

Josep Arnaldos, Rosa Barba, Jordi Berenguer, Jordi Bruno, Antoni Caballero, Lucila Candela, Salvador Cardona, Jesús Carrera, Enric Carrera, Ramon Carreras, Joaquim Casal, Josep M. Casas, Ignasi Casas, Jordi Corominas, Lázaro Cremades, Martí Crespi, Domènec Cucurull, Joan A. Cusidó, Emilio Custodio, Francesc Daumal, Joan de Pablo, Germán de Melo, Luciano del Álamo, Josep Dolz, Josep Font, Miguel J. García, Santiago Gassó, Margarita González, Antoni Grau, Manuel Herce, Josep Izquierdo, Ricard Jaime, Jaume Jorba, Joan Jorge, Rosa Junyent, Luis Martínez, Fructuós Mañà, Ricard Mari, M. Teresa Mas, Josep Mata, Josep Montserrat, Rafael Mujeriego, Andrés Navarro, Pere Pagès, Félix Pérez, Agustí Poch, Lluís Puigjaner, Fernando Ramos, Carles Riba, M. Carmen Riva, Carles Sala, Agustín Sánchez-Arcilla, Miquel Sánchez, Ramon Sans, Anna Sastre, Rafael Serra, Manuel A. Soler, Montserrat Soliva, Carles Sumpsi, Salvador Tarragó, Antonio L. Torres, Enric Vázquez, Claret Verdú, Luis Virto, Josep Xercavins

A cura d'Antonio L. Torres i Ivan Capdevila

# Medi ambient i tecnologia

Guia ambiental de la UPC

## 5 El sòl i les aigües subterrànies

Lucila Candela Lledó, Dept. d'Enginyeria del Terreny i Cartogràfica/Fundació CIHS  
Emilio Custodio Gimena, Dept. d'Enginyeria del Terreny i Cartogràfica/Fundació CIHS<sup>1</sup>  
Andrés F. Navarro Flores, Dept. de Mecànica de Fluids

### 5.1 El cicle de l'aigua i les aigües subterrànies

El cicle de l'aigua (cicle hidrològic) és la transferència contínua d'aigua entre diferents estaments o fases (oceà, atmosfera, superfície continental, gels, sòls i subsòl), essent la quantitat total pràcticament constant. El moviment de l'aigua ve donat per l'aportació d'energia solar (i en molt menor grau per la calor interior de la Terra) i l'efecte de la gravetat. El temps mitjà de permanència de l'aigua en cada fase és molt variable, des de pocs dies a l'atmosfera i rius fins a molts anys —fins i tot milers d'anys— al subsòl.

Les aigües del subsòl són les aigües subterrànies, que ocupen els porus i les fissures de les roques i que hi circulen lentament. Aquestes suposen el 0,75% de tota l'aigua de la Terra i el 30% de l'aigua dolça, mentre que les aigües superficials són sols el 0,008% del total d'aigua (el 0,0002% als rius; la resta als llacs) i el 0,30% de l'aigua dolça (0,006% als rius). D'aquí la importància de les aigües subterrànies com a reserva i com a recurs d'aigua dolça, amb les característiques addicionals de la lenta circulació (de mil·límetres a metres per dia) i l'àmplia ubiqüitat. A més, tenen un paper essencial en els processos geològics i biològics.

Les aigües subterrànies interaccionen constantment amb les altres fases del cicle hidrològic (Fig. 5.1). Així, l'aigua de pluja que s'infiltra al terreny, després de tornar en part a l'atmosfera com a evapotranspiració (transpiració per les plantes i evaporació dels terrenys), s'hi endinsa i hi produeix la recàrrega. També les aigües superficials de torrents, rius i llacs es poden infiltrar al terreny en condicions apropiades, i produir-hi recàrrega. Les aigües subterrànies surten a l'exterior i mantenen el cabal de manantials (fonts) i rius, o el nivell d'aigua de certs llacs, o bé descarreguen a la costa, al mar, de forma difusa o concentrada en surgències; també pot ser evapotranspirada a l'atmosfera directament a aiguamolls i àrees amb freatofites (plantes que viuen en sòls negats o que reben humitat per ascens d'aigua subterrània).

<sup>1</sup> Actualment (1998) Director General de l'Institut Tecnològic Geomineri de Espanya.

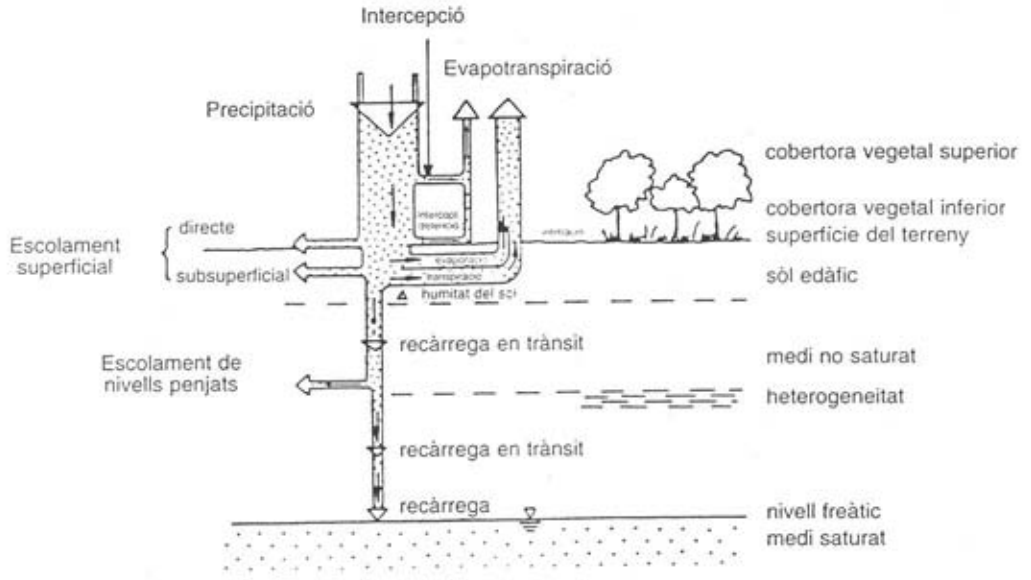


Fig. 5.1 Esquema i representació de l'aportació pluviomètrica, l'escolament i la recàrrega

A les interrelacions naturals —incloent-hi les transferències dins el terreny entre unes formacions i d'altres—, s'hi sumen les artificials, tant d'extracció (bombeigs de pous, drenatges, interceptació amb galeries i mines) com de recàrrega (infiltració d'excedents de reg, fuites de conduccions, embassaments i dipòsits, vessaments...).

## 5.2 L'aigua al terreny

L'aigua subterrània ocupa els porus i les fissures existents als materials que formen el terreny, fins a fondàries que poden arribar a milers de metres. Sota la superfície del terreny coexisteixen aire i aigua dins els porus i les fissures i l'aigua està subjecta a esforços capil·lars que fan que la seva pressió efectiva sigui inferior a l'atmosfèrica (Fig. 5.2). És la zona no saturada o vadosa, de la qual una part especial és la superior, que constitueix el sòl edàfic (allà on viuen les plantes i estenen les seves arrels). A partir de certa fondària (de centímetres a desenes de metres) l'aigua ocupa tot el volum de porus i fissures; el límit superior d'aquesta zona saturada d'aigua és el nivell freàtic, on la pressió de l'aigua és igual a l'atmosfèrica (Fig. 5.2), mentre que per sota la pressió creix hidrostàticament. Les forces capil·lars poden elevar la zona saturada una mica per sobre del nivell freàtic i formar la franja capil·lar, on l'aigua està a pressió menor que l'atmosfèrica.

Les plantes poden extreure l'aigua de la zona no saturada allà on tenen arrels, i ho fan per osmosi, venent les pressions negatives (per sota de l'atmosfèrica), fins un cert límit, anomenat punt d'emmesteïment o marciment.

