioactivitat natural, isòtops ambientals) per a un millor coneixement del funcionament i l'estructura dels sistemes càrstics.

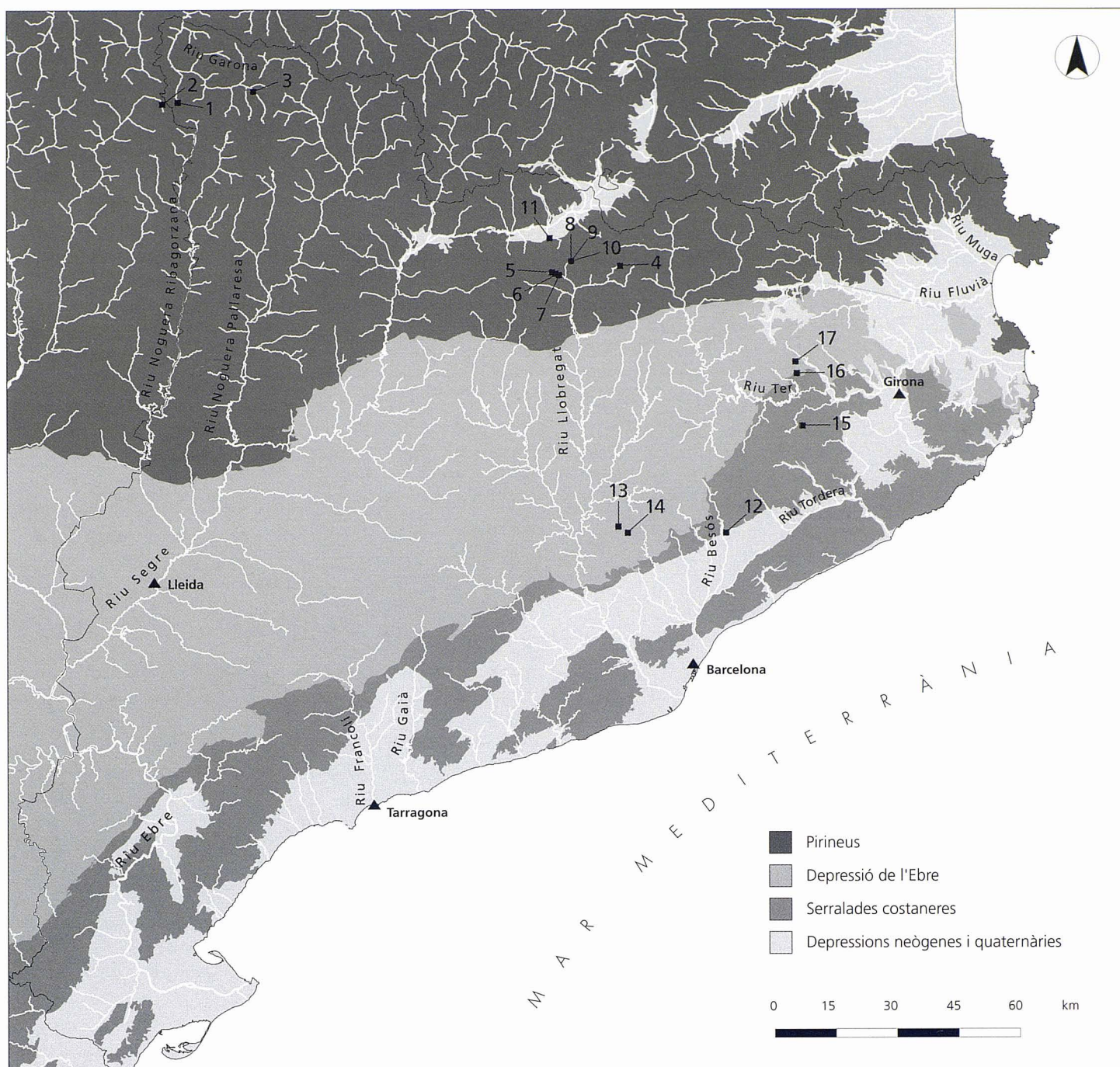


Figura 1. Mapa de situació dels sistemes càrstics experimentals a les tres grans unitats geològiques de Catalunya.

3 Objectius

Els objectius concrets d'aquestes conques experimentals són els següents:

- Avaluació de recursos i reserves: significació estratègica
- Coneixement del balanç d'aigua i matèria entre les entrades i les sortides del sistema
- Modelització del funcionament i l'estructura dels sistemes
- Localització espacial de les reserves

- Significació ecològica de les aigües subterrànies i superficials implicades
- Creació d'un marc d'R+D en hidrologia que permeti la racionalització de la gestió de l'aigua
- Avaluació de la vulnerabilitat dels recursos i dels riscos sobre obra pública i patrimoni (contaminació d'aqüífers, problemes geotècnics, afeccions de monuments, ...)
- Elaboració de cartografies hidrogeològiques de detall
- Desenvolupament de bases de dades per a la planificació hidrològica territorial

4 Metodologia

La metodologia bàsica del treball parteix d'una utilització explícita de l'anàlisi de sistemes, però des d'una perspectiva hidrogeològica, experimental i interdisciplinària. Aquesta perspectiva ha permès superar els obstacles epistemològics existents des d'unes altres aproximacions clarament reduccionistes com la geomorfologia, la geografia, la geospeleologia (geologia) i la hidrogeologia clàssica.

La interdisciplina, des de la hidrogeologia experimental, es concreta en quatre possibles aproximacions: la hidrodinàmica, la hidrogeotèrmia, la hidrogeoquímica i la hidrobiologia. Des d'aquestes disciplines es quantifiquen diferents paràmetres o marcadors per avaluar els recursos i les reserves dels aqüífers, el seu funcionament i la seva estructura, així com per establir la seva modelització des de distintes perspectives, que van dels models matemàtics clàssics a les fractals.

La investigació rigorosa dels aqüífers implica l'estudi dels principals elements del cicle de l'aigua: paràmetres meteorològics, sòls, vegetació i circulació superficial i subterrània a la zona no saturada (infiltració) i saturada. Per tant, els punts d'observació correspondran a aquests diferents conceptes.

Els paràmetres meteorològics s'obtenen a partir d'estacions completes (temperatura de l'aire i del sol, humitat relativa, radiació global o neta, velocitat i direcció del vent, pluviometria, ...), pluviògrafs i pluviòmetres totalitzadors. Aquest equipament permet determinar la intensitat de pluja, fer càlculs per a l'evapotranspiració potencial i real (paper de la vegetació) i facilitar la quantificació de la infiltració eficaç. El paper de la vegetació també es posa de manifest en estudis d'intercepció i escolament cortical.

Els punts d'observació en sòls se situen de manera que puguin ser representatius de la diversitat d'ambients implicats a la conca.

Els punts corresponents a aigües subterrànies són, essencialment, les descàrregues naturals (surgències), els pous i els piezòmetres. A més hi ha punts de control de les aigües superficials com a punts d'observació complementaris i per al càlcul del balanç d'aigua i de matèria. En qualsevol cas, en aquests punts es mesura en continu el nivell de l'aigua (per a l'obtenció del cabal), la temperatura i la conductivitat.

