

Hidrogeologia de les Illes Balears: les masses càrstiques

Giménez, J., Barón, A., Comas, M., González, C., Garau, J., Beidas, O., Oliver, M. i Nadal, F.X.

Servei d'Estudis i Planificació de la Direcció General de Recursos Hídrics.
Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient i Mobilitat del Govern de les Illes Balears.
c/ Gremi Corredors 10, 07009 Palma
jgimenez@dgrehid.caib.es

Resum

Les aigües subterrànies suposen el 95% dels recursos hídrics de les illes Balears. Degut a la configuració litològica de les Balears la majoria de les aigües subterrànies es localitzen en aquífers carbonatats que en gran part presenten característiques càrstiques més o menys desenvolupades. De fet 64 de les 90 masses d'aigua subterrànies definides en el Pla Hidrològic de les Illes Balears de 2011 tenen característiques càrstiques. Aquestes masses d'aigua ocupen el 69% de la superfície a Mallorca, el 68% a Menorca, el 67% a Eivissa i el 100% a Formentera. Les particularitats dels aquífers càrstics fan que la seva gestió sigui més complexa que la dels aquífers de flux difús. Així degut a que la velocitat d'infiltració i circulació de l'aigua dins d'un aquífer càrstic sol ser elevada, quan es vol establir la vulnerabilitat a la contaminació d'un aquífer càrstic és recomanable tenir en consideració el desenvolupament del carst. El mateix ocorre amb els perímetres de protecció de pous de proveïment, el càlcul dels quals s'ha de realitzar amb metodologies diferents a les dels aquífers de flux difús. L'explotació dels aquífers càrstics pot accelerar els processos naturals com l'aparició de col·lapses. A Mallorca l'explotació intensiva i estacional de l'aquífer de Crestatx ha provocat l'aparició de col·lapses que han afectat infraestructures urbanes. D'altra banda a Menorca el descens continuat dels nivells freàtics a l'aquífer d'Es Migjorn ha accelerat l'aparició de col·lapses que han afectat la qualitat de les aigües d'un pou de proveïment de Es Migjorn Gran.

Resumen

Las aguas subterráneas suponen el 95% de los recursos hídricos de las Baleares. Debido a la configuración litológica de las Baleares la mayoría de las aguas subterráneas se localizan en acuíferos carbonatados con características cársticas más o menos desarrolladas. De hecho 64 de las 90 masas de agua subterráneas definidas en el Plan Hidrológico de las Islas Baleares de 2011 tienen características cársticas. Estas masas de agua ocupan el 69% de la superficie en Mallorca, el 68% en Menorca, el 67% en Eivissa y el 100% en Formentera. Las particularidades de los acuíferos cársticos hacen que su gestión sea más compleja que la del resto de acuíferos. Debido a la elevada velocidad de infiltración y circulación del agua en un acuífero cárstico, cuando se quiere establecer la vulnerabilidad a la contaminación de este tipo de acuíferos es recomendable considerar el grado de desarrollo del carst. Lo mismo ocurre con los perímetros de protección de pozos de abastecimiento, el establecimiento de los cuales debe realizarse con metodologías diferentes a las de los acuíferos de flujo difuso. La explotación de los acuíferos cársticos puede acelerar procesos naturales como la aparición de colapsos. En Mallorca la explotación intensiva y estacional del acuífero de Crestatx ha provocado la aparición de colapsos que han afectado infraestructuras urbanas. En Menorca el descenso generalizado de los niveles freáticos en el acuífero de Es Migjorn ha acelerado

la aparición de colapsos que han afectado la calidad de las aguas de un pozo de abastecimiento de Es Migjorn Gran.

Abstract

Groundwater account for 95% of the water resources in the Balearic Islands. Due to the configuration of the Balearic lithology the majority of groundwater aquifers are located in carbonate groundwater bodies with more or less developed karst features. In fact 64 of the 90 groundwater bodies identified in the Balearic Islands Hydrological Plan of 2011 have karst properties. These water bodies occupy 69% of the surface in Majorca, 68% in Minorca, 67% in Ibiza and 100% in Formentera. The particularities of karst aquifers makes their management more complex than the other aquifers. Due to the high infiltration rate and water circulation in karst aquifers, to establish the contamination vulnerability of these type of aquifers is recommended to consider the degree of karst development. The same occurs with the protection perimeters of supply wells, the establishment of which should be done with methods different from the used for diffuse flux aquifers. The exploitation of karst aquifers can accelerate natural processes such as the occurrence of collapses. In Majorca the intensive and seasonal exploitation of the Crestatx aquifer has caused the appearance of collapses that have affected urban infrastructures. In Minorca the general decline of groundwater levels in the Migjorn aquifer has accelerated the occurrence of collapses that have affected the quality of the water from a well supply in Es Migjorn Gran.

Característiques dels aquífers càrstics

Des del punt de vista del funcionament es poden diferenciar en tres tipus d'aquífers. En un extrem es situen els aquífers amb sistemes de flux difús, que es corresponen bàsicament amb aquífers de naturalesa granular o detrítica. En l'altre extrem es situen els aquífers amb sistemes de flux per conductes, que es corresponen amb els aquífers típicament càrstics. El tercer tipus d'aquífers es correspondria amb els que tenen propietats intermèdies entre ambdós extrems, per tant la frontera entre aquestes aquífers no està definida sinó que és gradual. A la següent taula es resumeixen les principals diferències entre aquests aquífers.

	Flux per conductes (Càrstic s.s.)	Flux difús
Heterogeneïtat	Alta	Baixa
Emmagatzement	Escàs	Elevat
Piezometria	Discontínua	Contínua
Hidrogrames	Pics	Rectes pendent \pm constant
Oscil·lacions piezomètriques	Importants	Regulars
Circulació	Per conductes	Flux difús
Infiltració	Punts localitzats	Uniforme
Morfologia càrstica	Abundant	Escassa
Regulació natural	Escassa	Elevada
Millora de la regulació	Difícil	Possible
Vulnerabilitat	Alta	Moderada-Baixa

Taula 1: Diferències entre aquífers de flux per conductes (càrstics) i de flux difús.

Així els aquífers càrstics ben desenvolupats es caracteritzen per ser molt heterogenis i amb un emmagatzement limitat. La circulació de l'aigua pel seu interior es du a terme

bàsicament mitjançant conductes preferents que tant poden ser verticals (simes) o horitzontals (galeries). Aquests conductes provenen de la dissolució preferent seguint les línies de debilitat originals de la roca, és a dir fractures i/o discontinuïtats d'origen sedimentari. Aquestes característiques comporten que l'evolució piezomètrica d'aquests aqüífers sigui discontinua, és a dir que sofreix pujades i baixades sobtades que poden ser importants (figura 1), que es corresponen amb l'entrada o sortida d'aigua a l'aqüífer a través de conductes verticals o horitzontals de manera sobtada. Aquestes pujades i baixades són les responsables que els hidrogrames que es puguin realitzar en aquests aqüífers tinguin pics. Totes aquestes característiques fan que la regulació en els aqüífers càrstics sigui escassa i al mateix temps difícil de gestionar.

