

7 Recursos hidrològics

Autors

Josep Mas-Pla

Ramon J. Batalla

Àngels Cabello

Francesc Gallart

Pilar Llorens

Diana Pascual

Eduard Pla

Laurent Pouget

Anabel Sánchez

Montserrat Termes

Laura Vergonyós

Josep Mas-Pla és hidrogeòleg, doctor en ciències geològiques i doctor en hidrologia i recursos hídrics. Actualment, és professor a la Universitat de Girona, on és responsable del Grup de Recerca en Geologia Aplicada i Ambiental (SGR 429). És investigador sènior a l'Institut Català de Recerca de l'Aigua. La recerca que duu a terme es desenvolupa en el camp de la hidrogeologia, en els aspectes quantitius i qualitius dels recursos hídrics, i ha aprofundit en la dinàmica dels aqüífers regionals i en la contaminació d'origen agrícola (nitrats, contaminants emergents) de l'aigua subterrània. Ha participat en els dos informes anteriors sobre el canvi climàtic a Catalunya.

Ramon J. Batalla és geomorfòleg, doctor en geografia per la Universitat de Barcelona. És professor de geografia física a la Universitat de Lleida des del 1996. És investigador sènior adscrit a l'Institut Català de Recerca de l'Aigua. Dirigeix el Grup de Recerca de Dinàmica Fluvial (SGR 645). Treballa en l'anàlisi de processos biofísics fluvials, especialment pel que fa al transport de sediments, i quina influència té en les comunitats d'invertebrats bentònics. També investiga els efectes del canvi global en els recursos hídrics i la dinàmica dels rius i estudia el comportament hidro-sedimentari dels grans rius regulats.

Àngels Cabello és enginyera de camins especialitzada en hidràulica i té tretze anys d'experiència en el

sector de l'aigua. Ha estat investigadora de l'equip d'Anàlisi dels Impactes del Canvi Global, a Cetaqua, i ha participat en diversos projectes europeus relacionats amb la gestió de riscos d'inundacions i sequeres.

Francesc Gallart és doctor en ciències geològiques i es dedica a la recerca de temes de geomorfologia i hidrologia en el CSIC des de l'any 1982. La línia de recerca que desenvolupa se centra en l'estudi dels processos hidrològics i erosius, principalment a les conques de recerca de Vallcebre (Alt Berguedà).

Pilar Llorens és doctora en geografia i investigadora a l'Institut de Diagnosi Ambiental i Estudis de l'Aigua del CSIC. La principal línia de recerca que desenvolupa és l'ecohidrologia, concretament l'estudi de les interrelacions entre la vegetació i els processos hidrològics i el paper que tenen en el balanç hídric a diferents escales espaciotemporals. Les investigacions, les porta a terme principalment a les conques de Vallcebre.

Diana Pascual és enginyera de boscos per la Universitat de Lleida. Des del 2009 treballa com a tècnica al CREAM, on estudia els efectes del canvi global en l'ús de l'aigua i en els ecosistemes forestals. Ha participat recentment en els projectes ACCUA i CLICO (FP7). Actualment, s'encarrega de la coordi-

nació tècnica del projecte Life+ MEDACC i col·labora activament en el projecte BeWater (FP7).

Eduard Pla és llicenciat en ciències ambientals i doctor en ecologia per la Universitat Autònoma de Barcelona. Des del 2002 treballa com a investigador al CREAF, on estudia els efectes del canvi global en els ecosistemes mediterranis i l'ecologia del foc. Actualment, la recerca s'orienta cap a l'anàlisi de la vulnerabilitat al canvi global en l'ús de l'aigua i la definició de mesures d'adaptació.

Laurent Pouget és expert en enginyeria hidràulica i té deu anys d'experiència en gestió i planificació de recursos hídrics, inundacions fluvials i xarxes de drenatge i clavegueram. És investigador de l'equip d'Anàlisi dels Impactes del Canvi Global, a Cetaqua, i ha participat en diversos projectes europeus, com, per exemple, el Life+ Water Change o el FP7 EUPORIAS.

Anabel Sánchez és llicenciada en biologia per la Universitat de Barcelona. Des del 1996 treballa al

CREAF, on participa en diversos projectes per a quantificar el balanç de carboni i aigua als boscos mediterranis i europeus, avaluar l'impacte del canvi climàtic en els serveis dels ecosistemes forestals i identificar estratègies de gestió sostenible i de mitigació i adaptació al canvi global. Actualment, analitza la vulnerabilitat al canvi global en l'ús de l'aigua i la definició de mesures d'adaptació (projecte Life+ MEDACC) i coordina el projecte BeWater (FP7).

Montse Termes és professora titular a la Facultat d'Economia i Administració d'Empreses de la Universitat de Barcelona i directora científica de l'equip de Recerca en Aigua, Economia i Societat, a Cetaqua. És experta en economia del sector públic, economia urbana i regional i economia de l'aigua.

Laura Vergonyós és llicenciada en ciències ambientals i màster en tecnologies de la informació geogràfica. Treballa com a tècnica en sistemes d'informació geogràfica aplicats a estudis de recursos i ecosistemes a l'Institut Català de Recerca de l'Aigua.

Sumari

Síntesi	164
7.1. Introducció	165
7.2. Estimació dels efectes del canvi global en els recursos hídrics	166
7.2.1. Efectes en l'escolament superficial.....	166
7.2.2. Efectes en la recàrrega dels aqüífers.....	168
7.2.3. Efectes de l'augment del nivell del mar a les planes litorals i deltaïques	169
7.3. Relació entre recursos hídrics i demanda d'aigua a Catalunya en el marc del canvi global	170
7.4. Efectes del canvi en els components hidrològics i els recursos hídrics al segle XXI.....	171
7.4.1. Càlcul de l'afecció i de la distribució per conques hidrogràfiques	172
7.4.2. Valoració dels efectes climàtics en la disponibilitat de recursos	179
7.5. Conclusions	182
7.6. Recomanacions	183
Referències bibliogràfiques	185

Síntesi

Els efectes del canvi climàtic en la disponibilitat de recursos hídrics a Catalunya constitueixen un dels impactes clau per al desenvolupament del país durant els decennis vinents. La importància de l'aigua en les necessitats humanes i en el manteniment dels ecosistemes converteix els recursos hídrics en un dels components més rellevants pel que fa a la sostenibilitat territorial. Diferents estudis i projectes realitzats a Catalunya en els darrers anys determinen que els canvis en els processos hidrològics són el resultat tant de les variacions climàtiques com d'efectes antròpics i, entre d'altres, del canvi d'usos del sòl. Tots aquests estudis, amb diferents metodologies i perspectives (hidrològiques, ecològiques i socioeconòmiques), coincideixen a l'hora de pronosticar un escenari d'escassetat hídrica que requereix mesures d'adaptació.

Aquest capítol presenta, complementàriament, unes cartografies de l'efecte de les projeccions climàtiques en els recursos hídrics, conceptualment anomenats *aigua blava*, realitzades per al conjunt de subconques de Catalunya. Aquestes aproxima-

cions, les quals tenen relació amb les variacions de temperatura i de precipitacions estimades per als horitzons del 2021 i del 2051 i amb la distribució actual dels usos del sòl a cada subconca, assenyalen reduccions importants de la disponibilitat dels recursos hídrics, amb una zonació marcada. A grans trets, indiquen una reducció mitjana propera al 10 % a les conques pirinenques i un màxim del 22 % a les conques litorals al 2051. Aquesta reducció es manifestarà a curt termini dins dels horitzons que han estat tinguts en compte.

En aquest procés d'adaptació, cal destacar el paper de les capçaleres pirinenques com a àrees fonamentals d'abastament. Per a afrontar l'escassetat dels recursos hídrics caldrà promoure una gestió integrada del territori que tingui en compte un replantejament de les infraestructures, de les connexions, de l'ús de recursos alternatius i de la distribució territorial dels recursos per a les diferents necessitats.

Paraules clau

balanç hídric, aigua superficial, aigua subterrània, escassetat hídrica, vulnerabilitat

7.1. Introducció

Els informes internacionals i nacionals sobre el canvi climàtic coincideixen a l'hora d'assenyalar que l'augment en la variabilitat de la disponibilitat dels recursos hídrics serà un dels fenòmens més rellevants als quals caldrà que ens adaptem. Les regions de clima mediterrani es caracteritzen pel fet de tenir una variabilitat hidroclimàtica important (Conacher i Sala, 1992) i, per tant, es preveu que seran especialment sensibles a la variabilitat i a l'escassetat més grans de recursos hídrics que representaran els nous escenaris climàtics (Martín-Vide *et al.*, 2011). La disminució dels recursos hídrics afecta molts i diversos elements del medi natural i del territori, com, per exemple, la disponibilitat d'aigua per a satisfer la demanda per a usos varis, la producció energètica i, de manera notable, la dinàmica biofísica dels sistemes fluvials (per exemple, la interacció entre aigües superficials i subterrànies a les lleres, el transport de sediments i la qualitat dels hàbitat riberencs) i d'altres sistemes associats, com ara platges i deltes.

Fer compatible la garantia d'aigua per a satisfer les diferents demandes i el manteniment del bon estat hidromorfològic i ecològic dels rius, tal com indica la Directiva marc de l'aigua (Directiva 2000/60/CE), requereix tenir un coneixement exhaustiu de la quantitat i qualitat dels recursos hídrics disponibles i de les necessitats econòmiques, socials i ambientals que s'hi associen. Els escenaris climàtics previstos per a Catalunya indiquen de manera clara que l'escassetat de recursos hídrics serà el principal objectiu al qual caldrà adaptar les polítiques de gestió hídrica i ambiental (ACA, 2015).

El canvi climàtic i els efectes que té són dos dels elements principals dins l'anomenat *canvi global*, fet que engloba no solament el clima, sinó també els canvis en els usos del sòl i la gestió de les conques, els rius i els aqüífers duts a terme durant el segle xx. Aquests canvis han modificat el balanç hídric global, regional i de conca, de manera que les conseqüències són equiparables a les repercussions que tenen les variacions en la temperatura i les precipitacions (IPCC, 2014; Buendía *et al.*, 2015). Òbviament, aquestes alteracions tenen efectes tant en els recursos hídrics superficials com en els subterranis i en les relacions entre els

dos components. A escala regional, per exemple, determinar les alteracions de la dinàmica hidrogeològica en zones on l'aigua subterrània és una font de subministrament indispensable per a rius i zones humides serà clau a l'hora de fer el diagnòstic de la direcció i magnitud del canvi (Mas-Pla, 2005). Les previsions de demanda per a la meitat del segle XXI, les quals són condicionades pel creixement demogràfic i l'eficiència d'ús, no assenyalen cap creixement notable de les necessitats hídriques a les conques internes de Catalunya, on hi ha la demanda domèstica i industrial més destacables. De fet, des del 2001, s'ha registrat un descens de l'abastament urbà del 15 %, el qual ha passat a ser de 572 hm³/any el 2012. Les estimacions de demanda hídrica basades en un creixement més gran de la població indiquen un consum per al 2051 similar al que hi havia a principis dels anys 2000 (ACA, 2015). Aquesta estabilitat en la demanda a les conques internes contrasta amb els nous regadius i les grans presses projectades per a abastir-los en l'actual Pla Hidrològic a la Conca de l'Ebre, on, en cas que es dugui a terme, l'increment de les necessitats agrícoles es trobarà en un conflicte amb altres usos. Els usos ambientals i, més específicament, l'estabilitat del delta de l'Ebre en tots els aspectes que depenen del cicle hidrològic i sedimentari serien especialment sensibles: la contenció de la falca marina i del transport de sediment (que actualment ja són controlats pels embassaments de Riba-roja i Mequinensa), l'equilibri de la línia de costa (que depèn, tanmateix, de la subsidència del mateix delta i de l'ascens del nivell del mar), la disponibilitat d'aigua per a reg, el manteniment de l'equilibri ambiental en el sentit més ampli, i, òbviament, la dinàmica socioeconòmica relacionada amb el cabal del riu.

En aquest context, els coneixements sobre els efectes del canvi global a Catalunya assolits durant el darrer decenni han estat fruit de nombrosos projectes de recerca que, de manera directa o indirecta, han avaluat els efectes que un clima i un territori canviant poden tenir en els recursos hídrics i els ecosistemes que en depenen. En aquest capítol, exposem una síntesi de tots aquests avenços amb l'objectiu de determinar quina és la disponibilitat actual de recursos hídrics i quina pot ser la magnitud del canvi. Així mateix, es presenta una valoració dels recursos disponibles mitjançant un

exercici de balanç hídric al conjunt de les conques hidrogràfiques de Catalunya, el qual es basa en les projeccions climàtiques per a Catalunya (Calbó *et al.*, capítol 5 d'aquest TERCER INFORME SOBRE EL CANVI CLIMÀTIC A CATALUNYA). A partir d'aquesta informació es presenten una sèrie de recomanacions que pretenen contribuir a una adaptació més bona al canvi i als escenaris previstos, en què l'aigua serà, encara més, un recurs escàs i variable.