Aquestes mesures que es realitzen de manera contínua són complementades amb mesures discontinues però sistemàtiques (cada quinze dies o bé mensuals i en crescudes per a intervals més ajustats) en els punts d'observació principals (surgències, pèrdues, zona no saturada, zona saturada, piezòmetres, aqüífers superficials,...). Aquestes mesures discontinues es concreten en determinacions analítiques de ions majoritaris, minoritaris, elements traça, radioactivitat, gasos en dissolució (nitrogen, argó, diòxid de carboni, metà,...) i isòtops ambientals (oxigen-18, deuteri i triti).

Paral·lelament a tot el que es realitza des d'una perspectiva hidrològica experimental també es desenvolupa un treball de caracterització del medi geològic que consisteix en la realització de cartografies temàtiques, anàlisi de l'estructura

tectònica i quantificació de determinades característiques de l'encaixant, de les formacions superficials i sòls, així com dels sediments intracràstics (geoquímica, elements traça, radioactivitat, radó en continu en sòls,...). Tanmateix és important caracteritzar el context geològic i l'evolució geodinàmica de la unitat en observació: geologia estructural, traves de fissió, datació absoluta, ...

5

Sistemes càrstics experimentals a Catalunya

A Catalunya s'han realitzat recerques de caràcter experimental en nombrosos aqüífers; no obstant això, a continuació únicament es farà referència als que han estat equipats amb un monitoratge en continu, i que formen part de projectes en curs de desenvolupament o recentment finalitzats.

Aquests sistemes o conques experimentals es troben distribuïts a les tres grans unitats geològiques de Catalunya, és a dir, als Pirineus, a la conca terciària de l'Ebre i a les serralades costaneres catalanes (figura 1).

Els exemples d'aqüífers càrstics de Catalunya monitorats se situen entre els que tenen una major significació espacial i hidrològica. En aquests aqüífers, actualment també s'hi desenvolupen recerques relatives a l'estudi de la radioactivitat natural, particularment la mesura del radó en continu i la seva utilització com a indicador del seu funcionament. El monitoratge del radó s'ha concretat, així mateix, en uns altres sistemes de diferent naturalesa hidrogeològica. A tots, a més, sistemàticament s'agafen mostres per a la determinació del pH, l'alcalinitat, la duresa total, els ions majoritaris, isòtops ambientals i elements traça.

5.1

Sistema de Joèu (Val d'Aran)

(Figura 1, punts 1 i 2)

Al sistema de Joèu els punts monitorats són l'única surgència del sistema (Uelhs deth Joèu) i la pèrdua més important (Forao d'Aigualluts) (figura 2).

Per una conca d'uns 30 km², el volum de trànsit o aportació mitjana anual se situa al voltant dels 50 hm³. Es tracta d'un aqüífer ben drenat, amb un volum de reserves dinàmiques de prop de 3 hm³. L'aigua de la surgència és de molt feble mineralització (la conductivitat mitjana és de 70 µS/cm a 20 °C), fet que es manifesta tant en els ions majoritaris com en els elements traça (figura 3).

A partir d'experiències de traçat (Forao d'Aigualluts), s'ha pogut constatar que el temps de trànsit de l'aigua per l'aqüífer oscil·la entre 8-10 hores en crescuda i més de 8 dies a ple hivern, amb la conca totalment coberta de neu i amb cabals d'infiltració mínims.

La descàrrega del sistema (Uelhs deth Joèu) és objecte d'aprofitament hidroelèctric (central de Benòs).

Forao d'Aigualluts

Instruments digitals.

NIVELL, TEMPERATURA I CONDUCTIVITAT DE L'AIGUA	●
NIVELL DE L'AIGUA	
RADÓ DE L'AIGUA	●
PLUJA	
PARÀMETRES METEOROLÒGICS BÁSICS	

Uelhs deth Joèu

Instruments digitals.

NIVELL, TEMPERATURA I CONDUCTIVITAT DE L'AIGUA	●
NIVELL DE L'AIGUA	
RADÓ DE L'AIGUA	●
PLUJA	
PARÀMETRES METEOROLÒGICS BÁSICS	

5.2

Sistema d'Aigüeira (Val d'Aran)

(Figura 1, punt 3)

Tenint en compte que no es coneix l'existència de pèrdues rellevants, només s'ha monitorat la surgència principal.

La font d'Aigüeira, surgència principal del sistema, constitueix l'abastament d'aigua potable de Salardú, Tredòs i Unha. Des d'un punt de vista estrictament hidrològic, es tracta del verdader naixement de la Garona.

Per una conca d'uns 12 km², el volum de trànsit és d'uns 8 hm³. Les reserves d'aquest aqüífer són especialment importants (uns 10 hm³) i més si es té en compte la superfície de la conca. La mineralització de l'aigua, tot i ser feble, és superior als altres aqüífers de la mateixa capçalera de la Garona (100.5 mg/l de mitjana). Per tant, es tracta d'una aigua d'excel·lent qualitat per al consum humà.

Les concentracions de radó a l'aigua són relativament elevades i molt constants al llarg del cicle hidrològic. És important tenir en compte aquest



Figura 2. Buidat de l'estació dels Uelhs deth Joèu (Val d'Aran).

fet a l'hora d'edificar prop dels límits de l'aqüífer.

L'aigua de la font d'Aigüeira, a part de l'abastament públic ja esmentat, també és objecte d'aprofitament hidroelèctric.

5.3

Font d'Aigüeira

Instruments digitals.

NIVELL, TEMPERATURA I CONDUCTIVITAT DE L'AIGUA	●
NIVELL DE L'AIGUA	
RADÓ DE L'AIGUA	●
PLUJA	
PARÀMETRES METEOROLÒGICS BÀSICS	

Sistema de les fonts del Llobregat (Berguedà) (Figura 1, punt 4)

Està monitorada la surgència principal del sistema i es disposa de les dades de l'estació meteorològica que l'Institut Nacional de Meteorologia té a La Molina.

L'aportació anual d'aquest aqüífer és de prop de 26 hm³, amb un volum de reserves dinàmiques proper als 6 hm³. La mineralització de l'aigua és relativament baixa (233.8 mg/l de mitjana), tot i que clarament superior a la dels aqüífers aranesos.

Les fonts del Llobregat s'exploten hidroelèctricament i constitueixen una de les principals aportacions a l'embassament de la Baells.

5.4

Fonts del Llobregat

Instruments digitals.

NIVELL, TEMPERATURA I CONDUCTIVITAT DE L'AIGUA	●
NIVELL DE L'AIGUA	
RADÓ DE L'AIGUA	●
PLUJA	
PARÀMETRES METEOROLÒGICS BÀSICS	

Sistema de l'Adou del Bastareny (Berguedà)

(Figura 1, punts 5, 6 i 7)

És la conca amb el conjunt d'instruments més complet i ha estat definida com a sistema càrstic experimental de referència (figura 4).