Per contra els aqüífers no càrstics o poc carstificats presenten una saturació dels porus o fissures de la roca important. La connexió entre aquests porus permet que l'aigua discorri d'una manera més homogènia i gradual, per la qual cosa en aquests tipus d'aqüífers l'emmagatzement és més important. Aquest flux difús permet que la recàrrega i descarrega de l'aqüífer sigui lenta en comparació a la dels aqüífers típicament càrstics, per la qual cosa les gràfiques d'evolució piezomètrica son més suaus i regulars.

Aquestes circumstàncies comporten que la gestió dels aqüífers càrstics sigui més complicada ja que bàsicament l'aigua discorre en el seu interior amb una major velocitat. Aquesta alta velocitat fa complicat utilitzar aquest tipus d'aqüífers com a reservoris ja que l'aigua es "perd" o se'n va de l'aqüífer. Una de les solucions per poder aprofitar aquests recursos és la captació o derivació de les surgències o fonts, tal i com s'ha dut a terme en moltes zones de les Balears.

Els recursos hídrics a les illes Balears

Les aigües subterrànies constitueixen la quasi totalitat dels recursos hídrics de les Illes Balears. De fet les aigües per a consum humà provenen en el 95% de les aigües subterrànies. Tal i com s'observa a la taula 2 del conjunt de les aigües distribuïdes a la població de les Balears l'any 2006 sols el 4,5% prové de les aigües superficials recollides als embassaments de la Serra de Tramuntana de Mallorca. Així, quasi el 70% de les aigües prové de l'extracció de pous d'aigua dolça, el 7% de fonts, que es correspon amb aigües subterrànies aflorades de manera natural, i el 18% prové de les dessaladores, les quals produeixen aigua a partir de l'extracció d'aigua salada dels aqüífers costaners.

Illa	Hm ³ Extrems d'aqüífers	Hm ³ Captació fonts	Hm ³ Embassaments	Hm ³ Dessaladores	TOTAL
Mallorca	75,15	9,96	6,19	20,25	111,55
Menorca	14,18		-	-	14,18
Eivissa	7,60		-	4,74	12,34
Formentera	0,00		-	0,47	0,47
TOTAL	96,93	9,96	6,19	25,46	138,53
%	69,97	7,19	4,47	18,37	100

Taula 2: Origen de l'aigua de proveïment urbà a les Balears a l'any 2006 (SEP, 2011).

Al mateix temps la gran majoria dels aqüífers de les Balears son de naturalesa carbonatada i una bona part d'ells tenen un funcionament càrstic. De fet els únics

aqüífers pròpiament no càrstics son els que es troben a les conques sedimentàries terciàries i quaternàries. En aquest sentit l'estudi dels aqüífers càrstics és necessari a les Balears.

Característiques dels aqüífers de les Balears

Des del punt de vista geològic les Illes Balears son la part emergida del promontori Balear el qual constitueix la prolongació nord-oriental de l'arc orogènic Bètic. Al mateix temps el promontori Balear està subdividit en dos blocs separats pel canal de Mallorca, quedant un bloc septentrional format per les illes de Mallorca i Menorca, i un bloc meridional format per les illes Pitiüses. Els materials que afloren a les Illes Balears son en gran part de naturalesa carbonatada, ja que a part dels carbonats pròpiament dits, gran part de les roques detrítiques tenen una composició carbonatada ja que provenen de l'erosió de calcàries. De fet a part de les roques del Triàsic Inferior que afloren a Mallorca i sobretot a Menorca (fàcies Buntsandstein), les roques del Paleozoic (que bàsicament afloren a Menorca), i els guixos i argiles del Triàsic Superior (fàcies Keuper), la resta de roques que afloren a les Balears tenen una composició predominantment carbonatada.

Aquest predomini de les roques carbonatades implica que la naturalesa química de les aigües subterrànies de les Balears és bàsicament bicarbonatada - càlcica. Així mateix gran part dels aqüífers de les Balears es poden considerar com aqüífers càrstics, tot i que amb diferents graus de carstificació. De fet exceptuant els aqüífers localitzats a les conques sedimentàries postalpines (del Miocè a l'actualitat) la gran majoria d'aqüífers d'interès de les Balears tenen una naturalesa càrstica més o menys desenvolupada.

A les figures 4, 5 i 7 es mostra un esquema geològic de les diferents illes en el qual s'han diferenciat els terrenys aflorants en base a la seva permeabilitat. En aquestes figures també es mostra la divisió hidrogeològica duta a terme per l'elaboració del Pla Hidrològic de les Illes Balears (PHIB) en base a la Directiva Marc de l'Aigua (DMA). La DMA, entre altres aspectes, índica que s'han de diferenciar els cossos o masses d'aigua amb propietats semblants que poden ser aprofitats per l'home. De fet 45 de les 65 masses d'aigua definides a Mallorca es poden considerar com aqüífers càrstics ja que estan formades en la seva gran majoria per calcàries o dolomies massives o fissurades (bàsicament Triàsic superior i Juràssic inferior) i calcarenites o calcàries arrecifals (bàsicament del Miocè superior i Pliocè). La superfície aflorant d'aquestes 45 masses ocupa el 69 % de l'àrea de Mallorca. Pel que fa a l'illa de Menorca 5 de les 6 masses definides es poden considerar càrstiques, la superfície de les quals representa el 68 % de l'àrea de l'illa de Menorca. Igual que a Mallorca, a Menorca els aqüífers càrstics també es desenvolupen en calcàries i dolomies massives o fissurades del Triàsic superior o Juràssic inferior, i en calcàries arrecifals del Miocè superior. A l'illa d'Eivissa es poden identificar 11 masses amb característiques càrstiques més o menys desenvolupades d'entre les 16 masses definides. Aquestes 11 masses suposen una superfície del 67 % de l'extensió de l'illa. A Eivissa, però, els aqüífers càrstics es desenvolupen en les calcàries i dolomies del Triàsic superior i Juràssic inferior, i en els carbonats massius Cretàcics presents en algunes zones d'aquesta illa. A l'illa de Formentera les tres masses d'aigua definides es poden considerar aqüífers càrstics i tots ells es desenvolupen en calcàries arrecifals.

Els aqüífers càrstics de Mallorca.