7.2. Estimació dels efectes del canvi global en els recursos hídrics

En el context del cicle hidrològic, la disponibilitat d'aigua (recursos) és determinada per la relació entre els diferents components del balanç hídric, entre els quals la precipitació (P) i l'evapotranspiració potencial o de referència (ET_0 , segons la temperatura de l'aire, la velocitat del vent i la radiació solar) estan determinades directament per les condicions climàtiques. El resultat del balanç entre aquests components és l'evapotranspiració real (ET_r) d'una banda i, de l'altra, l'excés d'aigua que es manifesta, sobretot, en els cabals dels rius (escolament superficial, ES) i en la recàrrega de les aigües subterrànies per infiltració. Concretament, la infiltració d'aigua al sòl (I) depèn de l'estat hídric, de les característiques fisicoquímiques, de la coberta vegetal i de l'ús que se'n faci.

Tradicionalment, la gestió hídrica ha estat centrada principalment pel que fa a l'aigua d'escolament (i, parcialment, també la subterrània), malgrat que representa una fracció relativament petita del balanç (normalment, menys del 20 %). Per aquesta raó, a partir de final del segle xx, i amb la finalitat de gestionar els recursos d'aigua d'una manera sostenible en relació amb un ampli espectre de situacions, es tendeix a simplificar el balanç hídric perquè es creu que l'aigua de pluja es reparteix entre *aigua verda* i *aigua blava*. Com detallem més endavant (apartat 7.4), l'*aigua verda* és la que utilitzen els ecosistemes terrestres i els conreus de secà i l'*aigua blava* és l'aigua lliure que es converteix en escolament superficial i subterrani. Quan en una conca es produeix o planifica una modificació en l'ús del sòl que produirà un canvi en el consum d'*aigua verda*, s'ha de tenir en compte que el canvi repercutirà en els recursos disponibles d'*aigua blava* (Falkenmar i Rockström, 2004; Calder, 2005; Birot i Gràcia, 2011; Gallart, 2015).

L'estudi de cadascun dels components del balanç hídric en les conques catalanes, a diferents escales temporals i espacials, i la relació que té amb el canvi climàtic i el canvi global aporta una sèrie de resultats que tractem de sintetitzar a continuació.

7.2.1. Efectes en l'escolament superficial

Són diversos els treballs relacionats amb la influència del canvi climàtic en l'escolament superficial i amb els cabals dels rius a Catalunya, com, per exemple, els que es van dur a terme dins el marc del projecte ACCUA (CREAF, 2012) a partir de la modelització dels efectes en el cabal produïts amb diversos escenaris climàtics (moderat —B1— i mitjà-alt —A2—; escenaris de l'AR4 de l'IPCC) a les conques del Fluvià, la Tordera i el Siurana (Candela *et al.*, 2012; Pascual *et al.*, 2014), els quals es basaven en les projeccions climàtiques de regionalització dinàmica elaborades per l'SMC (Barrera-Escoda i Cunillera, 2010 i 2011). Els treballs de Pascual *et al.* apunten cap a una reducció mitjana de cabal del 34 % per al període 2076-2100 a les conques més humides (Fluvià i Tordera) i un decreixement més baix (25 % per al mateix període) a la conca més seca (Siurana), amb una afectació més gran en els cabals mitjans durant l'estiu i la tardor. Alhora, el treball explora les implicacions que aquests descensos poden tenir en els cabals de manteniment en els diferents trams dels rius estudiats i en els dies en què el cabal circulat serà inferior al recomanable. A les capçaleres del Fluvià i la Tordera, i per a l'escenari A2, les prediccions amplien molt notablement el nombre de dies amb cabals inferiors als necessaris per al funcionament saludable dels ecosistemes que depenen del riu.

L'estudi de Candela *et al.* (2012) té en compte la modelització de la recàrrega natural del subsòl en condicions climàtiques futures. Els resultats mostren que un increment de la temperatura de 2,2 °C i un decreixement de la precipitació de l'11 % comportaran al 2050 un descens del 20 % del cabal fluvial i d'un 18 % de la recàrrega al subsòl. Els mateixos autors destaquen, també, la importància de les condicions d'humitat del sòl en el control del balanç hídric pel que fa a aquestes prediccions.

Resultats preliminars d'estudis recents en el marc del projecte Life+ MEDACC (Vicente-Serrano *et al.*,

2015) han constatat descensos significativament rellevants en els cabals circulants al Segre, el Ter i la Muga del 1950 ençà, especialment aigües avall dels embassaments, fet que constata el paper tan determinant que la gestió hidrològica de la conca i les derivacions d'aigua superficial tenen en l'alteració del règim de cabals naturals. Aquestes alteracions arriben a ser de fins al 90 % a la part baixa del Segre i de fins al 50 % al Ter i a la Muga. Aquestes variacions, com veurem seguidament, estan relacionades amb tots els components que determinen el canvi global.

Així doncs, la comparació dels cabals observats amb els cabals estimats per als models hidrològics emprats amb la intenció de valorar la generació d'escolament superficial ha mostrat com, a més de probables alteracions causades pel canvi climàtic, els canvis en els usos del sòl, sobretot a les capçaleres de les conques, són un factor importantíssim per a avaluar la disponibilitat del recurs. Parlem, com s'ha esmentat, del *canvi global*. La relació directa entre l'increment de la coberta forestal i la disminució de l'escolament és un fenomen descrit en profunditat per diferents mètodes (per exemple, Zhang *et al.*, 2001). A Catalunya, Gallart (2009) i Gallart *et al.* (2011) van determinar la disminució continuada dels cabals a diverses conques fluvials. En el context de la conca de l'Ebre, cal esmentar que estudis anteriors ja van revelar que la disminució dels cabals (a un ritme del 0,2 % anual) era influenciada per la reforestació natural de les conques esdevinguda des de la meitat del segle xx (Gallart i Llorens, 2001, 2004). En rius regulats com l'Ebre, la disminució de l'escolament anual també és notable (Batalla *et al.*, 2014), fet que es pot atribuir tant a la reducció de l'aportació des de les capçaleres com a l'increment de la superfície de reg al llarg de la conca; però no hem d'oblidar, tampoc, que l'evaporació directa dels embassaments és un altre fet a tenir en compte en una conca mediterrània com aquesta.

Els estudis de simulació han estat emprats significativament per a avaluar els efectes del canvi climàtic en l'escolament superficial. Manzano (2009a) va estimar, amb models hidrològics de conca, una reducció del 15 % en les aportacions superficials associades a una disminució pluvio-

mètrica del 10 % per a l'horitzó del 2040, encara que no serà extensiva a tot el territori català. L'any 2070, les reduccions estimades pels models són del 16 al 28 %. Els models emprats per Manzano (2009a) mostren la importància de l'evapotranspiració, ja que es tracta del component del balanç hídric més crític en el control dels recursos disponibles en escenaris de temperatura més elevada i precipitació més baixa. Els canvis en la coberta vegetal com a resposta a la variació dels usos del sòl, principalment a les zones de capçalera, són una causa addicional que incrementa el volum evapotranspirat (Gallart, 2015). Conseqüentment, la influència paral·lela als canvis climàtics és determinant pel que fa a l'avaluació dels recursos disponibles. Estudis posteriors duts a terme a la conca del Cardener, els quals es basaven en la modelització de la resposta de les conques als canvis d'usos del sòl (Delgado *et al.*, 2010), han demostrat que és possible utilitzar models relativament simples per a simular l'efecte combinat del canvi de coberta vegetal i les diferents condicions climàtiques per a predir els recursos hídrics futurs.

Altres treballs recents de Buendía *et al.* (2014 i 2015) a les conques de la Noguera Pallaresa i la Ribera Salada han demostrat la importància conjunta que el canvi climàtic i la reforestació tenen en la disminució dels cabals a partir de l'aplicació dels models hidroclimàtics validats amb dades reals. Molts d'aquests treballs, els quals s'han desenvolupat a les conques, validen processos i estableixen les bases per a futures estratègies d'adaptació. Aquests treballs, no obstant això, requeriran una extrapolació de les dades en grans conques, on cal tenir en compte diverses qüestions afegides. Primerament, que els components del balanç hídric poden variar al llarg del curs del riu, especialment en aquells que travessen Catalunya de nord a sud (Llobregat, Segre) i creuen diferents zones climàtiques; i, en segon lloc, les pressions en el recurs, entre les quals es troben la tipologia i la magnitud de la demanda per a usos antròpics i ecològics, seran molt diferents pel que fa a les que hi ha a les capçaleres i a les parts baixes de les conques. Aquesta visió a diferents escales és, doncs, un factor clau per a establir mesures que minimitzin els efectes de les variacions climàtiques en el conjunt del país.

Tanmateix, cal remarcar la importància creixent previsible pel que fa als períodes en condicions extremes —aiguats i sequeres—, els quals modifiquen fortament la disponibilitat d'aigua. Més enllà del risc que representen (Llasat i Corominas, 2010; Manzano, 2009, i el capítol 6 d'aquest INFORME), signifiquen una modificació del cicle de l'aigua i de la disponibilitat dels recursos. D'una banda, els aiguats —com a resultat d'unes precipitacions més intenses— representen una modificació del règim fluvial actual al qual tenim adaptades les infraestructures de derivació i d'emmagatzematge d'aigua (embassaments). La concentració de la precipitació anual en períodes més curts i menys freqüents que deriva del canvi climàtic implica un canvi en el ritme de recàrrega dels aqüífers com a recurs subterrani explotable i que, en condicions de sequera, contribueix al cabal superficial amb el flux de base. Les sequeres associades a aquest règim de precipitacions, diferent de l'actual, implicaran una dependència més important dels volums d'aigua emmagatzemats als embassaments, de l'explotació dels recursos subterranis i dels recursos alternatius (aigua regenerada, potabilització d'aigües subterrànies actualment inacceptables per al consum i dessalinització d'aigua de mar). A efectes pràctics, i sense entrar-hi en detall, aquestes transformacions del cicle hidrològic obligaran a repensar les infraestructures hidràuliques (interconnexions i embassaments) al país i també l'assignació dels recursos hídrics per als diferents usos.

7.2.2. Efectes en la recàrrega dels aqüífers

L'efecte del canvi climàtic en la recàrrega dels aqüífers és un dels aspectes més rellevants en el balanç hídric de qualsevol conca de drenatge, atesa la dependència del subministrament que prové de les aigües subterrànies, especialment per als usos agrícoles i industrials, i també com a aigua potable per a molts municipis que es troben fora de les grans aglomeracions urbanes que depenen de la xarxa Ter-Llobregat i del transvasament de l'Ebre al Camp de Tarragona (Dolz i Armengol, 2011). Els recursos hídrics subterranis són claus, també, per al funcionament dels ecosistemes fluvials i l'adaptació humana al canvi climàtic (Taylor *et al.*, 2012; Green *et al.*, 2011).

L'efecte del canvi climàtic i dels usos del sòl en els recursos subterranis és especialment com-

plex, atesa la diversitat geològica dels aqüífers i del tipus de flux (local o regional). En termes generals, la vulnerabilitat dels aqüífers lliures, amb fluxos locals sovint lligats als cursos fluvials, és molt més elevada que la dels aqüífers confinats, on es desenvolupen fluxos regionals o a més gran escala (Mas-Pla, 2005). La resposta de cada tipus de sistema hidrogeològic al canvi global serà diferent en funció de les característiques geològiques de cada conca. Per exemple, un sistema càrstic respondrà més ràpidament a les variacions climàtiques que un aqüífer en roques ígnies, així com en funció de l'escala, atès que cal esperar que els sistemes hidrogeològics regionals siguin més resilients als canvis que els locals (Mas-Pla, 2010). Pel que fa als canvis de coberta vegetal, hi ha un gran consens que l'aforestació redueix la recàrrega dels aqüífers apreciablement (Kim i Jackson, 2012), la qual cosa sol reduir els cabals d'estiatge, en particular en àrees amb aqüífers de gran volum, la capacitat dels quals no es completa durant l'estació humida (Calder, 2005).

Les dades obtingudes amb models en relació amb els efectes del canvi climàtic a la recàrrega d'aqüífers a Catalunya són escasses i la major part corresponen al treball ja esmentat de Candela *et al.* (2012) a la conca del Siurana i a un estudi anterior d'Ortuño *et al.* (2009) a diferents conques del país. Tots dos casos empenen un model de balanç hídric (Samper *et al.*, 2005) per a estimar la recàrrega al subsòl. En el cas del Siurana, Candela *et al.* (2012) avaluen els canvis en tot el sistema hidrològic per al 2050 i calculen que l'escolament superficial disminuirà en un 20 % i que la recàrrega natural pot disminuir un 18 %, per bé que conclouen que hi haurà un desfasament entre la disminució de l'escolament i de la recàrrega. Tanmateix, els resultats de la modelització confirmen el caràcter cíclic dels canvis en funció de la variabilitat climàtica. Ortuño *et al.* (2009) reconeixen la dificultat de la quantificació i la dependència estreta que té amb l'escenari climàtic que ha estat tingut en compte (A2 o B2) a la mateixa conca i en el model escollit. Amb tot, els resultats de l'estudi indiquen que la recàrrega disminuirà, aproximadament, un 25 % en el període 2071-2100 per a l'escenari climàtic A2, i un 19 % en l'escenari B2. En aquest

darrer cas, com a exemple, la disminució de la recàrrega oscil·larà entre un 21 i un 24 % a Cercs (Berguedà) i a la riera de Santa Coloma (Selva), i entre un 15 i un 16 % a Llobregat de la Muga, a l'Empordà. En qualsevol cas, els autors reconeixen la variabilitat dels resultats associats als canvis en la predicció pluviomètrica.