Hi ha un cert contingut d'humitat màxim al terreny no saturat sota el qual l'aigua és retinguda contra les forces de la gravetat: és la capacitat de camp o humitat de retenció. Per sobre d'aquest valor l'aigua circula verticalment cap avall com a recàrrega en trànsit cap al nivell freàtic.

A la zona saturada l'aigua té a cada lloc una determinada pressió, que genera un potencial hidràulic,

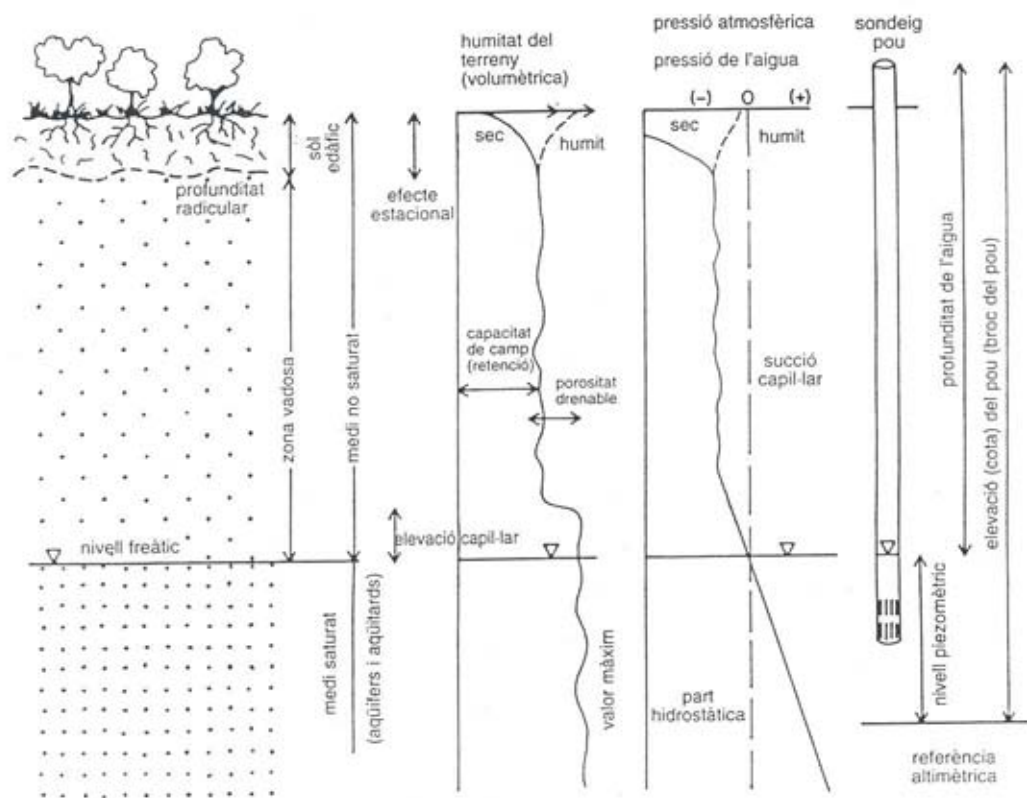
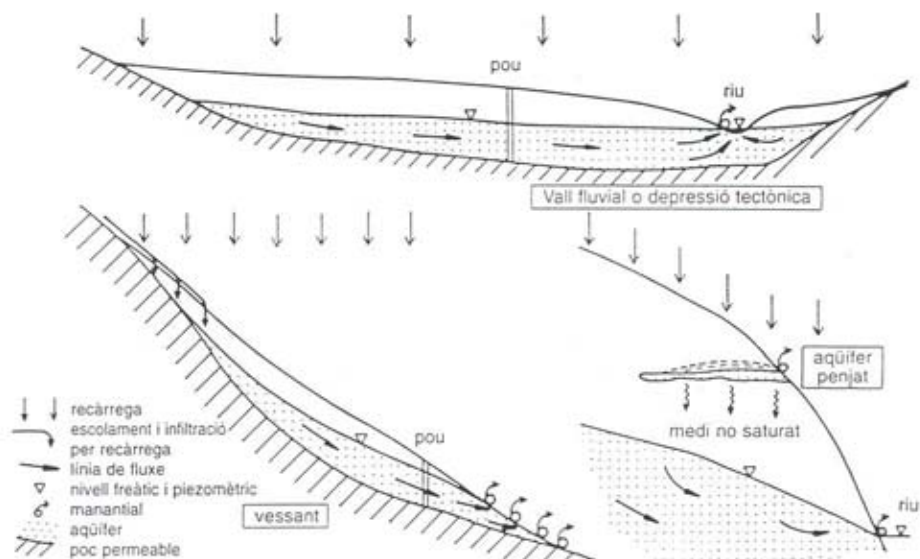


Fig. 5.2 Humitat del terreny, pressió de l'aigua i nivell piezomètric en un perfil del terreny

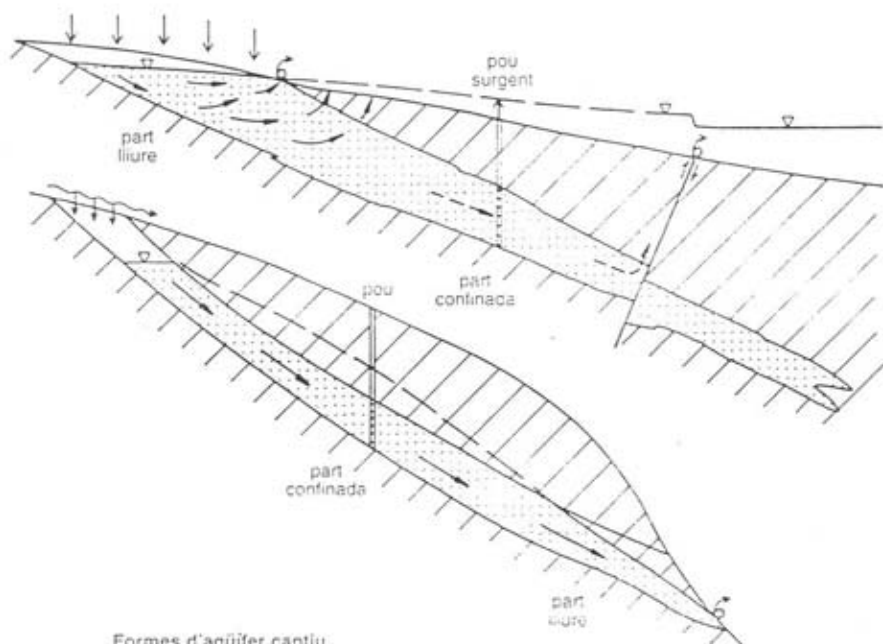
que és l'energia per unitat de massa causada per la pressió més la causada per l'alçària sobre una certa referència (el terme d'energia de velocitat és negligible). L'aigua subterrània es mou en sentit contrari al gradient de potencial hidràulic. Quan la densitat de l'aigua al medi saturat és constant, el potencial hidràulic es pot expressar com l'alçària sobre la referència altitudinal d'una columna d'aquesta aigua que equilibri la pressió al punt considerat (Figura 5.2): és el nivell piezomètric. Al nivell freàtic el potencial hidràulic és igual a la seva alçària.

Els dos paràmetres principals per descriure el moviment de l'aigua subterrània al medi saturat són la porositat i la permeabilitat. La porositat és el volum de porus i fissures en un volum unitari del terreny, i pot variar entre el 20% i 40% en medis no consolidats, però pot ser molt més petita quan es tracta de roques dures. La permeabilitat o conductivitat hidràulica és el coeficient que relaciona el cabal circulant amb el gradient hidràulic segons la llei de Darcy.

L'aigua subterrània abans d'arribar al medi saturat ha de passar pel medi no saturat. L'aigua que hi entra per la superfície, després de retreure l'evapotranspiració, desplaça cap avall tota l'aigua continguda al medi no saturat, i fa entrar al medi saturat la que hi havia just a sobre del nivell freàtic. Aquest procés, dit de flux de pistó, és sovint una molt raonable aproximació macroscòpica de la realitat. Els temps de trànsit poden variar i ser molt ràpids, fins a situacions en què les aigües que actualment arriben al medi saturat provenen de pluges de fa molt temps enrere, anys i fins i tot milers d'anys.



