

Les aigües subterrànies al Maresme

Josep M. Carmona Pérez i Diana Puigserver Cuerda

Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica,
Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona

GROUNDWATER IN THE MARESME. – The concept of the aquifer is introduced and the characteristics of subsurface rocks to form a groundwater-bearing formation are analysed in this work. The conceptual model of groundwater flow in the granitic aquifer of the Maresme and its connection with the aquifers on the coastal plains are studied, as well as the connection with the alluvial aquifers of the lower part of the La Tordera river and delta. How the water recharge takes place and how natural and artificial discharges occur are also studied. The impacts on the system caused by artificial discharges are also analysed. The analysis includes the quantitative and qualitative state of groundwater based on the water bodies defined by the Catalan Water Agency. The problem of groundwater contamination by chlorinated solvents in the aquifer of the stream of Sant Pol de Mar is presented as an example of the pressures related to groundwater quality. Finally, the origin of the Maresme geothermal manifestations (geothermal waters and springs of sparkling water), which is related to groundwater flow through deep faults and extends beyond the surficial granitic aquifer system is also studied.

Introducció. Què són les aigües subterrànies i què és un aqüífer

Les aigües subterrànies són les que circulen a través del subsòl dintre del que s'anomenen aqüífers. Un aqüífer és una roca que ha de complir uns determinats requisits. En primer lloc ha de ser porosa, per exemple sorra o grava (fig. 1A), o calcària fracturada i/o carsificada. Les roques poroses poden emmagatzemar aigua als espais buits que formen els porus. Tanmateix, aquesta aigua ha de poder circular a través de la roca porosa, raó per la qual els porus han d'estar interconnectats (fig. 1B). Es diu llavors que la roca és permeable.

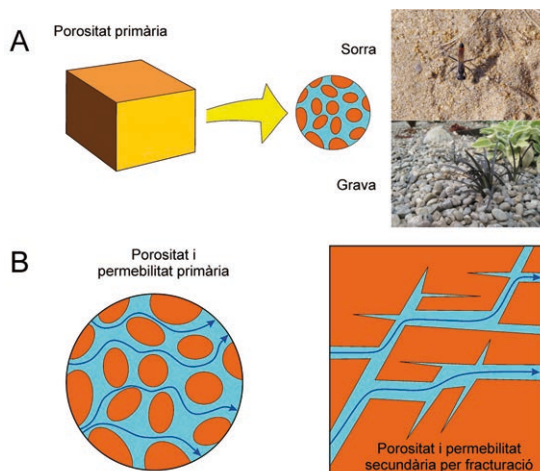


Figura 1. A, porositat primària. B, porus interconnectats en una roca amb porositat primària i en una roca amb porositat secundària per fracturació (Autor: J.M. Carmona).

Per tant un aqüífer és una roca que està saturada en aigua, l'emmagatzema i la transmet. Els aqüífers es poden classificar en tres grups: lliure, captiu i semicaptiu.

L'aqüífer lliure està limitat per la seva part superior per la superfície freàtica (fig. 2A), que el separa de la zona no saturada, per sobre de la qual hi ha la superfície del terreny. Part de l'aigua de pluja que s'infiltra a través de la zona no saturada arriba a la superfície freàtica i recarrega l'aqüífer. L'aqüífer captiu està limitat per la part superior i per la part inferior per materials de molt baixa permeabilitat (per ex. argiles) o per materials absolutament impermeables (per ex. granits no fracturats ni meteoritzats). En l'aqüífer semicaptiu, o bé un d'aquests dos límits està format per materials de baixa permeabilitat (per ex. llims o sorres molt fines) i l'altre és impermeable, o bé tots dos són de baixa permeabilitat.

L'aigua de l'aqüífer es desplaça des de les zones en què la seva energia total, anomenada altura piezomètrica (suma de l'energia de pressió i de l'energia potencial), és superior fins a les zones on aquesta és menor. L'aigua subterrània prové de la pluja, i va a parar a les zones de descàrrega natural, per exemple a un riu connectat hidràulicament amb l'aqüífer o una font (fig. 2A), o subaquàticament al mar (fig. 2B), on es tanca el cicle hidrològic.

L'aigua subterrània també va a parar a les descàrregues artificials, com ara els pous (captacions verticals) i les mines d'aigua (captacions horitzontals).

Enquadrament geològic del Maresme

Des del punt de vista geològic, el Maresme forma part de les Serralades Costaneres Catalanes (fig. 3), les quals constitueixen un



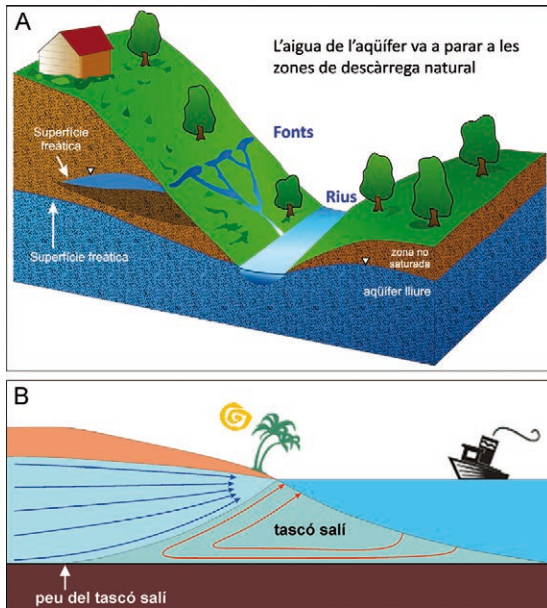


Figura 2. A, descàrrega natural d'un aquífer lliure a una font i a un riu efluent (modificat de Fetter, 1980). B, descàrrega subaquàtica i contínua de l'aquífer al mar (línies blaves) i entrada i sortida contínua d'aigua salada (línies vermelles) que dona lloc a la formació d'un tasco salí dintre de l'aquífer. Aquest tasco és una estructura natural que es troba en equilibri amb la descàrrega d'aigua de l'aquífer (Autor: J.M. Carmona).

sistema de blocs aixecats (*horsts*) i enfonsats (*grabens i semigrabens*). Més enllà dels límits estrictament polítics, el Maresme es correspon amb un bloc aixecat (*horst*) limitat per dos blocs enfonsats (fig. 3). Així, per la costa està limitat amb un bloc que se situa per sota del mar, el *semigraben* de Barcelona, i per la seva part septentrional limita amb el graben del Vallès-Penedès. Encara que en la zona del