El carst de l'Adou assumeix una part important del drenatge de la serra del Cadí. El sistema presenta tres surgències permanents, a cotes que oscil·len entre 915 m i 970 m, una de les quals constitueix l'abastament d'aigua potable de la població de Bagà. En aquesta zona de surgències hi ha un mínim de sis sobreeixidors que únicament entren en funcionament en episodis de crescuda molt importants. A 2.430 m d'altitud hi ha una quarta font permanent que drena un petit aqüífer epicàrstic, l'aigua de la qual, després d'un curt recorregut superficial, s'infiltra i s'incorpora a l'aqüífer de l'Adou.

Els resultats preliminars dels quals es disposa han permès estimar un volum de reserves dinàmiques per al conjunt del sistema que pot oscil·lar entre 2 i 5 hm³. Per una altra banda es

constata que les tres surgències principals, tot i pertànyer al mateix sistema, presenten algunes característiques fisicoquímiques força diferenciades (figura 5). En qualsevol cas, es tracta d'aigües relativament poc mineralitzades (251.1 mg/l de mitjana a l'Adou), amb una certa incidència dels sulfats (màxims de fins a 86.5 mg/l a la font del Violí i de 48.4 mg/l al bullidor de Sant Esteve), sobretot si es compara amb aqüífers propers com ara els de les fonts del Llobregat o de la Fou de Bor.

A part de l'abastament urbà de Bagà, l'aigua de les descàrregues del sistema càrstic de l'Adou del Bastareny és objecte d'aprofitament hidroelèctric i permet el funcionament de dues piscifactories. A més, constitueix una de les aportacions principals a l'embassament de la Baells.

5.5

Circulació profunda a les penyes altes del Moixeró (Berguedà)

(Figura 1, punts 8, 9 i 10)

Les observacions es realitzen en conductes càrstics localitzats com a conseqüència de les obres de perforació del túnel del Cadí. Els dos punts monitorats són els que aporten cabals més importants.

L'aportació total anual és d'uns 1.6 hm³. El caràcter permanent d'aquests punts d'aigua demostra que drenen un domini situat a la zona saturada. Tant la hidrodinàmica com la hidrogeològica i la hidrogeotèrmia posen de manifest que la circulació dominant de l'aigua és de tipus lent, amb una certa incidència puntual, però

Bastareny

Instruments digitals

	Adou del Bastareny	Bullidor de Sant Esteve	Font del Violí	Torrent de Murcurols	Torrent de Murcurols en el Molnell	Riu Bastareny al molí del Puig	Coll de la Bena
NIVELL, TEMPERATURA I CONDUCTIVITAT DE L'AIGUA	●	●	●				
NIVELL DE L'AIGUA				●	●	●	
RADÓ DE L'AIGUA	●	●	●				
PLUJA			●				●
PARÀMETRES METEOROLÒGICS BÁSICS (T, HR, RAD, GL, VEL I DIR VENT)							●

Bastareny

Altres instruments

	Adou del Bastareny	Coll de la Bena	Comabona
PLUVIÒMETRE TOTALITZADOR		●	●
RADÓ DEL SÒL	●	●	
CO ₂ DEL SÒL		●	●

Túnel del Cadí

Instruments digitals

	Conducte GR2	Conducte GR4	Total aportació Subterrània Túnel del Cadí
NIVELL, TEMPERATURA I CONDUCTIVITAT DE L'AIGUA			
NIVELL DE L'AIGUA			●
RADÓ DE L'AIGUA	●	●	
PLUJA			
PARÀMETRES METEOROLÒGICS BÁSICS			

molt significativa, d'aigües d'infiltració ràpida en el punt que anomenem GR2.

Aquestes aigües són relativament poc mineralitzades (valors mitjans de mineralització de 283 i 246 mg/l als punts GR2 i GR3 respectivament), amb nivells de magnesi comparativament elevats (19.6 i 17.6 mg/l de mitjana) en relació amb els observats a les fonts del Llobregat i a la Fou de Bor. Els nivells de radó no són negligibles.

La major part de l'aigua subterrània en relació amb el túnel del Cadí és canalitzada i objecte d'aprofitament hidroelèctric.

5.6

Sistemes experimentals en relació amb l'estudi de la radioactivitat i el radó

Al llarg dels anys 1994 i 1995 s'ha desenvolupat un estudi per a l'avaluació del paper de la radioactivitat i el radó com a possibles marcadors hidrogeològics. També es van analitzar els ions majoritaris i elements traça. Aquest estudi, a part dels sistemes càrstics ja comentats, es va dur a terme en els sistemes aquífers següents, dels quals n'hi ha un de càrstic i d'altres fissurats o de naturalesa essencialment granular (o mixta):

- El sistema càrstic de la Fou de Bor (Cerdanya).

Figura 1, punt 11.

- El sistema de la font Fresca en gresos fissurats (Garrotxa). Figura 1, punt 17.
- El sistema de la font del Roure en peu de mont Quaternari (la Selva). Figura 1, punt 16.
- El sistema dels Caus de Mura en conglomerats fissurats (Bages). Figura 1, punt 13.
- El sistema de la font de la Coma en conglomerats fissurats (Bages). Figura 1, punt 14.
- El sistema hidrotermal de la Garriga-Samalús (Vallès Oriental). Figura 1, punt 12.
- El sistema granodiorític de Sant Hilari (la Selva). Figura 1, punt 15.

Els resultats obtinguts en els dotze aquífers en què s'ha monitorat el radó permeten apuntar les consideracions següents (Morin, 1995): a) s'observen concentracions de radó molt variables en els diferents aquífers; b) la concentració de radó varia en relació amb el cabal, tot i que de manera diferent segons el tipus d'aquífer; c) a la major part d'àrees experimentals es posa en evidència que la infiltració lenta és el procés pel qual s'incorpora una bona part del radó a l'aigua; d) en períodes de crescuda sembla que el radó prové essencialment de la zona no saturada de l'aquífer; e) sembla que en els sistemes càrstics hi ha fonts de radi (el qual genera el radó) tant a la zona saturada com a la no saturada de l'aquífer. En aquest sentit, s'apunten tres possibles orígens d'aquest radi:

- Origen extern. Serà important en els casos en què l'aquífer drena una xarxa superficial desenvolupada en granits. És el cas del carst de Joèu.
- Origen en litologies impermeables o de baixa permeabilitat, riques en elements radioactius, intercalades amb les pròpiament carbonatades de l'aquífer. Podria ser el cas del sistema de les fonts del Llobregat (tot i que els elements traça no han permès confirmar aquesta hipòtesi) i dels sistemes de Mura.
- Origen en les mateixes calcàries. Tot i que es considera que la radioactivitat en aquestes

