



Universitat
de les Illes Balears

***Títol: Redefinició i optimització del disseny de la
xarxa hidromètrica de l'illa de Mallorca.
Implementació i avaluació del primer any en
funcionament***

NOM AUTOR: Josep Fortesa Bernat

Memòria del Treball de Fi de Màster

Màster Universitari d'Anàlisi, Planificació i Gestió en Àrees Litorals
de la

UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS

Curs Acadèmic 2014 - 2015

Data: 08-09-2015

Signatura de l'autor:

Nom Tutor del Treball: Joan Estrany Bertos

Signatura Tutor:

Acceptat pel Director del Màster Universitari de: Joana Maria Seguí Pons

Signatura:

Resum

S'ha realitzat el disseny i la implementació de la xarxa hidromètrica de Mallorca per tal d'optimitzar la xarxa foronòmica de la Conselleria de Medi Ambient, Agricultura i Pesca. El resultat és una xarxa formada per 34 estacions d'aforament que duen a terme el monitoreig continu de l'escorrentia superficial a partir de sensors de registre digital, controlant 1.482,95 km², un 47,9% de la superfície total, la qual cosa suposa una estació cada 91 km². S'han seleccionat cinc conques de drenatge representatives amb diferents superfícies, usos del sòl, règim de precipitacions i risc potencial d'erosió, de les quals es presenten els resultats de l'any hidrològic 2014-2015. S'han avaluat i comparat el seu funcionament front els instruments de registre analògics, en els quals s'han detectat errors de mesura del nivell i en la transformació del cabal. La comparativa entre les dues metodologies reforça l'argument de l'optimització de la xarxa a partir de la instrumentació de registres digitals degut a la resolució temporal i espacial així com fiabilitat que assoleixen una vegada calibrats. Els resultats obtinguts cal incorporar-los a la planificació, gestió i avaluació dels recursos hídrics per tal de dur a terme una millora en la presa de decisions sobre la gestió dels recursos hídrics a l'illa de Mallorca.

Paraules clau: disseny de xarxa, monitoreig continu, calibratge, xarxa hidromètrica.

Llista de figures

Figura 1. Àrea d'estudi: xarxa hidromètrica de Mallorca.

Figura 2. Sonda de pressió instal·lada al torrent de Ternelles.

Figura 3. Usos del sòl i àrea marjada a les conques de drenatge seleccionades.

Figura 4. Edats geològiques pertanyents a les conques de drenatge seleccionades.

Figura 5. Hidrograma i hietograma del període d'estudi de les cinc conques de drenatge seleccionades.

Figura 6. Comparació del nivell enregistrat per aparell analògic (limnígraf) i per aparell digital (sonda de nivell) a l'estació d'aforament de Sant Miquel per a l'event de 29 de setembre de 2014.

Figura 7. Comparació del cabal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) enregistrat per aparell analògic (limnígraf) i per aparell digital (sonda de nivell) a l'estació d'aforament de Sant Miquel per a l'event de 29 de setembre 2014.

Figura 8. Comparació del nivell enregistrat per aparell analògic (limnígraf) i per aparell digital (sonda de nivell) a l'estació d'aforament de Sant Miquel per a l'event de 3 novembre de 2014.

Figura 9. Comparació del cabal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) enregistrat per aparell analògic (limnígraf) i per aparell digital (sonda de nivell) a l'estació d'aforament de Sant Miquel per a l'event de 3 de novembre de 2014.

Figura 10. Corba d'aforament confeigida a partir de dades obtingudes de sonda de nivell (esquerra) i a partir de dades obtingudes del limnígraf a l'estació d'aforament de Sant Miquel (dreta).

Figura 11. Comparació del calibratge de les sondes de nivell de les estacions d'aforament de Sant Miquel (*Campbell*) i de Sitges-Almadrava (*Hobo*).

Llista de taules

Taula 1. Aportacions totals, cabals mitjans, aportacions específiques, escolament i precipitació de les cinc conques de drenatge seleccionades.

Taula 2. Events del període d'estudi i estacionalment de cada estació a les cinc conques de drenatge seleccionades.

Taula 3. Cabals màxims, mitjans i aportacions per events a les cinc conques de drenatge seleccionades.

Taula 4. Comparativa del nivell màxim, cabal màxim, cabal mitjà i aportació enregistrat a una estació d'aforament en format analògic (limnígraf) i digital (sonda de nivell).

Taula 5. Comparativa del nivell màxim, cabal màxim, mitjà i aportació enregistrat a una estació d'aforament en format analògic (limnígraf) i digital (sonda de nivell).

Índex

1.	Introducció: les xarxes hidromètriques.....	1
2.	Monitoreig de la hidrologia superficial a Mallorca	6
3.	Objectius	7
4.	Àrea d'estudi	8
5.	Material i mètodes	10
5.1.	<i>Criteris de disseny</i>	10
5.2.	<i>Feina de camp</i>	11
5.3.	<i>Computació i anàlisi de dades</i>	14
6.	Resultats.....	16
6.1.	<i>Implementació i avaluació del disseny</i>	16
6.2.	<i>Dinàmiques i processos hidrològics durant l'any hidrològic 2014-2015</i>	17
6.2.1.	<i>Període d'estudi</i>	17
6.2.2.	<i>Events</i>	19
6.2.3.	<i>Comparativa entre registres analògics i digitals</i>	20
6.2.4.	<i>Comparativa entre registres digitals</i>	25
7.	Discussió.....	25
8.	Conclusions	28
9.	Agraïments	29
10.	Referències bibliogràfiques.....	30

1. Introducció: les xarxes hidromètriques

La fiabilitat de les dades hidromètriques requereix d'una continuïtat temporal i una sistemàtica de contrast i manteniment a les estacions de monitoratge (Shaw, 1994). És necessari destacar que, donat el caràcter estocàstic del procés, es requereixen de sèries temporals de llarg abast (i.e., 30 anys) per realitzar interpretacions del funcionament del sistema poc influenciades per situacions anecdòtiques i poc representatives, i també, curiosament, per poder interpretar i emmarcar adequadament aquest tipus de situacions. Per aquest motiu, el manteniment eficient de la xarxa s'ha d'establir com a norma i ha d'estar subjecte a un procés continu d'optimització (Rantz, 1982). En aquest context, s'ha d'emfatitzar que els ambients mediterranis han patit una profunda transformació a resultes de l'activitat humana. Contemporàniament, s'ha detectat una pèrdua progressiva de sòls agrícoles per mor de l'increment de la urbanització modificant la resposta hidrològica a les conques de drenatge mediterrànies. Endemés, l'increment de l'activitat turística ha impactat de manera destacada a la línia de costa de les regions mediterrànies, impacte molt més important en aquells espais amb major sensibilitat ambiental com són els insulars, per exemple les Illes Balears (Vogiatzakis et al., 2008).

La Llei de Recursos Hídrics del 1963 aprovada i desenvolupada al Regne Unit fou l'impuls més important pels primers estudis hidrològics, sobretot en el món anglosaxó (Ward, 1967). La llei marcà un abans i un després, ja que els estudis posteriors establiren les bases científiques per a la recol·lecció de dades, balanços hidrològics, sistemes de recerca i la classificació de les conques en representatives i experimentals. La realització d'aquests treballs apuntaven la necessitat de dissenyar i implementar xarxes hidromètriques a partir de l'estudi de la precipitació, l'evaporació, l'aigua superficial i les aigües subterrànies (Gregory, 1964; citat a Ward, 1967), tot i trobar-se amb una manca d'informació (i.e., classificació de sòls, geomorfometria, capacitat d'infiltració, usos del sòl) que dificultava la realització dels treballs. Prèviament, des de mitjans dels anys quaranta fins la dècada dels anys seixanta del segle passat, la major problemàtica hidrològica era aconseguir una explotació més eficient dels recursos hídrics per fer front a l'increment de la demanda per part dels usos domèstics, la indústria i les activitats agrícoles (Gregory, 1964). A partir de diverses normatives sobre

els recursos hídrics i la creació d'autoritats fluvials amb competències es persegueix l'objectiu de gestionar millor la demanda, per la qual cosa s'ha d'instrumentar la xarxa per quantificar el recurs.

Alguns estudis inicials utilitzaven instruments de monitoreig molt senzills tals com un sistema d'engranatges que connectaven un pes a una ploma per enregistrar les oscil·lacions del nivell de l'aigua (e.g., [Ward, 1967](#)). Emperò, amb els pas dels anys s'ha aconseguit una millora substancial gràcies als avanços tecnològics, els quals han permès un monitoreig continu a gran resolució temporal (i.e., escala minutal), el seguiment de més d'una variable, la millora en les tècniques d'aforament, l'automatització de la xarxa i l'obtenció de dades a temps real. En definitiva, aquests avenços permeten obtenir un major volum d'informació i de més qualitat tal com demostren Le Coz ([2008](#)) i Volkman et al. ([2010](#)), els quals expliquen les millores en la instrumentació utilitzada i exposen els resultats obtinguts per a la predicció de crescudes.

Així doncs, xarxa hidromètrica no és més que un sistema de monitoreig dels components del cicle de l'aigua ([Mishra i Coulibaly, 2009](#)). Hi ha diferents tipus de xarxes depenent dels problemes que es vulguin resoldre i dels objectius a assolir: les xarxes que mesuren l'aigua superficial, l'aigua subterrània o la qualitat de l'aigua. Els objectius d'aquestes xarxes són l'estudi de les reserves hídriques, l'estudi del canvi climàtic i les implicacions en els recursos hídrics, l'avaluació de projectes d'irrigació i la distribució de l'aigua dins el sistema hidrològic. Assolir aquests objectius permet ampliar els coneixements sobre el monitoreig continu de la xarxa hidrològica, establir els requeriments de dades per part dels usuaris així com millorar el disseny de la xarxa, la difusió de la informació i el sistema de presa de decisions ([Dixon, 2010](#)). La implantació d'una xarxa hidromètrica suposa -per tant- conèixer i controlar tots els processos hidrològics que es generen a una conca per tal d'utilitzar-los en l'estimació dels riscos d'inundació, oferir millores a la gestió dels recursos hídrics i realitzar avaluacions hidro-ecològiques. Per tant, el monitoreig d'aquest sistema i la transformació d'aquest en dades es pot entendre com un cicle de vida de dades ([Dixon, 2010](#); [Dixon, 2013](#)) format per sis etapes: (1^a) disseny de la xarxa de monitoreig, (2^a) detecció i registre de dades, (3^a) validació i arxivament de dades, (4^a) síntesis i anàlisi de

dades, (5^{ena}) difusió de la informació i (6^{ena}) ús de la informació i presa de decisions.

Nombrosos estudis s'han centrat en el disseny i optimització de xarxes hidromètriques, sobretot al Canadà (Spence et al., 2007; Mishra i Coulibaly, 2010), als Estats Units (Crawford, 1979; Volkmann et al., 2010; Li et al., 2012) i al Regne Unit (Ward, 1967; Laizé, 2004; Laizé et al., 2008; Dixon, 2010). Cal dir que a l'àmbit mediterrani no són abundants, podent-se destacar Boudevillain et al. (2011), centrat al sud de França per tal de comprendre millor els events de precipitació intensa que generen crescudes espasmòdiques a partir del *Cévennes-Vivarais Mediterranean Hydrometeorological Observatory* (CVMHO). A més a més, per realitzar el disseny de les xarxes hidromètriques s'han aplicat gran diversitat de mètodes (Mishra i Coulibaly, 2009). Així doncs, cada mètode té inconvenients i avantatges, per tant, s'han de tractar els mètodes de manera no exclouent. Els (1) mètodes estadístics són útils per a l'anàlisi i la comprensió de la distribució espacio-temporal i variància de les dades, tot i no inclouen les característiques físiques de la conca. Aquests es poden complementar amb els (2) d'interpolació espacial, ja que recentment s'ha inclòs el factor relleu a la interpolació espacial, i els que utilitzen la (3) teoria de l'entropia per identificar la redundància de la informació. En canvi, (4) l'optimització de mètodes és aquell a tenir menys en compte ja que l'objectiu és maximitzar la informació a partir d'uns costos mínims, quan el benefici que se'n pot obtenir de la xarxa és superior al seu cost. Als esmentats anteriorment s'han d'incloure aquells que es basen en les (5) característiques físiques de la conca ja que relacionaran el nombre d'estacions amb el pendent, l'orientació, els usos del sòl i l'àrea de la conca. Per tant, el mètode òptim serà (6) l'híbrid, al representar la distribució de la informació rellevant juntament amb les característiques de la conca. Aquest mètode híbrid cal que incorpori el major nombre d'usuaris que facilitin informació i que sigui d'utilitat; per la qual cosa major informació serà demandada i generarà una continuïtat en el funcionament de la xarxa.