Formes d'aqüífer lliure (freàtic)



Formes d'aqüífer captiu (confinat) i semiconfinat

Fig. 5.3 Formes d'aqüífer lliure (freàtic) i captiu (confinat)

Això no s'ha de confondre amb el fet que després d'un període de pluges s'observi una pujada del nivell de l'aigua; aquest és un efecte hidràulic, no pas de transferència d'aigua. L'aigua que hi entra és la primera de la cua i la que acaba d'arribar-hi roman l'última de la cua.

L'aigua subterrània pot ser captada directament als seus punts de descàrrega natural (brolladors i rius) o forçant-ne la concentració en un lloc en crear artificialment allí una disminució del potencial hidràulic, en general mitjançant un pou o sondeig d'on l'aigua és bombejada. La capacitat de mobilitzar l'aigua cap un lloc depèn de la depressió piezomètrica produïda i del producte de la permeabilitat pel gruix de la formació permeable, que és la transmissivitat.

Quan la transmissivitat de la zona saturada d'una formació permet mobilitzar quantitats d'aigua d'interès pràctic (econòmic), es parla d'un aquífer. Si la quantitat directament mobilitzada no és d'interès, es parla d'un aquífer (medi semipermeable), mentre que si aquestes quantitats són mínimes, es parla d'un aquíclode o medi impermeable a efectes pràctics. Els jaciments de petroli tenen sovint l'origen en aquífers i aquíclodes. Quan la pressió al límit superior d'un aquífer és més gran que l'atmosfèrica, es diu que està confinat (Fig. 5.3), mentre que si és igual a l'atmosfèrica l'aquífer és designat com a freàtic o lliure.

A la realitat es troben formacions saturades molt diferents superposades i en contacte lateral, que conjuntament amb les zones no saturades corresponents formen els sistemes aquífers. En aquests la recàrrega circula preferentment verticalment pel medi no saturat i pels aquífers situats entre aquífers, i dominantment de forma horitzontal pels aquífers, cercant els punts de descàrrega en llocs topogràficament baixos, ja sigui directament, a través de discontinuïtats del terreny (fractures i falles obertes), o bé artificialment (pous, sondeigs, drens, galeries, etc.).

### 5.3 Composició química de l'aigua subterrània

La composició química natural de l'aigua subterrània és el resultat de dos processos principals:

- La concentració de les sals atmosfèriques aportades com a aeròsol marí, pols i sals dissoltes a l'aigua de pluja (de l'aigua superficial que s'infiltra al terreny) a causa de l'evapotranspiració.
- La interacció de l'aigua de recàrrega amb els minerals del terreny.

En general, els minerals no són solubles, però es poden hidrolitzar per l'efecte del  $\text{CO}_2$  (diòxid de carboni). El  $\text{CO}_2$  passa de l'aire del sòl edàfic a l'aigua que s'infiltra (hi és normalment a pressió parcial de 10 a 100 vegades la de l'atmosfera a causa de l'acció de les plantes i els microbis del sòl); així, el  $\text{CO}_2$  es mineralitza com a ió bicarbonat i incorpora els cations mòbils de la roca que es meteoritza (principalment Ca, Mg, Na i K); en àrees volcàniques o amb intrusions magmàtiques recents, s'hi afegeix l'aportació de  $\text{CO}_2$  profund i aleshores l'alteració de la roca es produeix en fondària. També l'oxigen dissolt a l'aigua que s'infiltra oxida la matèria orgànica del sòl i les substàncies en estat reduït (com ara Fe-II, que passa a Fe-III). L'acció cessa quan el  $\text{CO}_2$  i/o el  $\text{O}_2$  (oxigen incorporat de l'aire exterior i del sòl) s'han consumit en reaccions químiques, de vegades ràpidament i d'altres molt lentament, segons les circumstàncies locals. A la Fig. 5.4 se'n presenta una descripció sintètica.

En climes humits domina el segon procés (marca litològica), però en climes àrids el primer procés pot ser preponderant (marca climàtica) i resultar-ne una recàrrega força salobre i fins i tot salina. En aquest procés l'ió clorur pràcticament no es modifica químicament ni precipita, ni és generalment aportat per la roca, per la qual cosa és de gran utilitat per identificar els processos de recàrrega.

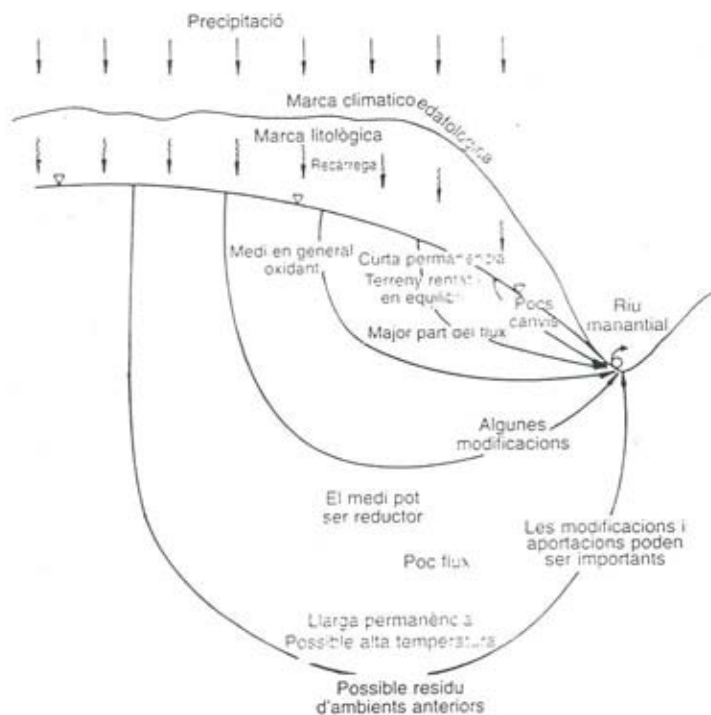
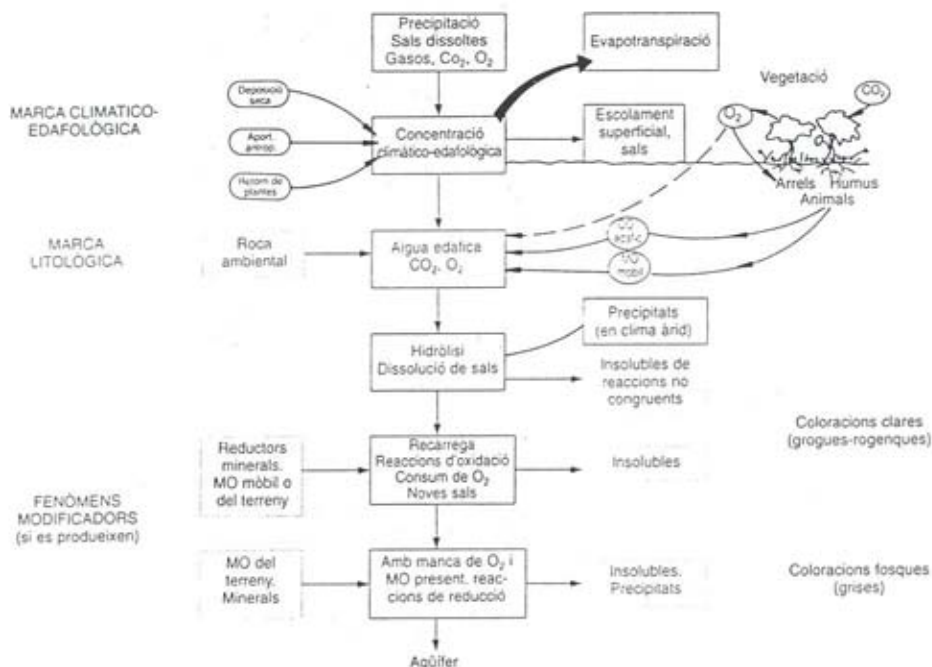


Fig. 5.4 Esquemes de l'evolució hidroquímica més comuna de l'aigua subterrània al terreny. El gràfic superior es refereix al medi no saturat i l'inferior fa referència al medi saturat

L'aigua de pluja i la superficial també aporten una marca isotòpica que caracteritza l'origen de l'aigua i els processos de recàrrega. Això fa referència principalment als isòtops estables de l'aigua (oxigen-18 i deuteri), que es fraccionen (varien les concentracions) en els processos de generació i transport de la humitat atmosfèrica, però que es conserven al terreny. El carboni-13 reflecteix els processos d'incorporació de  $\text{CO}_2$  a l'aigua i de reacció amb els minerals.