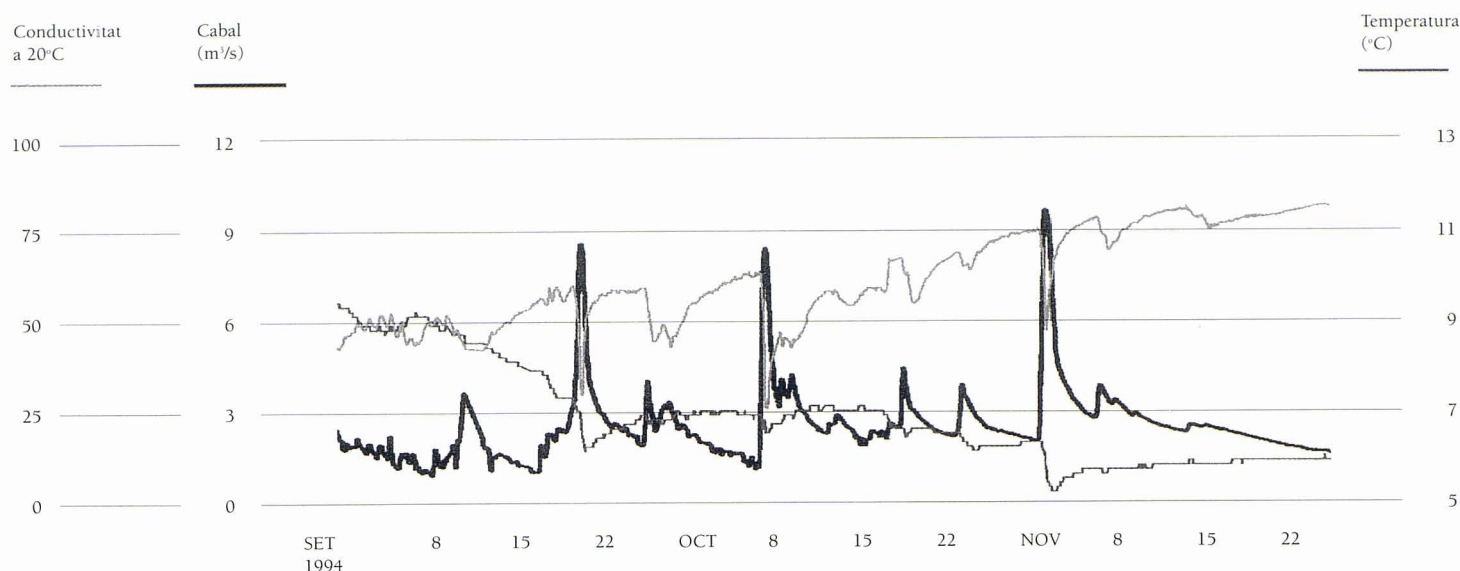


Figura 3. Resposta de la temperatura i la conductivitat de l'aigua a les variacions de cabal als Uelhs deht Joèu (Val d'Aran).

roques és molt baixa, cal matisar que aquesta no és en absolut negligible. A més, el procés de dissolució (carstificació) pot facilitar la dissolució de l'urani i el radi i la reconcentració d'aquests en les argiles producte de la dissolució de les calcàries.

L'interès de la recerca de la radioactivitat natural i del radó trascendeix la perspectiva hidrogeològica estricta. En efecte, en constituir el radó la primera causa natural de càncer, el seu estudi en els medis naturals (sistemes hidrològics, sòls, formacions superficials, substrats rocósos,...) i artificials (habitatges) des d'una òptica ambiental i sanitària adquireix una gran importància. En aquest sentit els estudis realitzats a Catalunya en el referit projecte europeu (Morin, 1995) constitueixen un precedent interessant per a la posada a punt de metodologies de mesura in situ i en continu del radó en aigües subterrànies i en aqüífers de diferent naturalesa hidrogeològica i geològica.

Les aigües subterrànies constitueixen així un important agent o vector de transport de radó i, per tant, són el factor responsable de les concentracions significatives que es poden trobar a la zona saturada i no saturada (depenent de les característiques geomètriques de l'aqüífer) i particularment a la seva zona de descàrrega. La naturalesa original del carst, per les seves característiques hidrogeològiques de funcionament i estructura (dominis d'elevada permeabilitat, zona no saturada ben comunicada amb l'exterior, freqüentment importants formacions superficials, presència de fonts cabaloses, ...) afavoreix encara més la possibilitat de trobar-hi concentracions

significatives de radó. En aquest sentit la urbanització d'aquests espais hauria de tenir present el radó com un condicionament ambiental de primer ordre, que sistemàticament caldrà considerar i analitzar rigorosament (Freixes *et al.*, 1996).

6 El patrimoni hídic càrstic: significació i estratègies de gestió

Els recursos hídrics dels aqüífers en roques carbonatades tenen un gran interès des del punt de vista de la hidrogeologia operativa, és a dir, la seva explotació ofereix moltes possibilitats segons com siguin les seves característiques hidrogeològiques i òbviament també segons els objectius de l'aprofitament.

En aquests tipus d'aqüífers és fonamental conèixer les característiques particularitzades de cada sistema o exemple, sobretot quan hi ha intervingut el fenomen de la carstificació que introdueix importants modificacions en la naturalesa del medi hidrogeològic original. En efecte, com a conseqüència dels processos de carstificació, l'aqüífer originàriament fissurat (de funcionament lineal i d'estructura estadísticament homogènia) evoluciona vers l'aqüífer càrstic, de funcionament no lineal i estructura estadísticament heterogènia. Per tant, segons com hagin estat les condicions per a la carstificació (potencial de carstificació), sistemes diferents poden ubicar, per exemple, volums de reserves dinàmiques molt variables (Mangin, 1975, 1994a, 1994b; Freixes, 1993).

El desenvolupament de la carstificació intro-

dueix, doncs, fortes anisotropies i heterogeneïtats en el conjunt de l'aqüífer, que han de ser considerades en les diferents etapes d'aproximació hidrogeològica: de l'exploració a la gestió. A més, l'estat d'evolució del sistema i l'existència o no d'una estructura endocàrstica pretèrita no funcional (paleocarst) és també un aspecte molt important des de la perspectiva de l'explotació i de la creació de reserves o de la possible ubicació d'infraestructures d'obra pública en l'àmbit de l'aqüífer o del paleocarst. Qualsevol actuació en aqüífers càrstics (exploració de les estructures d'emmagatzematge, creació de dispositius d'explotació, o bé, simplement, la consideració dels recursos i les reserves en la planificació hidrològica o del territori) exigeix el monitoratge bàsic del sistema (precipitacions, cabal, nivells piezomètrics, temperatura, ions majoritaris, elements traça i isòtops) com a mínim d'un cycle hidrològic (Collin i Mangin, 1985; Astruc *et al.* 1988; Marchet, 1989; Freixes, 1993; Bakalowicz *et al.* 1994, 1995).

Els aqüífers o sistemes en roques carbonatades ubicats en diferents àmbits geològics de Catalunya mostren una diversitat de característiques de funcionament i estructura que és indispensable conèixer per a una gestió òptima. Els exemples esmentats en els apartats anteriors —ben diferents els uns dels altres— reflecteixen aquesta diversitat i la necessitat d'una gestió adaptada a cada cas (Freixes *et al.*, 1998).