Cal fer un esment especial pel que fa a les conseqüències del decreixement dels cabals fluvials i, com a resultat, a la reducció de la recàrrega dels aqüífers. Tots dos fenòmens apunten cap a una disminució dels recursos hídrics disponibles, tant superficialment com subterràniament, fet que exigirà un notable esforç d'adaptació tant amb relació a la resposta a les demandes d'ús com a la conservació de les funcions i serveis dels ecosistemes fluvials i associats (Peñuelas *et al.*, 2005, 2010; i el capítol 9 d'aquest INFORME). En aquest context, i atès que la major part dels rius de Catalunya estan regulats, la gestió dels embassaments es pot convertir en un element clau en la preservació de les relacions riu-aqüífer a les parts baixes de la conca i en l'adaptació a les noves condicions hidroclimàtiques, així com per a mantenir els nivells adequats de qualitat hidromorfològica i ecològica dels sistemes fluvials. En relació amb la demanda, cal preveure una afecció important als aqüífers lliures de les planes al·luvials que, en moltes àrees, concentren la màxima explotació per a usos agrícoles. Els efectes de la gestió a la capçalera de les conques també és important en conques més petites, com, per exemple, a la riera d'Arbúcies, on derivacions històriques per a reg i abastament comprometen el cabal en el curs inferior i afecten la recàrrega dels aqüífers associats (Mas-Pla *et al.*, 2012).

7.2.3. Efectes de l'augment del nivell del mar a les planes litorals i deltaïques

Una conseqüència addicional del canvi climàtic a les zones litorals és l'ascens del nivell del mar, fet que compromet especialment la qualitat dels recursos hídrics (Ferguson *et al.*, 2012). El fenomen d'intrusió salina és present arreu del litoral català i ha afectat històricament l'explotabilitat dels aqüífers litorals (Mas-Pla *et al.*, 2014). En aquest sentit, tant l'ascens del nivell del mar com la minva de la recàrrega a les planes litorals afavoriran l'avançament de la falca salina cap al continent, fet que

disminuirà el volum emmagatzemat d'aigua dolça als aqüífers (Mas-Pla i Ortuño, 2005). La possibilitat d'obtenir recursos alternatius, com ara aigua superficial (Fluvià-Muga, Camp de Tarragona), o la construcció de plantes dessalinitzadores (Tordera, Barcelona) han implicat una millora en la qualitat de l'abastament urbà d'aigua, per bé que amb un cost econòmic i energètic més elevat. Totes dues opcions, no obstant això, són poc sostenibles en el marc d'adaptació al canvi climàtic, ja que l'ús de recursos superficials serà afectat directament per la disminució de cabals prevista i entrarà en conflicte amb les funcions ecològiques dels rius, i els requeriments energètics de la dessalinització impliquen, actualment, emissions a l'atmosfera més destacables de gasos amb efecte d'hivernacle.

Amb tot, les dues àrees litorals més paradigmàtiques del país, els deltes del Llobregat i de l'Ebre, presenten problemes diferents pel que fa als recursos hídrics i a l'acció del mar. La contenció de la falca salina al delta del Llobregat, la qual és induïda per les extraccions d'aigua subterrània, ha estat motiu de la construcció de barreres hidràuliques que també poden ser efectives pel que fa a l'ascens de la cota del mar (Ortuño *et al.* 2012). Al delta de l'Ebre, el balanç entre aigua dolça i aigua salada, tant al llarg del canal del riu com en els aqüífers, és extremament delicat, atesa la geografia del delta i, sobretot, perquè l'equilibri hídric és controlat per les activitats agrícoles (Ibàñez *et al.*, 1997). L'Ebre, per ell mateix, és el paradigma de sistema hídric litoral que rep tant els efectes del canvi global des del continent (reducció i canvis en el règim de cabals, reducció de les aportacions de sediment) com des del mar (intrusió marina, erosió litoral). Addicionalment, la gestió antròpica d'aquest territori ha condicionat en bona part aquest sistema natural, de manera que l'adaptació al canvi climàtic esdevé una qüestió que implica tant la gestió de tota la conca com la local (Fatoric i Chelleri, 2012). El marc legal del Pla Hidrològic de la Conca de l'Ebre actual, aprovat el gener del 2016, atorga més recursos als regadius, limita la implementació d'un règim complet de cabals ambientals al tram baix de l'Ebre i esdevé una nova pressió hidrològica que s'afegirà a les que es deriven del canvi climàtic.

7.3. Relació entre recursos hídrics i demanda d'aigua a Catalunya en el marc del canvi global

L'adaptació al canvi climàtic significa anticipar-ne els efectes adversos, prendre les accions apropiades per a minimitzar-ne les conseqüències i, fins i tot, aprofitar els avantatges que se'n puguin derivar. Entre els efectes adversos hi ha els que poden afectar els diferents processos biofísics que assegurin l'estabilitat dels ecosistemes i la biodiversitat, així com la garantia d'aigua a les demandes antròpiques. De fet, la Directiva marc de l'aigua es fixa com a objectiu una gestió de l'aigua adaptada als canvis que satisfaci totes dues necessitats. Els avantatges sorgiran de la necessitat de racionalitzar totes dues demandes amb l'objectiu d'assolir una compartimentació més equilibrada i sostenible dels recursos hídrics disponibles. En aquest sentit, cal continuar insistint en la necessitat d'ampliar i millorar la monitorització de tots els components del balanç hídric en conques representatives, a diferents escales temporals i espacials, per a obtenir dades rellevants que permetin assolir un coneixement més bo i una modelització més robusta dels processos.

La major part dels estudis han determinat que el canvi climàtic té efectes en un o diversos components del cicle hidrològic. La qüestió és determinar la magnitud, el recorregut temporal i la irreversibilitat d'aquests efectes un cop determinats límits (per exemple, com afecta la durada de les seques a la biodiversitat dels sistemes fluvials) hagin estat assolits. Estudis com els de Bangash *et al.* (2013), Terrado *et al.* (2014) i Boithias *et al.* (2014) il·lustren la relació entre el canvi climàtic, l'escassetat hídrica i el funcionament ecològic.

Els efectes del canvi global en els usos i demandes d'aigua són un tema també molt complex. El projecte Life+ Water Change avalua econòmicament els possibles impactes del canvi global als municipis de l'Àrea Metropolitana de Barcelona, en què el subministrament es realitza amb aigua del riu Llobregat (Pouget *et al.*, 2012; Guiu *et al.*, 2015). En aquest estudi s'analitzen els costos i els beneficis que es podien generar amb diferents estratègies d'adaptació. En una primera fase, es van determinar els costos tangibles d'un dèficit potencial dels recursos (costos derivats de la manca d'aigua en diferents sectors de l'economia que es

podrien veure afectats per una disminució de la producció) i els costos indirectes (la disminució del benestar de la població causada per una manca en el subministrament). A continuació, es van dissenyar tres estratègies d'adaptació formulades per a resoldre diferents escenaris futurs d'increment de la demanda d'aigua i de disminució dels recursos disponibles a causa del canvi climàtic. Aquestes estratègies es basen en la combinació de diferents mesures a partir del criteri de cost-eficiència (evitant el dèficit d'aigua al mínim cost) i cadascuna proposa diferents etapes d'adaptació als escenaris previstos, els quals van ser expressats en unitats de volum d'aigua addicional que cal aportar per a satisfer la demanda segons els escenaris que havien estat definits. Seguidament, es va simular l'efecte d'aquestes mesures, fet per al qual es va tenir en compte la inversió inicial i costos d'operació de cada mesura com a valor del cost evitat.

Els resultats van mostrar un dèficit de l'1 al 7 % de la demanda total actual per a un període de trenta anys (2011-2040). Finalment, es van calcular els valors actuals nets (beneficis menys costos) per al cas d'estudi. Una primera conclusió prou determinant és que els beneficis de l'adaptació (fins a un valor aproximat del 4 % del VAB català) són més alts que els costos de l'adaptació (d'un 0,1 % del VAB català) i, per tant, l'adaptació al canvi climàtic, si tenim en compte les mesures analitzades, és quelcom desitjable per als casos de dèficit similar o més alt que la situació del període històric tingut en compte. D'aquesta manera, els resultats indiquen la necessitat que hi ha de desenvolupar mesures adients que puguin ser sotmeses a una anàlisi cost-benefici. Els resultats d'aquestes valoracions han de conduir a la presa de decisions eficients en un procés d'adaptació d'una conca amb uns recursos hídrics sotmesos a una demanda molt important.

El Pla de Gestió del Districte de Conca Fluvial de Catalunya 2016-2021 (ACA, 2015) té en compte de manera explícita i extensa la influència del canvi climàtic, especialment pel que fa als recursos superficials, i també reconeix, pel que fa al balanç hídric de les masses d'aigua subterrània, que els efectes del canvi climàtic, encara lleus, seran molt difícils de discernir, atès que els processos i les dinàmiques són lents. En relació amb les dinàmiques, i de manera també qualitativa, es poden

avançar les principals alteracions, especialment les que afectaran els aqüífers al·luvials: variació de la recàrrega directa, alteració de les relacions rius-aqüífer i modificacions de la falca salina al litoral.

7.4. Efectes del canvi en els components hidrològics i els recursos hídrics al segle XXI

Falkenmark i Rockström (2004) exposen amb claredat les particularitats del cicle de l'aigua, expressen la importància del balanç hídric en el funcionament dels ecosistemes i emfatitzen que la natura i la societat fan servir els mateixos recursos. En l'exposició, desenvolupen els conceptes d'*aigua blava* i *aigua verda*, els quals ja han estat esmentats i que són útils per a calcular els efectes del canvi climàtic. El balanç hídric global i per a les diferents

zones climàtiques de Catalunya diferenciades en aquest estudi (Pirineus, interior i litoral) es mostra a la figura 7.1.

Més concretament, l'*aigua blava* és l'aigua visible que flueix pels sistemes fluvials i, en el subsòl, pels aqüífers. Per contra, l'*aigua verda* està formada pel flux invisible de vapor cap a l'atmosfera, produït, principalment, per la transpiració de les plantes mitjançant el creixement de la biomassa vegetal. En el concepte d'*aigua verda* també s'incorpora l'evaporació de l'aigua, per bé que no és productiva en termes de biomassa. Tant l'*aigua blava* com l'*aigua verda* són imprescindibles per al desenvolupament de les funcions ecològiques i condicionen el desenvolupament humà i de les societats. El balanç està condicionat per les alteracions climàtiques i del