Tot i els diferents mètodes de disseny, un problema bàsic en el disseny de xarxes sorgeix perquè les variables hidromètriques no es poden explicar tan sols a partir de models matemàtics, en els quals la magnitud de les variables és una funció invariant en el temps de la magnitud de la variable en un altre punt (Bras i Rodríguez-Iturbe, 1985, citat a Mishra i Coulibaly, 2010). Per tant, la xarxa ideal és aquella que comprèn les

característiques físiques dels processos hidrològics (i.e., precipitació, geomorfologia, litologia i usos del sòl), les quals posteriorment seran transformades en dades i integrades en futurs models de gestió i presa de decisions (Moss, 1979). Així doncs, a l'hora de dissenyar una xarxa s'han de tenir en compte una sèrie de consideracions. S'ha de justificar per què es planifica i s'implementa la xarxa, quin és el seu objectiu, la utilitat, el temps d'estudi, quins és el procés hidrològic que s'estudia, el número d'estacions i la freqüència amb la què s'estudia l'esmentat procés així com la disponibilitat de recursos humans i instrumentals tot tenint en compte les característiques hidrològiques de la conca (Ward, 1967; Moss, 1979). Igualment, cal considerar que la capacitat econòmica és un factor limitant en la densitat de la xarxa (Moss, 1979).

Amb tot, el disseny i l'avaluació de la xarxa hidromètrica permet planificar, predir i valorar la informació que genera cada estació, quina és la informació total de la xarxa, quanta informació d'una estació es pot conèixer a partir del coneixement d'una altra i quina és la informació duplicada entre diverses estacions (Li et al., 2012). És fonamental definir la densitat (nombre d'estacions) i l'escala temporal (interval de temps de mesurament) i espacial de la xarxa (localització) (Mishra i Coulibaly, 2009). La xarxa ha de tenir una densitat òptima que permeti englobar la diversitat de les característiques climàtiques, geològiques, usos del sòl i utilització d'aigua. En aquest sentit, un increment inicial de les estacions a la xarxa suposa una millora considerable en la quantitat i qualitat de la informació obtinguda. Emperò, es pot establir un llindar en el nombre d'estacions, a partir del qual no es detecten o són pràcticament imperceptibles les millores en la resolució i fiabilitat de les dades hidromètriques (Girons et al., 2015).

A més del monitoreig de l'escorrentia superficial, les xarxes hidromètriques han de comptar amb la mesura de variables meteorològiques, principalment la precipitació. Una de les tècniques que recentment han sofert una millora tecnològica important són els radars de precipitació. Aquests instruments assoleixen una resolució espacial de 1 a 36 km² i una resolució temporal de 5-15 minuts, calibrats i validats amb estacions pluviomètriques (Volkman et al., 2010; Bricet et al., 2011; Girons et al., 2015). Endemés, la resolució temporal i espacial que obté el radar s'adequa a les necessitats

d'informació meteorològica que es requereixen per estudiar els events de precipitació: mida, intensitat i duració (Crawford, 1979).

Finalment, l'obtenció de valors hidromètrics representatius és fonamental per tal de detectar dades errònies, caracteritzar els events extrems, les dinàmiques hidrològiques i els seus possibles canvis. Així doncs, poques dades a nivell temporal poden conduir a valors poc representatius, sobretot en el càlcul del cabal mitjà en règims hidrològics efímers i intermitents (Westberg et al., 2011; citat a McMillant et al., 2012). En aquest sentit, la *International Hydrological Decade* estableix un període mínim de deu anys de recollida de dades (Ward, 1967). Autors com Boudevillain et al. (2011) coincideixen en un monitoreig d'una durada superior a deu anys per obtenir resultats representatius. Però, autors com Sense i Farqharon (1998) recomanen un període entre 15 i 20 anys. Boudevillain et al. (2011) afirmen que s'ha de seguir una triple estratègia: estudis actuals, estudi d'events extrems i dades històriques. És per això que implementar una xarxa hidromètrica i obtenir resultats a llarg termini té com a un dels objectius millorar la qualitat de les dades de manera que les desviacions estàndards no superin el 20% pel cabal mitjà, el 30% pel període de retorn T50 i la mitjana de les inundacions anuals i un 10% pel període de retorn T2 i la mitjana setmanal del cabal (Mosley i Mckerchar, 1989). A l'extrem oposat, es troben estudis que utilitzen registres a curt termini, com al continent africà i asiàtic (Mosley i McKerchar, 1989), en els quals la disminució del nombre d'estacions ve fonamentada per problemes de finançament, marcs institucionals inadequats, falta de reconeixement de valor de les dades a llarg termini, guerres o d'altres desastres (Mishra i Coulibaly, 2009) i/o un mal disseny (Sense i Farquharsin, 1998). Tot plegat, incrementa exponencialment la incertesa de les dades i per tant la presa de decisions errònies afectant a l'abastiment d'aigua i a la mala inversió i gestió dels recursos. Esdevé aquí fonamental utilitzar registres a llarg termini així com avaluar i actualitzar el disseny de la xarxa hidromètrica periòdicament.

2. Monitoreig de la hidrologia superficial a Mallorca

El monitoreig de la hidrologia superficial de l'illa de Mallorca es realitza a partir de la xarxa foronòmica (1965 – actualitat), gestionada per la Direcció General de Recursos Hídrics, la qual és competent de la planificació hidrològica i del domini públic hidràulic. Aquest organisme forma part de la Conselleria de Medi Ambient, Agricultura, Pesca del Govern de les Illes Balears.

El disseny d'aquesta xarxa respon a un objectiu inicial d'estudi sobre el potencial hidrològic de conques de drenatge d'una sèrie d'embassament projectats durant els anys 60 del segle XX per part de la *Jefatura de Obras Hidráulicas de Baleares*. El sistema de monitoreig està compost per la instrumentació analògica (i.e., limnígrafs i limnímetres), per la qual cosa la resolució no és acurada. A més, l'estat de conservació de la instrumentació esmentada i de les seccions d'aforament empitjora exponencialment la incertesa. Per un costat, els valors amb limnímetre mesurat a un moment puntual del dia no són representatius de les oscil·lacions del nivell que es puguin donar, ja que el règim hidrològic mediterrani es caracteritza per events espasmòdics. Per l'altre costat, una petita part de la xarxa està instrumentada a partir de limnígrafs, dels quals el seu mecanisme d'enregistrament ja no funciona correctament, ja sigui per l'obsolet sistema de registre, el mal estat de la secció transversal d'aforament o la desconexió de l'entrada del pou amb el canal. A més, les seccions d'aforament estan en mal estat, ja sigui per processos d'erosió, sedimentació o per la mala ubicació hidràulica (i.e., estar situades prop de meandres).

Inicialment –1960– la xarxa comptava amb 44 estacions d'aforament, 10 equipades amb limnigrafs i les 34 restants únicament amb limnímetres. Al 1998 tan sols quedaven 30 estacions en funcionament i degut a l'abandonament de la xarxa es va proposar reconstruir-la de tal manera que aquesta es configurés a partir de 34 estacions (21 limnígrafs i 13 limnímetres), la qual es basava en el manteniment de la localització de les estacions i la instal·lació de més limnígrafs (tan sols a Mallorca), amb un pressupost total de 819 milions de pessetes (al canvi 4,92 milions €) (YACU, 1998). La proposta no es va dur a terme i l'any 2013 la xarxa hidromètrica comptava amb 33 estacions, de les quals 7 restaven equipades amb limnígrafs i 25 amb limnímetres. Així doncs, la metodologia utilitzada en la recol·lecció de dades i el deficient manteniment de la xarxa

gairebé des de la seva creació condueix a dia d'avui a la poca representativitat i validesa de les dades (Estrany, 2008).

3. Objectius

front a la necessitat de dur a terme un monitoreig que permeti l'obtenció de valors hidromètrics representatius de sèries temporals de llarg abast a partir de nous sistemes de monitoreig (Volkamn, 2010) i tècniques de mesura (Gravelle, 2015), cal redefinir i optimitzar la xarxa foronòmica perquè els resultats d'aquesta tenguin validesa i es puguin incorporar dins del procés de presa de decisions. L'objectiu general ha de ser millorar la planificació i gestió dels recursos hídrics front el futur incert dels sistemes fluvials en un context de canvi global (Walsh et al., 2015). Així doncs, els objectius específics en són els següents:

- Redefinir i optimitzar el disseny actual de la xarxa foronòmica de l'illa de Mallorca implementada a mitjans segle passat i actualment explotada per la Conselleria de Medi Ambient, Agricultura i Pesca per a la seva posterior implementació i automatització mitjançant l'establiment del criteri de reestructuració de la xarxa.
- Iniciar el calibratge de la nova xarxa hidromètrica mitjançant l'obtenció del nivell manual i d'aforaments directes per confegir corbes d'aforament tot realitzant un control de qualitat de les dades.
- primers Anàlisi dels resultats de la nova xarxa hidromètrica per a l'any hidrològic 2014-2015 a partir de cinc conques de drenatge representatives de la hidrologia de l'illa de Mallorca per tal de comparar-los dins del registre històric i amb els registres analògics.

4. Àrea d'estudi

Mallorca és la part emergida del promontori balear, una continuació de les serralades Bètiques que tenen origen a l'orogènia alpina (30 M.A.). La seva estructura està formada per *horsts* i *grabens* que donen origen a tres serralades principals diferents: la serra de Tramuntana, les serres de Llevant i les serres Centrals. Entre els diferents horsts s'han generat una sèrie de grabens o conques que s'han anat reblint pels sediments originats de les altres estructures durant el Miocè superior i el Quaternari. La serra de Tramuntana està formada majoritàriament per dolomies del Juràssic i del Triàsic. Les serres Centrals contenen conglomerats, llims, margues i arenisques del Miocè, tot i que també afloren algunes zones del Juràssic inferior on és important la presència de roques carbonatades. Les serres de Llevant estan compostes per dolomies del Juràssic inferior i Triàsic superior i calcàries oolítiques i estromatolítiques del Miocè superior. Cal destacar la important presència de roques carbonatades del Juràssic inferior o Lias. Mentre a la Terra només representen un 12%, a l'àmbit mediterrani aquest percentatge és molt superior (Lewin i Woodward, 2009). Així, el carst juga un paper fonamental en la recàrrega de les aigües subterrànies al condicionar el règim hidrològic, la morfologia i la sedimentologia dels canals, la qualitat de l'aigua i l'ecologia (Sear et al., 1999). És clau a l'illa de Mallorca aquest tipus de material litològic per la seva funcionalitat càrstica i hidrogeològica. També cal fer referència a les margues del Triàsic (Keuper), les quals actuen de substrat impermeable per a la circulació hídrica subterrània (Ginés i Ginés, 2011) ja que les zones triasico-liàtiques carstificades permeten una infiltració ràpida de la precipitació (Colom, 1982).

Aquesta estructura geològica i la litologia traslladen un marcat empriu a la hidrologia, tant superficial com subterrània. Així, la xarxa hidrogràfica de Mallorca (3.640 km²) es divideix en cinc vessants principals (litoral nord-est, Palma, Alcúdia, Campos i litoral sud-est) i dos secundaris (Andratx i Pollença) (Grimalt, 1989a). El règim hidrològic es caracteritza per ser eminentment efímer al basar-se en la transformació de precipitació a escorrentia directa a través d'events espasmòdics en els quals el cabal base s'esgota ràpidament per la desconexió entre el nivell base i el nivell freàtic. Tot i així, alguns trams fluvials es caracteritzen per diferents graus d'intermitència en el seu règim hidrològic, condicionats per la presència de litologies impermeables i una

hidrometeorologia, la qual *per se* és irregular intra- i interanualment. La xarxa està formada per conques petites, on tan sols 7 superen els 100 km² i la major, Muro, té una extensió de 456 km². A les zones de serralada, els cursos fluviotorrencials són curts i amb fort pendent, sobretot a les zones de capçalera on les conques són més petites i reben una precipitació mitjana-elevada, representen un 20% de la xarxa hidrogràfica. A les zones de plana les conques, amb un pendent suau i precipitació baixa i variable, veuen incrementada la superfície. Els torrents de plana suposen el 63% de la xarxa hidrogràfica. Cal destacar els torrents situats a sòls impermeables (17%) on –amb una mida, un pendent i una precipitació variable– tenen un règim hidrològic predominant intermitent o fins i tot perenne a diferència del règim efímer de la resta de la xarxa.