A l'illa de Mallorca es poden diferenciar diverses regions geològiques condicionades per l'estructuració postalpina. Aquesta estructuració configurarà l'illa en tres serres (Serra de Tramuntana, Serres Centrals i Serres de Llevant) que limiten dues conques sedimentàries o depressions (conca de Palma - Inca - Sa Pobla i conca de Campos - Manacor). Així mateix encerclant gran part de les Serres Centrals i les de Llevant durant el Miocè superior s'instal·laren unitats esculloses que avui en dia conformen les Marines (Marina de Lluçmajor, de Llevant i Marineta). Exceptuant els aqüífers localitzats a les depressions terciàries, a la resta de regions geològiques hi predominen els aqüífers formats en roques carbonatades els quals en la majoria dels casos presenten processos de carstificació. Algunes de les masses d'aigua càrstiques que s'han explotat intensament o mes representatives de Mallorca es mostren a la taula 3.

A la Serra de Tramuntana s'han definit 33 masses d'aigua subterrània, de les quals 25 són càrstiques, les quals ocupen el 77% de l'àrea de la Serra. Els aqüífers càrstics de la Serra de Tramuntana es desenvolupen majoritàriament sobre les calcàries del Juràssic Inferior (Liàsic) que presenten potències que poden assolir els 300 m i s'estructuren en diversos plecs i en lamines encavalcants. La serra de Tramuntana està formada bàsicament per plecs i encavalcaments vergents al NO, per la qual cosa la majoria d'estructures tenen un cabussament cap al SE. Les aigües de pluja que s'infiltra en superfície van assolint profunditat fins que toquen amb els nivells impermeables, que majoritàriament són les argiles, guixos i margues del Triàsic Superior (fàcies Keuper). L'estructuració dels materials implica que la majoria de circulacions subterrànies i de descàrregues tenen lloc a favor del cabussament dominant, és a dir cap al SE. Tot i així, a la banda NO de Tramuntana també hi ha descàrregues que poden tenir certa importància. Moltes de les masses subterrànies càrstiques de Tramuntana s'exploten intensament, per aquesta raó aquelles que estan en contacte amb el mar han sofert processos d'intrusió marina, mentre que les que estan aïllades del mar han registrat descensos dels nivells piezomètrics importants.

A la taula 3 s'observa que les masses d'aigua subterrània de Tramuntana més explotades han estat aquelles que estan més properes a Palma com la de La Vileta (part de la Unitat Hidrogeològica de Na Burgesa) de la qual l'any 2006 se n'extragueren 5,1 hm³/any dels 5,9 que hi entren de mitjana, la d'Esporles de la que s'aprofitaren 9,3 hm³/any dels 9,6 que hi entren, i la de Bunyola (part de la Unitat Hidrogeològica de S'Estremera) de la que s'extragueren 6,0 dels 9,1 hm³/any que hi entren de mitjana. Es destacable també la massa de Crestatx (part de la Unitat Hidrogeològica d'Inca - Sa Pobla) de la qual s'extragueren l'any 2006 2,3 hm³/any dels 2,6 que hi entren de mitjana. La resta de masses han estat relativament poc explotades degut sobretot al seu aïllament geogràfic. Es destacable que la massa de Sa Costera ha passat a ser una de les masses que alimenta a Palma des de la posada en marxa de la captació de la font des Verger l'any 2010.

	Codi	Nom	Àrea Permeable (km ²)	Infiltració pluja (hm ³ /any)	Suma entrades (hm ³ /any)	Extracció ús urbà (hm ³ /any)	Altres extraccions (hm ³ /any)	Sortida fonts (hm ³ /any)	Fonts captades (hm ³ /any)	Total usos (hm ³ /any)
Calcàries Massives Liassiques (Serra de Tramuntana)	18.02-M2	Banyalbufar	30,5	4,8	5,1	0,2	0,1	4,4	1,1	1,4
	18.02-M3	Valldemossa	32,8	4,8	4,9	0,2	0,1	3,2	0,3	0,7
	18.03-M2	Lluc	70,0	16,3	16,3	0,0	0,2	3,1	0,4	0,6
	18.04-M1	Ternelles	31,6	4,0	4,3	0,5	0,2	1,6	0,3	1,0
	18.05-M2	Aixartell	13,3	2,3	7,8	0,3	0,5	6,0	0,0	0,8
	18.06-M1	S'Olla	41,5	8,0	8,3	0,3	0,0	4,2	1,6	1,9
	18.06-M2	Sa Costera	24,8	7,4	7,4	0,0	0,0	6,7	6,0	6,0
	18.07-M1	Esporles	69,1	8,1	9,6	0,3	1,0	8,0	8,0	9,3
	18.08-M1	Bunyola (S'Estremera)	44,2	8,0	9,1	5,8	0,3	0,2	0,0	6,0
	18.08-M2	Massanella	17,1	4,3	5,6	0,0	0,0	2,5	0,1	0,1
	18.10-M1	Caimari (Ufanes)	44,0	14,3	16,5	0,4	0,0	13,0	0,0	0,4
	18.11-M5	Crestatx	5,1	1,0	2,6	2,2	0,2	0,0	0,0	2,3
	18.13-M1	Sa Vileta	17,8	2,4	5,9	3,7	1,5	0,0	0,0	5,1
Calcàries Massives i fisurades (Serres de Llevant)	18.17-M1	Capdepera	36,6	5,0	7,2	3,1	1,0	0,3	0,1	4,2
	18.17-M2	Son Servera	10,5	2,5	4,0	2,7	0,6	0,0	0,0	3,3
	18.19-M1	Sant Salvador	69,5	5,4	6,3	4,3	0,9	0,0	0,0	5,3
Calcàries Arrecifals i Calcarenites (Marines de Llevant, Migjorn, Marínetà, i altres)	18.11-M2	Llubí	89,1	17,5	21,5	7,8	2,6	0,0	0,0	10,4
	18.14-M1	Xorrigo	122,8	10,2	12,9	3,5	1,8	0,0	0,0	5,3
	18.14-M3	Pont d'Inca	103,7	8,1	18,2	9,3	4,8	0,0	0,0	14,1
	18.16-M2	Son Real	129,0	12,9	15,4	1,9	0,5	0,0	0,0	2,3
	18.20-M1	Santanyí	49,1	6,9	7,7	0,9	0,2	0,0	0,0	1,1
	18.20-M2	Cala D'Or	40,5	5,3	7,3	0,7	0,3	0,0	0,0	1,0
	18.21-M1	Marina de Lluçmajor	294,8	20,2	21,2	1,1	3,6	0,0	0,0	4,7
	18.21-M2	Pla de Campos	253,0	15,7	18,7	0,6	4,8	0,0	0,0	5,4
	18.21-M3	Son Mesquida	61,7	4,1	5,1	1,2	2,4	0,0	0,0	3,6

Taula 3: Balanç hídric resumit d'algunes de les masses subterrànies amb comportament més o menys càrstic de Mallorca. Les extraccions indicades es corresponen a dades de l'any 2006 (excepte per la massa de Sa Costera que indica la mitjana que es preveu captar), mentre que les entrades i infiltració s'han obtingut en base a la permeabilitat del terreny, la pluviometria mitjana històrica i la transferència entre masses subterrànies (SEP, 2011).