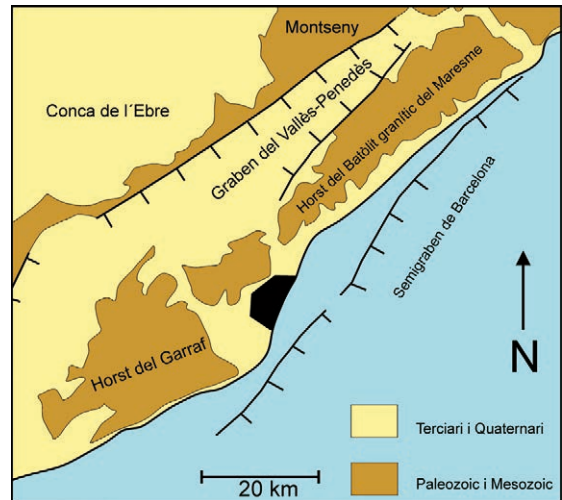


Figura 3. Esquema estructural de les Serralades Costaneres Catalanes (Autor: J.M. Carmona).

Montnegre està format per roques metamòrfiques paleozoiques, el Maresme està constituït principalment per roques granítiques que formen l'anomenat batòlit del Maresme. Aquest batòlit té una longitud de 75 km i assoleix una amplada de 20 km, mentre que la seva màxima altitud es troba al massís Paleozoic del Montnegre, amb 773 m.

L'aquífer de naturalesa granítica del Maresme

Roques dominants

Entre les roques granítiques del batòlit del Maresme destaquen els granits en sentit estricte, les granodiorites i les tonalites. A grans trets, aquestes roques estan formades princi-



Figura 4. Fotografia a l'escala de mostra de mà d'un granit (roca plutònica de textura granuda). Cristalls de color gris (quars), cristalls de color blanc (feldspat) i cristalls de color negre (mica, en aquest cas biotita) (Autor: J.M. Carmona).



la regional, hi ha un sistema de fractures dominant N-S i un altre de secundari de direcció SO-NE o O-E. Aquests dos sistemes també es manifesten a l'escala local i d'aflorament (fig. 5A i B, respectivament). Com que aquestes roques estan fracturades, presenten una porositat i permeabilitat secundàries per fracturació (fig. 1B) que, en les parts més superficials se superposa a la porositat i permeabilitat secundàries per meteorització química.

Tot aquest conjunt de roques poroses i permeables es troba saturat en aigua subterrània per sota de la profunditat a què es troba la superfície freàtica (fig. 2A) i constitueix un aqüífer de naturalesa granítica. La directiva marc de l'aigua (directiva de la Unió Europea 2000/60/CE) estableix un marc comunitari d'actuació en l'àmbit de la política d'aigües. Seguint aquesta directiva, que va entrar en vigor el 22 de desembre del 2000, l'Agència Catalana de l'Aigua engloba les aigües subterrànies del aqüífer de naturalesa granítica del Maresme (juntament amb les dels materials paleozoics del Montnegre, les dels materials al·luvials de les rieres i les de les planes litorals) dintre de la massa d'aigua 18 (fig. 6). A més, al Maresme hi ha una segona massa d'aigua, que es troba parcialment en aquesta comarca, es tracta de la número 35, que se situa al nord-est de la comarca i que està constituïda pels aqüífers que formen els materials al·luvials de la baixa Tordera i delta (fig. 6). A la part del delta es distingeix un aqüífer al·luvial superficial lliure

(graves i sorres amb matriu llimosa) i un de profund (graves i sorres). Materials llimosos separen entre si aquests dos aqüífers.

Model conceptual del funcionament hidràulic de l'aqüífer de naturalesa granítica del Maresme

Els sistemes de fracturació que afecten el batòlit granític del Maresme controlen la xarxa hidrogràfica superficial (fig. 7A). L'erosió del sauló al llarg de la traça de les falles més importants, on la roca està més triturada, ha donat lloc a l'excavació de les rieres principals. Aquest sauló s'ha dipositat més avall en el llit de les rieres, on s'ha acumulat com a sorres, que formen part dels al·luvials quaternaris de les rieres (fig. 7B). Aquests materials al·luvials també constitueixen formacions poroses i permeables. Posteriorment les sorres seran transportades al mar i redistribuïdes per la costa, on una part formaran les platges.

Recàrrega de l'aqüífer

El conjunt format pel granit fracturat, el sauló i els materials al·luvials de les rieres, conforma un aqüífer lliure. La superfície freàtica d'aquest aqüífer separa el que és la zona saturada (el que és pròpiament l'aqüífer lliure, fig. 7C) de la zona no saturada que es troba per sobre. Una part de l'aigua de pluja s'infiltra en el subsòl a través de tota la superfície