El clima mediterrani és present a l'illa de Mallorca a partir dels diferents subtipus de clima mediterrani segons la classificació d'Emberger (Guijarro, 1986). Al sector central i oriental de la serra de Tramuntana es localitza el subtipus humit i superhumit. A la resta d'aquesta serralada, al nord i al quadrant nord-est de l'illa s'estableix el clima subhumit temperat i subhumit càlid. Entre el sud de l'illa i la badia de Palma es troba el subtipus semiàrid temperat i semiàrid fred. Aquesta subdivisió climàtica establirà diferents llindars de precipitacions per a cada una de les zones esmentades. Les precipitacions mitjanes anuals oscil·len entre els més de 1.200 mm de la part central de la serra de Tramuntana fins els menys de 400 mm al sud de l'illa. Cal destacar que a la part central i oriental de la serra de Tramuntana es recullen uns 800 mm de precipitació mitjana anual i el llindar dels 700 mm es pot fer extens per a tota la Serra. Aquest darrer valor també s'assoleix al nord-est de les serres de Llevant. Per a les precipitacions màximes en 24 hores per a un període de retorn de 25 anys, tota la serra de Tramuntana té un mínim de 110 mm, incrementant fins els 250 mm en a la zona central de la Serra. Al pla central aquests valors oscil·len entre els 90 i 100 mm. Al nord-est de les serres de Llevant aquests valors estan al voltant dels 110 i 150 mm. Al sud de l'illa es troben uns valors de 80-90 mm (Grimalt, 1989b). Pel que fa a les temperatures, la mitjana és de 16,5°C.

Actualment la distribució percentual dels usos del sòl a Mallorca és: secà arbrat (40,79%), secà no arbrat (16,89%), forestal (16,82%), matollar (15,92%), urbà (5,45%), regadiu (3,48%) i zones d'aiguamoll (0,65%) (Nivell 2 CORINE). Aquestes dades han sofert un canvi important respecte la segona meitat del segle XX. Pel que fa a la massa

forestal, des del 1971 (IFN1) al 2010 (IFN4) ha incrementat un 79%, passant de 176.590 ha a 220.785. Aquesta aforestació és fruit de l'èxode rural sobretot a àrees marginals de Mallorca com la serra de Tramuntana i serres de Llevant. Aquest increment té conseqüències en els processos hidrològics, ja que l'increment de superfície forestal s'explica per l'avanç de la transició forestal, on el creixement de la vegetació progressa fins assolir el darrer estadi, l'arbre, tot disminuint l'escolament capaç de generar-se durant els events hidrològics (Buendia et al., 2015). L'èxode rural s'accelerà partir de la dècada del 1960 i afectà tot el territori insular, on gran part de la població activa passà a dedicar-se al sector terciari, primerament cap als nuclis turístics del litoral, i posteriorment amb un procés d'urbanització creixent de les àrees rurals i amb el turisme residencial (Grimalt et al., 2002). Pons (2011) quantificà aquest procés d'urbanització ja que el 1956 les zones urbanes representava un 1,13% i el 2006 havien incrementat fins assolir el 6,23%. Contràriament a la massa forestal, els usos urbans generen una major escorrentia.

5. Material i mètodes

5.1. Criteris de disseny

S'ha redefinit i optimitzat la xarxa foronòmica de Mallorca mitjançant un mètode de disseny híbrid, el qual inclou part del mètode estadístic a partir de les mitjanes i intensitat de precipitació (i.e. període de retorn de 25 anys), dels mètodes que inclouen les característiques físiques de la conca (litologia, precipitació, usos del sòl, geomorfometria, superfície de conques) i mètodes que utilitzen diferents estratègies de mostreig (conques integrades) tot combinant-se amb un sistema d'informació geogràfica. No s'han aplicat mètodes com el d'interpolació espacial, la teoria de l'entropia o índexs de característiques físiques de la conca ja que requereixen cabals mitjans diaris. Actualment no es compta amb aquesta dada, ja que, com es demostrarà a continuació, les dades dels registres analògics de la xarxa foronòmica no són representatives.

El disseny de la nova xarxa hidromètrica es basa en l'estructura de la xarxa foronòmica de Mallorca, la qual engloba gairebé totes les conques de major importància; és a dir,

les que tenen major superfície i/o reben un major volum de precipitació. Amb aquests supòsits s'ha reestructurat la xarxa hidromètrica, realitzant una instrumentació inicial bàsica de monitoreig continu i digital a les conques que tenen la zona de capçalera a la serra de Tramuntana i serres de Llevant, on a la seva part baixa s'ubiquen zones de cultiu i zones urbanes. Finalment, s'han incorporat aquelles conques amb un major potencial erosiu tals com la d'Andratx, afectada recurrentment per incendis forestals. D'aquesta manera s'ha incrementat el número d'estacions per conca alhora que també el nombre d'aquestes.

La xarxa hidromètrica es reestructurarà realitzant una instrumentació inicial bàsica de monitoreig continu i digital tenint en compte les característiques climàtiques i hidrològiques intrínseques de l'àrea d'estudi ja que aquestes determinen la densitat de la xarxa a nivell espacial i temporal. Els factors més importants a les regions mediterrànies són la variació estacional i la intensitat de les precipitacions (Inbar, 1992), per la qual cosa alhora seran els factors, juntament amb la litologia, que determinaran el règim hidrològic a escala temporal i espacial (Thornes et al., 2009). Per tant, aquestes característiques seran les condicionats del temps de mesura, el qual per aquestes s'ha considerat adient que es realitzarà una lectura de dades quinzeminutals. D'aquesta manera es pot monitoritzar adequadament tant el cabal base com les crescudes efímeres com han demostrat alguns autors (Sala i Farguell, 2002; De Girolamo et al., 2015).

5.2. Feina de camp

La xarxa hidromètrica de Mallorca (Fig. 1) està formada per 34 estacions d'aforament, de les quals 12 (Campbell Scientific CS450-L) estan completament equipades (nivell, terbolesa, conductivitat i temperatura) i les 22 restants són sondes de pressió atmosfèrica (HOBO U20L-04 0-4 m) que permeten obtenir el nivell de làmina d'aigua i temperatura.

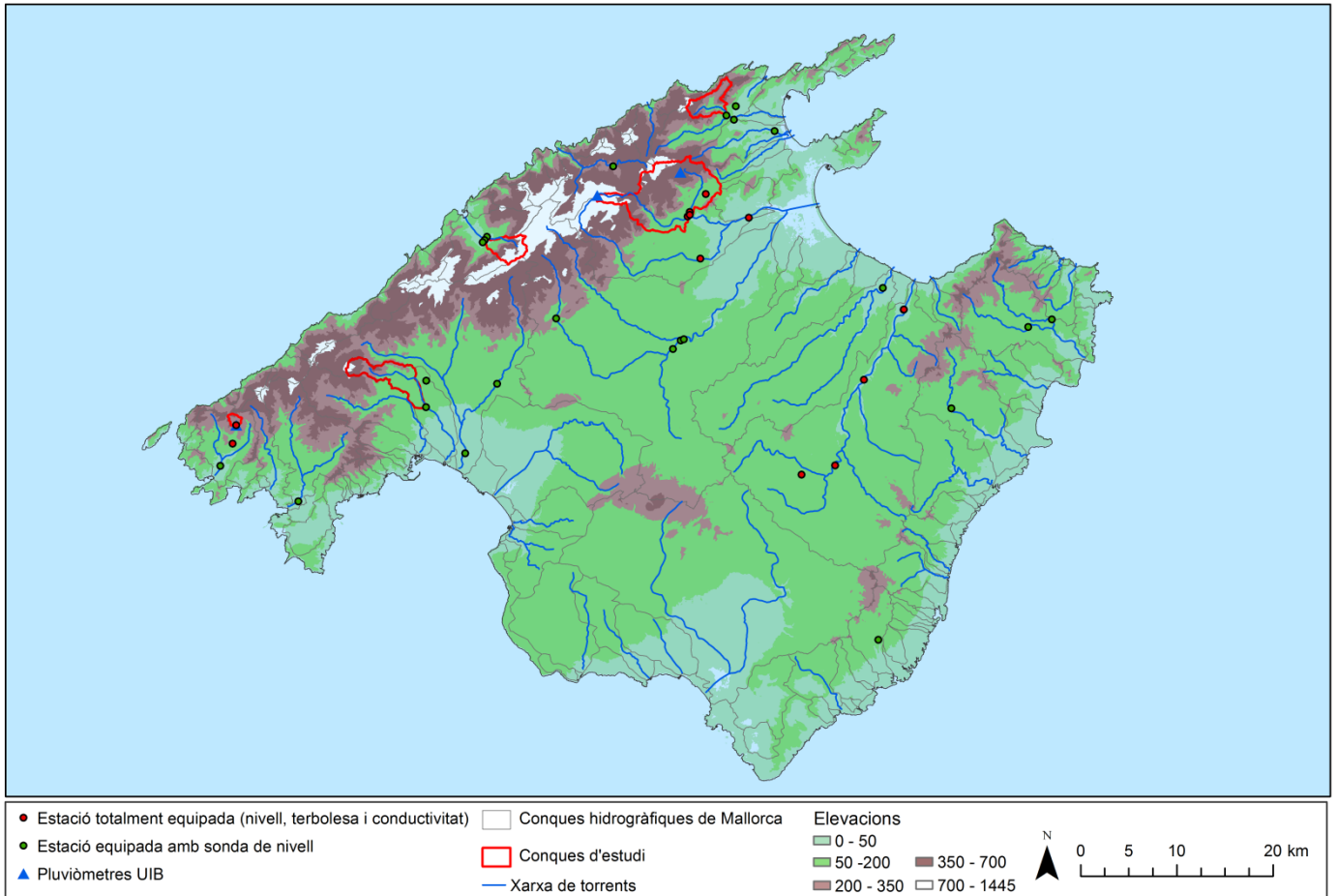


Figura 1. Àrea d'estudi: xarxa hidromètrica de Mallorca.

Els dos conjunts de sondes enregistren a una resolució temporal quinzeminutal a partir de lectures minutals. Dues sondes de pressió atmosfèrica addicionals situades a l'estació Pont de ses Pastores i a la Universitat de les Illes Balears (Fig. 1) s'utilitzen com a baròmetres de referència per a la realització de la transformació de pressió (kPa) a nivell (m).

Cal dir que la xarxa inicialment estava formada per les 12 estacions completament equipades. Durant l'estiu de 2014 es va realitzar la instal·lació de les 22 sondes de pressió atmosfèrica (Fig. 2) mitjançant la construcció d'una columna de protecció (reblerta amb ciment, arena i grava) a partir de dos blocs de formigó de 20 x 20 cm, dues varilles de 8 mm de diàmetre i 50 cm de llargària. Per a la subjecció de la sonda es requereix clavar dos pernys d'expansió als què s'hi enrosquen dues abraçaderes que subjecten la carcassa dins la qual s'introdueix i protegeix la sonda.

La recollida de dades de les estacions s'ha realitzat cada tres mesos per a les dotze sondes *Campbell Scientific CS450-L* i una recollida mensual per a les 22 sondes *HOB0*

U20L-04 0-4 m.

A més, la xarxa compta amb un total de seixanta cinc aforaments realitzats en períodes d'event i cabal base, per tal d'elaborar les corbes d'aforament. Els aforaments s'han realitzat amb un sensor magnètic inductiu ([OTT MF pro](#)) el qual mesura un rang de 0 a 6 m s⁻¹, amb una precisió del 2% pels valors mesurats ± 0.015 m s⁻¹ (0 a 3 m s⁻¹) i d'un 4% pels valors mesurats ± 0.015 m s⁻¹ (3 a 5 m s⁻¹s).



Figura 2. Sonda de pressió instal·lada al torrent de Ternelles.

Pel monitoreig de la precipitació s'utilitzaran dues xarxes de pluviòmetres. Una és la del *Mediterranean Ecogeomorphological and Hydrological Connectivity Research Team* ([MEDhyCON](#)) de la UIB que està formada pels pluviòmetres de sa Murtera, coll des Telègraf i Miner Gran (Fig. 1). Mesuren la precipitació (mm) i la temperatura (°C) a una resolució temporal quinzenal. La segona xarxa de pluviòmetres es la de l'Agència Estatal de Meteorologia ([AEMET](#)) que a l'illa de Mallorca compta amb 29 estacions automàtiques amb una resolució temporal deuminutal i 133 estacions manuals amb una resolució temporal diària. Totes elles mesuren temperatura (°C), vent (km h⁻¹), ratxa de vent (km h⁻¹), precipitació (mm), pressió (hPa) i humitat (%).