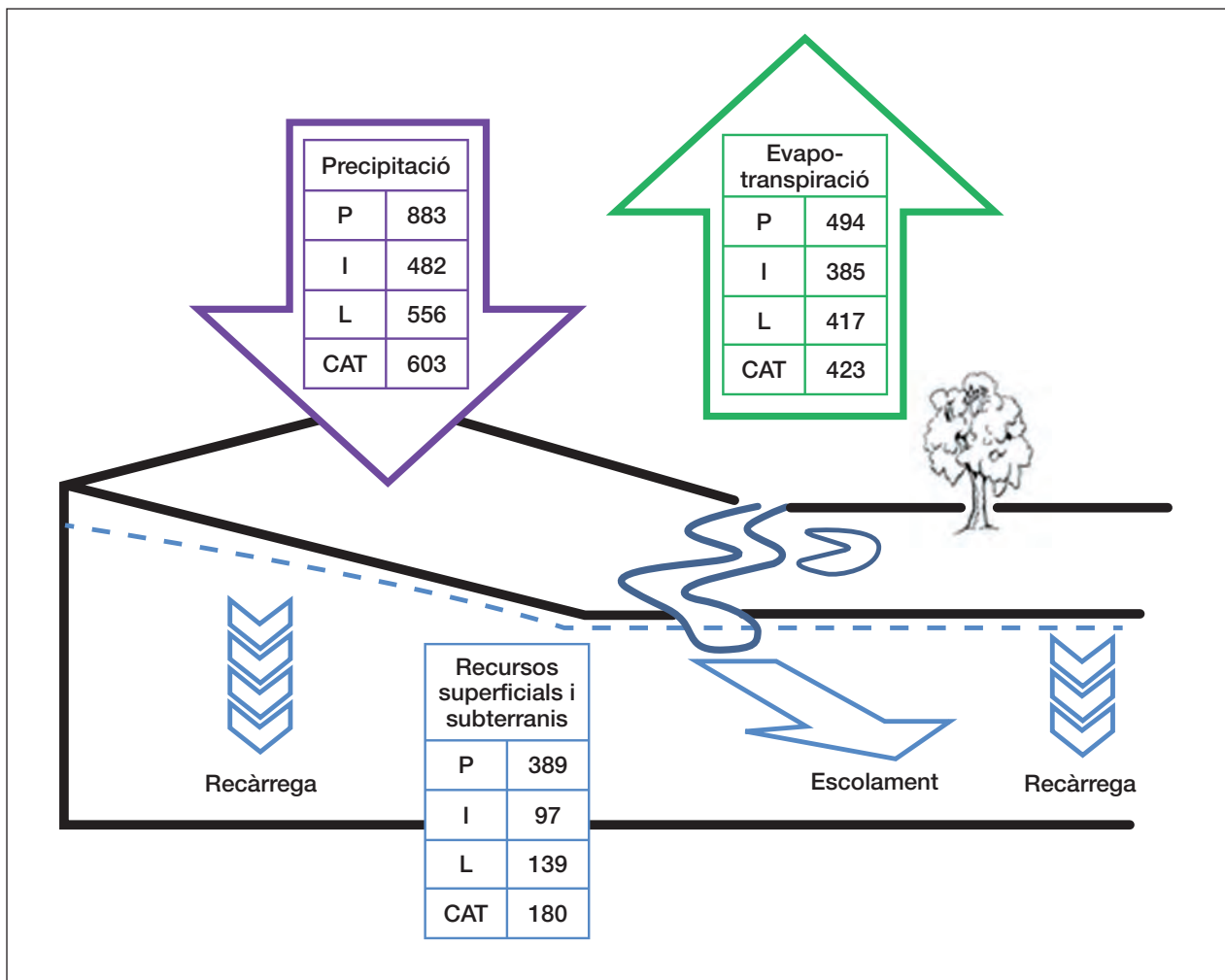


FIGURA 7.1. Esquema del balanç hídric en una conca hidrogràfica, on les entrades són representades per la precipitació incident i les sortides com a *aigua verda*, de manera que mostren els processos d'evapotranspiració real, i com a *aigua blava*, que engloba l'escolament i la infiltració i representa els recursos hídrics disponibles (superficials i subterranis). Els valors representen els termes del balanç hídric actual, amb dades dels darrers deu anys, expressats en mm (és a dir, l/m²), a les regions dels Pirineus (P), l'interior (I), el litoral (L) i en el conjunt de Catalunya (CAT), segons els càlculs de la taula 7.2.

medi, especialment per les que afecten els usos del sòl. Per aquestes raons, incorporem els conceptes d'*aigua blava* i *aigua verda* per a tractar la qüestió de la disponibilitat futura de recursos hídrics que, en aquest apartat, avaluem en funció dels escenaris climàtics previstos de temperatura i precipitació a Catalunya per als horitzons dels anys 2021 i 2051, fet per al qual hem tingut en compte les cartografies més recents de coberta del sòl, les quals hem suposat invariants en aquests propers decennis.

7.4.1. Càlcul de l'afecció i de la distribució per conques hidrogràfiques

El balanç hídric permet determinar la disponibilitat d'aigua anual a una conca a partir de l'equilibri entre els diferents components del cicle hidrològic, concretament:

$$P = ET_r + ES + \Delta S + I,$$

on P és la precipitació i principal entrada de recursos a una conca. Les sortides de recursos del balanç estan representades per l'evapotranspiració (entre la qual distingim la potencial o de referència, ET_0 , i la real, ET_r), l'escolament superficial (ES), la variació d'aigua acumulada al sòl (ΔS) i la infiltració cap al nivell freàtic. Per simplicitat, en aquest balanç no es té en compte el flux subterrani lateral a través dels límits de l'aquífer, el qual és determinant en la sostenibilitat de l'explotació dels sistemes hidrogeològics a escala regional (Menció *et al.*, 2010).

L'equació anterior permet determinar els recursos disponibles, $R = ES + \Delta S + I$, com la diferència entre precipitació i evapotranspiració real,

$$R = ES + \Delta S + I = P - ET_r$$

L'equació de Zhang *et al.* (2001) és una expressió racional senzilla que permet calcular l'evapotranspiració real anual (ET_r , és a dir, l'*aigua verda*) en funció del tipus de coberta vegetal i els valors de la precipitació (P) i l'evapotranspiració potencial (ET_0) anuals,

$$\frac{ET_r}{P} = \frac{1 + w \frac{ET_0}{P}}{1 + w \frac{ET_0}{P} + \left(\frac{ET_0}{P}\right)^{-1}}$$

L'índex w és el coeficient d'aigua disponible per a la vegetació. Des del punt de vista hidrològic, representa l'aigua del sòl que cal esperar que sigui accessible a diferents plantes per a un cert valor de la precipitació anual. El valor oscil·la entre el 0,5 per a zones de prat i fins al 2,0 per a boscos. En aquest cas, la proporció de recursos disponibles, l'*aigua blava*, en relació amb la precipitació (R/P) està expressat per

$$\frac{R}{P} = 1 - \frac{ET_r}{P},$$

on ET/P és l'índex de Zhang *et al.* (2001), que hem esmentat anteriorment.

Aquest mètode de càlcul dels recursos disponibles en relació amb l'*aigua blava* ha estat emprat per Gallart *et al.* (2011), Bangash *et al.* (2013) i Boithias *et al.* (2014) en el càlcul de balanços hídrics en diverses conques. Tanmateix, l'aplicació no està exempta de discussió i els resultats són indicatius de la distribució dels dos components del balanç hídric expressats pels quocients R/P i ET_r/P . En aquest sentit, Delgado *et al.* (2010) troben diferències entre els valors d'escolament superficial calculats amb el model HYLUC i els obtinguts per la fórmula de Zhang *et al.* (2001) quan van intentar calcular els cabals generats en una conca, fet pel qual van tenir en compte els diversos usos del sòl.

Per a dur a terme una valoració regionalitzada dels efectes del canvi climàtic a diferents subconques de Catalunya que inclogui tant les projeccions climàtiques elaborades per Calbó *et al.* (capítol 5) —amb una distribució del territori català en tres grans zones: Pirineus, litoral i interior— com els usos del sòl i l'afecció al balanç hídric, s'han elaborat diferents cartografies basades en la metodologia següent:

- 1) Càlcul dels valors de temperatura (T) i precipitació (P) mitjanes anuals a partir de dades mensuals per a cada estació meteorològica de Catalunya, amb dades de l'SMC, i una estimació de la evapotranspiració potencial (ET_0) anual sobre la base del mètode de Thornthwaite per a cada observatori (figura 7.2).
- 2) Càlcul de la distribució dels usos del sòl a cada conca (en kilòmetres quadrats a cada subconca) mitjançant la informació de les cobertores

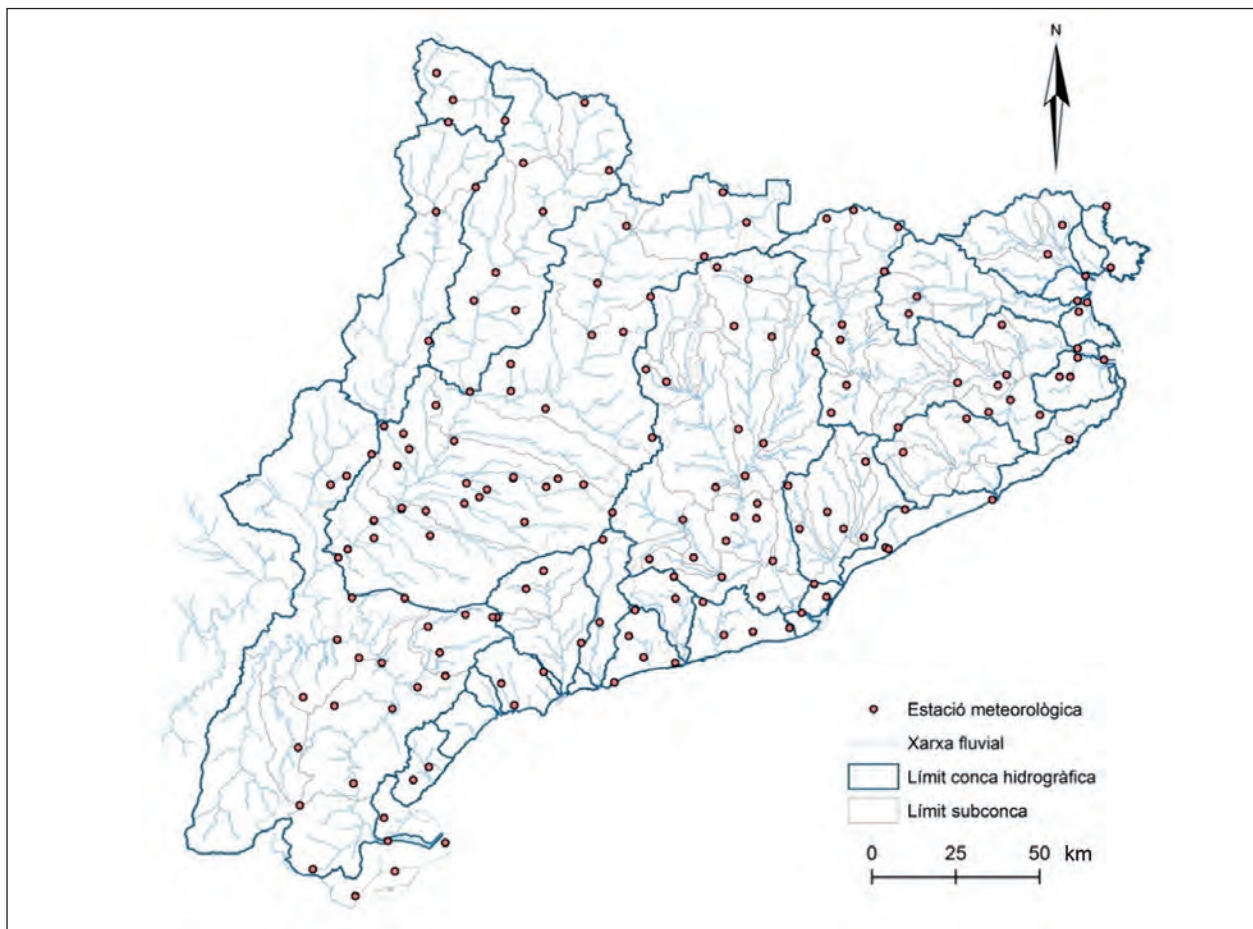


FIGURA 7.2. Distribució de les subconques en què s'han dividit les conques hidrogràfiques catalanes i localització dels observatoris meteorològics del Servei Meteorològic de Catalunya emprats en el càlcul dels recursos d'aigua disponibles.

de sòl del CREAM (4a edició) a l'àmbit de Catalunya i del CORINE Land Cover 2006 pel que fa a les conques que s'estenen més enllà del territori català, fet pel qual es va adoptar una modificació simplificada de la regionalització del sistema fluvial a les conques internes de Catalunya (ACA, 2002). La delimitació de les subconques s'ha dut a terme mitjançant el model d'elevació digital ICGC 15 x 15 a Catalunya i IGN 5 x 5 LIDAR a Aragó.

- 3) Càlcul de la relació ET/P amb l'expressió de Zhang *et al.* (2001) a cada subconca, segons els valors de T , P i ET_0 locals, de manera proporcional a la distribució d'usos del sòl. Els valors de l'índex w emprats en aquesta simulació per a diferents usos del sòl es presenten a la taula 7.1.
- 4) Finalment, es calcula el valor de la relació R/P amb les dades meteorològiques registrades i es repeteix aquest càlcul amb els valors de P i T estimats per Calbó *et al.* (capítol 5) per als

TAULA 7.1. Valors del coeficient w (Zhang *et al.*, 2001) per als diferents usos del sòl emprats en aquest estudi

Ús del sòl	w
Bosc	1,75
Plantacions de pollancre	1,75
Conreu reg	1,50
Conreu secà	0,75
Vegetació escassa	0,40
Prat supraforestal	1,00
Aigua continental	0,00
Zona urbanitzable	0,00
Altres	0,00

horitzons del 2021 i el 2051, fet per al qual s'ha suposat que la distribució dels usos del sòl a les conques resta invariable. Els càlculs de ET_0 i del quocient ET_r/P per tots dos horitzons climàtics s'han realitzat mitjançant les funcions de regressió obtingudes a partir dels càlculs realitzats en les condicions actuals (figura 7.3).

Els resultats mitjans per a cada conca hidrogràfica, amb els valors de les projeccions climàtiques anuals expressades pel quocient R/P i les relacions entre aquestes i l'actual, es presenten a la taula 7.2, mentre que els detalls per a cadascuna de les subconques es presenten a la taula 7.3.