El paper d'aquests sistemes o unitats hidrogeològiques és, tanmateix, divers. Hi ha sistemes en explotació d'una forta implicació socioeconòmica i un important paper estratègic



Figura 4. L'Adou del Bastareny (alt Llobregat) en aigües altes.

(Capellades, Banyoles, Garraf,...) i uns altres, amb una utilització més limitada, que la prospectiva ens mostra com a recursos potencials i que són o poden ser estratègics en determinades situacions (Aigüeira, Adou del Bastareny, fonts del Llobregat,...) (Freixes *et al.*, 1996).

Òbviament, fora de l'òptica estricta de la hidrogeologia operativa, el paper d'aquests aqüífers és també fonamental des del punt de vista mediambiental i ecològic. En aquest sentit, el sistema de Banyoles a les comarques de la Garrotxa-el Pla de l'Estany n'és un exemple paradigmàtic, ja que té un interès enorme des d'ambdós punts de vista: el de l'explotació actual i el de la significació ecològica. En efecte, aquest exemple és rellevant per les característiques següents: les seves dimensions (implica un espai d'extensió superior als 100 km²), les conques fluvials implicades entre les quals destaca la del riu Fluvià, la importància dels seus recursos i reserves (reserves superiors a 50 hm³), l'existència del llac de Banyoles que s'alimenta subterràniament i que constitueix un espai limnològic i ecològic de primera magnitud, la significació i l'interès ecològic de la resta d'estanys de l'àmbit del sistema-aqüífer (Can Coromina, Rovira, Cendra, Cisó,...) i, des del punt de vista del risc i l'ordenació del territori, els fenòmens de dissolució i col·lapse (moltes vegades estanys i estanyols) de significativa activitat actual en tota l'extensió del sistema-aqüífer (Banyoles, Porqueres, Besalú, Sant Miquel de Campmajor,...). L'interès i les implicacions del sistema encara van més enllà, ja que d'una banda el desguàs de l'estany alimenta el riu Terri i, d'una altra, el desbordament del

Clot d'Espolla, sobreexidor més alt i significatiu del sistema, origina temporalment el rec Espolla (Cervelló i Freixes, 1992; Fortià, 1993).

Paradoxalment, tot i els interessants estudis hidrològics realitzats en el sistema de Banyoles, no es coneixen prou bé ni el funcionament ni l'àrea o les àrees de recàrrega, i tampoc la relació aigües superficials i subterrànies, així com alguns altres aspectes que es podrien considerar fonamentals per a una bona gestió i prospectiva dels seus recursos. En molts altres exemples de Catalunya succeeix exactament el mateix. És a dir, són nombrosos els aqüífers que tenen un paper important des de l'òptica dels recursos i també fortes implicacions mediambientals, però en els quals una gestió òptima exigeix disposar d'un coneixement més aprofundit. Així es poden citar les unitats hidrogeològiques de Capellades, el Garraf, el Baix Empordà (Pals-Torrent-Fonteta), la font Gran de Cercs, les fonts del Cardener, les fonts del Llobregat, l'Adou del Bastareny, Joèu, Aigüeira,... Tant l'aqüífer de Banyoles com els altres referits necessiten el desenvolupament de treballs orientats a l'elaboració de models que assegurin una gestió òptima dels seus recursos, la qualitat de les aigües i el manteniment dels ecosistemes implicats (Freixes *et al.*, 1996; Pascual *et al.*, 1996).

Determinades unitats tenen una significació especial. Així, per exemple, els sistemes de les fonts del Llobregat, l'Adou del Bastareny i la Fou de Bor, a part del seu interès estratègic (abastaments de Bagà i Bor, minicentrals, piscifactories, aportacions més importants a l'embassament de la Baells), són aspectes essencials i definidors del

Parc Natural del Cadí-Moixeró; això es fa palès per les seves dimensions (l'àrea ocupada pels sistemes coincideix pràcticament amb la del parc), les interessants característiques morfològiques (superficials i endocàrstiques) i paisatgístiques, la seva important i significativa funcionalitat hídrica actual, que es fa particularment evident en les descàrregues naturals, i els ecosistemes relacionats.

Molts països europeus, però també americans, de l'Àsia occidental, la Xina i el sud-est asiàtic, anàlogament a Catalunya, tenen extensions considerables de roques carbonatades i importants sistemes aqüífers càrstics en aquestes litologies. En aquests països s'han desenvolupat diverses tecnologies i infraestructures de captació, regulació i explotació d'aquests recursos: barratges a la conca d'alimentació (amb galeries d'interconnexió) als *polja* iugoslau (Bonacci, 1989), barratges subterranis directament a les estructures de drenatge de la zona saturada en exemples xinesos (Astruc *et al.*, 1988; Freixes, 1993), pous de gran diàmetre i elevat cabal a França,... No obstant això, el procediment més antic i freqüent ha estat la captació i regulació de fonts càrstiques (Mangin, 1975, 1994a, 1994b; Collin i Mangin, 1985; Sanz, 1987; Bonacci, 1989; White i White, 1989; Soulios, 1991; Freixes, 1993; Bakalowicz, 1994; European Commission, 1995).

A continuació i de manera sintètica descriurem algunes de les possibilitats d'explotació de la zona saturada d'aqüífers càrstics a partir de diferents dispositius i procediments i segons les seves característiques (Astruc *et al.*, 1988). Aquests