5.3. **Computació i anàlisi de dades**

S'ha realitzat un monitoreig continu des de l'octubre del 2014 fins al juliol del 2015, període representatiu de l'any hidrològic (d'octubre a setembre), a 34 estacions d'aforament, de les quals s'han seleccionat cinc conques representatives (Figura 1):

1. Sa Murtera (36% - 1,19 km²).
2. Biniaraix (30% - 8,12 km²).
3. Ternelles (26% - 9,03 km²).
4. Na Bàrbara (11% - 21,8 km²).
5. Sant Miquel (21% - 56 km²).

S'ha seleccionat una conca de capçalera (1), dues conques de dos tributaris (2 i 3) i dues conques del canal principal (4 i 5). Pel que fa als usos del sòl (Fig. 3) aquestes tenen semblances i diferències. Totes les conques tenen un 30% de massa forestal, exceptuant Biniaraix (15%). Les conques que tenen un major percentatge d'usos de secà són sa Murtera i na Bàrbara, diferenciant-se aquesta darrera perquè té un 6% de sòl urbà. Les àrees que presenten una major superfície de carritxeres són Ternelles (60%) i Sant Miquel (40%). Biniaraix és l'àrea d'estudi on es veuen tots els usos del sòl representats i on hi ha una distribució més homogènia d'aquests.

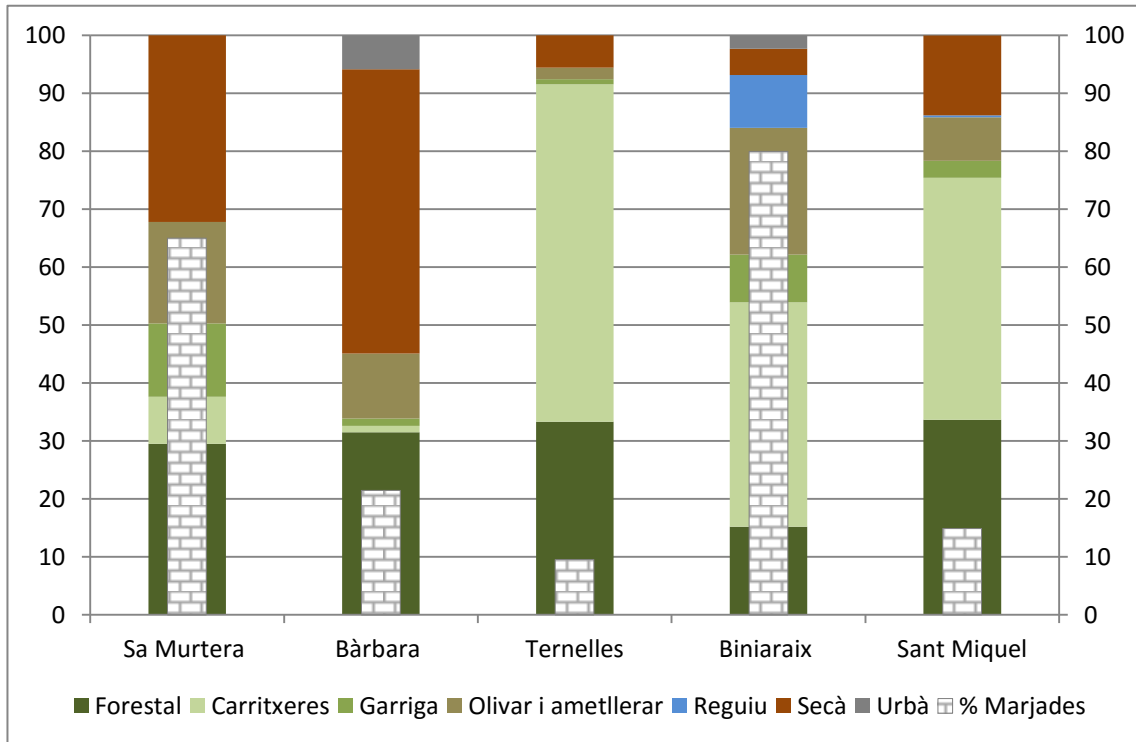


Figura 3. Usos del sòl i àrea marjada a les conques de drenatge seleccionades. Font: nivell 2 Corine Land Cover.

La litologia de les conques seleccionades (Fig. 4) és majoritàriament del Triàssic a Sa Murtera, del Juràssic a Biniaraix i Sant Miquel, del Juràssic i Triàssic a Ternelles i del Quaternari, Juràssic i Triàssic a Bàrbara.

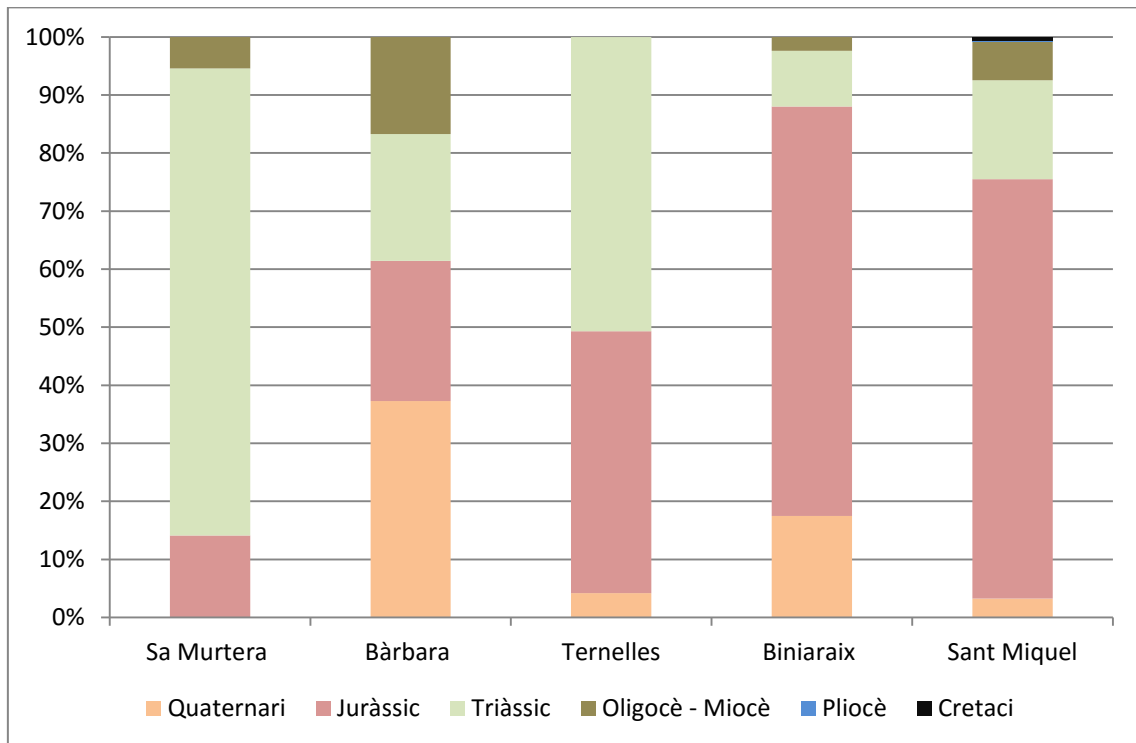


Figura 4. Edats geològiques pertanyents a les conques de drenatge seleccionades.

D'aquestes cinc conques representatives s'ha realitzat una anàlisi dels resultats per events, estacional i anual.

Per a l'anàlisi hidrològica, s'ha calculat el temps d'escorrentia, el cabal màxim i l'aportació total del període d'estudi. S'han plantejat conjuntament amb el valor de precipitació.

Per obtenir el nivell de làmina d'aigua de les sondes *HOBO U20L-04 0-4m* es realitza una compensació baromètrica amb el software *Hoboware Pro* a partir de les dades de pressió atmosfèrica proporcionades per les sondes de referència de la Universitat de les Illes Balears i del pont de ses Pastores, les quals es poden utilitzar amb aquelles sondes situades a un radi de trenta quilòmetres.

Per tal d'analitzar la fiabilitat dels valors hidrològics estimats, s'han realitzat dos processos de calibratge. El primer calibratge es realitza per obtenir el nivell de la làmina d'aigua, aquest es realitza entre el nivell real de la làmina d'aigua mesurat *in situ* i el nivell de la sonda en el mateix moment que es mesura el nivell real. El segon calibratge se centra en la corba d'aforaments, on es relaciona el nivell de la làmina d'aigua amb el cabal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) estimats a través d'aforament directe amb molinet hidràulic.

6. Resultats

6.1. Implementació i avaluació del disseny

Una vegada completada la instal·lació de la xarxa hidromètrica, aquesta compta amb una estació per cada 91 km^2 , drenant un total de $1.482,95 \text{ km}^2$, un 47,9 % de la xarxa hidrogràfica. Així doncs, la xarxa engloba 16 conques que tenen la zona de capçalera a la serra de Tramuntana i serres de Llevant, on a la seva part baixa s'ubiquen zones de cultiu i zones urbanes, les quals representen el 54,4% de la superfície drenada de Mallorca. La majoria d'aquestes drenen al vessant sud de la serra de Tramuntana en direcció a les badies de Palma, Alcúdia i Pollença, on les conques van incrementant la seva superfície. D'aquestes 16 conques, 8 (45,9%) estan entre les 10 conques de major superfície. Pel que fa a la precipitació, cal dir que totes les capçaleres de conca situades

a la serra de Tramuntana assoleixen els 800 mm anuals de mitjana, exceptuant Andratx (600 mm), mentre que a les serres de Llevant s'assoleix un mínim de 500 mm anuals de mitjana. Per a les precipitacions màximes en 24 hores per a un període de retorn de 25 anys, totes les conques queden emmarcades dins d'un mínim de 100 mm en 24 hores. Endemés, 25 de les 34 estacions s'ubiquen a planes geomorfològiques d'inundació (Gelabert, 2002). Finalment, s'han incorporat aquelles conques amb un major potencial erosiu tals com Andratx, afectada recurrentment per incendis forestals. D'aquesta manera, s'ha incrementat el número d'estacions per conca alhora que també el nombre d'aquestes.

6.2. Dinàmiques i processos hidrològics durant l'any hidrològic 2014-2015

6.2.1. Període d'estudi

Al llarg del període d'estudi s'observen diferents comportaments de resposta per a cadascuna de les conques (Fig. 5), fet influenciat per a la precipitació total i la seva distribució temporal i espacial al llarg de l'any. Hi ha tres ordres de magnitud diferents per a l'aportació total (hm^3) per a les conques seleccionades. L'aportació total (hm^3) de sa Murtera, na Bàrbara i Ternelles no sobrepassa el mig hectòmetre cúbic, a Biniaraix (Figura 5) està al voltant de l'hectòmetre cúbic i a Sant Miquel (Figura 5) sobrepassa els 34 hm^3 (Taula 1). De les tres estacions que es pot realitzar una comparació amb els registres històrics de la conselleria (1968- actualitat), dues (Ternelles i Biniaraix) tenen una aportació a l'any 2014-2015 inferior a la mitjana, en canvi a Sant Miquel, l'aportació ha sobrepassat notablement la mitjana.