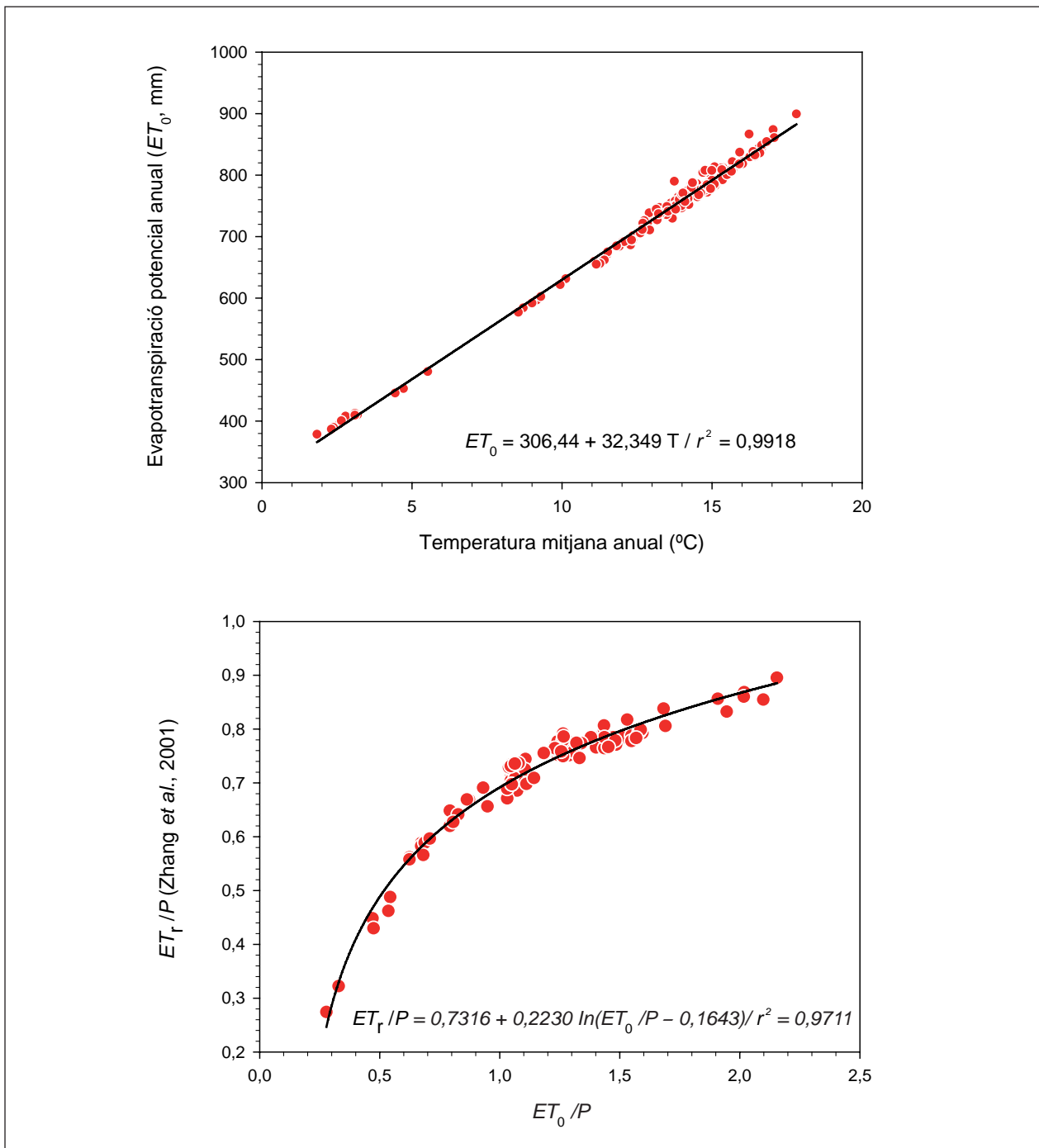


FIGURA 7.3. Relacions entre a) les variables meteorològiques, evapotranspiració potencial-temperatura de tots els observatoris en territori català del Servei Meteorològic de Catalunya, i b) les variables hidrològiques expressades pels quocients ET/P (estimat per l'equació de Zhang *et al.*, 2001) fet pel qual s'han tingut en compte els usos del sòl a cada subconca) i els valors de ET_0/P (estimat a partir de les dades meteorològiques) a cada una de les subconques de Catalunya.

TAULA 7.2. Valors dels quocients *R/P* actuals (2015) i per a les projeccions climàtiques per als escenaris del 2021 i del 2051, i dels quocients entre els valors de *R/P* projectats per a aquests anys amb el valor actual. S'inclouen les dades de superfície i precipitació.

Els valors mitjans al peu de la taula estan ponderats amb el valor de la superfície de cada zona i es tenen en compte segons la ubicació: Pirineus (P), Interior (I) i Litoral (L). *n*: nombre de subconques a cada zona

Conques internes	Zona	<i>n</i>	Àrea (km ²)	Àrea (%)	Precipitació (mm)	<i>R/P</i> (actual)	<i>R/P</i> 2021	Quocient $(R/P)_{2021} / (R/P)_{act}$	<i>R/P</i> 2051	Quocient $(R/P)_{2051} / (R/P)_{act}$
Besòs	P*	1	28,7	2,6	887,0	0,406	0,398	0,981	0,377	0,928
	L	8	1.088,3	97,4	683,0	0,406	0,250	0,888	0,228	0,805
Fluvià	P	2	235,9	21,1	875,0	0,345	0,335	0,977	0,317	0,924
	L	4	827,6	77,8	683,0	0,406	0,228	1,000	0,206	0,900
Foix	L	1	311,3	100,0	543,0	0,233	0,194	0,834	0,172	0,739
Francolí	L	3	837,4	100,0	533,0	0,242	0,209	0,861	0,186	0,765
Gaià	L	1	422,9	100,0	516,0	0,205	0,178	0,868	0,156	0,761
Llobregat	P	4	735,1	14,8	642,0	0,266	0,272	1,024	0,254	0,955
	I	14	3.621,7	72,9	586,0	0,242	0,218	0,904	0,212	0,878
	L	4	608,7	12,3	532,0	0,236	0,186	0,805	0,164	0,710
<i>Mitjana ponderada Llobregat:</i>					<i>587,7</i>	<i>0,245</i>	<i>0,222</i>	<i>0,909</i>	<i>0,213</i>	<i>0,869</i>
la Muga	L	6	846,9	100,0	615,0	0,223	0,227	1,024	0,205	0,922
Rieres litoral gironí	L	4	653,2	100,0	602,0	0,224	0,217	0,975	0,195	0,874
Rieres litorals Garraf-Penedès	L	2	728,8	100,0	547,0	0,234	0,201	0,919	0,179	0,814
Rieres litorals Maresme	L	1	331,8	100,0	637,0	0,315	0,242	0,769	0,219	0,696
Rieres litoral tarragoní	L	5	876,4	100,0	520,0	0,209	0,178	0,872	0,157	0,765
Ter	P	5	1.184,9	36,3	905,0	0,394	0,380	0,973	0,359	0,920
	I	4	704,7	21,6	663,0	0,288	0,267	0,930	0,261	0,907
	L	8	1.371,6	42,1	689,0	0,273	0,264	0,969	0,241	0,883
<i>Mitjana ponderada Ter:</i>					<i>761,9</i>	<i>0,320</i>	<i>0,307</i>	<i>0,962</i>	<i>0,288</i>	<i>0,901</i>
la Tordera	P*	2	154,5	17,7	930,0	0,430	0,413	0,960	0,391	0,910
	L	4	719,7	82,3	577,0	0,226	0,217	0,956	0,195	0,846
Conca de l'Ebre										
Baix Ebre	I	2	1.210,1	20,2	456,0	0,169	0,139	0,837	0,134	0,801
	L	4	4.791,9	79,8	461,0	0,180	0,147	0,819	0,126	0,696
la Garona	P	1	445,2	100,0	1064,0	0,570	0,507	0,889	0,480	0,842
Segre	P	8	5.053,1	42,1	896,0	0,461	0,437	0,958	0,411	0,899
	I	5	6.939,6	57,9	413,0	0,164	0,135	0,816	0,129	0,780
<i>Mitjana ponderada Segre:</i>					<i>616,5</i>	<i>0,289</i>	<i>0,262</i>	<i>0,876</i>	<i>0,248</i>	<i>0,830</i>

Valors mitjans	Zona	<i>n</i>	Àrea (km ²)	Àrea (%)	Precipitació (mm)	<i>R/P</i> (actual)	<i>R/P</i> 2021	Quocient $(R/P)_{2021} / (R/P)_{act}$	<i>R/P</i> 2051	Quocient $(R/P)_{2051} / (R/P)_{act}$
	P		7.837,5	22,57	883	0,434	0,413	0,963	0,389	0,906
	I		12.476,1	35,92	482	0,194	0,167	0,850	0,161	0,818
	L		14.416,4	41,51	556	0,241	0,196	0,885	0,174	0,780
Total			34.730,0		603	0,268	0,235	0,890	0,218	0,822

* La part alta de les conques del Besòs i de la Tordera, per la singularitat orogràfica, s'han equiparat als escenaris propis dels Pirineus.

Variabls: *T*, temperatura; *P*, precipitació; *ET₀*, evapotranspiració potencial; *ET_r*, evapotranspiració real (*aigua verda*); *R*, recursos disponibles (*aigua blava*).

Zona: P, Pirineus; L, litoral; I: interior; P* es correspon a les subconques del riu Besòs i la Tordera al massís del Montseny, a les quals també s'ha aplicat la projecció corresponent als Pirineus per motius orogràfics.

1. Calculades a partir de les projeccions de Calbó *et al.* (capítol 5 d'aquest INFORME) per a cada horitzó.

2. Calculat a partir de l'equació de Zhang *et al.* (2001) emprant el percentatge d'usos del sòl.

3. Calculat amb l'equació $ET_0 = 306,44 + 32,35 T$, $r^2 = 0,992$ (figura 7.3).

4. Calculat amb l'equació $ET/P = 0,7316 + 0,2230 \ln(ET_0/P - 0,1643)$, $r^2 = 0,971$ (figura 7.3).

7.4.2. Valoració dels efectes climàtics en la disponibilitat de recursos

Atesa la dependència dels paràmetres climàtics en la disponibilitat d'aigua, la distribució geogràfica dels resultats, els quals estan expressats en les cartografies de la figura 7.4 indiquen que la màxima disminució tindrà lloc, de manera general, a les terres de l'interior i assolirà un 15 % al 2021 i un 18,2 % al litoral. Per contra, la disminució a les subconques pirinenques (és a dir, a les capçaleres de les conques) serà del 3,7 % i del 9,4 %, respectivament. A Catalunya, els valors ponderats a les àrees esmentades impliquen una pèrdua d'un 11 % i d'un 17,8 % dels recursos per als dos escenaris esmentats, respectivament. Òbviament, una modificació de la superfície de les conques ocupades

per boscos durant els propers anys, fet que obligaria a l'aplicació del coeficient w més elevat entre els corresponents als diferents usos del sòl, modificaria aquests valors estimats i incrementaria el dèficit de recurs. Com que preveure els canvis percentuals dels usos del sòl durant els propers decennis és difícil, sembla més prudent indicar la tendència en els valors de R/P que provocarien aquests canvis que el fet de valorar possibles valors.