A les Serres de Llevant, 9 de les 13 masses d'aigua definides tenen un comportament més o menys càrstic, ja que estan formades en la seva gran majoria pels materials carbonatats del Triàsic superior i Juràssic inferior. Cal indicar però que el funcionament d'aquestes masses no és tant càrstic com el dels aqüífers de la Serra de Tramuntana. D'entre les masses amb característiques càrstiques de les Serres de Llevant es poden destacar, pel seu grau d'explotació les masses de Capdepera (l'any 2006 se n'extragueren 4,2 hm³ dels 7,2 que hi entren de mitjana), Son Servera (se n'extragueren 3,3 hm³ dels 4,0 que hi entren) i Sant Salvador (s'extragueren 5,3 hm³ dels 6,3 que hi entren). Les

masses de les Serres de Llevant també han sofert descensos de nivells importants en els casos en els que no hi ha connexió amb el mar, i intrusió salina en els casos en que hi ha connexió amb el mar.

La resta de masses amb comportaments o característiques càrstiques de Mallorca es localitzen bàsicament a les plataformes carbonatades miocenes que encerclen les Serres Centrals i les Serres de Llevant. En aquestes masses s'hi ha desenvolupat un carst que és visible en superfície mitjançant macroformes de relleu com poden ser els canons càrstics i les àrees deprimides endorreiques. També s'hi han desenvolupat importants sistemes càrstics subterranis que bàsicament segueixen sistemes de fractures i discontinuïtats sedimentàries. Aquests sistemes de galeries solen estar doncs orientats en direccions preferents i poden tenir longituds quilomètriques com en el cas de la cova de Vallgornera a Lluçmajor.

Pel seu grau d'explotació, d'entre les masses conformades per materials calcaris del Miocè superior i Pliocè a Mallorca es pot destacar la massa de Llubí, de la qual l'any 2006 se n'extragueren 10,4 hm³, i la massa de Pont d'Inca, de la qual se n'extragueren 14,1 hm³. La transmissivitat elevada d'aquestes masses i el fet que totes elles estan connectades amb el mar fan que la seva explotació sigui molt delicada. Aquesta circumstància juntament amb l'explotació intensiva d'alguns sectors d'aquestes masses contingudes en els materials de les plataformes neògenes han provocat que moltes d'elles estiguin afectades per processos d'intrusió marina.

Els aqüífers càrstics de Menorca.

A l'illa de Menorca es distingeixen dues grans unitats geomorfològiques: Tramuntana i Migjorn. A la regió de Tramuntana hi trobem materials paleozoics i Mesozoics deformats durant l'orogènia Alpina, mentre que la regió de Migjorn està formada per materials Miocens i Quaternaris disposats en una situació quasi horitzontal. En la divisió hidrogeològica realitzada per a l'adaptació del PHIB a la DMA una gran part de Tramuntana s'ha classificat com a no massa, ja que els materials que hi afloren no permeten l'existència d'aqüífers d'importància econòmica o aprofitables. Així, a Tramuntana s'han definit tres masses d'aigua, de les quals sols la massa de Sa Roca, és de certa importància (veure taula 4).

La regió del Migjorn, està formada gairebé en la seva totalitat per formacions arrecifals del Miocè Superior (calcàries i calcarenites) en disposició subhoritzontal. En aquesta regió s'han diferenciat tres masses d'aigua en les quals trobem la gran majoria de pous de proveïment urbà de Menorca.

La massa de Sa Roca està formada en la seva gran majoria per carbonats del Triàsic superior i del Juràssic inferior fissurats i plegats durant l'orogènia Alpina. En aquesta massa el carst no està ben desenvolupat tot i que existeixen evidències de carst en superfície. Es tracta, però d'una massa estratègica a Menorca ja que és la única massa d'importància que no està connectada amb el mar i presenta una transmissivitat bona.

Les masses del Migjorn de Menorca presenten un comportament semblant a les de les masses de les marines de Mallorca. En aquest sentit el carst desenvolupat en elles es

visible en les formes de relleu en superfície (conques endorreiques, canons càrstics, coves, ...) a part de la presència de coves i galeries (figura 6) que, com en el cas de Mallorca presenten unes direccions preferents dominades per la fracturació. Les masses del Migjorn de Menorca són i han estat els principals aquífers de l'illa ja que d'elles s'extreu gairebé el 90% de l'aigua subterrània a Menorca. Aquesta intensa explotació ha donat lloc a un descens generalitzat dels nivells a les parts més interiors de l'illa i a una intrusió marina en les zones costaneres.

	Codi	Nom	Àrea Permeable (km ²)	Infiltració pluja (hm ³ /any)	Suma entrades (hm ³ /any)	Extracció ús urbà (hm ³ /any)	Altres extraccions (hm ³ /any)	Sortida fonts (hm ³ /any)	Fonts captades (hm ³ /any)	Total usos (hm ³ /any)
Calcàries Arrecifals (Migjorn)	19.01-M1	Maó	116,7	18,9	22,0	5,5	2,5	0,0	0,0	8,0
	19.01-M2	Migjorn Gran	110,4	12,1	13,6	1,9	0,8	0,0	0,0	2,8
	19.01-M3	Ciutadella	156,6	25,9	29,0	5,1	3,8	0,0	0,0	8,9
Calcàries Trias i Lias (Tramuntana)	19.02-M1	Sa Roca	58,4	4,5	4,7	1,5	0,8	0,7	0,5	2,7

Taula 4: Balanç hídric resumit d'algunes de les masses subterrànies amb comportament més o menys càrstic de Menorca. Les extraccions indicades es corresponen a dades de l'any 2006, mentre que les entrades i infiltració s'han obtingut en base a la permeabilitat del terreny, la pluviometria mitjana històrica i la transferència entre masses subterrànies (SEP, 2011).

Els aquífers càrstics de les Pitiüses

Les Pitiüses es poden considerar com un sol domini geomorfològic format per l'illa d'Eivissa al Nord, formada bàsicament per materials plegats durant l'orogènia Alpina, i els illots del canal de Formentera i l'illa de Formentera al sud on dominen els materials post orogènics d'origen arrecifal disposats de manera subhoritzontal.