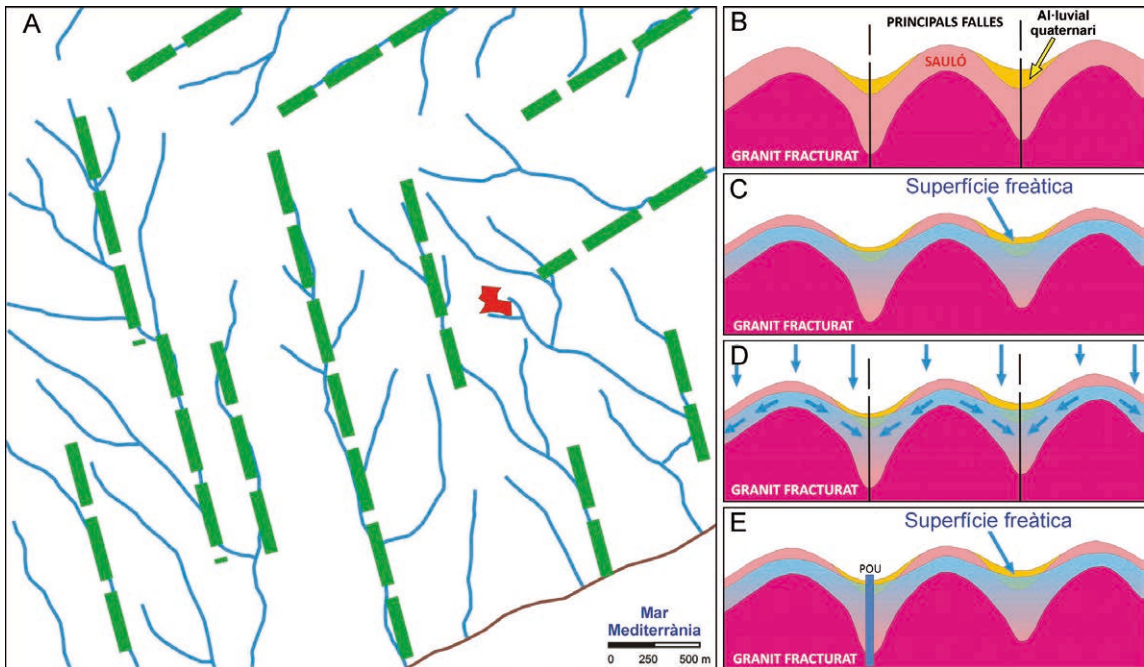


Figura 7. A, correspondència entre els sistemes de fracturació dominants i la xarxa de drenatge superficial a la zona de Canet de Mar, en les immediacions de l'abocador clausurat (indicat amb color vermell). B, les rieres s'han encaixat seguint les principals falles. C, superfície freàtica. D, les falles importants esdevenen eixos drenants principals de les aigües subterrànies. E, l'eix de les rieres són les zones més apropiades per construir un pou (Autor: J.M. Carmona).



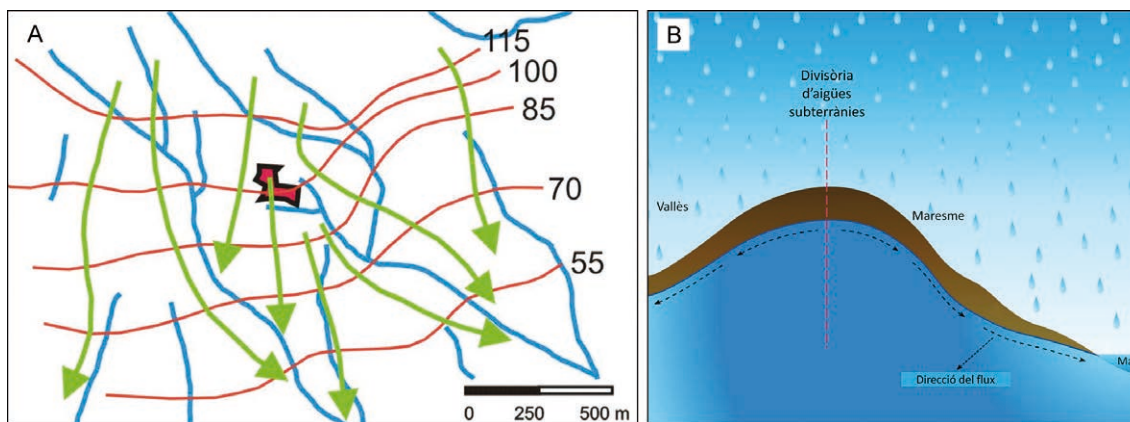


Figura 8. A, mapa piezomètric (msnm). Zona de Canet de Mar, en les immediacions d'un antic abocador de residus sòlids urbans clausurat. B, divisòria d'aigües subterrànies a l'aqüífer granític del Maresme, entre el Vallès i el Maresme (Autor: J.M. Carmona).

que aflora de sauló i de materials al·luvials. Una part d'aquesta aigua infiltrada l'usen les plantes, la resta continua la seva trajectòria descendent a través de la zona no saturada i finalment travessa la superfície freàtica, recarregant l'aqüífer (fig. 7C). Un cop a l'aqüífer, les línies de flux de l'aigua subterrània es dirigeixen des de les zones amb més altura piezomètrica cap a l'eix de les rieres (fig. 7D), on hi ha una menor altura piezomètrica.

Descàrregues naturals

Quan les aigües subterrànies han arribat a l'eix de les rieres importants (fig. 8A), continuen el seu trajecte subterrani. Una part circula en direcció NO cap al Vallès (fig. 8B), i una altra part circula en direcció SE cap al mar (fig. 8B), on descarreguen subaquàticament tancant el cicle hidrològic (fig. 2B). En les zones del Maresme on hi ha planes litorals, les aigües subterrànies procedents de l'aqüífer granític circulen a través de materials neògens i d'aquí descarreguen al mar, també de manera subaquàtica.

El mar és la principal zona de descàrrega natural. Tanmateix, l'aigua subterrània pot ser interceptada i sortir a la superfície a través d'altres descàrregues naturals abans que arribi al mar. Aquest és el cas de les fonts i els rius efluentes. Així, quan la superfície del terreny talla la superfície freàtica de l'aqüífer es forma una font (fig. 2A) i quan la superfície freàtica de l'aqüífer se situa per sobre de la làmina d'aigua d'un riu i hi ha connexió hidràulica entre riu i aqüífer, part de l'aigua d'aquest alimenta el riu. En aquest cas es diu que el riu és efluent (fig. 2A), i és la situació en règim natural de La Tordera.

Descàrregues artificials

Eventualment, en el seu trajecte cap al mar, l'aigua subterrània també pot sortir a la

superfície a través de descàrregues artificials. Aquestes descàrregues tenen lloc mitjançant el que s'anomenen captacions, les quals poden ser verticals o horitzontals.

Les captacions verticals són els pous, dels quals n'hi ha de molts tipus, encara en el cas del Maresme se'n poden distingir dos tipus: a) Els construïts manualment (fig. 9A, B), que són de gran diàmetre (sovint superior a 1 m), de profunditat limitada (sovint no molts metres més enllà de la profunditat a què es troba la superfície freàtica) i suportats per totxana o altres materials de construcció, i b) els construïts per mitjans mecànics (fig. 9C), que són de diàmetre menor que els anteriors (sovint no més de 0,5 m), de gran profunditat (en el Maresme poden depassar els 100 m (per tant arriben a perforar el granit fracturat no meteoritzat) i suportats per canonada de ferro. En l'eix de les rieres és on els gruixos de l'aqüífer són mes grans i on la roca és més permeable. Aquestes zones són les més apropiades per obtenir els cabals més grans mitjançant captacions verticals (fig. 7E), ja que són les zones més transmissives de l'aqüífer (fig. 10A).