També amb la recàrrega s'incorporen certs isòtops radioactius existents a l'atmosfera de forma natural o bé antropogènica, principalment residuals de les proves termonuclears atmosfèriques de dècades passades. Els més útils són el triti (isòtop de l'hidrogen amb període de 12,4 anys) i el carboni-14 (període de 5.760 anys). Una vegada l'aigua és dins del terreny, cessa l'aportació atmosfèrica i el contingut isotòpic decreix per desintegració radioactiva. Una mostra d'aigua és una mescla d'aigües recarregades en diferents temps i llocs. Si es coneix la forma de mescla, a partir de la concentració radioisotòpica és possible deduir el temps mitjà de permanència de l'aigua subterrània en un aquífer.

La composició química de l'aigua subterrània és el resultat dels processos ja comentats, als quals se sumen processos modificadors com ara la precipitació, el bescanvi iònic (principalment catiònic) i reaccions redox. Aquests poden ser intensos quan l'aigua és desplaçada per una altra de composició química diferent (bons exemples es troben als aquífers costaners, a la zona de mescla entre l'aigua dolça continental i l'aigua marina) o si el terreny conté matèria orgànica.

L'activitat humana pot afectar —de vegades intensament— la composició química de la recàrrega i de les aigües subterrànies, introduint-hi característiques (temperatura...), soluts (sals, nitrats...) i substàncies diverses (hidrocarburs, plaguicides, dissolvents halogenats...), tant al terreny com a l'aigua, que poden suposar una degradació de les característiques naturals, de vegades intensa i greu.

Cal esmentar que encara que l'aigua subterrània estigui en estat natural, això no vol dir que tingui una bona qualitat per a tots els usos a què es vulgui destinar. La causa d'això és que aquesta aigua pot ser salobre i salina, amb concentracions inconvenients de certes substàncies naturals (fluor, bor, metalls pesants, com ferro i manganès, dureses elevades, excés d'ions alcalins respecte d'alcalinitat...), i fins i tot en ocasions pot tenir continguts radioactius (radó, principalment) elevats.

Malgrat aquestes situacions, bona part de les aigües subterrànies són dolces, exemptes de gèrmens patògens i virus, en general aptes per a qualsevol ús i directament potables.

#### 5.4 Importància de l'aigua subterrània a la natura i al medi ambient

L'aigua subterrània té un important paper a la natura. L'efecte de la gran reserva d'aigua respecte al flux anual és essencial per mantenir el cabal de base de molts rius i la humitat del sòl a les riberes i àrees baixes. Això explica l'existència de molts boscos de ribera (en galeria), aiguamolls i franges de vegetació permanent.

Als aquífers costaners, l'aigua subterrània descarrega al mar, en bona part de forma difusa al llarg de la costa. Al terreny el flux d'aigua dolça continental llisca sobre l'aigua marina, més densa, i l'empeny tot limitant-ne la penetració. Una part de l'aigua subterrània dolça es pot estendre fins a la costa en aquífers freàtics i crear aiguamolls i zones amb arbres a les depressions litorals. A més a més, allà on es concentra la descàrrega al mar fa disminuir localment la salinitat i crea un hàbitat especial per a algues, crustacis i peixos.

Des d'un altre punt de vista, l'aigua subterrània és un agent geològic de gran importància que explica processos geodinàmics, mobilitza matèria i dona lloc a mineralitzacions i modificacions diagenèti-



ques, tant a fondària moderada (aigües fredes) com a gran profunditat (hidrotermalisme i hidrometa-morfisme).

## 5.5 Explotació de les aigües subterrànies

L'explotació de les aigües subterrànies produeix un important recurs d'aigua dolça per a l'abastament humà i per a les seves necessitats econòmiques, com ara el regadiu, la ramaderia, la indústria i el turisme.

Els avantatges de l'explotació de les aigües subterrànies mitjançant pous, drens i galeries són nombrosos. Cal destacar la freqüent disponibilitat a la vora d'allà on fa falta, amb captació fàcil i adaptable a l'evolució de les necessitats, en general amb una bona qualitat i sense problemes sanitaris biològics —quan hi són, en general és per un mal disseny, estat i operació de les captacions i no pas de l'aqüífer— i amb prou reserves per compensar la menor recàrrega en èpoques seques i per resoldre situacions d'emergència i situacions punta, a més de poder assolir-ne un coneixement progressiu a mesura que se n'incrementa l'explotació.

Però tota explotació comporta efectes, més palesos com més intensa sigui. L'explotació suposa que l'aigua subterrània que fluïa naturalment és pertorbada per aconseguir que esdevingui disponible a les captacions. Així, es produeix una certa davallada progressiva dels nivells freàtics i piezomètrics, del cabal dels brolladors i rius, una reducció d'aiguamolls, el desplaçament d'aigües salines al terreny (tant a la costa com a l'interior del continent) i, així mateix, que l'extracció esdevingui progressivament més cara. Aquests efectes es poden preveure i, per tant, es poden valorar. No són pas "problemes" dissuasius, sinó una característica de l'explotació, que cal i es pot incorporar als estudis tècnics i econòmics.

Altres efectes són de caràcter geotècnic, com la progressiva subsidència (enfonsament lent generalitzat del terreny) a conseqüència de la disminució de la pressió de l'aigua dins de sediments encara poc consolidats, com els que es troben a deltes i rebliments recents de depressions geològiques. També en àrees càrstiques (carbonats amb efectes de dissolució) —o mineres amb galeries abandonades— és possible que s'acceleri l'aparició de col·lapses del terreny.

Malgrat tots aquests problemes, els beneficis de l'explotació de l'aigua subterrània són sovint molt superiors als costos de les correccions i reparacions mediambientals i socials. Així mateix, efectes com els descrits es fan més palesos com més gran és l'explotació, i per tant més gran és el benefici obtingut, una part del qual s'hauria d'emprar per compensar-los. Però hi ha un límit a partir del qual els problemes físics, hidràulics, de qualitat, econòmics, socials i ecològics són excessius. Llavors es pot dir que l'aqüífer o el sistema aquífer és sobreexplotat. Però aquesta és una denominació confusa. Malgrat que s'empra a l'actual Llei d'aigües espanyola, no està definida clarament, i possiblement no es pot fer amb caràcter general. Complica la definició el gran volum de reserva d'aigua associat als aquífers, la relativament petita difusivitat hidràulica (velocitat de propagació de les pertorbacions) i la complexa disposició d'aqüífers i aquítards, que fan que una pertorbació provoqui modificacions dels nivells piezomètrics i cabals durant períodes que duren anys o segles, abans no s'arriba a una nova situació d'equilibri. Això fa que l'observació de descensos continuats de nivells i cabals s'interpreti en el sentit que l'extracció supera a la recàrrega, tot i que realment pot ser que no sigui així. La qüestió encara es complica més quan es considera la qualitat de l'aigua.

Els aquífers costaners són un cas especial, perquè la sortida d'aigua dolça és necessària per limitar la penetració de la falca d'aigua marina i retornar al mar la fracció de mescla que es produeix.