A l'illa d'Eivissa es poden diferenciar dues zones muntanyoses (Ets Amunts - Serra de Sant Vicent al Nord, i S'Atalaia de Sant Josep - Serra Grossa al Sud) separades per una depressió orientada en direcció SO - NE (depressió de Sant Antoni - Santa Eulària). Les zones muntanyoses estan formades en la seva gran majoria per carbonats massius del Juràssic inferior i del Cretaci mitjà i superior, mentre que a la depressió central hi afloren bàsicament turbidites del Miocè inferior i materials del Quaternari d'origen al·luvial, col·luvial i eòlic. Per la seva banda l'illa de Formentera està formada en la seva pràctica totalitat per calcàries arrecifals del Miocè superior disposades subhoritzontalment damunt les quals hi trobem sediments eòlics i al·luvials del Quaternari.

A les dues zones muntanyoses d'Eivissa hi trobem aquífers càrstics amb un desenvolupament important. Així a la zona dels Amunts trobem els polies de Santa Agnès de Corones i de Sant Mateu d'Aubarca, o surgències amb comportament càrstics com es Broll de Buscastell. A les Serres meridionals també s'observen processos de carstificació en superfície, però sense donar lloc a formes del relleu importants.

La compartimentació geològica és molt important a l'illa d'Eivissa, per aquesta raó no hi ha cap aqüífer de gran importància. En l'actualitat l'illa d'Eivissa es proveeix, en gran part amb aigua dessalada, però fins a la posada en marxa de les dessaladores alguns dels aqüífers d'Eivissa es van explotar intensament, el qual va provocar intrusió salina en ells. Aquesta circumstància es produïa sobretot a la massa de Serra Grossa, que proveeix a Vila, i en menor mesura a la massa de Santa Agnès que proveeix a Sant Antoni. Aquesta intrusió ha estat més eficient gràcies a la fracturació i carstificació de les masses carbonatades.

	Codi	Nom	Àrea Permeable (km ²)	Infiltració pluja (hm ³ /any)	Suma entrades (hm ³ /any)	Extracció ús urbà (hm ³ /any)	Altres extraccions (hm ³ /any)	Total usos (hm ³ /any)
Calcàries Massives i fissurades (Jurassic i Cretaci) Eivissa	20.02-M1	Santa Agnès	35,8	2,5	2,7	0,5	0,3	0,8
	20.03-M1	Cala Llonga	19,8	1,5	2,5	1,3	0,8	2,1
	20.04-M2	Es Canar	30,3	1,6	2,0	0,5	0,8	1,3
	20.05-M1	Cala Tarida	42,2	2,0	2,5	0,4	0,3	0,7
	20.06-M3	Serra Grossa	49,6	2,8	3,0	1,6	0,1	1,7
Calcàries Arrecifals i calcarenites (Formentera)	21.01-M1	La Mola	15,33	1,10	1,16	0,00	0,03	0,03
	21.01-M2	Cap de Berberia	21,18	1,30	1,55	0,00	0,04	0,04
	21.01-M3	La Savina	39,67	1,88	2,25	0,00	0,08	0,08

Taula 5: Balanç hídric resumit d'algunes de les masses subterrànies amb comportament més o menys càrstic de les Pitiüses. Les extraccions indicades es corresponen a dades de l'any 2006, mentre que les entrades i infiltració s'han obtingut en base a la permeabilitat del terreny, la pluviometria mitjana històrica i la transferència entre masses subterrànies (SEP, 2011).

Les masses d'aigua de Formentera tenen un comportament equivalent a la resta de masses de les Balears desenvolupades damunt de materials carbonatats d'origen arrecifal. Per tant els conductes càrstics i altres manifestacions associades a la fracturació d'aquests materials hi son abundants. Les petites dimensions de Formentera comporten que els aqüífers d'aquesta illa siguin de dimensions reduïdes, i la naturalesa dels materials i la connexió amb el mar impliquen que l'explotació d'aquestes masses sigui molt delicada. De fet en l'actualitat la pràctica totalitat de l'aigua de consum humà d'aquesta illa és aigua produïda per la dessaladora, tot i això les masses continuen tenint una important intrusió del mar i per tant una baixa qualitat química.

Protecció i gestió dels aqüífers càrstics

Tal i com s'ha indicat els aqüífers càrstics, per les seves especials característiques, tenen una gestió més complexa que no els aqüífers amb un flux de tipus difús. A part de la escassa capacitat de regulació natural i d'emmagatzement d'aquests tipus d'aqüífers, un dels aspectes més problemàtics d'aquests tipus d'aqüífers és la seva alta vulnerabilitat a la contaminació. La vulnerabilitat d'un aqüífer es pot definir com la facilitat amb la qual un contaminant aplicat a la superfície del terreny arriba o afecta a l'aqüífer subjacent. Per tant aquells aqüífers molt vulnerables son els que poden ser més fàcilment "atacats"

per un contaminant. La metodologia clàssica per a la determinació de la vulnerabilitat a la contaminació d'un aqüífer ha estat ideada per a aqüífers de flux difús, per aquesta raó ha estat necessari proposar mètodes específics per a zones càrstiques.

Un mètode àmpliament utilitzat per al càlcul de la vulnerabilitat d'un aqüífer és el **DRASTIC** (Aller et al., 1987). Aquest mètode té en consideració 7 variables que permeten establir un nivell de vulnerabilitat: D (Profunditat de l'aigua), R (Recàrrega neta), A (Litologia de l'aqüífer), S (Tipus de sòl), T (Pendent del terreny), I (Naturalesa de la zona no saturada), i C (Conductivitat hidràulica). A cadascun d'aquests paràmetres se li assigna un índex de ponderació que estableix la importància o influència d'aquest factor damunt la vulnerabilitat. Així, l'índex DRASTIC d'una zona concreta es determina mitjançant la següent expressió,

$$\text{DRASTIC} = 5D + 4R + 3A + 2S + T + 5I + 3C$$

Per tant aquest mètode considera que els factors més determinants per al càlcul de la vulnerabilitat són la profunditat i la naturalesa de la zona no saturada. Així, quan la profunditat de l'aigua és inferior a 1,5 metres D té un valor de 10, mentre que quan la profunditat és superior a 30 m el valor és 1. Així mateix quan la zona no saturada es correspon amb argiles o llims al paràmetre I se li assigna un valor de 2, mentre que quan es tracta de carbonats carstificats se li assigna un valor de 10. D'altra banda el pendent natural del terreny i el tipus de sòl són els paràmetres menys determinants. Si es determina l'índex DRASTIC a un territori s'obtindrà un valor característic per a cada àrea que ens permetrà determinar quines zones són les més vulnerables (índex DRASTIC més alt) i quines són les menys vulnerables (índex DRASTIC baix).