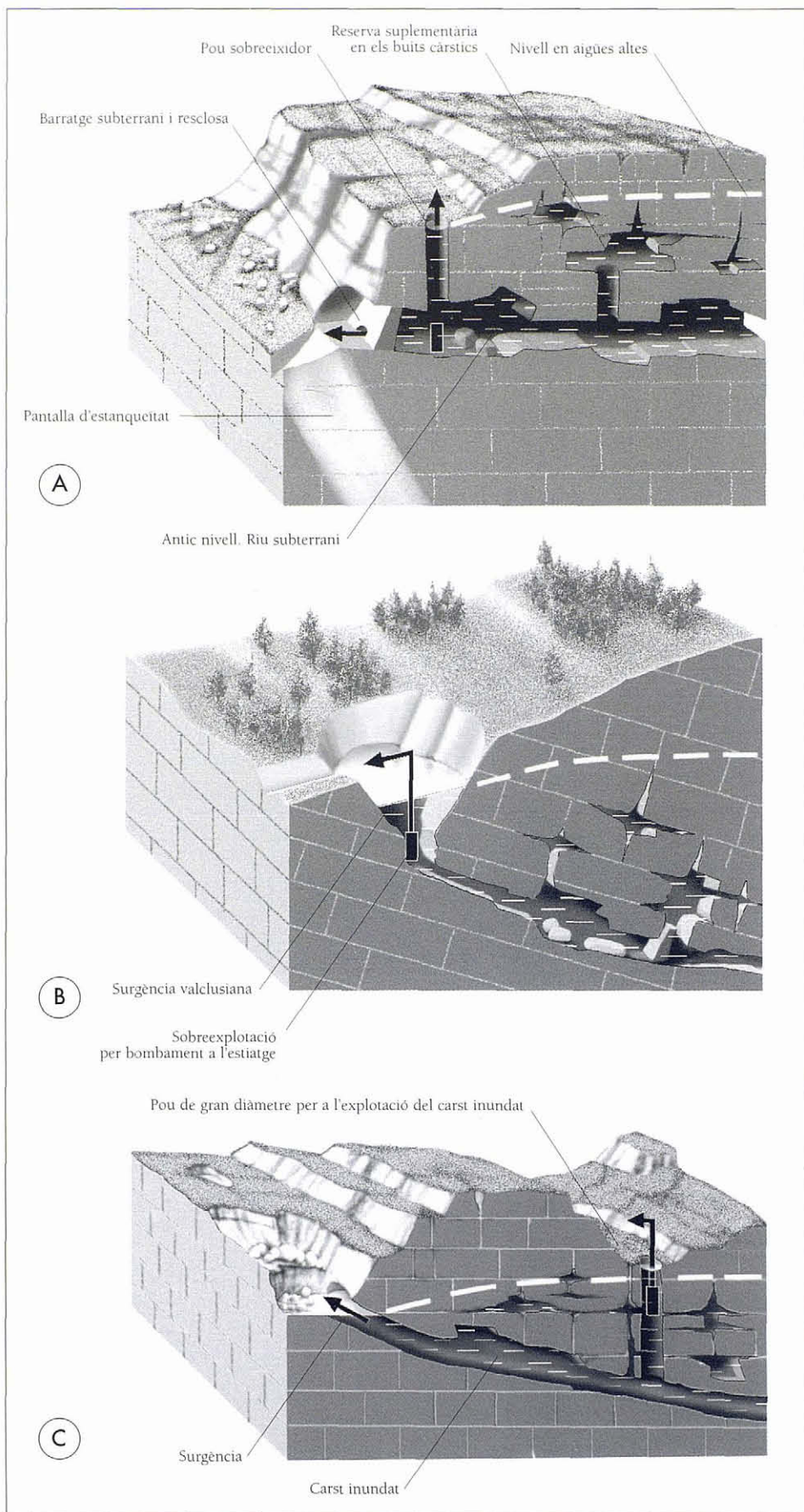


Figura 6. Dispositius d'explotació de la zona saturada d'aqüífers càrstics: a) barratge subterrani en un dren; b) bombament de sobreexplotació en una font valclusiana; c) captació vertical de gran diàmetre a la zona saturada.

diferents dispositius són perfectament aplicables a exemples coneguts de Catalunya (Pirineus i serralades costaneres catalanes) (Freixes, 1989). Els dispositius que es poden considerar són: barratge subterrani en un dren, bombament de sobreexplotació en font valclusiana i captació vertical de gran diàmetre a la zona saturada (figura 6).

6.1

Barratge subterrani en un dren

El primer dels dispositius es refereix a l'emplaçament d'un barratge subterrani en un dren (figura 6A) proper a la descàrrega natural de l'aqüífer o de barratges en diferents drens depenent de les característiques de l'estructura de la zona saturada (Freixes, 1989). Aquest dispositiu permet un augment de la reserva no solament per l'emmagatzematge en el dren o en les estructures de drenatge d'aigües amunt, sinó sobretot per la inundació d'estructures laterals més o menys carstificades o bé d'elevada carstificació (sistemes annexos al drenatge). Aquest dispositiu necessita d'un sobreexidor artificial per a situacions d'aigües altes, sobretot quan no n'existeixen de naturals, i segons sigui l'altura del nivell piezomètric originat artificialment.

6.2

Bombament de sobreexplotació en font valclusiana

Un segon dispositiu possible en un sistema de tipus valclusià consisteix en l'emplaçament d'una estació de bombament d'elevat cabal a la font valclusiana en període d'estiatge; el procediment consisteix en una sobreexplotació. Les reserves es recuperen en el següent període d'aigües altes (figura 6B).

6.3

Captació vertical de gran diàmetre a la zona saturada

Quan es tracta d'un aqüífer de reserves importants i les característiques de la font fan inviable l'emplaçament d'una captació, el dispositiu consisteix en una captació vertical de gran diàmetre, aigua amunt de la font càrstica i a l'interior de la zona saturada (figura 6C).

Com un dispositiu d'aquest tercer tipus, però més complex i de gran eficàcia, es pot citar la captació de la Source de Lez, prop de Montpeller, a França (figura 7). Aquesta font fou captada l'any 1854 amb una explotació de 0.025 m³/s, que progressivament passà a un cabal d'1.2 m³/s l'any 1969. Això no obstant, les necessitats d'a-