Totes aquestes consideracions són una part dels objectius de la gestió dels aqüífers i s'han de considerar en la planificació hidrològica com a eina per orientar la política sobre l'aigua i ordenar les actuacions i inversions econòmiques, a més d'establir les bases per a la protecció del recurs i del seu paper ecològic. L'objectiu és l'ús sostenible del recurs, és a dir, garantir que l'ús actual no impedeixi que les generacions futures en puguin gaudir, en les circumstàncies que llavors els afectin.

La gestió de les aigües subterrànies no és una tasca senzilla a causa dels nombrosos interessos que hi concorren, en especial en àrees amb recàrrega escassa i elevada demanda potencial d'aigua.

Una situació extrema a Europa és la d'Espanya, a causa de l'agricultura de regadiu, que consumeix més del 80% de tota l'aigua dolça disponible, malgrat que l'aportació al producte nacional és relativament petit.

La gestió de l'aigua subterrània i de l'aigua en general ha d'atendre tècnicament, socialment i política les demandes i mantenir els volums i les temporalitats que exigeix el medi ambient, alhora que ha de crear les condicions per reconduir la demanda (generalment reduir-la) cap als usos de més interès. La protecció del medi ambient requereix regles clares, acceptació pública i voluntat política.

## 5.6 Contaminació del sòl i les aigües subterrànies

Les accions antròpiques sovint menen al canvi en les propietats (conductivitat elèctrica, temperatura, terbolesa, radioactivitat...) i a la introducció al medi de substàncies (ions, metalls pesants, hidrocarburs, dissolvents organohalogenats, diverses substàncies orgàniques...) i components biològics (bacteris, gèrmens diversos, virus...) que degraden i alteren les característiques naturals, i hi produeixen contaminació. Aquesta pèrdua de qualitat pot variar des de molèsties i necessitat d'un cert tractament previ a la utilització fins a toxicitat. La contaminació de les aigües subterrànies crea un problema ambiental, perquè a més de la greu pèrdua del recurs, aquestes aigües es trobaran tard o d'hora als rius, brolladors, llacs, aiguamolls i pous. També l'abandonament d'extraccions d'aigua subterrània suposa la recuperació dels nivells freàtics en àrees que antigament eren soms o aiguamolls: si durant l'època d'extracció, amb importants descensos freàtics, aquestes àrees han estat edificades i ocupades, després poden presentar greus problemes d'inundació d'espais subterranis i excavacions, i problemes d'estabilitat a les edificacions.

El moviment dels contaminants pel terreny està subjecte a diversos processos que tendeixen a diluir-los o eliminar-los. Alguns d'aquests processos són: filtració mecànica a la superfície del sòl i les cavitats (afecta la matèria en suspensió), hidròlisi en funció del pH (afecta els carbonats, certs plaguicides...), precipitació-dissolució, reaccions redox (en funció de la presència o absència d'oxigen i d'altres oxidants i reductors que afecten els compostos nitrogenats, matèria orgànica i certs metalls pesants), fenòmens d'adsorció a la superfície dels minerals i col·loides (afecta la matèria orgànica i els microorganismes), bescanvi iònic (afecta principalment els cations), i en menor grau exclusió iònica (afecta els anions en porus molt petits), com també fenòmens osmòtics i d'ultrafiltració. Les reaccions redox són freqüentment biocatalitzades per microorganismes propis del terreny i una vegada que s'han creat condicions favorables al seu desenvolupament (subministrament d'energia com a oxidants i matèria orgànica, disponibilitat de nutrients i absència o eliminació dels possibles inhibidors, que poden ser els propis productes de l'acció del microorganisme).

La freqüent llarga permanència de l'aigua al sòl, medi no saturat i aqüífer, abans no surt a l'exterior afavoreix els processos descrits i també l'eliminació de gèrmens patògens i virus en ser un medi inhòspit, i dona temps per a la desintegració de substàncies radioactives de període curt o mitjà. Addicional-

ment, l'important volum assolit permet que contaminacions esporàdiques o localitzades es dilueixin per dispersió hidrodinàmica.

La part química i biològicament més activa és el sòl edàfic. És aquí on es produeix la major descontaminació natural. La seva inexistència (àrees de roca nua o terrenys erosionats) o la seva eliminació (per exemple en excavacions) afavoreix la possibilitat de contaminació, com també la proximitat al focus contaminant. Aquesta proximitat ve indicada pel temps de trànsit de l'aigua i de cada contaminant específic.

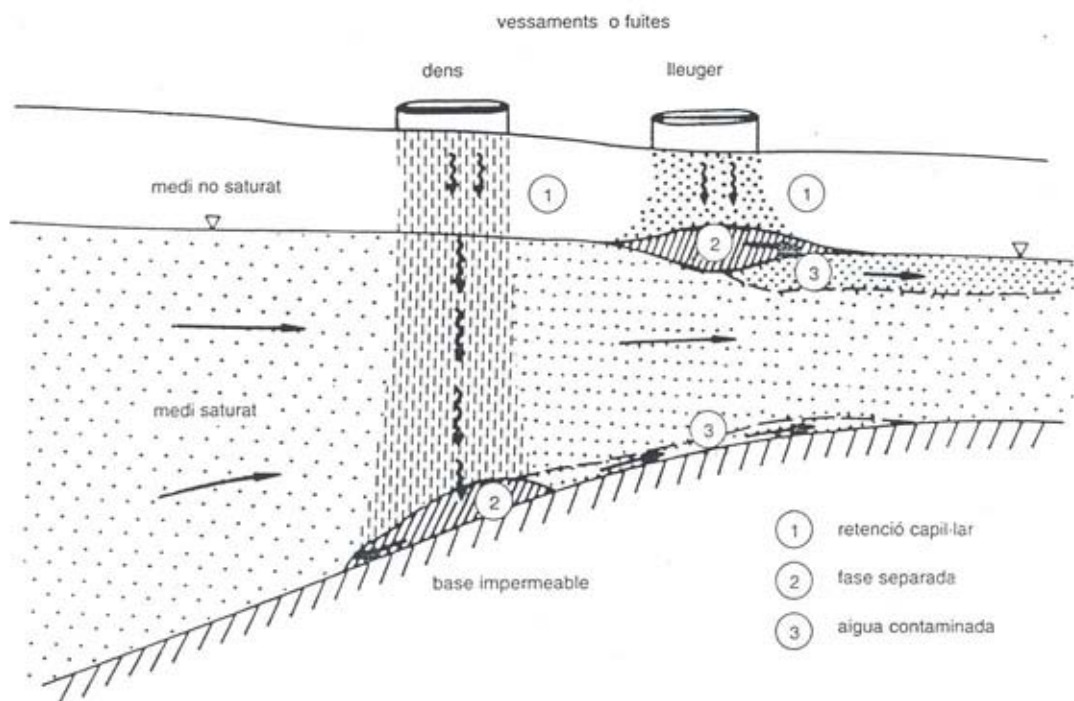
Hi ha contaminants que no s'alteren. L'ió clorur, com el bromur, i també el sulfat i el nitrat en medi reductor, romanen a l'aigua i a efectes pràctics es mouen a la mateixa velocitat que l'aigua, igual com ho fa el triti (isòtop radioactiu de l'hidrogen). Els cations dissolts com ara el Na, K i Mg, pel fet de ser solmesos a bescanvi iònic, fa que puguin ser temporalment retinguts al terreny i, per tant, es mouen a menor velocitat que la de l'aigua. El Ca, a més de tenir bescanvi iònic es pot dissoldre i precipitar com a carbonat.

Molts altres contaminants no romanen ni a l'aigua ni al medi (es precipiten, dissolen, oxiden, redueixen, es degraden en altres compostos...) i això és important per a l'autodepuració de l'aigua contaminada al terreny. L'eliminació o atenuació dels contaminants és una funció complexa de les condicions locals i de les característiques de les substàncies. Moltes substàncies orgàniques segueixen complicades vies de degradació, amb aparició de productes intermedis (metabòlits), de vegades més nocius que no pas els originals. Molts plaguicides originen cadenes de degradació i metabòlits diferents d'aquells de què informen els fabricants, ja que els estudis en què es basen fan referència al sòl agrícola. Sortosament, molts són fortament adsorbits, la qual cosa n'afavoreix la progressiva destrucció, però no tots, ni sempre el sòl és prou gruixut i continu (per exemple, per presència d'esquerdes de retracció).