Una altra metodologia àmpliament utilitzada és el mètode GOD (Foster, 1987). Aquest sols considera 3 paràmetres i sol ser utilitzat en indrets en els quals no es té un bon coneixement del medi. Aquesta metodologia permet, doncs, fer una primera determinació o aproximació a la vulnerabilitat de cada àrea d'un territori. Els paràmetres considerats són: **G**: Tipus d'aqüífer. Podent-se considerar 5 tipus diferents: inexistent, sorgent, confinat, semiconfinat o lliure. Aquest paràmetre pot tenir valors entre 0 (no existeix cap aqüífer) i 1 (aquífer lliure). **O**: Litologia de la zona no saturada. Es correspon amb la naturalesa i el grau de consolidació de la zona no saturada, i per tant té en compte la porositat i permeabilitat d'aquesta. Aquest paràmetre se li assignen valors entre 0,4 (argiles sense consolidar) y 1 (calixos i calcàries fissurades). **D**: Profunditat de l'aigua subterrània. Aquest paràmetre se li assignen valors entre 0,4 (profunditats superiors a 100 m) i 1 (profunditats inferiors a 2 metres). Multiplicant aquests tres paràmetres s'obté una valoració de la vulnerabilitat de l'aqüífer. Quan el valor és 0 indica que no hi ha aqüífer, mentre que els valors propers a 0 tindran una vulnerabilitat molt baixa, i els propers a 1 una vulnerabilitat molt alta.

Aquestes dues metodologies estan ideades per a aqüífers amb flux difús, per tant la seva aplicació a zones càrstiques pot induir a l'obtenció de vulnerabilitats poc reals. Degut a que els aqüífers càrstics són força corrents s'han desenvolupat mètodes específics per a aquests aqüífers entre els que es poden destacar el mètode COP i el mètode EPIK.

L'índex COP (Vías et al., 2002) s'obté al multiplicar tres factors: **C**, Concentració de flux; **O**, Estrats suprajacents, i **P**, Precipitació. El factor C es relaciona amb com i amb quina rapidesa les aigües superficials s'infilten fins a l'aqüífer. Per aquest factor es

diferencien aquelles àrees en que hi ha recàrrega mitjançant engolidors de la resta d'àrees. En aquelles àrees on hi ha engolidors C dependrà de la distància als engolidors. A la resta de zones C dependrà bàsicament del grau de desenvolupament del carst. Valors baixos d'aquest factor ens indicarà vulnerabilitats altes.

El factor O dona idea de la capacitat de la zona no saturada per a filtrar els contaminants. Per a l'obtenció d'aquest factor es considera l'existència o no de sòl, i la naturalesa i potència d'aquest. Si existeix un sol argilós i potent tindrà un factor elevat, mentre que si és un sòl poc potent i arenós se li assignarà un factor baix. Aquest factor també avalua la litologia de les roques de la zona no saturada i el fet que l'aqüífer sigui lliure, confinat o semiconfinat. Les roques argiloses i llimoses tenen valors elevats, mentre que les roques carstificades els tenen baixos. La suma d'aquests dos factors (sol i litologia) ens dona el factor O. Els valors elevats d'O indicaran una protecció de l'aqüífer alta, i per tant una vulnerabilitat baixa.

El factor P es relaciona amb la influència de la precipitació i la intensitat d'aquesta. Aquest mètode considera que la intensitat de la pluja, obtinguda mitjançant la relació entre la precipitació anual i el número de dies en els que es concentra aquesta pluja, incrementa la vulnerabilitat de l'aqüífer.

Un altre mètode per al càlcul de la vulnerabilitat desenvolupat per aquífers càrstics és el mètode **EPIK**, desenvolupat per Doerflinger y Zwahlen (1998). Aquest mètode es basa en quatre paràmetres: **E**, característiques de la zona superficial (epikarst); **P**, cobertora de protecció; **I** condicions d'infiltració; **K**, desenvolupament de la xarxa càrstica.

Aquest mètode defineix el factor de protecció de l'aqüífer, així valors baixos indicaran una protecció baixa i per tant una vulnerabilitat elevada. Aquest índex (**V**) s'obté al sumar els quatre factors considerats amb una ponderació establerta de la següent manera: $V = (3E) + (P) + (3I) + (2K)$

La variable **E** permet assignar un valor a la part superficial de l'aqüífer i la zona propera a la superfície. Aquesta variable tindrà el valor 1 quan existeixi una xarxa càrstica típica ben desenvolupada amb dolines, coves, i resta d'elements. El valor serà 3 quan hi hagi una absència de morfologia epicàrstica, i E serà 2 quan existeix evidències de carst a la superfície però no estigui ben desenvolupat. La variable **P** permet definir quin tipus de cobertora o sòl està present. Es diferencien quatre possibilitats. Quan hi ha absència de capa protectora ($P=1$). Si existeix una cobertora de poc gruix ($P=2$). Quan la cobertora és de gruix mitjà ($P=3$). En el cas que la cobertora estigui formada per argiles, el valor de P serà 4. La variable **I** permet estimar la facilitat a la infiltració o recàrrega. El valor d'I serà 1 quan es tracti de zones amb vies accessibles per a la infiltració, serà 2 quan el terreny tingui pendents moderats, i serà màxim (3) quan la zona presenti pendents del terreny elevats. La variable **K** es refereix al desenvolupament de la xarxa càrstica. Quan existeix una xarxa càrstica ben desenvolupada el valor serà 1. Quan la carstificació és relativament pobre el valor serà 2, i quan l'aqüífer té un comportament proper a un aquífer detrític o isòtrop el valor serà 3.

Un cop s'han estimat cadascun dels paràmetres s'obté el factor de protecció de l'aqüífer que podrà oscil·lar entre 9 (màxima vulnerabilitat) i 34 (mínima vulnerabilitat). Els valors entre 9 i 19 es consideren amb vulnerabilitat alta, els que es situen entre 20 i 25 tenen una vulnerabilitat moderada, i els que assoleixen valors entre 26 i 34 se'ls assigna

un grau de vulnerabilitat baix. Els autors d'aquest mètode afegixen una altra categoria que es correspon amb una vulnerabilitat molt baixa quan existeix un sòl o cobertura formada per materials de baixa conductivitat hidràulica (argiles) de com a mínim 8 metres de gruix.