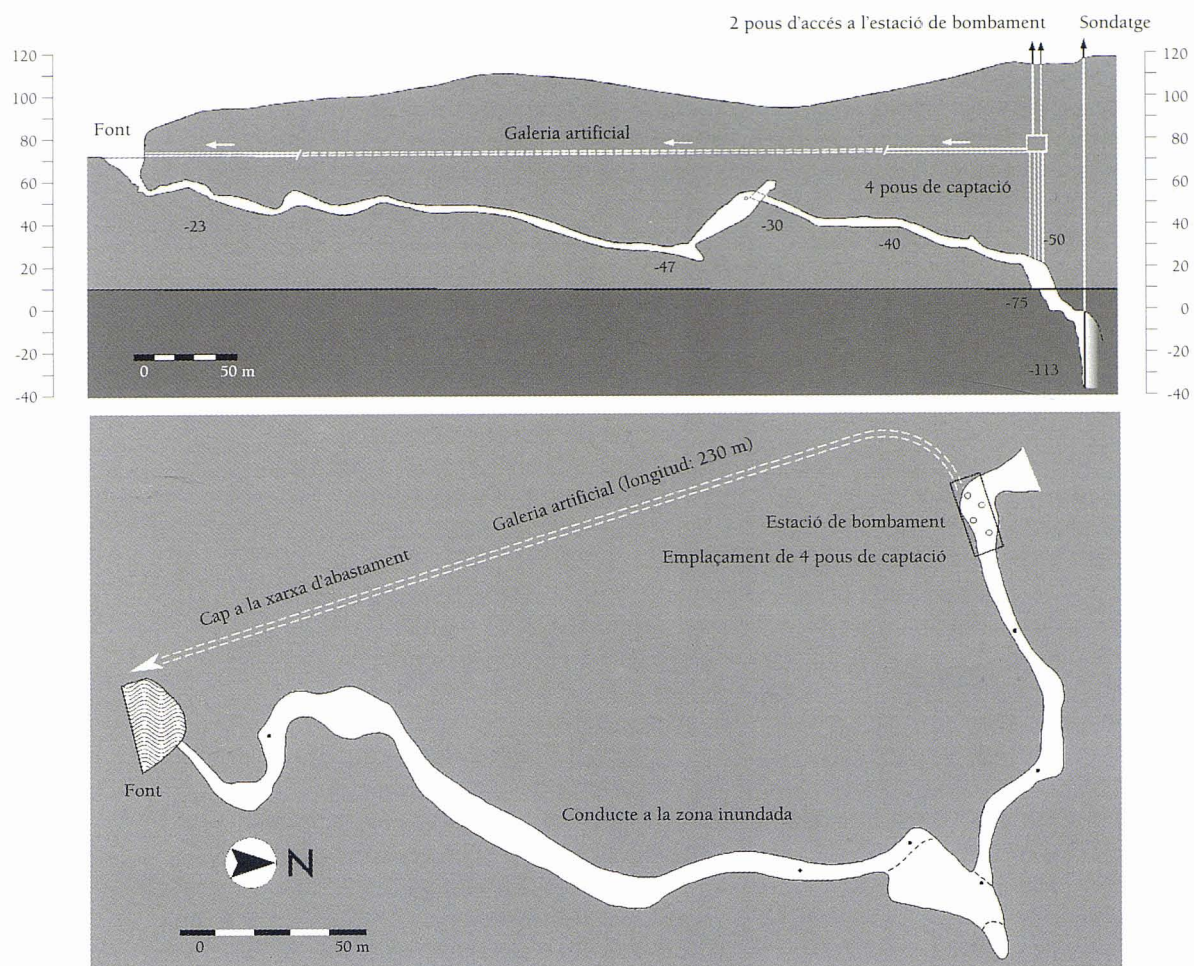


Figura 7. Captació de la Source de Lez (Montpeller, França).

bastament de Montpeller exigien encara cabals més importants; així es va resituar la captació, originàriament a la font, i es va ubicar aigua amunt en un conducte de la zona saturada que permetia un descens del nivell piezomètric superior al de la font; el conducte càrstic esmentat fou topografiat i estudiat prèviament mitjançant tècniques d'exploració subaquàtica. La nova captació permeté bombar un cabal de 2 m³/s en continu amb un descens del nivell entre 25 i 30 m; d'aquesta manera va quedar resolt l'abastament de Montpeller (207.996 habitants). El conjunt del dispositiu té quatre pous d'1.8 m de diàmetre i 50 m de fondària i amb una galeria artificial impermeabilitzada que condueix les aigües fins a la xarxa d'abastament superficial. El dispositiu garanteix així mateix els cabals ecològics indispensables aigua avall de la Source de Lez (Paloc, 1982).

7 Prospectiva

El monitoratge instrumental digital dels aqüífers càrstics constitueix un precedent i una iniciativa inèdita a Catalunya i suposa la creació per primera vegada d'una infraestructura d'investigació hidrològica de gran interès des del punt de vista de la prospectiva dels recursos i les reserves en aigües subterrànies. Aquest equipament proporciona un marc de treball amb moltes possibilitats, com es dedueix dels objectius, i constitueix així mateix una infraestructura indispensable per a l'aplicació de les metodologies hidrogeològiques més avançades. El conjunt d'instruments esmentats són una contribució a la hidrometria de les aportacions càrstiques dels rius de Catalunya, concretada de moment a les conques de l'alt Llobregat i l'alta Garona. A més, aquest plantejament és el que ha permès l'obtenció d'ajuts internacionals (projectes de la Unió Europea) per al desenvolupament de programes de recerca.

A Catalunya es coneixen relativament bé els aqüífers de la franja costanera i de zones propie-

res, que és on es concentra la major part de població i, per tant, la major demanda d'aigua. En general es tracta d'aqüífers al·luvials quaternaris i miopliocens, dels quals n'hi ha que presenten un cert grau de contaminació d'origen industrial i agrícola, problemes de sobreexplotació i d'intrusió marina. En canvi, es disposa de molt poca informació dels aqüífers de muntanya, els quals acostumen a ser relativament poc explotats i, en general, sense problemes importants de contaminació com a conseqüència de l'escassa influència antròpica. Aquests darrers són els que fins ara han estat objecte d'estudi per part del Servei Geològic, per l'equip que actualment està a la Junta d'Aigües de Catalunya.

L'observació del Mapa d'Àrees Hidrogeològiques de Catalunya (Servei Geològic de Catalunya, 1992) il·lustra molt bé l'extensió dels dominis carbonatats en què cal desenvolupar una intensa exploració hidrogeològica i completar de manera exhaustiva un inventari d'unitats hidrogeològiques que aportin una primera aproximació als límits dels sistemes (àrees de recàrrega, descàrregues). Aquestes recerques són espe-

cialment necessàries a l'àmbit dels Pirineus però també a les serralades costaneres i a importants dominis de la conca terciària de l'Ebre (calcàries de Tàrraga, conglomerats i gresos carbonatats i unitats calcàries diverses de les vores nord i sud).

A més, és important abordar a curt o mitjà termini la instrumentació de la resta dels sistemes dels Pirineus (i del límit Pirineus-conca terciària de l'Ebre), així com de determinats aqüífers de les serralades costaneres i de la conca terciària de l'Ebre. La significació estratègica dels seus recursos hídrics ho justifica completament.

Des del punt de vista de la hidrogeologia operativa són evidents les possibilitats de captació i regulació de les descàrregues naturals de nombrosos sistemes, i també d'explotació de reserves profundes en algunes estructures geològiques de geometria favorable i amb evidents manifestacions hidrogeològiques (sinclinals de la conca de Tremp, de Ripoll,...). A més, la significativa i positiva inflexió de les activitats econòmiques de diverses comarques de muntanya (Val d'Aran, Cerdanya, alt Pallars,...) fa del tot necessària una planificació hidrològica que garanteixi una gestió òptima dels seus recursos hídrics (Freixes et al., 1996; Pascual et al., 1996).

La importància quantitativa dels recursos dels sistemes càrstics de Catalunya ha estat àmpliament comentada com també la seva significació ambiental i ecològica. Aquests aqüífers, però, no són aliens als problemes de contaminació i de degradació de la qualitat dels recursos. Les seves originals característiques requereixen mesures de protecció i una anàlisi de la vulnerabilitat degudament adaptades al seu funcionament i a la seva estructura (cartografies de risc, assaigs amb traçadors, delimitació acurada del sistema, activitats antròpiques en l'àmbit del sistema,...). Les actuacions en aquesta línia han estat recollides per les Accions Cost de la Unió Europea (European Commission, 1995); Catalunya contribuirà en una d'aquestes accions amb els resultats obtinguts en les conques experimentals abans descrites.

En un context més general, la problemàtica mediambiental del medi càrstic a Catalunya (en relació amb l'agricultura, la indústria, el desenvolupament urbanístic i les activitats econòmiques en general) és també molt important (Williams, 1993; Freixes et al., 1998). Els problemes originats van des de la degradació de la qualitat dels recursos hídrics fins a la ubicació d'abocadors de gran abast al bell mig d'espais càrstics catalogats com a parcs naturals. L'anàlisi d'aquests problemes concrets hauria de ser preocupació de l'Administració i mereixeria, si més no, un esforç d'estudi i d'avaluació de l'impacte ambiental amb l'objectiu de conèixer la situació actual al país.