Les captacions horitzontals són de molts tipus, però totes elles es caracteritzen per penetrar dintre de l'aqüífer de forma horitzontal o lleugerament inclinada. Quan no és possible construir la captació en una riera, s'ha d'optar per aprofitar l'aigua subterrània d'altres parts de l'aqüífer situades a una distància d'aquella que pot ser major o menor. En el cas del Maresme, en aquestes zones l'aqüífer sol presentar un menor gruix, atès que l'aqüífer és de tipus lliure, i fins i tot pot presentar una menor permeabilitat (es diu que l'aqüífer és menys transmissiu). El cabal d'extracció d'una captació està relacionat amb la transmissibilitat. Una manera d'incrementar-la de forma artificial és mitjançant una captació horitzontal, com ara una mina d'aigua, que és un sistema que tradicionalment ha estat freqüent en el Maresme (figs. 9D i 10B). Tanmateix, en ocasions es





Figura 9. Diferents captacions d'aigua subterrània localitzades a la riera de Sant Pol. A i B, antic pou "La Bomba", pou de gran diàmetre construït manualment i actualment abandonat (al fons s'aprecia el reflex de l'aigua). C, pou de petit diàmetre construït per mitjans mecànics i dotat de bomba submergida elèctrica per a l'extracció de l'aigua subterrània. D, mina d'aigua en el sauló del marge esquerre de la riera de Sant Pol, tallada per les excavacions d'una obra (Autor: J.M. Carmona).

construeixen mines d'aigua prop de la riera per tal obtenir cabals superiors als que s'obtidrien amb un únic pou, i en ocasions els pous poden tenir a certes profunditats ramals de mines que poden arribar a una determinada distància de l'eix del pou per tal d'incrementar la transmissivitat aprofitable en el pou.

Impactes de les extraccions sobre els aqüífers

Els aqüífers poden estar sotmesos a pressions que els poden afectar des del punt de vista quantitatiu. Aquestes pressions es manifesten de diverses maneres, com ara mitjançant una disminució generalitzada i de caràcter regional dels nivells piezomètrics, cosa que desencadena una sèrie d'efectes adversos. Així, aquest procés de davallada de nivells comporta una disminució dels cabals drenats a través de les descàrregues

naturals, com ara per exemple a través de fonts (fig. 11A,B) i a través de rius i rieres. Per altra banda, aquesta davallada de nivells va associada a una disminució del gruix saturat dels aqüífers lliures com a conseqüència de l'increment de l'ús de la *reserva d'un cop* (fig. 11B). La disminució de cabals que això comporta, provoca la reducció de l'eficiència de mines i pous de poca profunditat. Si la davallada de nivells continua, pot arribar a produir-se l'assecamment de fonts (fig. 11C) i mines. Pel que fa a les rambles o les rieres en què només hi circula aigua esporàdicament, aquestes no es veuen afectades, ja que no es dona connexió hidràulica amb l'aqüífer que hi pugui existir en el subsòl. En contrast, la davallada de nivells produïda per les extraccions d'aigües subterrànies sí que pot afectar de manera progressiva els rius o rieres que presenten un règim continu de cabals. En aquest cas, es produeix una dismi-



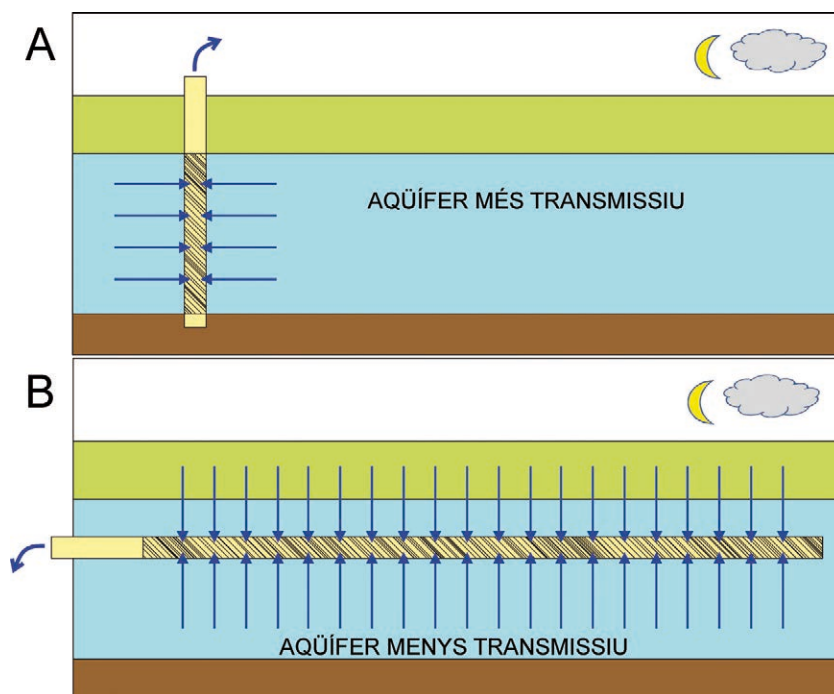


Figura 10. Esquema de funcionament de captacions d'aigua subterrània per aprofitament de recursos hídrics. A, captació vertical (pou), més adequada en general per a les zones on els aquífers són més transmissius. B, captació horitzontal (mina), més adequada en general per a les zones on els aquífers són menys transmissius (Autor: J.M. Carmona).