Molts hidrocarburs i dissolvents orgànics formen fases separades i immiscibles amb l'aigua si la concentració és prou elevada, com succeeix per fuites o escolaments de conductes i dipòsits. Una part significativa queda retinguda capil·larment al medi no saturat (Fig. 5.5) i la part que pugui arribar al nivell freàtic forma una capa flotant si és menys densa que l'aigua (cas dels hidrocarburs), mentre que si és més densa s'acumula al fons de l'aqüífer (cas de molts dissolvents orgànics halogenats). Així es crea una font gairebé permanent de contaminants que tenen una certa solubilitat a l'aigua i en malbaraten fortament la qualitat. Uns es degraden més o menys ràpidament si hi ha prou aportació d'oxidants (oxigen i nitrats) i es desenvolupa una acció bacteriana adequada, però d'altres en resulten poc degradables (resilients) i fins i tot gairebé permanents, com ara el fenol.

Els metalls pesants poden ser el resultat de l'oxidació de sulfurs o de la dissolució de certs carbonats, principalment, o bé ser aportats directament per indústries i activitats mineres. En medi oxidant i de pH elevat esdevenen gairebé immòbils i queden fixats com a precipitats i coprecipitats, principalment amb òxids de ferro. També en medis fortament reductors (matèria orgànica abundant amb subministrament de sulfat i pH alt) poden ser fixats com a sulfurs. En altres condicions poden esdevenir mòbils; de fet no és rar trobar aigües subterrànies amb elevats continguts de Fe i Mn, que en àrees riques en mineralitzacions metàl·liques poden anar acompanyats d'altres metalls pesants en forma soluble, com ara Zn, Hg, Pb, Sb, Tl, Cu... Alguns poden formar oxisals que estenen i compliquen el seu camp de mobilitat, com succeeix amb l'arsènic i el vanadi. Aquests són un seriós problema natural a molts llocs de l'Argentina, Níle, Mèxic i Austràlia, i també ho poden ser al voltant d'abocadors industrials i escombreres de mines, i sota sòls industrials i miners on s'han acumulat.

L'origen de la contaminació és prou divers, des de les activitats industrials i mineres fins a la utilització de fertilitzants i plaguicides (fitosanitaris) a l'agricultura, passant per les àrees urbanes i el seu entorn (instal·lacions diverses, fuites de tancs, manca d'oxigenació o eliminació del sòl...) i els acci-



*Fig. 5.5 Penetració al terreny d'un líquid immiscible amb l'aigua. La figura mostra dos casos: líquid més dens que l'aigua (dissolvents organoclorats) i líquid menys dens que l'aigua (hidrocarburs). En aquest darrer cas les oscil·lacions del nivell freàtic estenen la part contaminada retinguda capil·larment*

dents i escolaments a les conduccions, en dipòsits i durant el transport, i fins i tot la utilització de la sal per combatre el gel hivernal a les carreteres.

La forma de contaminació és molt important per deduir-ne les conseqüències i actuacions necessàries. Hi ha dues situacions extremes. Una és la contaminació difusa, que es produeix sobre la totalitat o una gran part del territori; és el cas de l'agricultura que emprava fitosanitaris, de les grans àrees urbanes i periurbanes i del transport aeri de contaminants (fums, aerosols). El moviment dels contaminants segueix el de la recàrrega i és dominantment vertical al sòl, medi no saturat i part superior de l'aqüífer, on es produeix una estratificació de gruix contínuament creixent si el procés es manté (Figura 5.6). El flux per unitat de superfície és relativament petit i els efectes es poden manifestar molt posteriorment.

L'altra situació extrema és la contaminació concentrada o específica, que dona lloc a un plomall de contaminació a l'aqüífer que s'estén segons el flux de l'aigua subterrània (Figura 5.6), amb una certa dispersió lateral i més gran longitudinalment: l'abast depèn de si el contaminant es degrada o no, i del temps des que es va iniciar el procés. Si es tracta d'una contaminació de curta durada, després d'un cert temps el plomall esdevé una taca que s'estén i s'allunya lentament. El temps a arribar la contaminació des de la superfície a l'aqüífer depèn de si hi ha aportació concentrada d'aigua (és ràpid) o si es fa amb la recàrrega (és lent; cas d'abocadors i escombreres o de lixiviació d'hidrocarburs retinguts per capil·laritat). Una situació intermèdia és la de fonts de contaminació lineals, com ara rius o canals que infiltren aigua contaminada, o àrees al llarg de carreteres molt transitades i autopistes (pèrdues de carburants no cremats o del plom antideflagració, pols del desgast de pneumàtics) o línies de ferrocarrils.

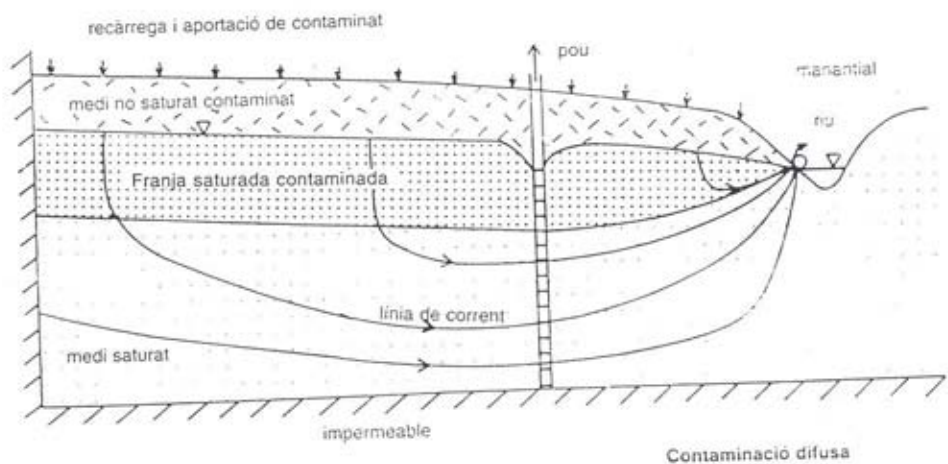
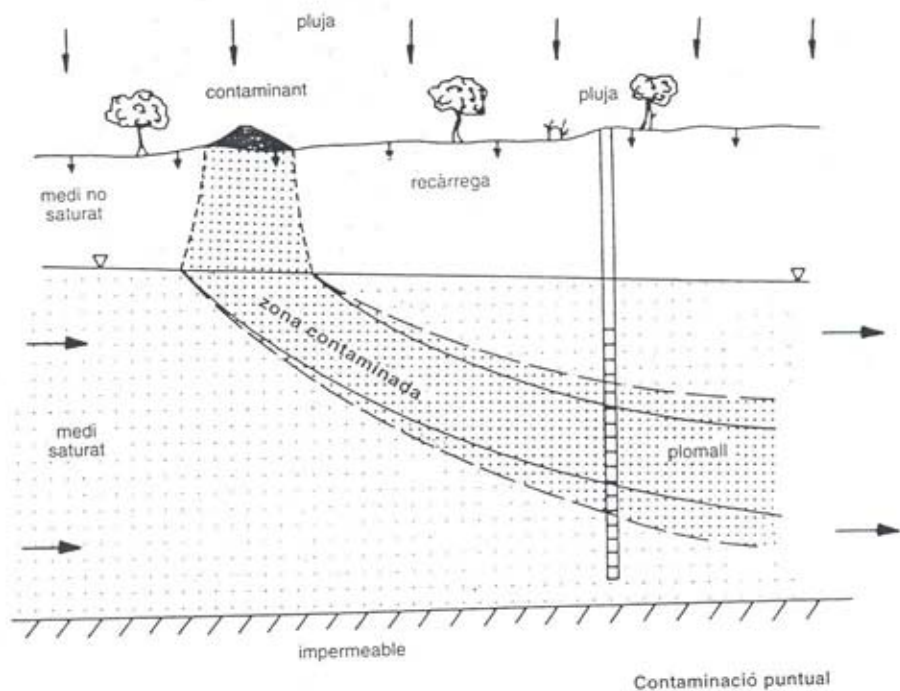


Fig. 5.6 Formació d'un plumall d'aigua contaminada per una font específica i d'una franja extensa d'aigua contaminada per una aportació difusa de contaminant sobre la superfície del terreny

La pitjor situació de contaminació concentrada és la que es produeix quan el contaminant arriba directament a l'aqüífer freàtic, com succeeix quan es rebleixen excavacions profundes d'extracció d'àrids amb deixalles o aigües contaminades són introduïdes en pous i excavacions o els purins de la ramaderia intensiva s'escampen sobre àrees deprimides.