El carst o medi càrstic transcendeix l'aspecte estrictament hidrològic i no solament per les implicacions ambientals i ecològiques sinó també per les culturals. Els espais calcaris, que caracteritzen la majoria de països de l'àmbit mediterrani, han estat el bressol de la cultura occidental. Així, el medi càrstic a la Mediterrània ha recollit un valuós patrimoni cultural: paleontològic, paleoantropològic, arqueològic i històric. Actualment, com succeí també en temps passats, la important disponibilitat de recursos hídrics del país calcarí ha estat determinant de la presència de moltes activitats agrícoles i industrials i de la localització d'importantes concentracions humanes. El planificador del territori no solament haurà de considerar els recursos hídrics del carst sinó el conjunt d'aspectes que fan d'aquest medi un valuós patrimoni natural i cultural. Una visió àmplia i oberta, és a dir interdisciplinària i transdisciplinària, obligatòriament haurà de considerar la globalitat de les seves característiques físiques i ambientals, així com la seva dimensió multicultural ■

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- Astruc, J.G.; Biscaldi, R.; Bakalowicz, M. i Mangin, A. (1988). "Le karst: des réserves en eau qu'il faut savoir utiliser". Adour-Garonne 40:53-57.
- Bakalowicz, M. (1994). "Water Geochemistry: Water Quality and Dynamics". In Gibert, J., Danielopol, D.L., Stanford, J.A. editors. Groundwater Ecology. Aquatic Ecology Series. Academic Press. USA. 571 pàg.
- Bakalowicz, M.; Crochet, P.; D'Hulst, D.; Mangin, A.; Marsaud, B.; Ricard, J. i Rouch, R. (1994). "High discharge pumping in a vertical cave. Fundamental and applied results". In Crampon, N. & Bakalowicz, M. editors. Basic and applied hydrogeological research in french karstic areas. Cost 65 Action. Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas, pàg. 93-110.
- Bakalowicz, M.; Drew, D.; Orvan, J.; Pulido-Bosch, A.; Salaga, I.; Sarin, A. i Tulipano, L. (1995). "The characteristics of karst groundwater systems". In Cost action 65. Karst groundwater protection. Final report. European Commission. pàg. 349-369.
- Bonacci, O. (1989). "Karst Hydrology (with special reference to the Dinaric karst)". Springer Series in Physical Environment. Springer-Verlag. Germany. 184 pàg.
- Cervelló i Freixes, A. (1992). *El domini càrstic. Història Natural dels Països Catalans*. Geologia II. Fundació Enciclopèdia Catalana. Barcelona.
- Collin, J.J. i Mangin, A. (1985). "Évolution récente de l'hydrogéologie: de la prospection à la gestion des ressources and eau". Bull. Soc. géol. France, (8), t.1, núm. 7, p. 999-1008.
- European Commission (1995). *Cost Action 65. Karst groundwater protection*. Final Report. 446 pàg.
- Fortià, R. (coordinador) (1993). *El medi natural a les comarques gironines. L'estat de la qüestió*. Diputació de Girona. Girona. 683 pàg.
- Freixes, A. (1986). *El carst conglomeràtic experimental de Rellinars: un enfocament sistemàtic i hidrogeològic en la recerca del medi càrstic*. Tesis de Llicenciatura. Universitat de Barcelona, 157 pàg.
- Freixes, A. (1989). *Possibilitats de captació d'aigües subterrànies per a l'abastament de l'Esplugu de Francolí. Proposta d'un nou embassament subterrani (II)*. Informe intern del Servei Geològic de Catalunya.
- Freixes, A. (1993). "El medio kàrstico: de la investigación observacional y experimental a la modelización". In Correig, A. editor, *Hidrología subterránea y migración de contaminantes*. Universitat de Barcelona-Institut d'Estudis Catalans, Barcelona.
- Freixes, A.; Monterde, M. i Ramoneda, J. (1998). *The karstification potential of the aquifers in the Val d'Aran (Catalonia)*. Acta Geologica Hungarica, 41 (1): 23-39.
- Freixes, A.; Monterde, M.; Morin, J.P. i Ramoneda, J. (1996). Recursos hídrics e implicaciones ambientales del sistema de Aiguèira (Val d'Aran). Actas de las Jornadas sobre Recursos Hídricos en Regiones Kàrsticas. Vitoria, pàgs. 53-71
- Mangin, A. (1975). *Contribution a l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. Thèse doctorat ès Sciences naturelles, Dijon, Annales Spéléologie, 29, pàg.283-332; 4, pàg. 495-601; 30, 1, pàg. 21-124.
- Mangin, A. (1994 a). "Structure and functioning of karst aquifers. Consequences on karst management and protection". In Crampon, N. & Bakalowicz, M. editors. Basic and applied hydrogeological research in french karstic areas. Cost 65 Action. Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas, pàg. 11-24.
- Mangin, A. (1994 b). "Karst Hydrogeology". In Gibert, J.; Danielopol, D.L. i Stanford, J.A. editors. Groundwater Ecology. Aquatic Ecology Series. Academic Press. USA. 571 pàg.
- Marchet, P. (1989). "L'action des agences de l'eau en milieu karstique". Spelunca, núm. 5, p. 80-84.
- Morin, J.P. (1995). "Exchange of matter and fluids motion in karstic media". Human Capital and Mobility núm. ERBCHBICT930308. Final report, 319 pàg.
- Paloc, H. (1982). "Thermalisme, fonctionnement des systèmes karstiques et aménagement d'un captage". Cours d'Hydrogéologie des Roches Fissurées. Excursions Techniques. Université des Sciences et Techniques. Montpellier, France.
- Pascual, J.M.; Freixes, A.; Masich, J.M.; Balasch, C.; Monterde, M.; Ramoneda, J. i Remacha, R. (1996). "Los acuíferos carbonatados en el Pirineo de Lleida (Pirineo Occidental de Catalunya)". Actas de las Jornadas sobre Recursos Hídricos en Regiones Kàrsticas. Vitoria, pàgs. 127-144.
- Sanz, E. (1987). "La regulación de los manantiales y su incidencia en España". Boletín geológico y Minero. T. XCVIII-VI, pàg. 831-858.
- Servei Geològic de Catalunya (1992). *Mapa d'Àrees Hidrogeològiques de Catalunya 1:250.000*. Institut Cartogràfic de Catalunya. Barcelona.
- Soulios, G. (1991). "Contribution à l'étude des courbes de récession des sources karstiques: exemples du pays hellénique". Journal of Hydrology, 124, pàg. 29-42.
- White, W. B. i et White E. L. (1989). *Karst Hydrology (Concepts from the Mammoth Cave Area)*. Van Nostrand Reinhold, New York. 346 pàg.
- Williams, P. (editor) (1993) "Karst Terrains. Environmental Changes and Human Impact". Catena Supplements 25. Catena Verlag, Germany. 268 pàg.