En aquest apartat no fem referència als recursos totals, sinó al canvi de la relació R/P esmentada anteriorment. Cal tenir en compte que a l'hora d'estimar la disponibilitat dels recursos futurs mitjançant el quocient R/P , caldrà tenir en compte el valor futur de P . Per tant, quan comentem els

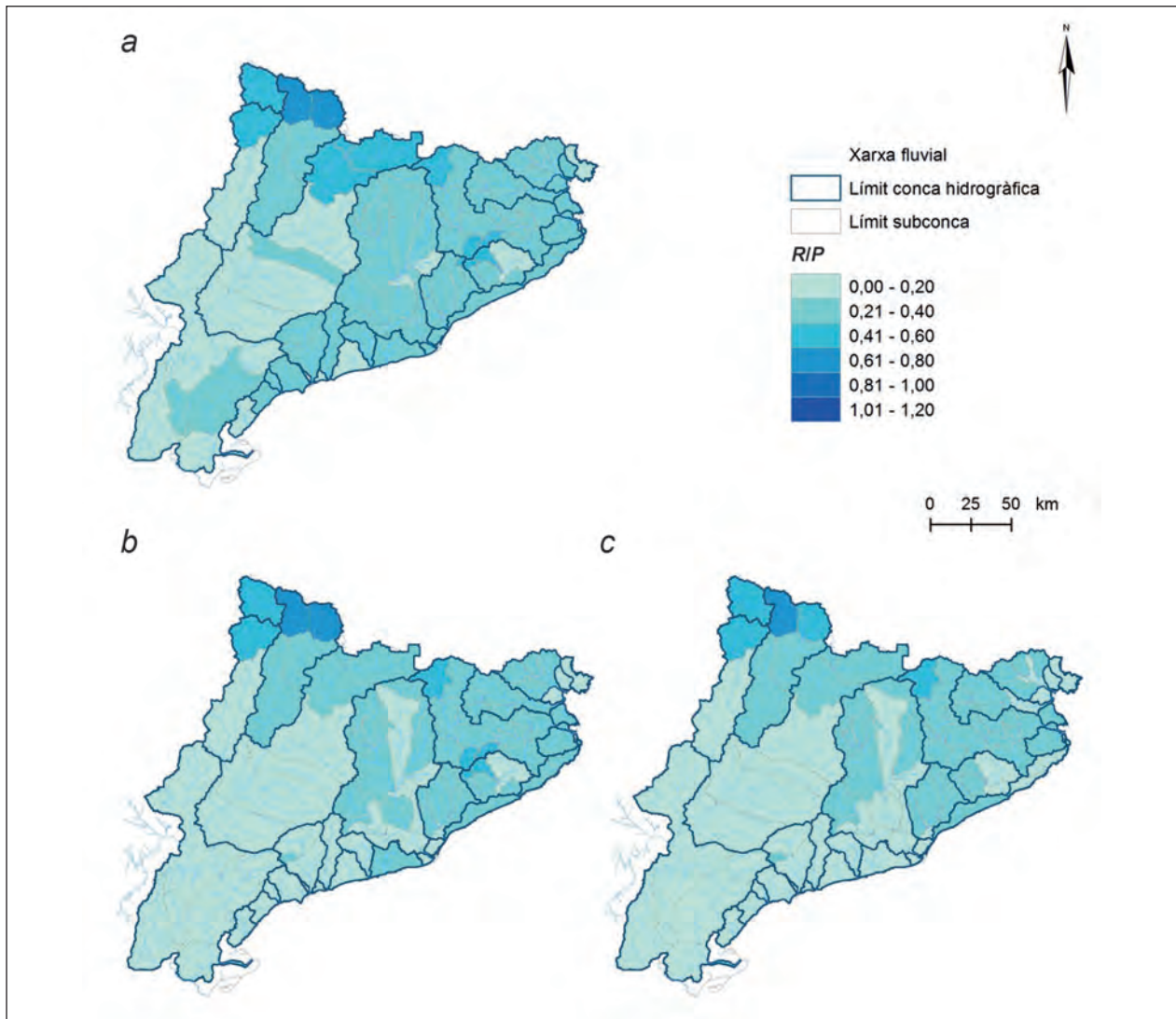


FIGURA 7.4. Distribució territorial de la relació entre els recursos hídrics i la precipitació (R/P) per a cada subconca. El quocient R/P representa la fracció de la precipitació incident que dona lloc a l'escolament superficial i a la recàrrega dels aqüífers, i que anomenem *aigua blava*. Les diferents cartografies es refereixen a) al moment actual, el qual resulta de les dades meteorològiques disponibles fins al 2015; b) a l'horitzó del 2021; i c) a l'horitzó del 2051, els quals es basen en les projeccions climàtiques de Calbó *et al.* del capítol 5.

valors de R/P cal tenir en compte que les previsions de la precipitació dels models climàtics per al nostre territori són molt més incertes que les previsions de la temperatura i que es preveu que la precipitació es reduirà poc en els mesos més freds i hidrològicament més eficaços (Christensen *et al.*, 2007). Aquesta variabilitat estacional, que, per simplicitat, no ha estat tinguda en compte en els càlculs (malgrat que sí que ha estat quantificada per Calbó *et al.* en el capítol 5) implica que els valors de R/P tan sols aproximen un valor mitjà anual. Atesa la transcendència del component estacional, la resposta real del cicle hidrològic a la quantitat de recursos disponibles caldrà tenir-la en compte amb més detall que el que es pot veure en aquest treball. Els resultats de la taula 7.3 mostren, de manera indicativa, els valors d'aigua blava R estimats per a aquests horitzons temporals a les tres zones (Pirineus, interior i litoral), els quals han estat calculats mitjançant el producte dels coeficients R/P per als valors de P anuals, un cop aplicades les reduccions expressades en el capítol 5 d'aquest INFORME.

La distribució dels recursos d'aigua disponibles a Catalunya, els quals s'expressen pel quocient R/P , mostra una diferència entre les conques internes i les conques de l'Ebre pel que fa a les dades climàtiques actuals: les primeres presenten una disponibilitat d'aigua més gran, excepte en les zones pirinenques, on els valors de R/P són més elevats. Així, a grans trets, les conques del Ter i del Llobregat mostren unes relacions més marcades entre els dos escenaris i la situació actual en el conjunt de les conques que els de la conca del Segre. En tots dos casos, la disminució més petita té lloc a les conques pirinenques, i és la conca del Llobregat la que presenta uns valors més elevats als Pirineus (cocient al 2051 de 0,955) i la conca del Segre la que se'n veurà més afectada (cocient al 2051 de 0,899). Es fa esment especial als efectes del canvi climàtic a les subconques pirinenques, atès que signifiquen la recàrrega dels principals sistemes de gestió de les conques fluvials (embassaments) per a satisfer la demanda de l'abastament agrícola de la plana de Lleida, l'abastament urbà a l'Àrea Metropolitana de Barcelona i a les zones de Girona - Costa Brava i la producció energètica. Si l'expresssem en volum d'aigua, la pèrdua de recursos absoluts serà molt més rellevant a la

conca del Segre, a causa, simplement, de la superfície més gran que comprèn. Així, la reducció d'aigua blava a la part pirinenca de la conca del Segre serà d'uns 145 hm³ i d'uns 323 hm³, respectivament, per als escenaris del 2021 i del 2051. També a les subconques pirinenques, la reducció a la conca del Ter serà de 23 hm³ i de 57 hm³, i al Llobregat de 0 hm³ i de 13 hm³, respectivament, per als escenaris del 2021 i del 2051.

La cartografia dels diferents valors de R/P , tant actuals com al 2021 i al 2051, indiquen que durant els propers decennis, els valors inferiors a 0,20 s'incrementaran a les subconques de l'interior de Catalunya, al llarg de l'eix del Llobregat i a la major part dels indrets litorals. Pel que fa al cocient R/P , la conca del Ter és la que presenta, i presentarà, valors més elevats i una resiliència més gran als efectes climàtics. Aquesta disminució dels valors de R/P per als propers decennis queda reflectida en els histogrames que il·lustren el percentatge d'àrea per a diferents rangs de R/P , fet que augmenta progressivament els valors en els rangs inferiors a 0,10 i 0,20. D'aquesta manera, per bé que actualment només un 34,8 % del territori català aprofita un 20 % dels recursos com a aigua blava, aquest percentatge territorial serà del 53,1 % el 2021 i del 57,3 % el 2051 (figura 7.5). Segons aquestes estimacions, les variacions climàtiques que es poden esperar a curt termini (2021) produiran un impacte territorial més gran en relació amb les condicions actuals que les que es preveuen entre el 2021 i el 2051.

Tanmateix, el cocient entre els valors de R/P corresponents als escenaris climàtics i els registrats actualment tendirà a disminuir arreu del territori (figura 7.6). No obstant això, algunes subconques, especialment les que es troben a les capçaleres dels rius catalans i al nord-est del país, poden mostrar un lleuger augment del valor de R/P el 2021 en relació amb el moment actual, amb cocients superiors a l'1,0, fet que indica un increment del 2 al 4 %. Aquest augment es justifica si entenem que la variació de la temperatura, i, per tant de l'evapotranspiració, no implica una pèrdua de recursos tan elevada com la disminució de la precipitació prevista per al 2021. Això cal entendre-ho com que en aquest primer horitzó no hi haurà variacions significatives dels valors de R/P i, per

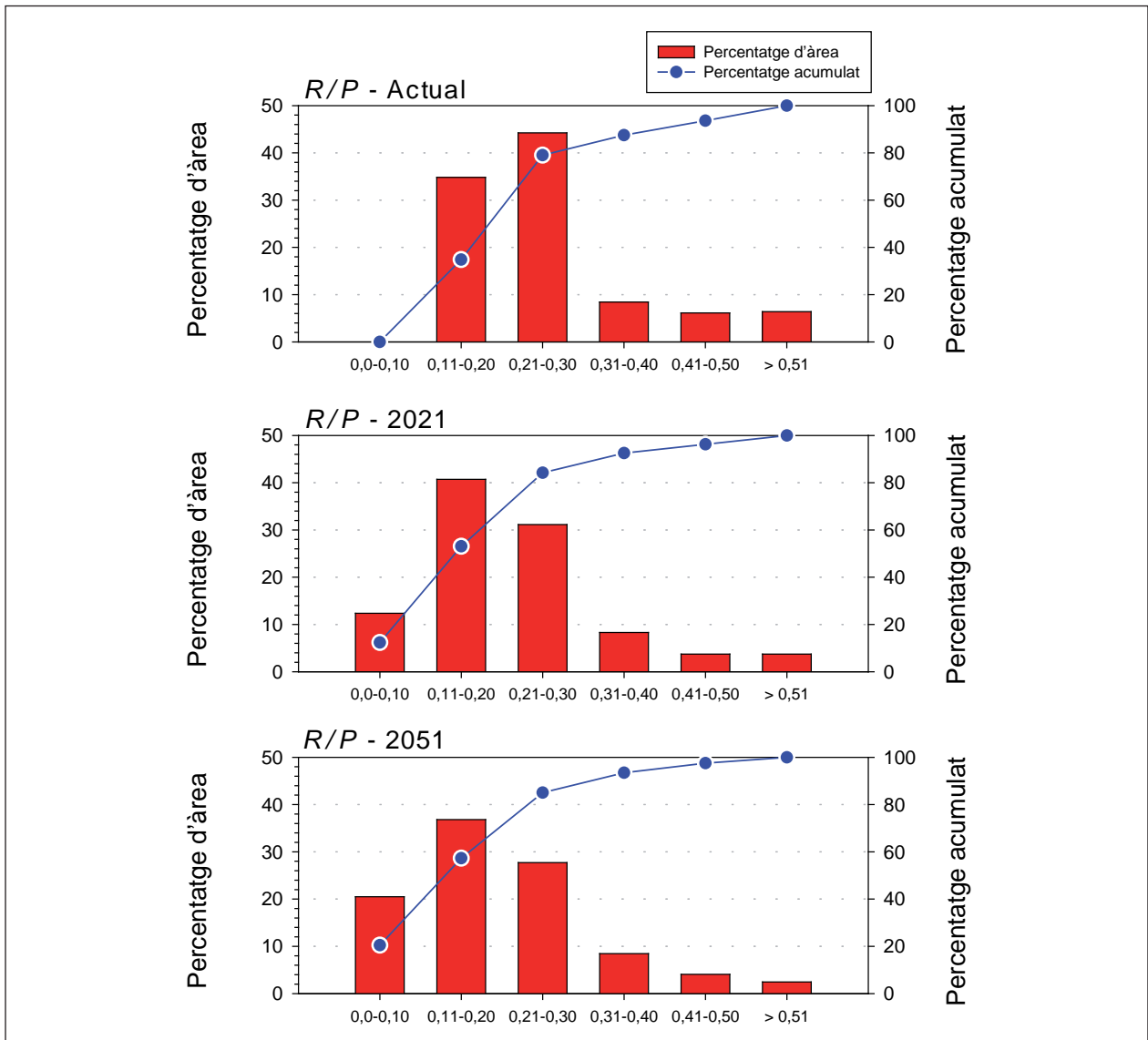


FIGURA 7.5. Percentatge de superfície del territori català per a diferents rangs del quocient R/P, i percentatge acumulat de la superfície.

tant, dels recursos disponibles. Aquest resultat, que pot semblar paradoxal ateses les tendències esmentades, permet introduir una altra repercussió important del clima futur: la variabilitat, molt més gran que l'actual i, per tant, amb una estacionalitat molt més marcada. Manzano (2009b) valora la importància de l'estacionalitat i assenyalava una marcada reducció de cabals a l'estiu, la qual podria arribar a un 40 % dels valors actuals, i l'augment de la freqüència d'aiguats extrems, la qual comprometria la gestió hídrica, ja que els règims de recàrrega i de cabals entrants als embassaments variarien. L'ús de valors mitjans en els càlculs és, doncs, una mera aproximació als canvis esperables. En conseqüència, la gestió de l'aigua haurà de tenir en compte aquesta incertesa, atès que

l'aprofitament dels recursos resultants d'una precipitació més variable i, possiblement, concentrada en pocs episodis plujosos és molt més complexa, fet pel qual és, per tant, més difícil satisfer tota la demanda, inclosa l'ambiental.