## 5.7 Protecció de les aigües subterrànies

De la mateixa manera que les aigües subterrànies presenten avantatges de resistència a la contaminació i que en el cas que es produeixi una acció coneguda hi ha un cert temps per actuar durant el qual la qualitat de l'aigua es manté correcta, no és menys cert que la contaminació s'acaba produint. Quan el resultat d'una contaminació es fa palesa, moltes vegades els volums d'aigua afectats i l'extensió territorial fan que, a diferència del que succeeix amb els rius, la correcció sigui difícil, costosa i molt lenta, especialment pel que fa referència al medi no saturat (l'aigua no es pot extreure normalment i s'ha d'esperar que completi el trànsit cap al medi saturat) i la necessitat de mobilitzar volums d'aigua superiors o molt superiors als afectats a causa de l'adsorció, el bescanvi iònic, la difusió a zones de baixa permeabilitat o la retenció de fases separades.

La conseqüència lògica del que s'ha exposat és que la prevenció de la contaminació resulta una alternativa clarament preferible a la correcció, i la normativa legal va en aquest sentit. L'opció d'abandonar un aquífer contaminat suposa perdre una font d'aigua i un volum de reserva molt valuós i no soluciona el problema, perquè els contaminants no degradats o diluïts acabaran per sortir al medi ambient de forma persistent. El valor real d'un aquífer es pot avaluar pel cost del dispositiu alternatiu que proporcioni el mateix servei d'aigua: en quantitat, qualitat, preu, oportunitat i servei mediambiental acostuma a ser molt elevat. Tot això fa que la legislació europea comunitària no sigui propícia a l'abandonament.

És clar que la contaminació difusa és generalment més insidiosa, la més difícil de restaurar i la que requereix més esforç normatiu de protecció. La vulnerabilitat d'un aquífer a la contaminació, que es defineix com la susceptibilitat d'un aquífer per ser penetrat per un contaminant distribuït sobre la superfície del terreny, considerant l'efecte del sòl edàfic, és un índex per orientar la protecció i les activitats territorials.

Malgrat les dificultats per definir la vulnerabilitat i per adoptar un mètode que permeti comparacions, permet arribar a una cartografia del territori. Tot aquífer freàtic a la llarga és vulnerable als contaminants conservatius, però gaudeix d'una certa protecció per als que es degraden. El grau de vulnerabilitat s'ha d'interpretar com una orientació per prioritzar les accions de protecció i les mesures que cal adoptar, que sempre han d'anar acompanyades d'estudis per assolir el detall que la cartografia de vulnerabilitat no pot mai aportar.

Les accions més freqüents de protecció són:

- Conservació del sòl edàfic.
- Reducció de la càrrega de contaminants per unitat de superfície (incloent-hi la limitació de l'ús de productes fitosanitaris).
- Acurada construcció de canonades, dipòsits, tanes i àrees d'emmagatzematge (és especialment important per als tanes de combustible i les estacions de servei de carburants).
- Bon emplaçament, operació, drenatge i impermeabilització superficial d'abocadors, escombreres i àrees de manipulació de deixalles.
- Correcta construcció de pous i sondeigs, disposant-hi segells i cimentacions per aïllar els aquífers de les aigües superficials i d'altres aquífers ja contaminats; moltes situacions d'aigües subterrànies contaminades són causades per pous mal construïts o corroïts, i no pas per l'aqüífer.
- Confinament o correcció d'aquífers veïns contaminats.

La contaminació d'un pou d'abastament d'aigua potable per a la població no suposa solament un greu risc sanitari, sinó la pèrdua d'un recurs i d'una inversió econòmica (pous, bombes, edificis, canonades, línies elèctriques, transformadors, camins...). Substituir-lo pot ser molt costós, i de vegades difícil, en especial al món rural i en poblacions petites, les quals a més a més no poden assolir la complexitat tècnica dels tractaments de les aigües superficials, quan hi són disponibles. Un aqüífer ben protegit i operat proporciona aigua directament potable, que no requereix tractament si la xarxa de distribució no té perill d'entrada d'aigües exteriors. El millor gust i l'absència d'additius químics és exigida en moltes poblacions d'Europa.

Per aquestes raons els pous i les fonts per a abastament públic són l'objecte d'una protecció especial amb l'establiment d'àrees de protecció individuals o conjuntes (la qual cosa també es fa per a les aigües minerals i termominerals). Aquesta protecció, considerada a les lleis i objecte de normes i recomanacions, consisteix a definir tres àrees:

- Immediata, d'alguns metres al voltant del pou, tancada i propietat de l'abastidor, on no s'admet cap activitat o emmagatzemament susceptible de contaminar.
- Pròxima, sovint fins a 50 o 100 m, que pretén la protecció contra gèrmens patògens, on són prohibides tot un seguit d'activitats als propietaris. La tendència és garantir un temps de trànsit de l'aigua pel terreny de 50 a 100 dies.
- Llunyana, fins al límit de procedència de l'aigua subterrània, on es limita l'ús de substàncies químiques i fums, el pas de vies de comunicació, la instal·lació d'estacions de servei, etc., i on s'exigeixen mesures de seguretat addicionals. És freqüent graduar la severitat de les restriccions segons la distància i les característiques hidràuliques del flux de l'aigua.

## 5.8 Correcció i rehabilitació dels aqüífers contaminats

La correcció i rehabilitació (descontaminació i remei) dels aqüífers contaminats extensivament per fonts difuses, comporta l'eliminació o el control (reducció de l'aportació) de les substàncies contaminants aplicant-hi normes adequades i fent-les complir i, si és el cas, compensant els perjudicis econòmics singulars (no els generals) que es puguin produir (per exemple la disminució de producció agrícola) amb els guanys generals atribuïbles a la rehabilitació, o amb fons comuns. Això no elimina el mal provocat —les accions directes de correcció són massa costoses—, però inicia el procés de renovació (a mig o llarg termini); mentrestant cal protegir les parts del sistema aqüífer no danyades amb una acurada construcció, operació i rehabilitació dels pous. Hi ha la possibilitat de destinar l'aigua de l'aqüífer a certs usos per als quals la pèrdua de qualitat soferta no sigui limitativa, però això forma part d'una acurada planificació dels recursos hídrics i d'una bona avaluació econòmica.

Els processos de salinització dels aqüífers costaners segueixen principis semblants, amb un important pes de les consideracions hidràuliques i d'actuacions temporals de reducció del potencial de l'aigua salada en bombejar-la.

Quan es tracta de contaminació específica o concentrada, cal eliminar la font de contaminació i extreure el contaminant de l'aqüífer —on es nota— i del sòl i medi no saturat, on pot passar desapercibut si no s'hi para atenció. En casos difícils es pot optar per confinar la part contaminada de l'aqüífer mitjançant barreres hidràuliques o físiques. També es pot extreure el sòl contaminat, encara que sovint el cost és molt elevat i a més a més cal trobar un lloc per abocar-lo, de vegades amb un tractament previ o la inertització.