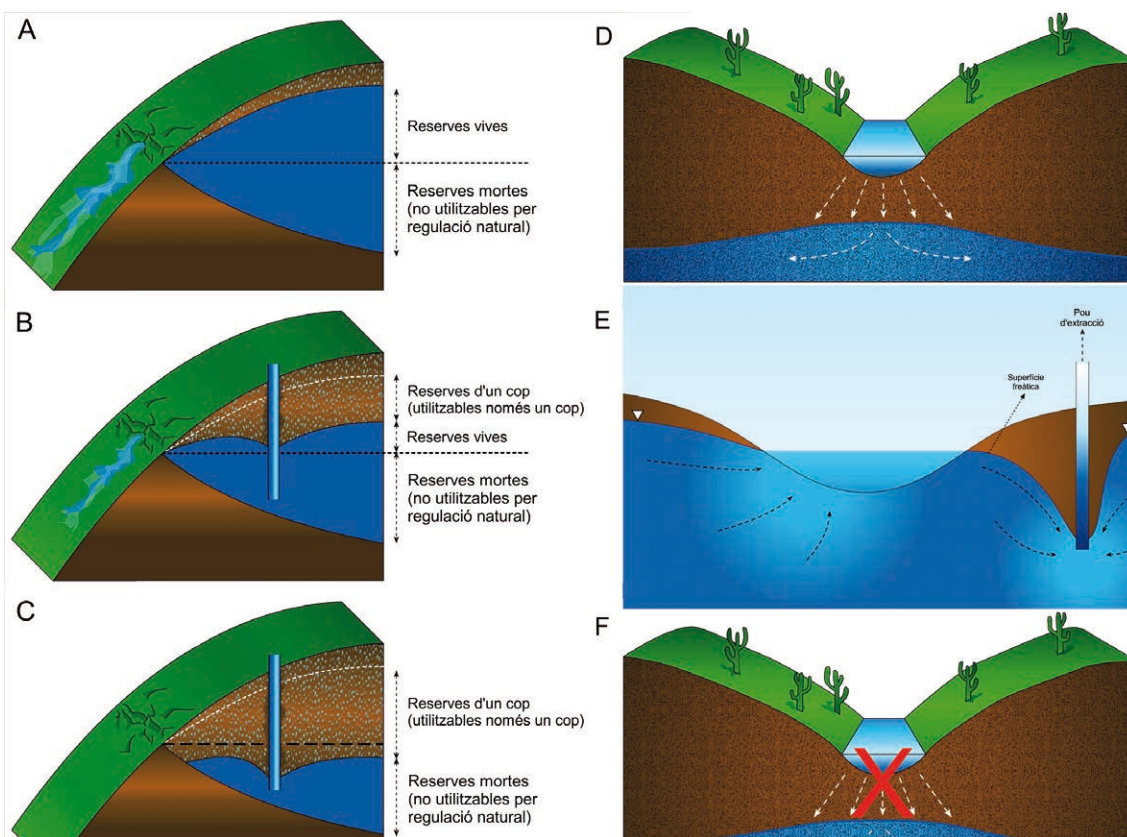


Figura 11. A-E, exemples d'impactes produïts per la davallada de nivells piezomètrics produïda per l'extracció d'aigües subterrànies. A, esquema de funcionament d'una font. B, afectació al cabal drenat per una font. C, assecament de fonts. D, desconnexió hidràulica entre un curs fluvial i l'aquífer. E, recàrrega induïda. F, impermeabilització del llit d'una riera o d'una rambla seca (Autor: J.M. Carmona).



nució progressiva dels cabals a partir de les zones de capçalera que pot arribar a produir una desconexió hidràulica amb l'aqüífer (fig. 11D). El tram fluvial s'asseca i només hi circula l'aigua en moments de precipitacions d'una certa intensitat.

Superposada a la davallada generalitzada de nivells provocada per les extraccions d'aigües subterrànies, també es dona una depressió de nivells al voltant de cada captació. Aquesta depressió s'anomena con de descensos o de bombament, i és anàloga a l'embut que es forma en una pica quan està desguassant l'aigua que conté. La profunditat del con de descensos en un pou depèn, entre d'altres factors, del cabal d'extracció, i és més profunda quan més gran és el cabal. Quan un pou se situa a prop d'un curs fluvial, com ara La Tordera, i el cabal de bombament supera un determinat límit, el con se situa per sota de la làmina d'aigua del riu. Això significa que en aquesta situació l'altura piezomètrica en el riu és superior a la de l'aqüífer en la zona d'influència del pou. Atès que l'aigua subterrània es desplaça des de les zones de més altura piezomètrica a les de menor altura, a partir d'aquell moment el riu comença a recarregar l'aqüífer. Aquest fenomen s'anomena recàrrega induïda (fig. 11E) i comporta una disminució del cabal d'aigua que circula pel curs fluvial. Quan les captacions són molt nombroses es pot produir l'assecamment total de molts trams del curs fluvial. La recàrrega induïda pot portar l'agreujant que si el riu està contaminat, l'aqüífer es veurà afectat per aquesta contaminació.

Per altre costat, en el cas de les zones de costa, on té lloc la descàrrega natural al mar per tancar el cicle hidrològic (fig. 2B), i especialment on es dona l'existència de planes litorals, el conjunt d'extraccions que es realitzen provoca la disminució de cabals naturals

que descarreguen al mar, cosa que dona lloc a un trencament de l'equilibri que hi ha entre el cabal d'aigua salada que, de manera natural, penetra dintre de l'aqüífer (atès que l'aigua salada és més densa que la dolça) i el cabal d'aigua dolça que subaquàticament és drenat al mar. El resultat és l'avenç del peu del tascó marí (fig. 2B), el que suposa una penetració de l'aigua salada dintre de l'aqüífer (fig. 12). Aquesta penetració, que és més gran que la penetració natural, és el que s'anomena intrusió marina. És important destacar però, que qualsevol extracció que es realitza en un aqüífer, per petita que sigui, provoca una disminució del cabal natural drenat al mar, i per tant un trencament de l'equilibri i una penetració del peu del tascó. Es tracta d'arribar a un equilibri sostenible entre els cabals totals extrets i l'avenç del peu del tascó marí. De fet la variació de la recàrrega natural (ja sigui anual o estacional) provoca una oscil·lació en el cabal que és drenat al mar i un moviment d'avenç-retrocés natural del peu del tascó. En relació amb això, la impermeabilització de rieres, que impedeix la infiltració d'aigües d'avinguda en els aqüífers costaners (fig. 11F), suposa també una disminució del cabal d'aigua subterrània que drena al mar. La impermeabilització de la riera se suma conseqüentment a l'efecte que provoquen les extraccions d'aigua subterrània pel que fa a l'afavoriment del fenomen de la intrusió marina en aquests aqüífers.

L'estat quantitatiu i qualitatiu de les aigües subterrànies del Maresme

Segons la secció de consulta de dades de la pàgina web de l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA, 2014), l'estat quantitatiu de la massa d'aigua 18 (aquífer de naturalesa granítica del Maresme, fig. 6) a data del 2012 era considerat com a bo (amb dades