En resum els mètodes "clàssics" per a l'obtenció de la vulnerabilitat a la contaminació d'un aqüífer consideren que la profunditat del nivell piezomètric i el tipus de roca present a la zona no saturada són els dos paràmetres més determinants. A les zones càrstiques ben desenvolupades però, algun d'aquests paràmetres poden ser relativament poc importants. Així, en les àrees on existeix un sistema d'avencs o engolidors ben desenvolupat la profunditat del nivell freàtic pot ser poc important, ja que l'aigua d'infiltració discorre molt ràpidament fins a profunditats que poden superar el centenar de metres. Per aquesta raó els mètodes ideats per a aqüífers càrstics consideren com a factors determinants de la vulnerabilitat l'existència d'un sistema càrstic i fins a quin punt està desenvolupat, considerant-se tant l'existència d'una morfologia càrstica en superfície com l'existència d'un carst desenvolupat en profunditat. S'ha d'indicar, però, que si es vol fer una estimació de la vulnerabilitat d'un territori on hi ha aqüífers càrstics i no càrstics és més convenient utilitzar un mètode genèric o clàssic, tot i que subestimi la vulnerabilitat a les zones amb carstificació desenvolupada. S'ha de considerar també que per a poder aplicar els mètodes específics per a aqüífers càrstics és necessari disposar d'un bon coneixement del desenvolupament del carst en cada zona. A la figura 8 es presenta la vulnerabilitat a la contaminació a l'illa de Mallorca, en la qual s'observa que els valors de més alta vulnerabilitat es localitzen a les àrees dominades per roques carbonatades i a les zones on la profunditat del nivell freàtic és baixa.

Un altre aspecte relacionat amb la gestió dels aqüífers és el referent a la protecció de les captacions de proveïment urbà. Els pous de proveïment disposen d'uns perímetres de protecció que tenen l'objectiu d'evitar l'arribada de contaminants al pou en qüestió. La contaminació considerada pot ser bacteriològica o química. En el cas de la contaminació bacteriològica s'ha d'establir una zona de transit al voltant del pou que permeti assegurar que un microorganisme no sobreviurà, per la qual cosa el temps de trànsit sol estar entre 10 i 100 dies. En el cas de la contaminació química el temps de trànsit que sol considerar-se és d'entre 5 i 10 anys, que és el temps que es considera necessari per a diluir un possible contaminant que ha entrat a l'aqüífer. Les envoltants que defineixen aquests temps de trànsit entre un punt del territori i el pou de proveïment són els anomenats perímetres de protecció.

Per a la determinació de la distància cartogràfica al voltant del pou que es correspon amb el temps de trànsit es poden utilitzar diverses metodologies. De la mateixa manera que per a l'obtenció de la vulnerabilitat d'un aqüífer, els mètodes clàssics per a determinar aquests temps de transit així com els radis d'influència o zona de captació d'un pou estan ideats per a aqüífers amb flux difús. Aquests mètodes es basen en les equacions de flux de l'aigua subterrània i en els paràmetres hidrodinàmics, el qual en aqüífers no isòtrops pot induir a errors. Les variables que es consideren per establir els temps de transit i en conseqüència els perímetres de protecció són la transmissivitat, el cabal de bombament, el gruix saturat de l'aqüífer, el gradient hidràulic i la porositat. A partir d'aquests paràmetres s'obté l'evolvent o perímetre al voltant del pou que tindrà una forma més o menys el·líptica en funció del gradient hidràulic de la zona. Degut a que en els aqüífers càrstics l'aigua circula preferentment per conductes l'establiment d'un perímetre de protecció amb aquest tipus de metodologia pot aportar resultats irrealistes. En

aquest sentit hi ha altres metodologies que ens permeten fer una millor estimació dels perímetres de protecció.

Un mètode utilitzat és fer ús de traçadors. Aquest mètode consisteix en abocar una substància innòcua per a l'aqüífer a una zona i determinar el temps que triga en aparèixer a la captació en qüestió. D'aquesta manera s'obté amb bona precisió les velocitats i direccions del flux subterrani. Una altra opció que permetrà determinar el perímetre de restriccions és fer un bon estudi hidrogeològic que permeti determinar les direccions de flux en cada zona. En les àrees càrstiques a més serà necessari conèixer la fracturació que afecta a les roques carbonatades, ja que les cavitats i per tant els conductes per on circularà l'aigua subterrània seguiran aquestes línies preferents. En resum, degut a la anisotropia dels aquífers càrstics, per a determinar els perímetres de protecció dels pous en aquestes zones és necessari disposar de una major informació del subsòl, en especial per a la determinació de velocitats i direccions de flux preferents.

Problemàtica dels aquífers càrstics

A part la problemàtica que comporta l'existència d'un epikarst ben desenvolupat, ja que comporta que l'aigua d'infiltració assoleixi l'aqüífer amb rapidesa, una de les problemàtiques més acusades en els aquífers càrstics és el desenvolupament del carst subterrani. La formació i desenvolupament d'aquest carst està condicionada en gran mesura per la circulació de les aigües subterrànies, per la qual cosa la modificació d'aquesta circulació pot induir i potenciar processos de dissolució o precipitació. En aquest sentit la gestió dels aquífers càrstics ha de tenir en consideració que l'explotació de l'aqüífer pot provocar o accelerar processos càrstics.

Un exemple d'aquest problema ha ocorregut a la massa de Crestatx (Garcia Moreno i Mateos, 2011). Aquesta massa d'aigua que proveeix la badia d'Alcúdia ha estat intensament explotada, de fet s'estima que 2,3 dels 2,6 Hm³ anuals que hi entren s'extreuen mitjançant pous (taula 3). Aquest intensa explotació es produeix bàsicament a l'època estival, període en el qual el nivell piezomètric pot descendir fins a quasi 90 m per sota del nivell del mar. D'altra banda a l'època hivernal els nivells es recuperen a cotes positives. A finals dels anys 90 es va detectar l'aparició d'enfonsaments associats a col·lapses càrstics que ens entre els anys 2008 i 2010 varen accelerar-se amb les intenses pluges d'aquets anys. L'aparició d'aquests col·lapses sembla poder-se relacionar directament amb l'explotació de l'aqüífer. Així aquestes oscil·lacions piezomètriques han ajudat a incrementar la grandària dels conductes càrstics de la zona i han permès l'arrossegament dels materials fins que omplien les cavitats. En l'actualitat alguns d'aquests col·lapses, que tenen diàmetres de fins a 15 metres i profunditats de 7 m, afecten a una urbanització i la seva solució no és gens fàcil.