L'eliminació o reducció dels contaminants *in situ* sol ser una alternativa millor, en funció dels contaminants de què es tracti i la ubicació al terreny. Hi ha una intensa recerca sobre el tema i s'han estudiat i

emprat molts mètodes, però actualment sols uns quants han assolit aplicació pràctica, i són reproduïbles i modelitzables. Així, es preveu la possibilitat de volatilitzar el contaminant al medi saturat i no saturat (aireig en el cas d'hidrocarburs i dissolvents orgànics volàtils), de forçar-ne l'oxidació introduint-hi oxidants (aire, oxigen, nitrats) i afavorir-hi l'acció bacteriana sobre la matèria orgànica i certs metalls pesants, de reduir-hi forces capil·lars en augmentar la temperatura amb injecció de vapor, de crear-hi un medi reductor apropiat (afegint-hi alcohols per reduir nitrats), de forçar-hi el bescanvi iònic, etc. (Fig. 5.7).

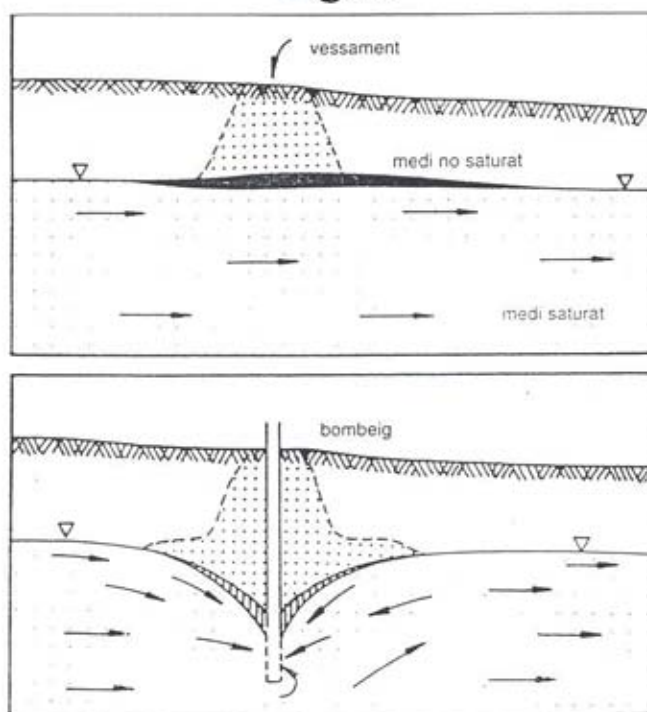
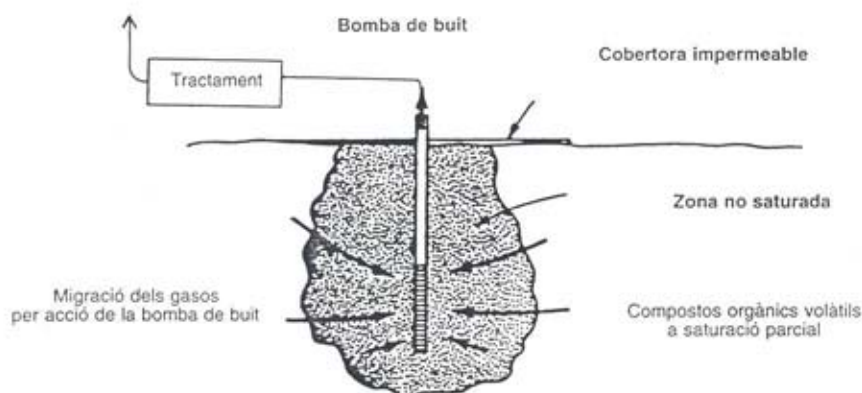


Fig. 5.7 Dos exemples de tractament d'aqüífers per regeneració. A la figura superior s'esquemmatitza l'extracció de volàtils al medi no saturat per bombeig d'aire. La figura inferior mostra l'extracció d'hidrocarburs que sura sobre el nivell freàtic mitjançant un bombeig d'aigua



## Bibliografia

- [AIH95] AIH (1995). *Las aguas subterráneas en la Ley de Aguas española: un decenio de experiencia*. Barcelona: Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español. 2 vol.
- [APPE96] APPELO, C.A.J.; POSTMA, D. (1996). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema.
- [CAND93] CANDELA, L.; VARELA, M. (1993). *La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas: teoría, medición y modelos*. Barcelona: CIMNE-UPC.
- [CAND94] CANDELA, L.; RAO, R.S.C.; MARGIOTTA, M.; REBOUÇAS, M. (1994). *Soil and groundwater pollution from agricultural activities*. UNESCO Series of Learning Materials in Engineering Sciences. París: UNESCO.
- [CUST83] CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. (1983). *Hidrología subterránea*. Barcelona: Omega. 2 vol.
- [CUST96] CUSTODIO, E. (1996). "Groundwater problems in general and in Spain in Particular". *European Water Pollution Control*. Elsevier, núm. 6 (5), pàg. 68-83.
- [CUST97] CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R.; SAMPER, J. (1997). *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica*. Madrid: ITGE/AIH.
- [DOME90] DOMENICO, P.A.; SCHWARTZ, F.W. (1990). *Physical and chemical hydrogeology*. Wiley.
- [EPA91] EPA (1991). *Site characterization for subsurface remediation*. Environmental Protection Agency. EUA. EPA/625/4-91/026.
- [FETT94] FETTER, C.X. (1994). *Contaminant hydrogeology*. Nova York: Macmillan Publ. Co.
- [ITGE89] ITGE (1989). *Las aguas subterráneas en España: estudio de síntesis*. Madrid: Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- [NRC93a] NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1993). *In situ bioremediation: when does it work?* Washington: National Academy Press.
- [NRC93b] NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1993). *Groundwater vulnerability assessment*. Washington: National Academic Press.
- [YARO96] YARON, B.; CALVET, R.; PROST, R. (1996). *Soil pollution: processes and dynamics*. Springer.

## Legislació

La gestió de les aigües subterrànies i la seva protecció pel que fa a quantitat, qualitat i paper mediambiental requereix un suport legal i administratiu en diferents àmbits.

El primer àmbit és el de la Unió Europea. Cal fer esment de la Directiva (80/68) sobre la protecció de les aigües subterrànies contra la contaminació causada per determinades substàncies perilloses, la Directiva (80/778) sobre qualitat de l'aigua destinada a consum humà, la Directiva (74/464) sobre la contaminació causada per substàncies perilloses, i la Directiva (86/278) sobre la protecció del medi ambient i dels sòls. És a punt de ser promulgada una Directiva marc sobre l'aigua, que englobarà una part de les anteriors, i que té una notable orientació de qualitat i econòmica. El control de la contaminació per nitrats d'origen agrícola és un objectiu clar (Directiva 91/676) i els estats n'han de fer regulacions específiques i definir-ne àrees vulnerables a partir del 1999.

A Espanya la màxima regulació legal de les aigües correspon a la Llei d'aigües, del 1985, que ha substituït la del 1879. Es complementa amb dos reglaments, que tracten de desplegar la Llei i ordenar l'administració de l'aigua.

La Llei d'aigües declara que totes les aigües són de domini públic. La gestió i protecció de les aigües

subterrànies és ara competència pública. La Llei regula la gestió i protecció de les aigües subterrànies, i els plans hidrològics n'han d'incloure normes específiques.

Quant als sòls contaminats, no fa gaire es va promulgar la Llei de residus, del 1998. Carrega la responsabilitat del sòl contaminat sobre el propietari del terreny. Encara no és clar el lligam amb la Llei d'aigües. A Catalunya s'aplica la Llei de residus, del 1993, essent l'estatal subsidiària, i es prepara una *Guia d'avaluació de la qualitat del sòl*.

## Agraïments

S'agraeix el suport rebut de la Fundació Centre Internacional d'Hidrologia Subterrània, amb seu a la UPC, i també dels projectes Doñana (CICYT AMB-95-0372) i PALAEAUX (ENV4-CT95-0156).