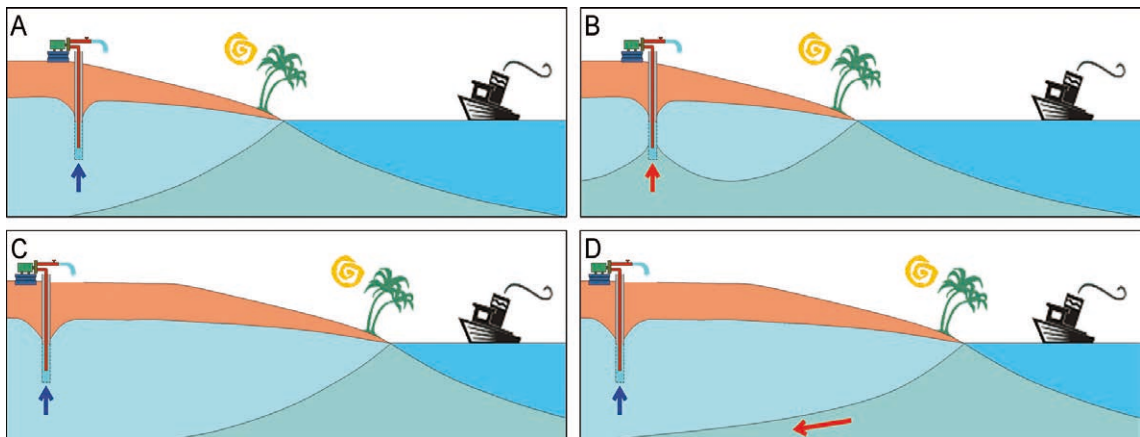


Figura 12. Avenç del tascó salí en un aqüífer costaner i penetració dintre de l'aqüífer. A i B, amb pous situats per sobre de la interfase aigua-dolça, aigua-salada. C i D, amb pous situats aigües amunt del peu del tascó salí (fig. 2B) (Autor: J.M. Carmona).





Figura 13. A, B i C, abocament d'olis industrials a tocar de la riera de Sant Pol. S'observa com aquests compostos s'infiltringen en el subsòl. D, abocament de quitrans directament a la riera de Sant Pol (Autor: J.M. Carmona).

de 2007 a 2012). En el document d'observacions que acompanya l'esmentat sistema de consulta s'indica que de manera local es dona una lleugera recuperació dels nivells piezomètrics i que al llarg del període 2007-2012 la tendència va ser estable. Pel que fa a l'estat químic, aquest ha estat qualificat com a dolent per tot el període considerat, principalment a causa de l'elevada presència de nitrats d'origen agrícola en la major part de la superfície (només el 31 % de la massa no es veu afectada). Destaca el fet que el 96,96 % de la massa aconsegueix l'indicador de contingut en clorurs (com a indicador d'intrusió marina). Tot i així, es donen també contaminacions puntuals que poden ser importants per l'afectació que suposen, com ara la contaminació per solvents clorats que es va produir a la riera de Sant Pol i que es tractarà dintre del següent apartat d'aquest treball dedicat a la contaminació de les aigües subterrànies.

Per la seva banda, l'estat quantitatiu de la massa d'aigua 35 (al·luvials i delta de La Tordera, fig. 6), durant el període assenyalat, ha estat qualificat per l'ACA com a bo, atesa l'estabilització generalitzada de nivells piezomètrics que hi ha hagut (en general per sobre del nivell del mar), encara que s'han enregistrat oscil·lacions interanuals de més de 12 m,

sobretot a l'aquífer profund. Pel que fa a l'estat qualitatiu, aquest també ha estat considerat com a bo. Destaca en aquest sentit que el 94,48% de la superfície aconsegueix l'indicador de contingut en clorurs i que el 93,57% de la massa no es veu afectada per la contaminació en nitrats.

La contaminació de les aigües subterrànies del Maresme. L'exemple de contaminació de l'aquífer de la riera de Sant Pol

Es produeix contaminació de l'aigua quan s'hi incorporen en proporcions superiors a les normals, substàncies o formes d'energia alienes a la seva composició natural, de manera que es restringeixen les seves possibilitats d'ús. Diferents episodis de contaminació de les aigües subterrànies del Maresme han tingut lloc en el passat. A més de l'esmentada contaminació per nitrats vinculada a pràctiques agrícoles i ramaderes, també s'han produït altres episodis com a conseqüència d'un disseny i gestió no del tot adequats d'abocadors de residus sòlids urbans (Bisbal *et al.*, 1996; Carmona *et al.*, 2003). En altres casos s'han produït com a conseqüència d'accions negligents o clarament delictives, com ara els abocaments directes al medi de substàncies contaminants que



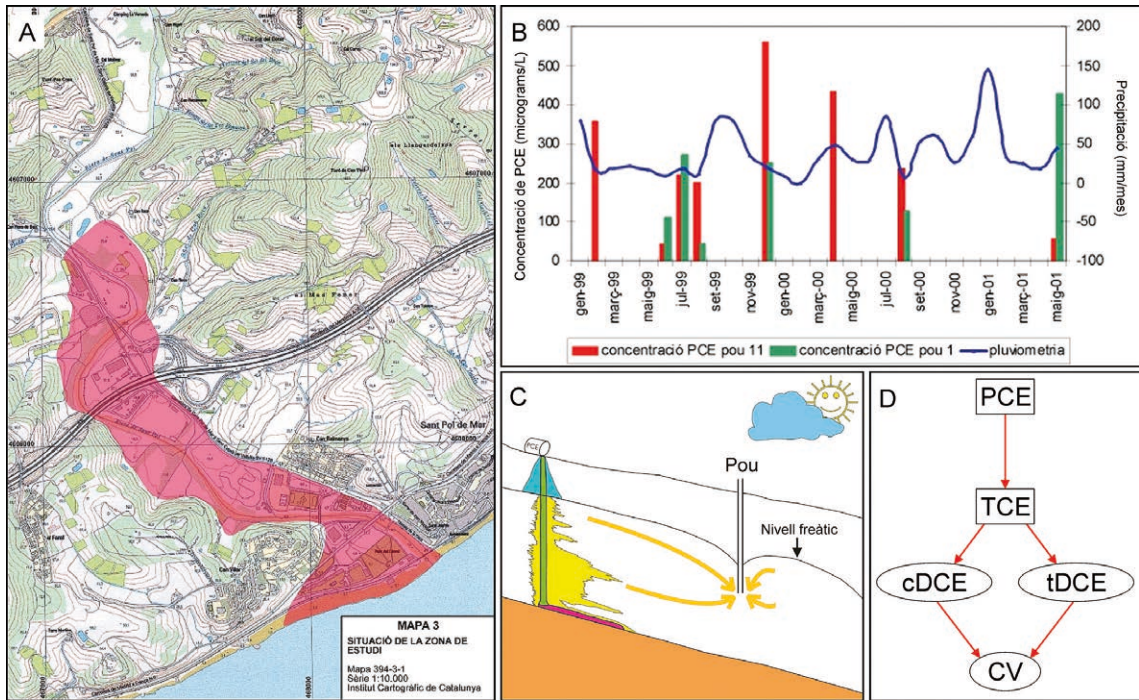


Figura 14. A, superfície de l'aquífer de la riera de Sant Pol que es va contaminar per solvents clorats. B, evolució de les concentracions de PCE i precipitació durant el període 1999-2001. C, esquema d'un vessament de PCE i infiltració com a fase lliure a través del terreny (verd) fins arribar a la base de l'aquífer (vermell); fracció volatilitzada en la zona no saturada (blau); fracció dissolta en l'aigua subterrània que circula (groc). L'aigua contaminada és captada per un pou (fletxes). D, cadena de degradació de PCE a TCE, i d'aquest a cis i trans-dicloroetilè (cDCE i tDCE), i d'aquests a clorur de vinil (CV) (Autor: J.M. Carmona).

es mostren a la figura 13. Es tracta d'exemples d'abocaments que indiquen l'elevada vulnerabilitat de l'aquífer lliure que hi ha a sota, ja que no hi ha cap barrera entre la superfície del terreny i la superfície freàtica, sota la qual es troben les aigües subterrànies.