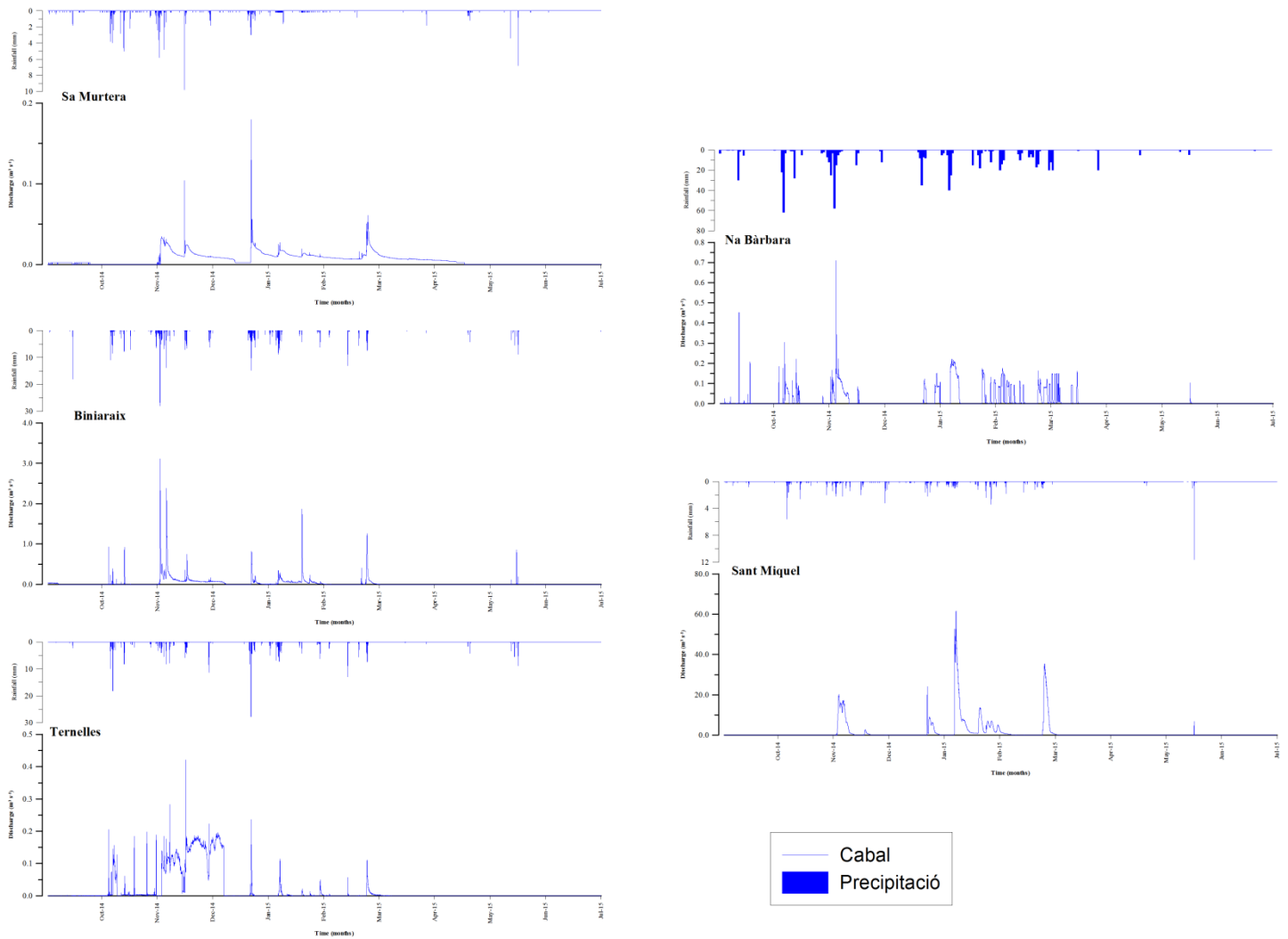


Figura 5. Hidrograma i hietograma del període d'estudi de les cinc conques de drenatge seleccionades.

Pel que fa al cabal mitjà anual, tan sols a Sant Miquel se supera el registre de $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a la resta d'estacions és molt inferior. Pel que fa a l'aportació específica de l'any 2014-15 ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$), Sant Miquel és la conca amb una major aportació, seguida de Sa Murtera, ja que l'estructura geològica (fonts) i els materials impermeables (argiles del Keuper) generen una dinàmica major del cabal base, a més de que és la conca de menor superfície ($1,19 \text{ km}^2$). La resta en ordre descendent, es correspon amb Biniarix, Ternelles i na Bàrbara. L'escolament, en ordre descendent, segueix el següent ordre: Sant Miquel, Biniarix, Ternelles, na Bàrbara i Sa Murtera.

Dades any hidrològic 2014-2015	Superfície de conca (km ²)	Aportació total (hm ³)		Cabal mitjà anual (m ³ s ⁻¹)	Aportació específica de l'any 2014-15 (m ³ s ⁻¹ km ⁻²)	Escolament (mm)	Precipitació 2014 - 2015	Precipitació mitjana (mm)	Estació meteorològica
		UIB any 2014-15	Mitjana Conselleria						
Sa Murtera	1,19	0,157	-	0,006	5,001	31	390	517	S'Alqueria d'Andratx
Bàrbara	21,80	0,375	-	0,014	0,652	75	722	635	Esporles
Ternelles	9,03	0,442	3,881	0,024	2,660	87	778	767	Pollença
Biniaraix	8,12	1,021	4,255	0,039	4,771	204	1.042,6	N/D-	Son Torrella
Sant Miquel	56,00	34,402	19,381	1,353	25,028	6.877	528,4	N/D-	Campanet

Taula 1. Aportacions totals, cabals mitjans, aportacions específiques, escolament i precipitació de les cinc conques d'estudi seleccionades

6.2.2. Events

Durant el període d'estudi les estacions seleccionades han registrat 91 events (Taula 2). A nivell estacional, la tardor acumula el 22% de les crescudes, l'hivern el 47%, la primavera el 26% i l'estiu el 4%. La distribució percentual de les crescudes per estacions d'aforament és la següent: Sa Murtera (5%), Biniaraix (20%), Sant Miquel (10%) i na Bàrbara (38%).

Events					
Estació	Tardor	Hivern	Primavera	Estiu	Total d'events
Sa Murtera	0	4	1	0	5
Biniaraix	5	9	2	2	18
Ternelles	8	14	2	*	24
Sant Miquel	0	7	1	1	9
Bàrbara	7	9	18	1	35
Total	20	43	24	4	91

Taula 2. Events del període d'estudi i estacionalment de cada estació.

*Període on la sonda no ha enregistrat.

Pel que fa a les majors crescudes (Taula 3), totes es concentraren a l'hivern (Taula 3) ja que la superposició dels diferents events meteorològics varen generar les condicions idònies per a la generació de crescudes, on 15 dies abans de cada crescuda hi havia una precipitació acumulada de 12,8 mm a Sa Murtera; 48,4 mm a Biniaraix; 58,2 mm a Ternelles; 67,2 mm a Sant Miquel i 57 mm a na Bàrbara. Aquesta precipitació

acumulada el que generà el dia del major event, fou que per cada unitat de precipitació caiguda aquesta es multipliqués significativament al transformar-se en escorrentia.

La durada d'aquests events és d'entre 1-2 dies excepte la crescuda a l'estació de Sant Miquel que té una durada de 14 dies. El major event es va originar a l'estació de Sant Miquel, superant els seus valors a la resta d'estacions fins a dos ordres de magnitud en els seus registres.

Estació	Cabal punta $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	Cabal mitjà $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	Aportació total event hm^3	Data cabal màxim
Sa Murtera	0,180	0,037	0,007	20/01/2015 18:45
Biniaraix	3,108	0,793	0,928	01/12/2014 13:30
Ternelles	9,641	0,110	0,001	05/12/2014 14:30
Sant Miquel	61,685	9,641	12,156	05/02/2015 12:15
Bàrbara	0,710	0,176	0,013	03/12/2014 21:15

Taula 3. Estadística bàsica de cabals dels events enregistrats a les estacions d'aforament de les conques de drenatge representatives..

6.2.3. Comparativa entre registres analògics i digitals

Considerant que els registres històrics d'hidrologia superficial s'han computat a través d'aparells analògics (i.e., limnífafs), és tost important dur a terme una comparació dels registres analògics i els digitals usats a la xarxa hidromètrica de la UIB. Així, es comparen dos events a partir de l'enregistrament del limnífaf de l'estació d'aforament oficial de Sant Miquel (E-11-04) i de la sonda de nivell *Omnilog* que la UIB té instal·lada a la mateixa estació. Tot i que el primer event no s'inclou dins de l'any hidrològic 2014-2015, cal dir que s'han seleccionat els events segons la disponibilitat de limnigrames per tal de poder realitzar la comparació entre events de diferent magnitud per analitzar el funcionament de l'instrumental de mesura en condicions hidràuliques contrastades.

6.2.3.1. Event 29/09/2014

Pel que fa als registres de nivells s'observen tres diferències (Fig. 6). Així, tant a l'inici de l'event com al final el registre analògic es continuen enregistrant valors de nivell, hi ha una hora de retard (Taula 4) en l'enregistrament del pic de làmina d'aigua i aquest és

superior al de la sonda de nivell, tot i que en la recessió de la crescuda el nivell decreix de forma més brusca.

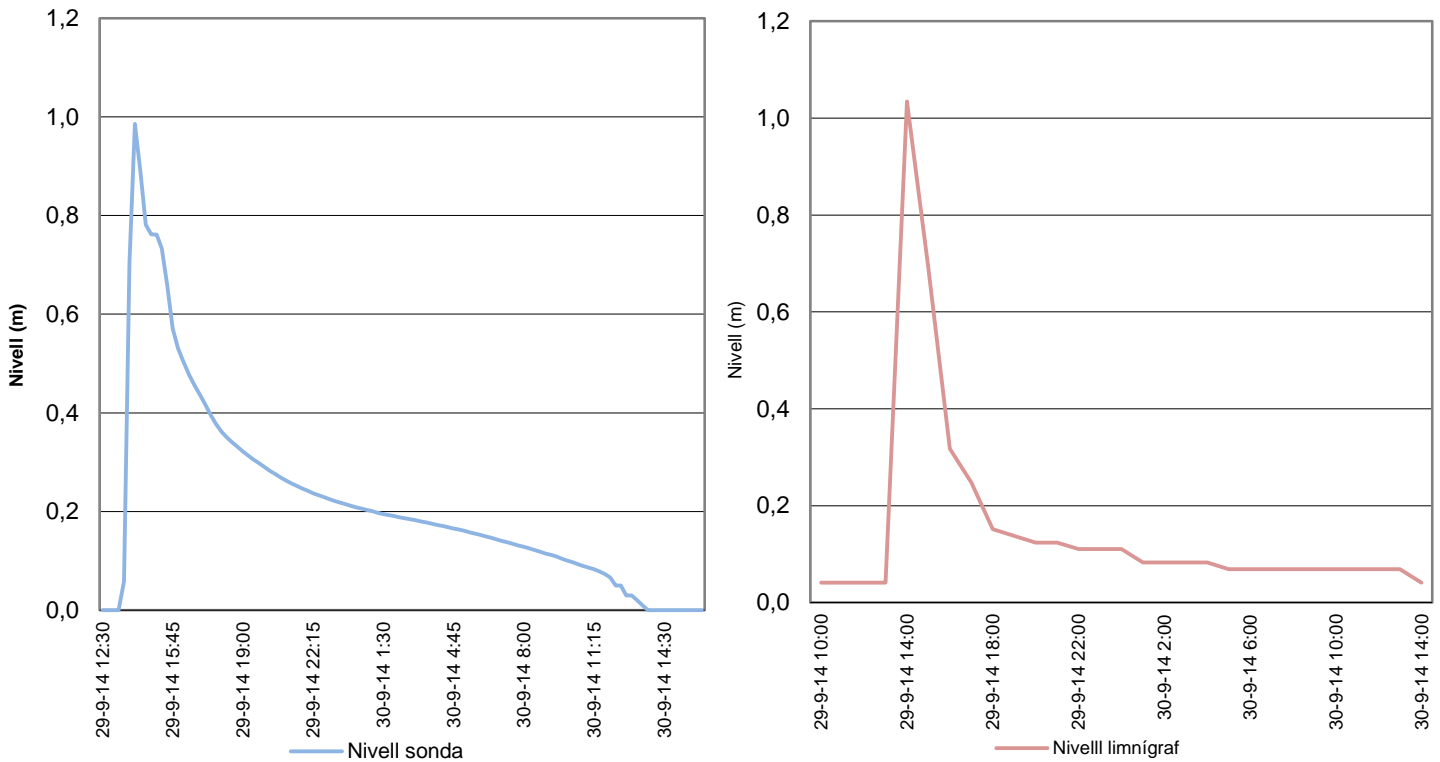


Figura 6. Comparació del nivell enregistrat per aparell analògic (limnigraf) i per aparell digital (sonda de nivell) a l'estació d'aforament de Sant Miquel per a l'event de 29 de setembre de 2014.

En relació als cabals obtinguts (Taula 4), cadascun amb la corba d'aforament de la respectiva estació, hi ha diferències notables, sobretot en el cabal màxim (Fig. 7) on aquest és superior a la sonda de nivell en un ordre de magnitud ($180,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ front $18,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) i en l'aportació total on el volum d'aigua és gairebé el doble a la sonda de nivell que al del limnigraf.