Amb tot, el quocient R/P per a l'horitzó de l'any 2021 mostra una tendència clara a la baixa en el conjunt de Catalunya, amb un 11 % menys dels recursos, de manera que seria només del 3,7 % a les comarques pirinenques. No obstant això, la projecció del quocient R/P per a l'any 2051 és inequívoca i mostra una disminució del 17,8 % a tot el país, del 9,4 % als Pirineus i un clar decreixement a totes les subconques que s'han tingut en compte (excepte a la part alta de la Muga, a l'Alt Empor-

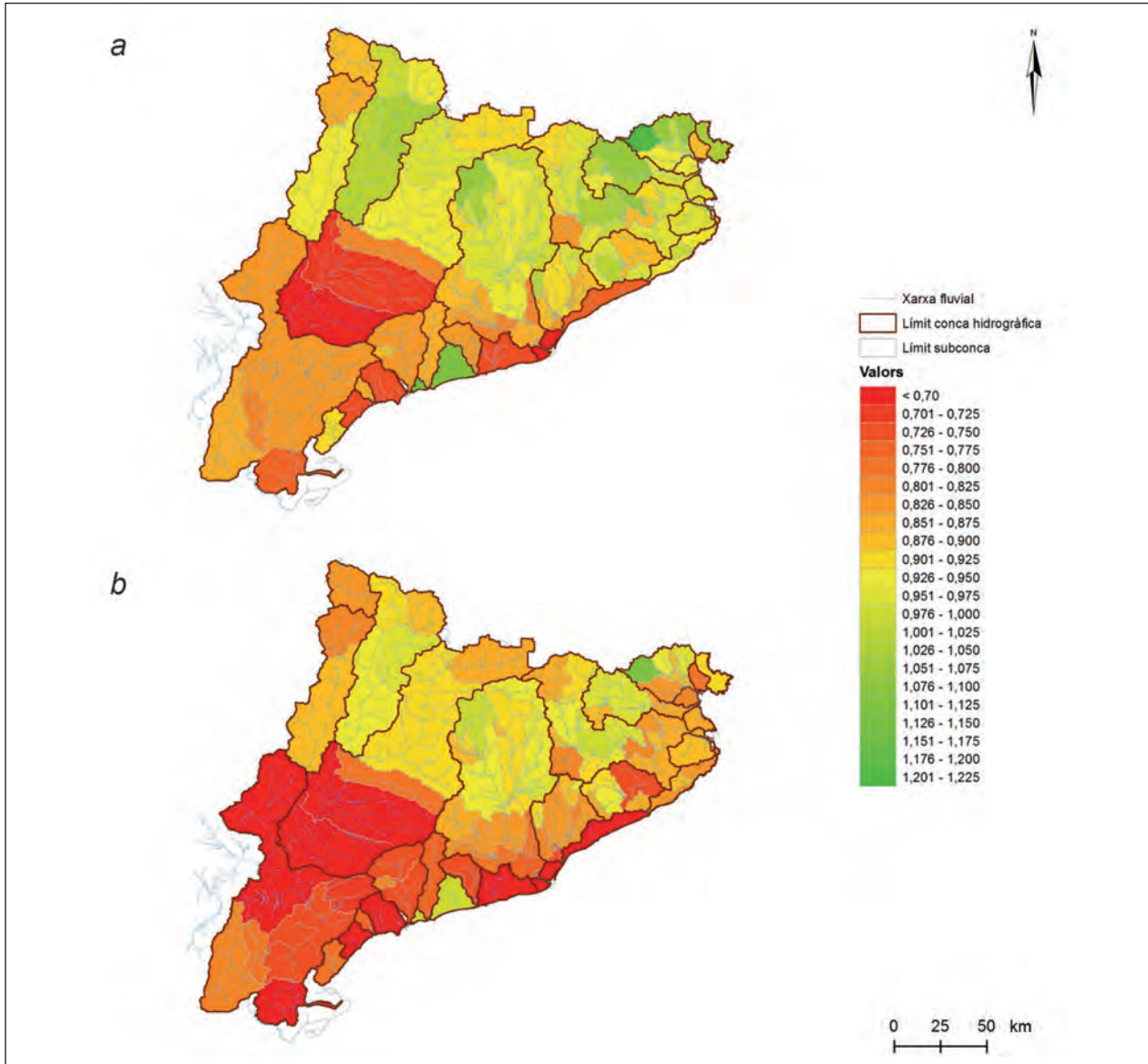


FIGURA 7.6. Distribució territorial de la relació dels recursos hídrics (expressats pel quocient R/P) als horitzons a) 2021 i b) 2051, en relació amb els valors actuals.

dà, que es presenta com una anomalia del càlcul, més que com una tendència significativa).

De manera similar, el cicle hidrològic també es veurà afectat per un canvi en l'estacionalitat pel que fa a com el coneixem actualment. Els valors mitjans mensuals, els quals s'empren habitualment, deixaran de tenir significat i caldrà gestionar els recursos des d'una incertesa més gran, especialment pel que fa a les entrades al sistema. Aquesta estacionalitat, per bé que no ha estat tinguda en compte (per brevetat) en els càlculs que hem presentat, serà fonamental en els esquemes de gestió. D'altra banda, no podem negligir el comportament de la coberta

de neu als Pirineus. La contribució a l'escolament superficial que té és fonamental per al règim hídric dels principals rius catalans (Ter, Llobregat, Segre, Noguera Pallaresa i Noguera Ribagorçana) i per a garantir un cabal continuat durant la primavera, el qual té una influència important en les reserves dels embassaments.

7.5. Conclusions

El coneixement dels efectes del canvi climàtic en els recursos hídrics a Catalunya s'està desenvolupant gràcies a diversos projectes, tant acadèmics com de gestió, alguns ja acabats i d'altres vigents, que els avaluen des de diferents perspectives: 1) la

fenomenològica, per a la qual es té en compte el comportament de les conques hidrogràfiques i els motius dels canvis davant de les variacions climàtiques; 2) la hidrològica, per a la qual es valora la magnitud dels canvis previstos, i 3) la social, per a la qual s'integren els efectes socioeconòmics que la disminució de recursos hídrics pot tenir en els propers decennis.

Tots aquests estudis, els quals han estat sintetitzats en aquest capítol, reflecteixen la singularitat hídrica del país i, en particular, l'heterogeneïtat territorial pel que fa als efectes del canvi climàtic. Per bé que hi ha un factor comú, que és la futura escassetat dels recursos, els estudis permeten identificar zones diferents amb nivells distints de vulnerabilitat. Les diverses projeccions climàtiques que s'han tingut en compte per a les zones pirinenques, de l'interior i del litoral mostren una resposta hídrica paral·lela a les variacions climàtiques per als horitzons del 2021 i del 2051, amb efectes similars tant al centre com al litoral català (conques de Tarragona, Baix Ebre). Aquesta resposta és evident especialment a la meitat meridional, on la disminució dels recursos per al 2051, els quals s'indiquen per la relació entre els quocients R/P , es calcula que serà del 70 % al 75 % dels valors que es registren actualment.

Aquest capítol presenta cartografies inèdites de la disponibilitat futura d'aigua a Catalunya, les quals han estat expressades pel quocient R/P (*aigua blava*), el qual ha estat calculat a partir de la distribució espacial dels usos del sòl, de l'efecte en la proporció entre *aigua verda* (ET/P) i *aigua blava* (R/P) i de les projeccions climàtiques disponibles estimades per Calbó *et al.* en el capítol 5 d'aquest INFORME. Juntament amb les taules que les complementen, els mapes il·lustren la magnitud del canvi climàtic en els recursos hídrics, tant superficials com subterranis, els quals han estat tinguts en compte conjuntament amb el nom conceptual *aigua blava*. Les reduccions de disponibilitat dels recursos —o, dit d'una altra manera, de l'escassetat— s'han xifrat en un 9,4 % a les comarques dels Pirineus, en un 18,2 % a les interiors i en un 22 % a les litorals, fet que evidencia la importància que el canvi climàtic tindrà en la disponibilitat hídrica i en la gestió. En destaquen les estimacions referents a les subconques pirinenques, atès que

condicionaran els recursos hídrics disponibles per a la regulació dels embassaments, elements principals de gestió per als diferents usos antròpics i per a la garantia de les funcions ecohidrològiques del sistema fluvial. Convé remarcar el fet rellevant que el ritme de canvi en la disminució dels recursos hídrics serà més elevat per a l'horitzó de 2021 que entre el 2021 i el 2051. Aquest resultat indica la importància i la urgència que té incorporar el canvi global com un element essencial de la gestió hidrològica. Cal destacar la importància que les modificacions en els usos del sòl tindran en la disponibilitat hídrica a les conques (per generació dels recursos a les capçaleres i pel consum a les parts baixes), fet que suggereix que la gestió territorial és un component fonamental en el procés d'adaptació al canvi climàtic, a fi de garantir la disponibilitat d'aigua tant per a necessitats naturals com per a usos antròpics.

Finalment, cal esmentar la importància de la variabilitat estacional evidenciada per les projeccions climàtiques de Calbó *et al.* (capítol 5) i ressaltada anteriorment per diverses simulacions hidrològiques (Manzano, 2009b; CREAM, 2012). Malgrat que, per simplicitat, els mapes que es presenten es basen en les projeccions anuals, entenem que la gestió dels recursos no es pot desentendre dels canvis estacionals i dels canvis de freqüència de les precipitacions màximes, en la mesura que totes dues modificaran el règim hidrològic i l'accessibilitat als recursos hídrics.

7.6. Recomanacions

L'estimació de la quantitat i la variabilitat dels recursos hídrics disponibles durant els propers decennis és un dels reptes principals de la planificació ambiental, socioeconòmica i territorial a Catalunya. Les projeccions climàtiques, les tendències en el canvi d'usos del sòl i els diversos càlculs efectuats corroboren una reducció de la quantitat d'aigua i un increment de la variabilitat temporal (magnitud i freqüència de sequeres i riuades) els propers anys. En aquest sentit, els processos d'adaptació s'hauran de basar en el control i, si és possible, en la reducció de la demanda, de manera que incidiran en la millora de l'eficiència tant en la distribució dels recursos com en l'ús, sempre amb la doble finalitat de garantir l'abastament i els usos i els serveis ecosistèmics.

L'abastament d'aigua a Catalunya, tant pel que fa a l'ús urbà com a l'agrícola, depèn de grans xarxes que es basen, principalment, en l'aprofitament dels recursos hídrics superficials. L'explotació de recursos locals, especialment subterranis, i la regeneració d'aigües residuals són fonts que, per bé que actualment es poden tenir en compte com a alternatives, han d'arribar a ser molt més importants (gairebé habituals) en les estratègies d'abastament dels propers decennis. De la mateixa manera, els aqüífers que hi ha en àrees urbanes s'han de considerar «recursos de proximitat» que, amb un règim d'explotació i un tractament adequats, podrien estalviar una part important de les derivacions d'aigua dels rius, de manera que podrien alliberar l'aigua necessària per al funcionament correcte dels ecosistemes i donar un nou valor d'oportunitat a les regions situades a les parts baixes i finals de les conques.

La pressió exercida per l'explotació dels aqüífers al·luvials en la relació riu-aqüífer s'incrementarà a causa de l'escassetat hídrica derivada del canvi climàtic. L'explotació de recursos hidrogeològics com els que es troben disponibles en aqüífers profunds, amb temps de trànsit més elevats en el subsòl i, per tant, menys afectats pels futurs canvis en el balanç hídric superficial a curt termini, generaria una pressió més baixa en el medi i, especialment, en els cursos fluvials relacionats amb els aqüífers. Aquests sistemes hidrogeològics profunds, més costosos d'explotar però capaços de proporcionar volums addicionals d'aigua, esdevenen una possible opció complementària a les fonts d'abastament actuals. No obstant això, aquestes fonts profundes presenten el risc de sobreexplotació i en cap cas no seria desitjable abusar-ne en detriment de les fonts superficials. Un ús equilibrat de totes dues pot significar, en moltes àrees, un alleugeriment de la pressió en les fonts de subministrament d'aigua actuals.

Algunes d'aquestes recomanacions ja formen part de les mesures del Pla de Gestió del Districte de Conca Fluvial de Catalunya (ACA, 2015), amb accions concretes per a garantir l'abastament d'aigua. En certa manera, per tant, es tracta d'internalitzar a temps els costos d'aquest procés d'adaptació abans no constitueixin unes externalitats difícils de gestionar, encara més costoses i menys eficients que quan calgui implementar-les amb urgència.

Aquesta recomanació és aplicable tant al sector públic (bàsicament responsable de l'abastament urbà de l'aigua) com al sector privat o mixt (relacionat, principalment, amb l'abastament de l'aigua de reg i de la producció energètica).

En relació amb la vulnerabilitat territorial, determinades zones de Catalunya mostren una disminució notable dels recursos hídrics (*aigua blava*), especialment les comarques de l'interior i les properes al litoral central i meridional. Els mapes mostren un mosaic territorial divers i heterogeni que assenyalava les àrees amb prioritat per a les polítiques d'adaptació. El balanç entre els recursos hídrics disponibles i els usos de l'aigua haurà de ser tingut en compte amb una perspectiva diferent per a cada zona, en tant que no són el mateix les comarques de l'interior que les subconques litorals. Les primeres tenen un ús de l'aigua principalment agrícola i depenen, sobretot, dels recursos superficials; les segones presenten unes necessitats bàsicament urbanes, en alguns casos amb un marcat component estacional (turisme), i depenen de transvasaments i de recursos subterranis prou malmesos i amb un evident increment del risc de salinització (intrusió marina) a causa del canvi climàtic.