Un exemple de contaminació al Maresme, que va obligar a clausurar els pous d'abastament municipal per a la població, és l'aquífer al·luvial de la riera de Sant Pol. La part baixa d'aquest aquífer es va contaminar per solvents organoclorats (fig. 14A), percloroetilè i tricloroetilè (PCE i TCE, respectivament). El valor límit de la normativa de potabilitat per a la suma de valors de PCE i TCE és de 10 µg/L (Directiva 1998/83/CE i Reial Decret 140/2003). En aquest aquífer es van arribar a enregistrar 580 µg/L de PCE al 1999 (fig. 14B), i al 2006 encara s'enregistren 60 µg/L en aquest compost. Aquests contaminants són hidrocarburs líquids més densos que l'aigua i volàtils (fig. 14C). Tot i que són poc solubles en aigua, són cancerígens per sobre del valor marcat per la normativa de potabilitat. Només un litre de PCE o TCE pot contaminar més de 150 milions de litres d'aigua neta. Tot i que es poden degradar (fig. 14D), poden arribar a ser molt recalcitrants i perdurar per dècades en l'aquífer si les condicions de degradació no

són les adequades, tal i com va succeir en aquest cas (Carmona *et al.*, 2002, 2003), i no es prenen mesures de remediació.

Les manifestacions geotermals al Maresme

L'origen de les aigües termals de Caldetes i d'Arenys de Mar

Les dades hidroquímiques i isotòpiques de la instal·lació "Bany públic de Caldes d'Estrac" (Caldetes) i del "Balneari Titus" (Arenys de Mar) mostren una temperatura constant de 39°C i 37°C, respectivament. La seva composició isotòpica mostra que són aigües molt lleugeres, amb valors de δ¹⁸O i δ²H de -7,7‰ i -40,2‰, respectivament. Aquests valors són completament diferents dels que corresponen a l'aigua de mar, δ¹⁸O i δ²H de 0,0‰ en ambdós isòtops. A més, les respectives relacions iòniques rMg/rCa són també molt diferents (0,0 en el cas de l'aigua de mar i entre 0,05 i 0,2 per les aigües geotermals estudiades). Tot això indica que, a pesar que el seu caràcter hidroquímic dominant és clorurat sòdic i a pesar de la seva proximitat al mar, el seu origen no es troba en relació amb l'aigua de mar. El fet que la composició isotòpica de les aigües geotermals sigui lleugera indica que es tracta



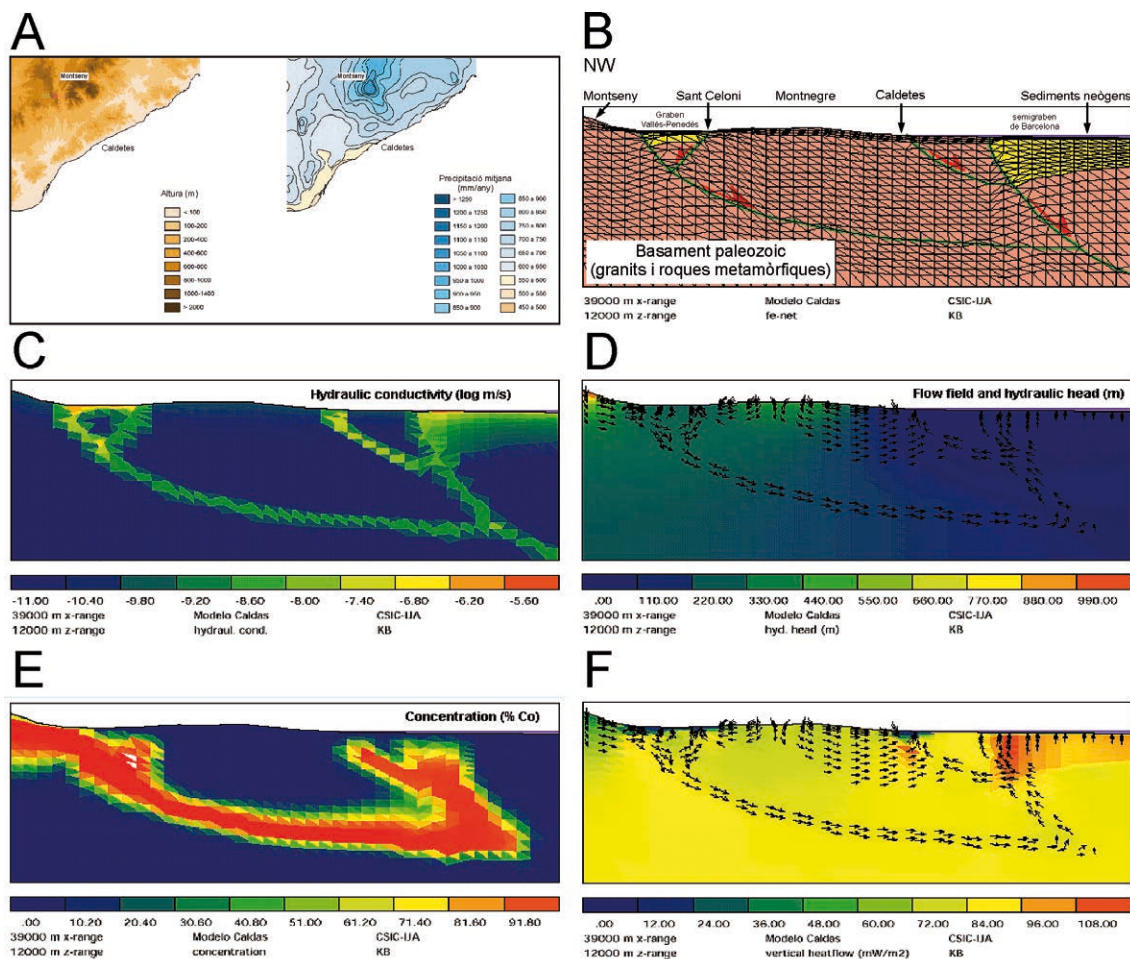


Figura 15. A, mapes topogràfic i pluviomètric del sector septentrional de les Serralades Costaneres Catalanes. B, malla d'elements finits del model numèric construït. C, distribució de la permeabilitat (conductivitat hidràulica, log m/s) en la secció modelada. D, resultats del model: camp de flux (vector velocitat) i nivells piezomètrics (m). E, resultats del model: concentracions de clorur (en percentatge de la concentració inicial, % C_0). F, resultats del model: camp de flux (vector velocitat) i flux vertical de calor (mW/m²).