Cabals event 29/09/14					
Estació	Nivell màxim (m)	Cabal màxim $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	Cabal mitjà $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	Aportació total event hm^3	Data cabal màxim
Sant Miquel limnigraf	1,03	18,900	2,624	0,27	29/09/2014 14:00:00
Sant Miquel sonda	0,99	180,715	5,710	0,50	29/09/2014 13:00:00

Taula 4. Comparativa del nivell màxim, cabal màxim, cabal mitjà i aportació enregistrat per una estació analògica (estació amb limnigraf) i una digital (sonda de nivell).

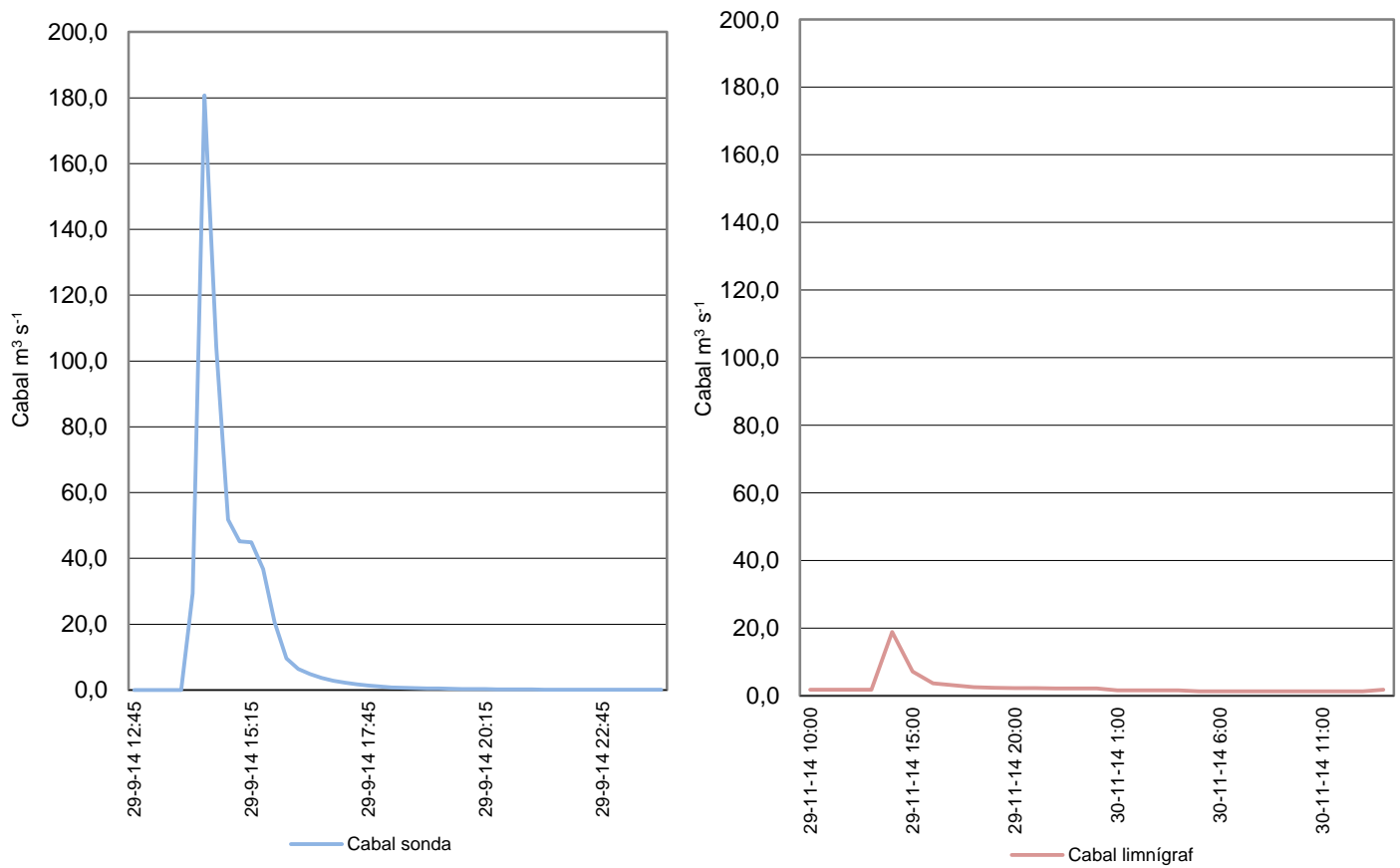


Figura 7. Comparació del cabal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) enregistrat per aparell analògic (limnigraf) i per aparell digital (sonda de nivell) a l'estació d'aforament de Sant Miquel per a l'event de 29 de setembre 2014.

5.2.3.2. Event 03/11/2014

Als nivells enregistrats en aquest event (Fig. 8) cal destacar que el limnigraf inicia la recollida de dades amb retard, els nivells són la meitat dels valors de la sonda, registra el pic de làmina d'aigua 45 minuts després que ho hagi fet la sonda de nivell i continua enregistrant una vegada ha finalitzat l'event.

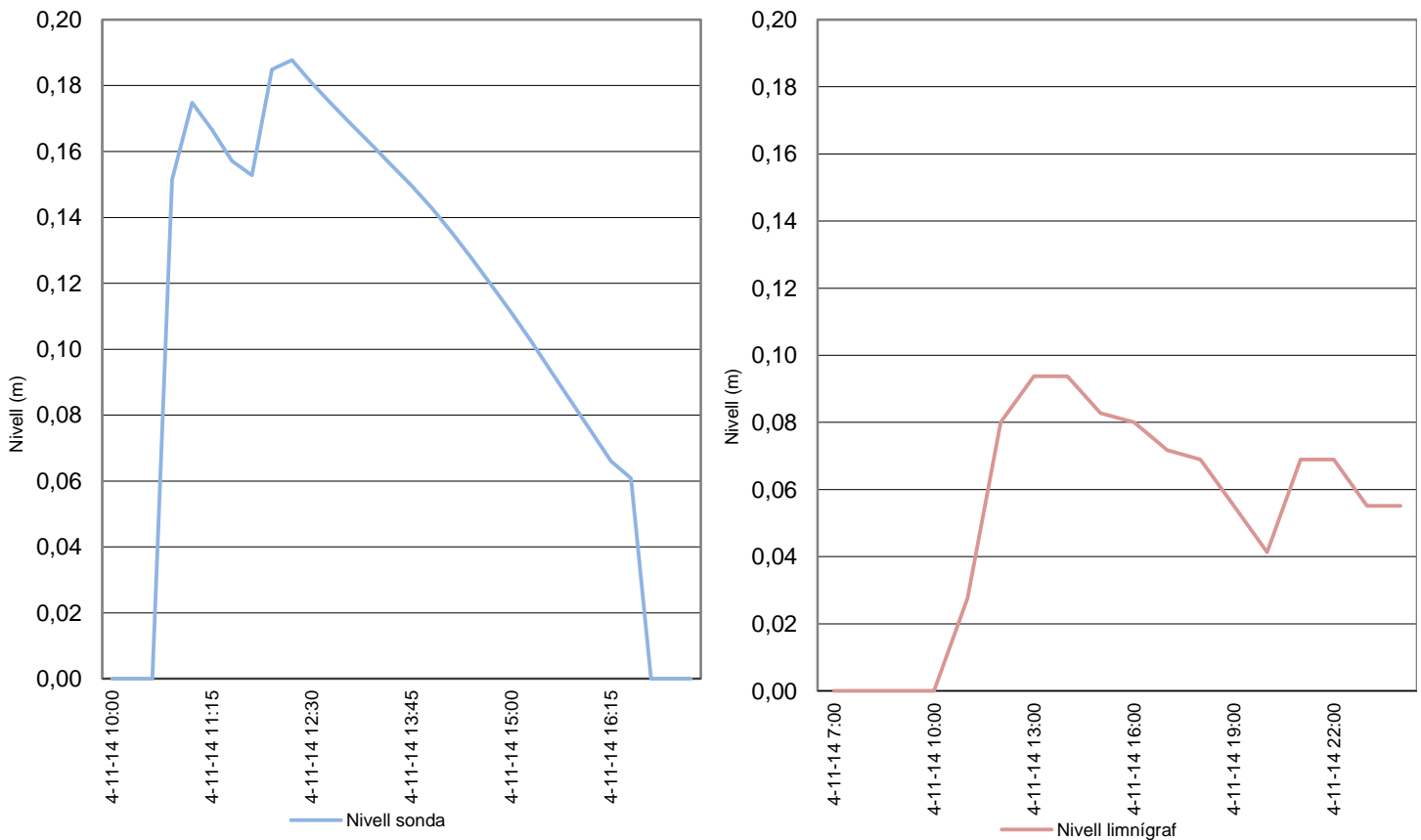


Figura 8. Comparació del nivell enregistrat per aparell analògic (limnigraf) i per aparell digital (sonda de nivell) a l'estació d'aforament de Sant Miquel per a l'event de 3 novembre de 2014.

Pel que fa als cabals (Fig. 9), les majors diferències es troben en l'aportació total on el limnigraf registra 65.134 m^3 front els 188 m^3 de la sonda de nivell (Taula 5). Les diferències entre el cabal màxim i el cabal mitjà també són considerables, d'un ordre de magnitud superiors.

Cabals event 03/11/14					
Estació	Nivell màxim (m)	Cabal màxim $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	Cabal mitjà $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	Aportació total event m^3	Data cabal màxim
Sant Miquel limnigraf	0,09	1,818	1,290	65.134,8	04/11/2014 13:00:00
Sant Miquel sonda	0,19	0,024	0,010	188,1	04/11/2014 12:15:00

Taula 5. Comparativa del nivell màxim, cabal màxim, mitjà i aportació per registrar per una estació analògica (estació amb limnigraf) i una digital (sonda de nivell).

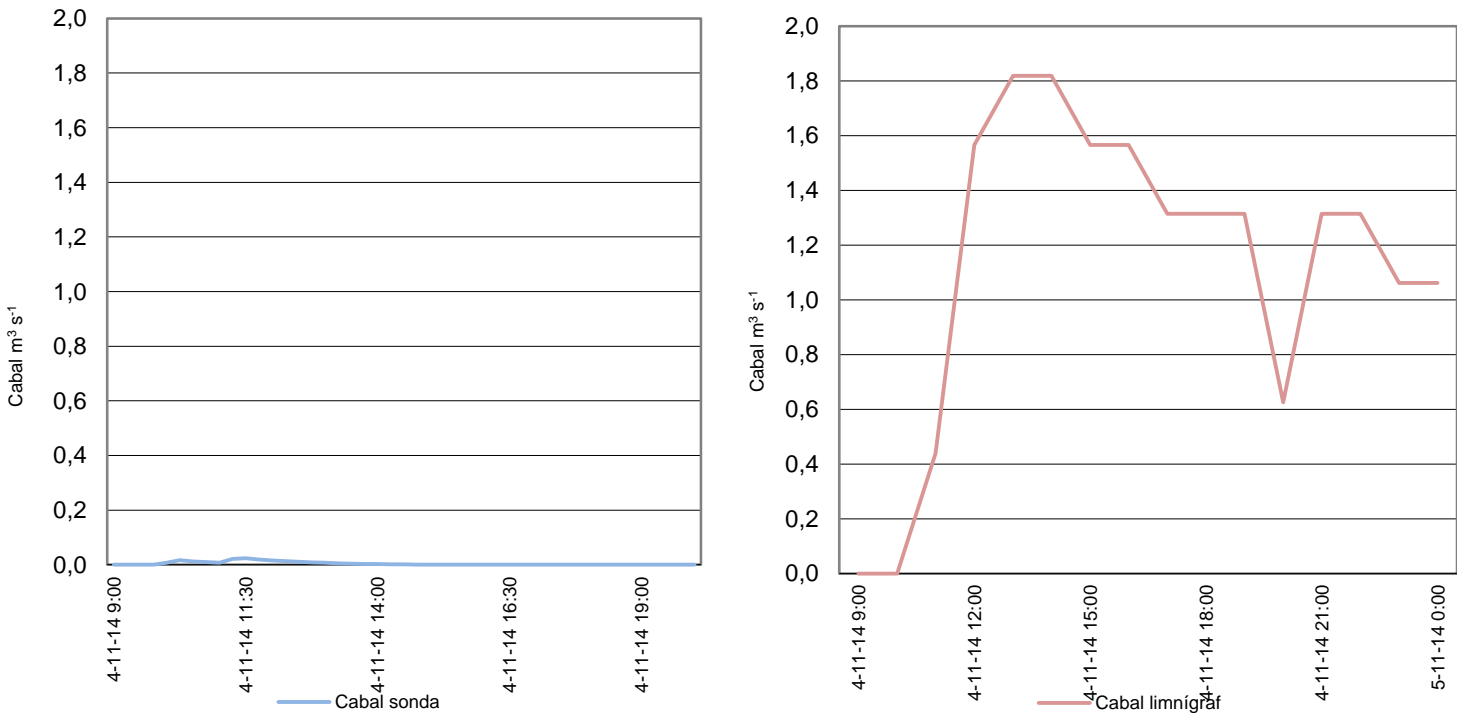


Figura 9. Comparació del cabal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) enregistrat per aparell analògic (limnigraf) i per aparell digital (sonda de nivell) a l'estació d'aforament de Sant Miquel per a l'event de 3 de novembre de 2014.