Altres exemples de l'obertura de col·lapses en zones càrstiques de les Balears els trobem a la massa d'aigua subterrània de Migjorn a Menorca. En aquesta zona en el barranc occidental del nucli d'Es Migjorn Gran hi ha una zona que rep el topònim de l'engolidor. Aquesta zona es localitza a la part central del barranc en una zona deprimida topogràficament. Per la part central d'aquest barranc hi discorre un petit canal de pedra que permet evacuar l'aigua en èpoques de pluja. L'any 2005 a uns 400 m aigües amunt del citat engolidor es va obrir un col·lapse d'uns 7 metres de diàmetre i 5 metres de profunditat que va afectar a aquest canal i a les terres circumdants. Un estudi de

tomografia elèctrica realitzat a la zona (figura 9) va posar de manifest que la cobertora de material al·luvial que recobreix el fons del barranc (en colors blaus) no reposa sobre un substrat horitzontal format per calcarenites miocenes (colors grocs i vermells), sinó que omple forats o avencs. S'observa també l'existència d'anomalies dins la cobertora que poden associar-se també a zones amb cavitats horitzontals.

L'obertura d'aquest col·lapse, però, no va provocar més danys que la pèrdua d'una petita zona de conreu a l'amo dels terrenys, a part de la inutilització de la síquia. No va ser fins uns 4 anys més tard (any 2009) que el problema es va accentuar, ja que es va obrir un nou col·lapse uns 400 m aigües amunt de l'anterior. En aquest cas aquest col·lapse no va ser de tanta profunditat com el primer, però va coincidir amb una aparició de fins a un dels pous de proveïment del nucli des Migjorn situat uns 250 metres a l'est del col·lapse. Així, doncs sembla ser que hi ha una connexió directe entre el darrer dels col·lapses i algun dels pous de proveïment del poble. En aquest cas aquests col·lapses no semblen atribuïbles a l'ascens i descens dels nivells piezomètrics estacionals, sinó que estan relacionats amb el descens continuat que han sofert els nivells generals en aquesta zona. De fet des dels anys 80 la profunditat de l'aigua en aquesta zona a descendit entre 10 i 20 metres a tota la zona, arribant-se a descensos de 30 metres (figura 10). Aquest descens pot haver provocat un canvi en les condicions dels materials de la zona vadosa que ha facilitat l'aparició dels col·lapses

Conclusions

Les roques que conformen els terrenys aflorants a les Illes Balears són en la seva gran majoria de tipus carbonatat. Aquestes roques carbonatades estan afectades en molts casos per processos càrstics. A les Balears la pràctica totalitat dels recursos hídrics provenen de les aigües subterrànies per tant és necessari tenir un bon coneixement dels aqüífers càrstics. Degut a que el comportament dels aqüífers càrstics és diferent al dels aqüífers de flux difús la gestió dels recursos hídrics a les Balears ha de tenir en consideració l'existència d'aquest fenomen. En aquest sentit és necessari que es duguin a terme estudis encaminats al millor coneixement del carst a les Balears. Aquest millor coneixement ha de permetre poder establir la vulnerabilitat dels aqüífers, les velocitats i les direccions de circulació dels fluxos subterranis. Així mateix l'explotació dels aqüífers càrstics de les Balears s'ha de dur a terme considerant els canvis que aquesta explotació pot induir en el funcionament dels sistemes càrstics. Aquests canvis de funcionament poden provocar pèrdues econòmiques de certa importància, ja que poden induir col·lapses o subsidències, raó per la qual és necessari fer una estimació de les conseqüències que poden anar associades a la sobreexplotació d'un aqüífer.

Bibliografia

ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J. H., PETTY, R.J., & HACKETT G., (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. *NWWA/EPA Series, EPA-600/2-87-035*.

DOERFLINGER, N. & ZWAHLEN F. (1998). Practical guide, groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK). *Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL)*, 56 p

FOSTER, S.S.D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Vulnerability of Soil and Groundwater to pollutants. *TNO Committee on Hydrological Research Information 38*: 69-86.

I. GARCIA MORENO, I & MATEOS R.M. (2011) Sinkholes related to discontinuous pumping: Susceptibility mapping based on geophysical studies The case of Crestatx (Majorca, Spain). *Environmental Earth Sciences 64-2*, 523-537.

IGME (2003). Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio. *Serie: HIDROGEOLOGÍA Y AGUAS SUBTERRÁNEAS*. 273 pp

Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) (1998). Guide pratique. Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK). 57 pp.

Servei d'Estudis i Planificació de la DG de Recursos Hídrics (2011). Memòria del Pla Hidrològic de les Illes Balears. 490 pp
(<http://www.caib.es/sacmicrofront/archivopub.do?ctrl=MCRST259ZI95153&id=95153>)

VIAS, J.M., ANDREO, B., PERLES, M.J., CARRASCO, F., VADILLO, I. & JIMENEZ, P. (2004): The COP method. Dins: *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*, Final Report of COST Action 620. Europe an Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development. 163-172.

Figura 1: Evolució piezomètrica típica d'un aquífer Càrstic.
Figure 1: Typical karstic piezometric evolution.

Figura 2: Evolució piezomètrica d'un aquífer amb certes característiques càrstiques.
Figure 2: Piezometric evolution of an almost karstic aquifer.

Figura 3: Evolució piezomètrica d'un aquífer de flux difús.
Figure 3: Piezometric evolution of a diffuse flux aquifer.

Figura 4: Masses d'aigua subterrània definides en base als criteris de la DMA a l'illa de Mallorca, amb indicació dels materials aflorants i agrupats per la seva permeabilitat.
Figure 4: Water bodys defined in Majorca according to WMD. Main rock materials are also indicated according to its permeability.

Figura 5: Masses d'aigua subterrània definides en base a la DMA a Menorca, amb indicació dels materials aflorants i agrupats per la seva permeabilitat.
Figure 5: Water bodys defined in Minorca according to WMD. Main rock materials are also indicated according to its permeability.

Figura 6: Perfil de tomografia elèctrica a Ciutadella on s'observen zones d'alta resistivitat (colors vermells) amb formes més o menys cilíndriques que es relacionen amb cavitats horitzontals buides o conductes.
Figure 6: Electric tomography profile realized in Ciutadella. High resistivity (red zones) cylindrical shapes are related to horizontal karstic caves.

Figura 7: Masses d'aigua subterrània definides en base als criteris de la DMA a les Pitiüses, amb indicació dels materials aflorants i agrupats per la seva permeabilitat.
Figure 7: Water bodys defined in Pitiusas islands according to WMD. Main rock materials are also indicated according to its permeability.

Figura 8: Mapa de la vulnerabilitat a la contaminació a Mallorca realitzada amb el mètode DRASTIC.
Figure 8: Vulnerability map of Majorca obtained with DRASTIC method.

Figura 9: Perfils de tomografia elèctrica realitzats a Es Migjorn Gran per a determinar l'existència de estructures càrstiques en profunditat.
Figure 9: Electric tomography profiles set up near Es Migjorn Gran to determine the possible existence of karstic structures at depth.

Figura 10: Evolució piezomètrica a un dels pous de proveïment del nucli de Es Migjorn Gran.
Figure 10: Piezometric evolution in a urban supply well in Es Migjorn Gran.