d'aigües d'origen meteòric recarregades a una altura molt per sobre del nivell del mar (entre 550 m i 650 m, fig. 15). Pel cabal conjunt drenat (al voltant de 150 L/min) i per la precipitació mitjana anual de la zona del Montnegre situada dintre d'aquest rang d'altures, la zona de recàrrega del sistema no es pot localitzar en aquest massís (fig. 15A). Totes aquestes dades indiquen l'existència d'un sistema de flux d'aigües geotermals a gran escala i a gran profunditat amb recàrrega al massís del Montseny (Carmona *et al.*, 2000). La circulació d'aquestes aigües al llarg de les principals zones de falles, que actuen com a vies preferencials de flux, explica les característiques hidroquímiques, isotòpiques i tèrmiques d'aquestes aigües. Per testar aquesta hipòtesi es va construir un model numèric d'elements finits que simula el flux d'aigua i el transport de clorurs i de calor al llarg d'una secció geològica de 39 km d'amplada que incorpora les principals unitats hidroestratigràfiques des del massís del Montseny (fig. 3) fins més en-

llà de la zona de Caldetes-Arenys, dintre del mar (fig. 15B,C-F). La secció incorpora les principals falles extensionals del graben del Vallès-Penedès i del semigraben de Barcelona (determinades a partir de seccions sísmiques). El model mostra que el flux d'aigua (fig. 15D) i el transport de clorurs fins a la zona de Caldetes-Arenys a través del sistema de falles és físicament possible (fig. 15E). Els clorurs procedeixen de les parts més profundes del graben del Vallès, on hi hauria materials triàsics evaporítics, tal i com passa també amb les aigües geotermals de Caldes de Montbui (Carmona *et al.*, 2000). Igual que en el cas dels clorurs, el model mostra també que el transport de calor és també possible (fig. 15F). Al llarg de les falles subverticals s'observen a les zones costaneres fluxos verticals ascendents d'aigua subterrània geotermal que transporten elevats fluxos de calor. En relació amb això, a la zona de Sant Pol de Mar hem observat a l'escala de camp en pous de més de 150 m temperatures més elevades que en els pous



de menor profunditat. Per altra banda, el model indica que els temps de residència de les aigües geotermals han de ser molt llargs, de l'ordre de desenes de milers d'anys (Carmona *et al.*, 2000). Aquesta hipòtesi, però, encara ha de ser verificada.

Altres manifestacions de l'activitat geotermal al Maresme. Les fonts picants

Una font picant, com ara la font picant de Burriac, a Argentona, és una manifestació en superfície de l'existència de condicions geotermals en profunditat. Són picants perquè contenen elevades concentracions de CO_2 en solució. L'origen d'aquest CO_2 està relacionat amb el caràcter freqüentment bicarbonatà càlcic de les aigües subterrànies. Quan aquestes aigües circulen a grans profunditats a través de falles (en el cas del Maresme a més de 10 km) s'escalfen a causa del calor intern que dissipa el planeta i assoleixen elevades temperatures. A aquestes temperatures els gasos són menys solubles, però les aigües geotermals es troben en un sistema tancat a gran profunditat que impedeix la volatilització d'aquests gasos. Tanmateix, quan les aigües puguen a la superfície, el sistema deixa d'estar tancat i part dels bicarbonats passen a CO_2 , que es volatilitza i ascendeix. Quan aquest gas puja entra en contacte amb les aigües subterrànies més fredes dels aqüífers més superficials. Els gasos a baixa temperatura són molt solubles en aigua, de manera que el CO_2 es dissol en l'aigua dels aqüífers superficials i dona lloc a àcid carbònic (H_2CO_3) que immediatament es dissocia en 2H^+ (que li dona acidesa) i HCO_3^{2-} . Quan aquesta aigua surt a través de les fonts es volatilitza parcialment CO_2 , i el seu característic tast picant és causat pel punt d'acidesa prèviament adquirit.

Bibliografia

- ACA (2013). Agència Catalana de l'Aigua Masses d'aigua. Consulta IMPRESS. (http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca?_nfpb=true&_pageLabel=P1223054461208201423967).
- ACA (2014). (http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca?_nfpb=true&_pageLabel=P3800245291211883042687).
- Bisbal, E., Carmona, J.M. i Font, X. (1996). *Efectes ambientals dels abocadors de residus sòlids urbans a la zona de l'Alt Maresme*. 3es Jornades Naturalistes del Maresme, Arenys de Mar.
- Carmona, J.M., Bitzer, K., López, E. i Bouazza, M. (2000). Isotopic composition and origin of geothermal waters at Caldetes (Maresme-Barcelona). *Journal of Geochemical Exploration*, 69-70: 441-447.
- Carmona, J.M., Font, X., Viladevall, M. i Puigserver, D. (2003). Monitoring groundwater pollution from a landfill in Canet de Mar (Barcelona Spain). *21st International Geochemical Environmental Symposium (IGES). Abstracts volume. Environmental Geochemistry*, p. 27.
- Carmona, J.M., Rivero, L., Puigserver, D., Font, X. i Viladevall, M. (2003). DNAPL groundwater pollution in the Riera de Sant Pol alluvial aquifer (Barcelona Spain). *21st International Geochemical Environmental Symposium (IGES). Abstracts volume. Environmental Geochemistry*, p. 62.
- Carmona, J.M., Soler, R., Escuder, R. i Rivero, L. (2002). *Les aigües subterrànies de la riera de Sant Pol. Necessitat de protegir-les*. VI Jornades Naturalistes del Maresme. Cabriels.
- Fetter, C.W. (1980). *Applied Hydrogeology*. Upper Saddle River (NJ). Prentice Hall.