Arran dels resultats tan divergents en quan a exportació d'aigua (cabal) entre el registre analògic i el digital, s'ha realitzat una comparació entre la corba d'aforament pròpia i la de la Conselleria de Medi Ambient (Fig. 10). La primera diferència a observar és que els eixos estan invertits un respecte de l'altre. En els dos casos s'han elaborat a partir de sis valors que són d'un rang representatiu de la làmina d'aigua, entre els 0,2 m i 0,9 m, tot i això la forma de la corba és totalment diferent. La corba d'elaboració pròpia té una forma còncava mentre que la de la Conselleria de Medi Ambient és convexa. Cal destacar que la primera presenta un grau elevat de correlació positiva on $R^2 = 0,978$.

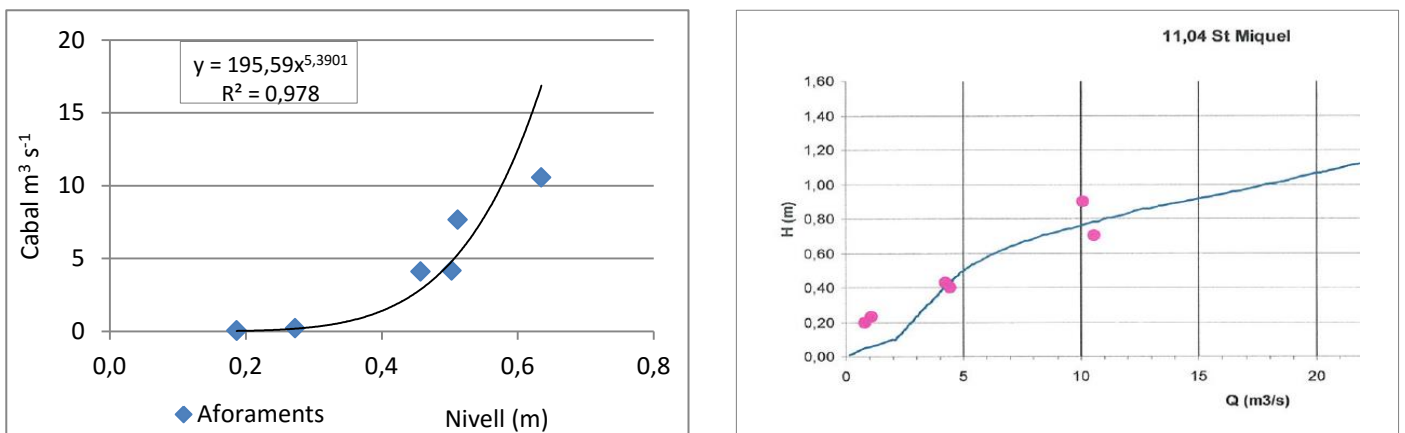


Figura 10. Corba d'aforament confeïda a partir de dades obtingudes de sonda de nivell (esquerra) i a partir de dades obtingudes del limnigraf a l'estació d'aforament de Sant Miquel (dreta).

6.2.4. Comparativa entre registres digitals

S'ha detectat una notòria diferència pel que fa a la resolució de l'enregistrament entre les sondes del fabricant de *Campbell* i *Hobo*, on les primeres permeten obtenir el nivell de la làmina d'aigua de manera més acurada. Com a conseqüència, el calibratge (Fig. 11) de les sondes *Campbell* i les corbes d'aforament d'aquestes estacions permet obtenir un resultat més acurat.

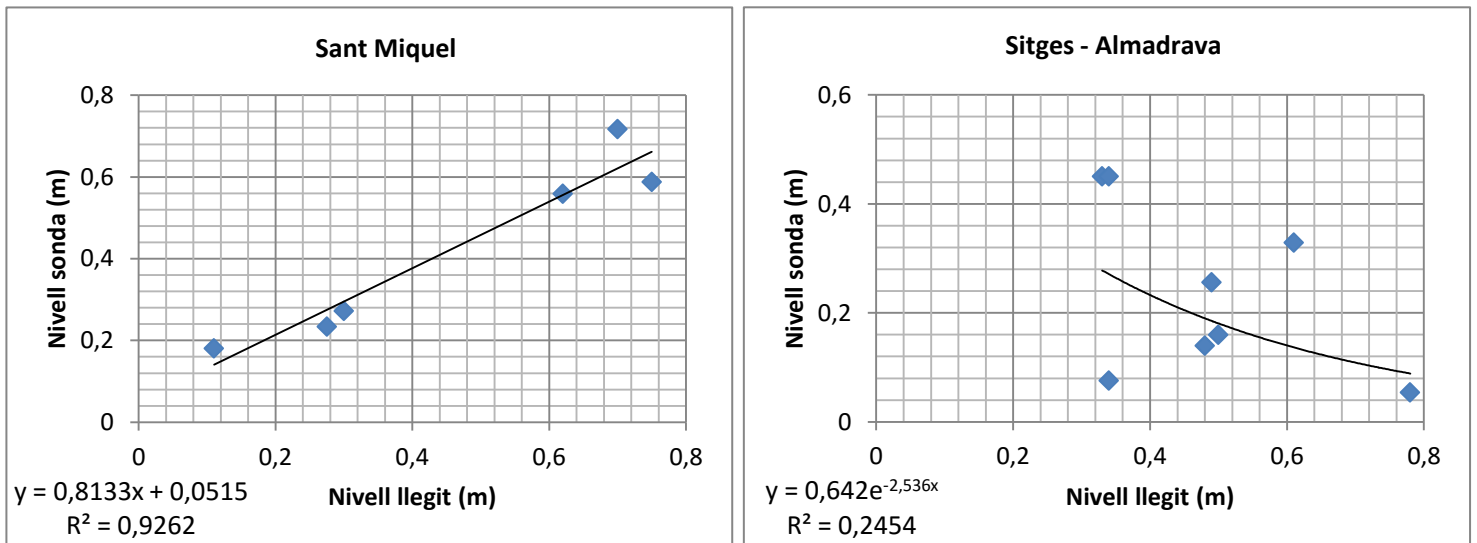


Figura 11. Comparació del calibratge de les sondes de nivell de les estacions d'aforament de Sant Miquel (*Campbell*) i de Sitges-Almadrava (*Hobo*).

Com es pot comprovar a la figura anterior, el calibratge realitzat a la sonda de Sant Miquel presenta un grau alt de correlació positiva ($R^2 = 0,93$), mentre que el calibratge de Sitges-Almadrava ($R^2 = 0,25$) Tot i haver estat realitzada amb més valors, la correlació que presenta és baixa.

7. Discussió

La redefinició i optimització del disseny de la xarxa hidromètrica pot suposar una millora en el procés de monitoreig de la xarxa hidrogràfica de Mallorca a l'incrementar les conques i la superfície monitoritzada així com un major control en les àrees de protecció de risc d'inundació i/o erosió. Així doncs, la xarxa hidromètrica provisional

de la UIB controla un 47,9% de la xarxa hidrogràfica (34 estacions distribuïdes a 16 conques) front el 33,2% controlat per la xarxa foronòmica de la Conselleria de Medi Ambient (32 estacions distribuïdes a 13 conques). Aquest increment ha suposat passar de tenir 1 estació cada 97 km² a 1 estació cada 91 km². Aquesta ràtio assoleix un valor significatiu ja que les recomanacions del 2008 de la World Meteorological Organization són d'1 estació cada 300 km² a illes petites (menors a 500 km²). Per tant, a l'obtenir una ràtio menor a la recomanada a un territori amb una superfície major cal donar importància al resultat obtingut. La disminució d'aquesta ràtio significa que hi ha hagut una expansió espacial de la xarxa, la qual s'ha realitzat a conques que no tenen monitoreig (i.e. Andratx, Galatzó, d'en Barres, na Bàrbara i de n'Amer) tot i el risc d'inundació. A més, s'han reubicat estacions per tal de donar una major cobertura territorial a nivell de conca (i.e., Muro i Sant Miquel).

Amb tot, també s'han detectat mancances i deficiències a la xarxa UIB, que vénen fonamentades sobretot en aquelles conques en les quals no s'ha duit a terme el monitoreig continu. La més importants d'elles és la conca de sa Riera, la qual té un registre important d'inundacions històriques. Una altra és la conca de son Catlar, la segona de major superfície de Mallorca (392 km²). Una altra deficiència de la xarxa UIB es detecta en aquelles conques que no estan acabades d'integrar tot i que compten almenys amb una estació, és a dir, o bé manca una estació a la zona de capçalera o aigües avall una vegada format el torrent principal. Pel que fa al dèficit d'una estació a la zona de capçalera es tracta del torrent de Coanegra. En quant als dèficits a les zones baixes de les conques caldria fer un monitoreig als torrents Major, Canyamel i de n'Amer. Cal dir que al realitzar el disseny de la xarxa aquests punts es varen tenir en compte ja que hi havia, i encara ara hi ha, la possibilitat d'incorporar estacions de la Conselleria a la xarxa, per la qual cosa es va evitar la duplicitat en algunes estacions. En el cas de que aquest supòsit es complís la xarxa es veuria incrementada fins a les 40 estacions, les quals drenarien entre el 60% i 63% de la xarxa hidrogràfica, tot suposant disposar d'1 estació cada 77 km².

Una millora a realitzar a la xarxa és el calibratge referent a les sondes de pressió HOBO U20L-04 0-4m. El fet de no assolir un grau suficientment bo de correlació (Figura 4) pot tenir com origen la manca de nivells per a calibrar, la distribució dels baròmetres i la

quantitats d'aquests que s'usen per a la compensació baromètrica, així doncs, és necessari plantejar o bé una redistribució o incrementar el nombre d'aquests. La millor opció és incrementar el nombre de nivells pel calibratge i incrementar el nombre de sondes que funcionin com a baròmetre. Una vegada millori la precisió de l'enregistrament, automàticament se'n beneficiarà el calibratge del nivell i la corba d'aforaments.

Un altre factor fonamental a tenir en compte per a la representativitat i validesa de les dades és el sistema de monitoreig que s'usa per enregistrar els valors. Els sistemes de registre analògics i digitals analitzats en aquest treball demostren diferències marcades entre ambdós sistemes. Una primera diferència de gran importància és la resolució temporal, ja que la resolució màxima dels registres analògics és l'horària, mentre que la dels sistemes digitals és la quinzeminutal (valor resultant de la mitjana de lectures minutals), podent encara obtenir una major resolució si es desitja. També cal destacar la diferent resolució en la mesura del nivell de la làmina d'aigua dels dos sistemes; mentre que els sistemes analògics no poden anar més enllà de la resolució centimètrica els registres digitals ofereixen una resolució mil·limètrica. D'aquestes diferències esmentades fins aleshores de per si ja se'n obtindran resultats de cabals i aportacions diferents entre els dos registres (Figura 16 i 18). S'han analitzat dos events de diferents magnituds per avaluar el funcionament dels dos sistemes de registre. En el cas de l'event major (29/09/14), tot i presentar un enregistrament semblant del nivell el resultat del cabal donat pel registre analògic ha estat d'un ordre de magnitud inferior, per la qual cosa al còmput final de l'aportació de l'event no suposa la meitat de l'enregistrat per la sonda de nivell. En canvi, per a l'event de menor magnitud (03/11/14), el registre analògic tot i enregistrar uns nivells que suposen ser la meitat dels registrats per la sonda de nivell, la seva transformació en cabal és d'un ordre de magnitud superior i de dues magnituds superiors pel que fa l'aportació total de l'event. Per tant, l'observat pels registres analògics és que infravalora el recurs a l'event major i el sobreestima a l'event de menor magnitud. Així doncs, l'origen de les diferències s'explica per la manca de resolució temporal i mètrica del limnígraf però sobretot per la transformació de nivell (m) a cabal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) a partir de la corba d'aforament. Aquestes diferències, en els sistemes de registre analògics s'agreugen quan la secció d'aforament està en mal estat, el mecanisme intern del sistema analògic no funciona correctament i el pou d'aforament no té una connexió directa amb la secció d'aigües baixes, fruit d'una manca de

manteniment o de disseny de la pròpia estació. Així doncs, la metodologia utilitzada en la recollida de dades basades en els sistemes analògics i el deficient manteniment de la xarxa condueix a dia d'avui a la poca representativitat i validesa de les dades (Estrany, 2008).