Cal destacar el paper de les capçaleres pirinenques en aquest procés d'adaptació, especialment les del Segre, les de la Noguera Pallaresa i les de la Noguera Ribagorçana, com a peces clau del trencaclosques. A més, cal repensar les grans infraestructures i la interconnexió de xarxes i analitzar les capacitats que tenen com a eines de mitigació dels impactes del canvi global en la disponibilitat dels recursos hídrics. Cal també valorar de manera molt concreta la destinació dels recursos hídrics per cobrir necessitats específiques, així com els canvis dels usos del sòl, especialment en relació amb la gestió de la massa forestal, part de la qual serà molt vulnerable a causa de l'augment de l'estrès hídric. Tot plegat obliga a promoure una gestió integrada del territori i una monitorització més àmplia dels processos involucrats en la generació i l'ús dels recursos hídrics, així com de les respostes dels ecosistemes associats a la situació de canvi profund en què es troben immersos. L'anàlisi del balanç cost-benefici de les possibles estratègies d'adaptació esdevé una eina complementària per a avaluar la viabilitat de les diferents propostes, fet pel

qual cal tenir en compte els diferents escenaris possibles, amb l'objectiu d'arribar a una comparimentació fonamentada i equilibrada dels recursos hídrics en l'actual marc de canvi global.

Referències bibliogràfiques

- ACA = AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA (2002). *Regionalització del sistema fluvial a les conques internes de Catalunya. Aplicació de la Directiva marc en política d'aigües de la Unió Europea (2000/60/CE)*. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Agència Catalana de l'Aigua.
- (2015). *Pla de Gestió del Districte de Conca Fluvial de Catalunya 2016-2021*. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Agència Catalana de l'Aigua.
- BANGASH, E. F.; PASSUELLO, A.; SÁNCHEZ-CANALES, M. [et al.] (2013). «Ecosystem services in Mediterranean river basin: Climate change impact on water provisioning and erosion control». *Science of the Total Environment*, 458-460, p. 246-255.
- BARRERA-ESCODA A.; CUNILLERA, J. (2010). «Study of the precipitation evolution in Catalonia using a mesoscale model». *Advanced Geosciences*, 26, p. 1-6.
- (2011). «Climate change projections for Catalonia (NE Iberian Peninsula). Part I: regional climate modeling». *Tethys*, 8, p. 75-87.
- BATALLA, R. J.; GOMEZ, C. M.; KONDOLF, G. M. (2004). «Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (Northeastern Spain)». *Journal of Hydrology*, 290, p. 117-136.
- BIROT, Y.; GRÀCIA, C. (2011). «Una visión general del ciclo hidrológico: Agua verde y agua azul. Agua para los bosques y la sociedad en el Mediterráneo. Un difícil equilibrio». Barcelona: EFIMED, p. 17-21.
- BOITHIAS, L.; ACUÑA, V.; VERGOÑÓS, L. [et al.] (2014). «Assessment of the water supply: demand ratios in Mediterranean basin under different global change scenarios and mitigation alternatives». *Science of the Total Environment*, 470-471, p. 567-577.
- BUENDÍA, C.; BATALLA, R. J.; SABATER, S. [et al.] (2015). «Runoff trends driven by climate and afforestation in a Pyrenean basin». *Land Degradation and Development*. DOI: 10.1002/ldr.2384.
- BUENDÍA, C.; BUSSI, G.; TUSET, J. [et al.] (2015). «Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment». *Science of the Total Environment*. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.005.
- CALDER, I. R. (2005). *Blue revolution, integrated land and water resource management*. Londres: Earthscan.
- CANDELA, L.; TAMOH, K.; OLIVARES, G. (2012). «Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain)». *Science of the Total Environment*, 440, p. 253-260.
- CENTRO TECNOLÓGICO DEL AGUA (2012). *Medium and long term water resources modelling as a tool for planning and global change adaptation. Application to the Llobregat River basin*.
- CHRISTENSEN, J. H.; HEWITSON, B.; BUSUIOC, A. [et al.] (2007). «Regional climate projections». A: IPCC = INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5)*. Cambridge, etc.: Cambridge University Press.
- CONACHER, A. J.; SALA, M. (1998). *Land degradation in Mediterranean Environments of the World. Nature, Extent, Causes and Solutions*. Wiley: Chichester.
- CREAF = CENTRE DE RECERCA ECOLÒGICA I D'APLICACIONS FORESTALS (2012). *Projecte ACCUA: Adaptacions al canvi climàtic en l'ús de l'aigua*. Barcelona: CREAF: Fundació Catalunya la Pedrera.
- DELGADO, J.; LLORENS, P.; NORD, G. [et al.] (2010). «Modelling the hydrological response of a Mediterranean medium-sized headwater basin subject to land cover change: The Cardener River basin». *Journal of Hydrology*, 383, p. 125-134.
- DOLZ, J.; ARMENGOL, J. (2011). *Els recursos hídrics a Catalunya: Dades i conceptes bàsics*. Barcelona: Cambra de Comerç de Barcelona.

- FALKENMARK, M.; ROCKSTROM, J. (2004). *Balancing water for humans and nature: the new approach in ecohydrology*. Londres: Earthscan.
- FATORIC, S.; CHELLERI, L. (2012). «Vulnerability to the effects of climate change and adaptation: the case of the Spanish Ebro delta». *Ocean & Coastal Management*, 60, p. 1-10.
- FERGUSON, G.; GLEESON, T. (2012). «Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change». *Nature Climate Change*, 2, p. 342-345.
- GALLART, F. (2009). «Canvis temporals observats en les sèries de cabals». A: AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. *Aigua i canvi climàtic: Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Agència Catalana de l'Aigua, p. 105-114.
- (2015). «Vulnerabilidades de los recursos hídricos en relación al cambio climático y a sus interacciones con los sistemas terrestres». A: *Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático: Impactos, vulnerabilidad y adaptación en España*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, p. 345-352.
- GALLART, F.; LLORENS, P. (2001). «Efectos de los cambios de uso y cubierta del suelo en los aportes del río Ebro y su evolución futura». A: *El curso inferior del Ebro y su delta*. Cantàbria: Universidad de Cantabria, Barcelona; Universidad de Barcelona, p. 51-57.
- (2003). «Catchment management under environmental change: Impact of land cover change on water resources». *Water International*, 28(3), p. 334-340.
- GALLART, F.; DELGADO, J.; BEATSON, S. J. V. [et al.] (2011). «Analysing the effect of global change on the historical trends in water resources in the headwaters of the Llobregat and Ter river basins (Catalonia, Spain)». *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, p. 655-661.
- GREEN, T. R.; TANIGUCHI, M.; KOOI, H. [et al.] (2011). «Beneath the surface of global change: impacts of climate change on groundwater». *Journal of Hydrology*, 405, p. 532-560.
- GUIU, R.; POUGET, L.; TERMES, M. (2015). «Selecting an efficient adaptation level to uncertain water scarcity by coupling hydrological modeling and economic valuation». *Water Economics and Policy*, 1(3).
- IBÁÑEZ, C.; PONT, D.; PRAT, N. (1997). «Characterization of the Ebre and Rhone estuaries: A basis for defining and classifying salt-wedge estuaries». *Limnol Oceanography*, 42, p. 89-101.
- IPCC = INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2014). *Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5)*. Edició de C. Field, V. R. Barros, K. J. Dokken [et al.]. Cambridge, etc.: Cambridge University Press. També disponible en línia a: <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2>> [Consulta: 17 febrer 2016]
- KIM, J. H.; JACKSON, R. B. (2012). «A global analysis of groundwater recharge for vegetation, climate, and soils». *Vadose Zone Journal*, 11(1). DOI: 10.2136/vzj2011.0021RA.
- LLASAT, M. C.; COROMINAS, J. (2010). «Riscos associats al clima». A: LLEBOT, J. E. (ed.). *Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Barcelona: Generalitat de Catalunya: Institut d'Estudis Catalans, p. 243-307.
- MANZANO, A. (2009a). «Exemples de modelització hidrològica en règim mitjà dels rius catalans en escenaris futurs». A: AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. *Aigua i canvi climàtic: Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Agència Catalana de l'Aigua, p. 127-141.
- (2009b). «Efectes sobre la variabilitat hidrològica i els fenòmens extrems». A: AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. *Aigua i Canvi Climàtic: Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Agència Catalana de l'Aigua, p. 153-165.
- MARTÍN-VIDE, J.; GALLART, F.; LÓPEZ-BUSTINS, J. A. (2011). «Climate change implications for forests and hydrology». A: YVES, B.; GRACIA, C.; PALAHÍ, M. (ed.). *Water for forests and people in the Mediterranean region*. European Forest Institute, p. 131-136.
- MARCÉ, R.; RODRÍGUEZ-ARIAS, M. A.; GARCÍA, J. C. [et al.] (2010). «El Niño-Southern Oscillation and

- climate trends impact reservoir water quality». *Global Change Biology*, 16, p. 2857-2865.
- MAS-PLA, J. (2005). «Recursos hídrics, dinàmica hidrològica i canvi climàtic». A: LLEBOT, J. E. (ed.) *Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Barcelona: Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible: Institut d'Estudis Catalans, p. 485-516.
- (2010). «Vulnerabilitat territorial dels recursos hidrològics al canvi climàtic». A: LLEBOT, J. E. (ed.) *Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Barcelona: Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible: Institut d'Estudis Catalans, p. 309-342.
- MAS-PLA, J.; FONT, E.; ASTUI, O.; [et al.] (2012). «Development of a stream-aquifer numerical flow model to assess river water management under water scarcity in a Mediterranean basin». *Science of the Total Environment*, 440, p. 204-218.
- MAS-PLA, J.; GHIGLIERI, G.; URAS, G. (2014). «Seawater intrusion and coastal water resources management. Examples from two Mediterranean regions: Catalonia and Sardinia». *Contributions to Science*, 10, p. 171-184.
- MAS-PLA, J.; ORTUÑO, F. (2009). «Anàlisi territorial de la vulnerabilitat dels recursos hídrics davant del canvi climàtic». A: AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. *Aigua i canvi climàtic: Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Agència Catalana de l'Aigua, p. 183-194.
- MENCIÓ, A.; FOLCH, A.; MAS-PLA, J. (2010). «Analyzing hydrological sustainability through water balance». *Environmental Management*, 45, p. 1175-1190.
- ORTUÑO, F.; JÓDAR, J.; CARRERA, J. (2009). «Canvi climàtic i recàrrega d'aqüífers a Catalunya. A: AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA. *Aigua i canvi climàtic. Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Barcelona: Generalitat de Catalunya: Agència Catalana de l'Aigua, p. 143-152.
- ORTUÑO, F.; MOLINERO, J.; GARRIDO, T. [et al.] (2012). «Seawater injection barrier recharge with advanced reclaimed water at Llobregat delta aquifer (Spain)». *Water Science & Technology*, 66, p. 2083-2089.
- PASCUAL, D.; PLA, E.; LOPEZ-BUSTINS, J. A. [et al.] (2014). «Impacts of climate change on water resources in the Mediterranean Basin». *Hydrological Sciences Journal*. DOI: 10.1080/02626667.2014.947290.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; SABATÉ, S. [et al.] (2005). «Sistemes naturals: ecosistemes terrestres». A: LLEBOT, J. E. (ed.) *Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Barcelona: Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible: Institut d'Estudis Catalans, p. 517-553.
- PEÑUELAS, J. [et al.] (2010). «Impactes, vulnerabilitat i retroalimentacions climàtiques als ecosistemes terrestres catalans». A: LLEBOT, J. E. (ed.) *Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Barcelona: Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible: Institut d'Estudis Catalans, p. 373-407.
- POUGET, L.; ESCALER, I.; GUIU, R. [et al.] (2012). «Global change adaptation in water resources management: The Water Change Project». *Science of the Total Environment*, 440, p. 186-193.
- SAMPER, J.; HUGUET, L.; ARES, J. [et al.] (2005). *User's guide Visual BALAN v. 2.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga*. La Coruña: Civil Engineering School of A Coruña.
- TAYLOR, R. G. [et al.] (2012). «Groundwater and climate change». *Nature Climate Change*, 8.
- TERRADO M.; ACUÑA V.; ENNAANAY D. [et al.] (2014). «Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized Mediterranean basin». *Ecological Indicators*, 37, p. 199-209.
- VICENTE-SERRANO, S. M.; ZABALZA-MARTÍNEZ, J.; LÓPEZ MORENO, J. [et al.] (2015). «Changes in extreme hydrological events in highly regulated river basins of Catalonia (NE Spain): discerning between climate change processes, land cover modifications and water resources management». *International Scientific Conference*, p. 1119.
- ZHANG, L.; DAWES, W. R.; WALKER, G. R. (2001). «Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale». *Water Resources Research*, 37, p. 701-708.