Tot i obtenir un millor resultat utilitzant registres digitals front els analògics, cal tenir en compte que els processos hidrològics no es fonamenten única i exclusivament en la recollida sistemàtica de dades una vegada realitzada la instal·lació del sistema de monitoreig continu. Aquests sistemes cal validar-los mitjançant el calibratge del nivell i del cabal a partir de les corbes d'aforament. Per tant, és fonamental realitzar periòdicament treball de camp per observar el funcionament d'aquests processos i mesurar-los *in situ* a diferents magnituds. Aquí rau la importància dels aforaments directes, tant a nivell quantitatiu com qualitatiu. Quantitativament, un major nombre d'aforaments proporciona major significància estadística; mentre que qualitativament és necessari que abastin el rang d'altures de cada secció d'aforament. Aquests procediments de treball de camp per a l'obtenció de nivells i la mesura del cabal implica el manteniment constant dels registres digitals, ja que sinó els valors d'aquests deixen de tenir validesa tot i realitzar-se un monitoreig continu dels processos.

8. Conclusions

La manca de manteniment i la reducció de les estacions de la xarxa foronòmica ha conduït a dia d'avui a la poca representativitat i validesa de les dades i a una pèrdua de continuïtat en la sèrie històrica. Per tant, la infravaloració de les dades hidromètriques i els beneficis que aquestes poden aportar a la societat (millora en la planificació i gestió dels recursos hídrics i sistemes d'alerta front inundacions), sumat a la decadència de la xarxa foronòmica, han impulsat la creació de la xarxa hidromètrica de la UIB.

A partir de la comparativa entre els registres analògics i digitals s'ha demostrat que és necessari substituir les xarxes analògiques per unes de digitals ja que aconsegueixen un monitoreig continu a una major resolució temporal i espacial de les dades i per tant una major validesa, representativitat i fiabilitat. Aquestes millores qualitatives en quant al

monitoreig ha de conduir a l'automatització de la xarxa a temps real per tal de que aquestes noves característiques millorin la previsió de les revingudes front a possibles riscos d'inundacions. Amb tot, a mig-llarg termini (5-10 anys) permetran avaluar novament la xarxa i iniciar una sèrie robusta de dades, la qual ha de ser valorada i utilitzada per a l'avaluació dels recursos hídrics utilitzant una metodologia correcte.

Atenent que les competències en gestió de recursos hídrics són de la comunitat autònoma de les Illes Balears, des d'aquesta Administració es pot aplicar una bona gestió fent ús de la política, la normativa, les competències, la cooperació, les estratègies, els administradors, els recursos, la informació, la participació i els instruments. Per tant, a llarg termini fóra òptim dur a terme l'automatització de la xarxa hidromètrica, millorant inicialment la instrumentació als cursos principals, utilitzar les sondes recentment instal·lades per determinar les ubicacions òptimes de futures estacions completes que s'anirien implantant progressivament a la xarxa de torrents secundària i estendre la xarxa a les altres illes. A més, s'hauran d'integrar altres variables com la humitat del sòl i l'evapotranspiració potencial per tal de modelitzar la resposta de les conques a la precipitació (*rainfall-runoff modelling*).

Amb tot, l'objectiu hauria de ser crear un Sistema Automàtic d'Informació Hidrològica (SAIH), el qual proporcionarà informació detallada a l'Administració i als serveis d'emergència i protecció civil. D'aquesta manera, els resultats d'aquest projecte es podran incorporar al Pla Especial de Gestió de Riscos d'Inundacions (INUNBAL), el qual es basa en l'establiment de preavisos, avisos i mecanismes i procediments d'actuació, la quantificació i anàlisi de la perillositat, del risc i la vulnerabilitat. Per tant, es pretén una millora en la previsió i actuació en situacions de revingudes per reduir el possible dany que aquestes puguin causar.

9. Agraïments

Vull agrair tot el suport i ajuda que he rebut durant tot el procés d'aprenentatge a Joan Estrany i també a Aleix Calsamiglia i Julián García, sense els quals no hagués estat possible la realització d'aquest treball i la implementació de la xarxa hidromètrica.



10. Referències bibliogràfiques

- Boudevillain, B., Delrieu, G., Galabertier, B., Bonnifait, L., Bouilloud, L., Kirstetter, P. E., & Mosini, M. L. (2011). The Cévennes-Vivarais Mediterranean Hydrometeorological Observatory database. *Water Resources Research*, 47, 1–6.
- Buendia, C., Bussi, G., Tuset, J., Vericat, D., Sabater, S., Palau, A., Batalla, R.J. (2015). Effect on afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment. *Science of the Total Environment*. In press: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.005>
- Colom, G. (1982). Geomorfología de Mallorca: el relieve y la forma de sus montañas. Gráficas Miramar: Palma de Mallorca; 165.
- Crawford, K. C. (1979). Considerations for the design of a hydrologic data network using multivariate sensors. *Water Resources Research*, 15(6), 1752-1762.
- De Girolamo, A. M., Pappagallo, G., & Lo Porto, A. (2015). Temporal variability of suspended sediment transport and rating curves in a Mediterranean river basin: The Celone (SE Italy). *Catena*, 128, 135-143.
- Dixon, H. (2010). Managing national hydrometric data: from data to information. *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources* (Proc. Of the Sixth World Water Conference, Fez, Morocco 2010). IAHS Publ. 340, 451-158.
- Dixon, H., Hannaford, J., & Fry, M. J. (2013). The effective management of national hydrometric data—experiences from the United Kingdom. *Hydrological Sciences Journal*, 58(7), 1383-1399.
- Estrany, J. (2008). Calibratge de la corba d'aforaments i anàlisi de resultats a estacions d'aforament experimentals. Informe tècnic. Direcció General de Recursos Hídrics. Conselleria de Medi Ambient. Govern de les Illes Balears, 25 pp.
- Gelabert, B. (2002). Atles de la delimitació geomorfològica de xarxes de drenatge i planes d'inundació de les Illes Balears. Direcció General de Recursos Hídrics. Conselleria de Medi Ambient. Govern de les Illes Balears, 7pp. <http://dgrechid.caib.es/www/atles/ATLES/TexteAtles.pdf>.
- Ginés A, Ginés J. (2011). El modelat exocàrstic de les balears i els camps de lapiaz de mitjana muntanya mediterrània a la Serra de Tramuntana de Mallorca. *ENDINS* 35: 53-63.
- Girons Lopez, M., Wennerström, H., Nordén, L.-A. i Seibert, J. (2015). Location and density of rain gauges for the estimation of spatial varying precipitation. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 97, 167-179.
- Guijarro, J.A. (1986). Contribución a la Bioclimatología de Baleares. Resumen de Tesis

Doctoral, Universitat de les Illes Balears, 36 pp.

- Gravelle, R. (2015). Discharge Estimation: Techniques and Equipment. *Geomorphological Techniques, Chap. 3, Sec.3.5*. British Society for Geomorphology.
- Gregory, S. (1964). Water resource exploitation-policies and problems. *Geography, 49(3)*, 310-314.
- Grimalt, M. (1989a). Geografia del Risc a Mallorca. Les inundacions. Palma, 1992. Institut d'Estudis Baleàrics. Conselleria de Cultura, Educació, i Esports. Govern Balear, 359 pp.
- Grimalt, M. (1989b). Repartiment de les precipitacions intenses a Mallorca. *Treballs de geografia* 41: 7-18.
- Grimalt, M., Rodríguez, R., Alomar, G., Ferrer, I., Reynés, A. (2002). Paisatge i pedra en sec a Mallorca. La serra de Tramuntana de Mallorca, les muntanyes construïdes. *Mètode*, 36, 40-43.
- Laizé, C. L. R. (2004). Integration of spatial datasets to support the review of hydrometric networks and the identification of representative catchments. *Hydrology and Earth System Sciences, 8(6)*, 1103–1117.
- Laizé, C. L. R., Marsh, T. J., & Morris, D. G. (2008). Catchment descriptors to optimise hydrometric networks. *Water Management, 161(WM3)*, 117–125.
- Le Coz, J. (2008). Challenges in hydrometry: some examples from France. *Experiences and Advancements in Hydrometry*, Mar 2008, Seoul, South Korea. 8 p. <hal-00509246>.
- Lewin J, Woodward JC. (2009). Karst geomorphology and environmental change, in JC Woodward (ed.), *The Physical Geography of the Mediterranean*. Oxford University Press, Oxford, 287-317.
- Li, C., Singh, V. P., & Mishra, A. K. (2012). Entropy theory-based criterion for hydrometric network evaluation and design: Maximum information minimum redundancy. *Water Resources Research, 48(5)*.
- McMillan, H., Krueger, T., & Freer, J. (2012). Benchmarking observational uncertainties for hydrology: rainfall, river discharge and water quality. *Hydrological Processes, 26*, 4078-4111.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2012). Cuarto Inventario Forestal Nacional. Illes Balears. Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal, 43 pp.
- Mishra, A. K., & Coulibaly, P. (2009). Developments in hydrometric network design: A review. *Reviews of Geophysics, 47*.

- Mishra, A. K., & Coulibaly, P. (2010). Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of Hydrology*, 380(3-4), 420–437.
- Mosley, M. P., & Mckerchar, A. L. (1989). Quality assurance programme for hydrometric data in New Zealand. *Hydrological Sciences Journal*, 34(2), 185–202.
- Moss, M. E. (1979). Some basic considerations in the design of hydrologic data networks. *Water Resources Research*, 15(6), 1673-1676.
- Pons, A. (2011). L'expansió de la urbanització a les Illes Balears (1956-2006). Influència del factor costaner. *Treball fi de màster d'Anàlisi, Planificació i Gestió en àrees litorals*. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears, 51 pp.
- Rantz SE. (1982). Measurement and Computation of Streamflow: Volume 2. Computation of Discharge. Water Supply Paper 2175, U.S. Geological Survey, Washington, DC.
- Sala, M., & Farguell, J. (2002). Exportacion de agua y sedimento en dos pequeñas cuencas mediterraneas bajo diferentes usos del suelo. Sistema costero catalán. *Revista C&G*, 16, (1-4), 97-109.
- Sear D.A., Armitage P.D., Dawson, F.H. (1999). Groundwater dominated rivers. *Hydrological processes* 13: 255-276.
- Shaw, E.M. (1994). Hydrology in Practice, Third. Chapman & Hall, London
- Spence, C., Saso, P., & Rausch, J. (2007). Quantifying the Impact of Hydrometric Network Reductions on Regional Streamflow Prediction in Northern Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 32(1), 1–20.
- Vogiatzakis, I.N., Pungetti, G., Mannion, A.M., (2008). Mediterranean island landscapes: natural and cultural approaches. New York: Springer.
- Volkman, T. H. M., Lyon, S. W., Gupta, H. V., & Troch, P. a. (2010). Multicriteria design of rain gauge networks for flash flood prediction in semiarid catchments with complex terrain. *Water Resources Research*, 46, 1–16.
- Walsh, C.L., Blenkinsop, S., Fowler, H.J., Burton, A., Dawson, R.J., Glenis, V., Manning, L.J., Kilsby, C.G. (2015). Adaptation of water resource systems to an uncertain future. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 12, 8853-8889.
- Ward, A. R. C. (1967). Design of Catchment Experiments for Hydrological Studies Published by: The Royal Geographical Society (with the Institute of British Geographers). *The Geographical Journal*, 133(4), 495–502.
- YACU. (1998). Planificació de la red foronómica futura de las Islas Baleares. Direcció General del Règim Hidràulic. Conselleria de Medi Ambient, Ordenació del Territori i Litoral. Govern de les Illes Balears, 124 pp.