



Gerard Grande i Bartumeu

Físic, màster en Física, Medi Ambient i Procediments de la Universitat Paris-Saclay i tècnic d'Andorra Recerca + Innovació

Resum

La xarxa hidromètrica d'Andorra afronta desafiaments significatius derivats del canvi climàtic, incloent-hi l'augment de temperatures, els esdeveniments extrems i les sequeres. La disponibilitat de dades de cabal fiables és essencial per a la modelització hidrològica, la regulació dels cabals ambientals i l'adaptació als impactes climàtics. Aquest estudi analitza les sèries hidromètriques disponibles a Andorra i n'avalua la consistència i la idoneïtat per a aplicacions científiques i de gestió.

S'ha dut a terme una anàlisi comparativa de les sèries de cabals de les estacions A402 (Pont dels Escalls) i A403 (Borda Sabaté) respecte a l'estació A022 (La Seu d'Urgell). L'anàlisi de regressió ha revelat més correlació en cabals elevats, mentre que en cabals baixos s'observa una variabilitat significativa i baixos sistèmics.

Per corregir aquestes discrepàncies, s'ha aplicat una metodologia basada en regressions segmentades, que ha permès millorar la robustesa del model diferenciant entre règims hidrològics. La sèrie corregida derivada de l'estació A403 ha presentat un nombre més baix d'inconsistències i s'ha identificat com la més adequada per establir una sèrie de cabals de referència per a Andorra. Addicionalment, s'ha desenvolupat una versió alternativa de la sèrie sense la influència del turbinatge de la central hidroelèctrica de FEDA (Forces Elèctriques d'Andorra).

Aquest estudi subratlla la importància del monitoratge continu, el calibratge rigorós i la disponibilitat de dades obertes en xarxes hidromètriques, especialment en conques sotmeses a una pressió antròpica elevada i a una elevada variabilitat climàtica. Aquest estudi constitueix una base sòlida per a futures recerques sobre la gestió dels recursos hídrics, incloent-hi l'estimació de cabals ambientals i la planificació hidrològica. Així mateix, la metodologia adoptada proporciona un model replicable per millorar la fiabilitat de les dades hidromètriques en altres conques fluvials de muntanya.



Gerard Grande i Bartumeu

Anàlisi de les sèries hidromètriques andorranes

Paraules clau: hidrometria, consistència de cabals, correcció de corbes de tarat, regressió segmentada, Andorra, adaptació al canvi climàtic, modelització hidrològica.

Introducció

Les conques d'Andorra afronten desafiaments significatius derivats del canvi climàtic, incloent-hi l'augment de temperatures, episodis extrems i sequeres. Aquests fenòmens, combinats amb la pressió turística i demogràfica, accentuen la necessitat d'una gestió acurada dels recursos hídrics. Aquest context fa imprescindible disposar de dades hidrològiques vàlides per estudiar i modelitzar els diferents escenaris hidrològics futurs i per donar suport a les inversions destinades a l'adaptació al canvi climàtic, així com per a la possible regulació dels cabals ambientals en el context de transició energètica. Arran del projecte Piragua (Beguería et al., 2019), Andorra Recerca + Innovació va estudiar les dades de cabals disponibles a Andorra per poder utilitzar-les en la modelització realitzada (AR+I, 2022). En aquesta recerca, es van detectar incongruències en les sèries de dades de les estacions d'aforament d'Andorra i una mancança en la disponibilitat de dades acurades sobre cabals baixos, necessàries per a l'estudi de períodes de sequera, i dels cabals ambientals i generadors del riu.

L'objectiu d'aquest document és analitzar les sèries hidromètriques amb els històrics més llargs disponibles a Andorra, identificar-ne la més adequada per a la realització d'estudis hidrològics i prospectar la possibilitat de corregir-la a fi de disposar d'una sèrie de cabals de referència.

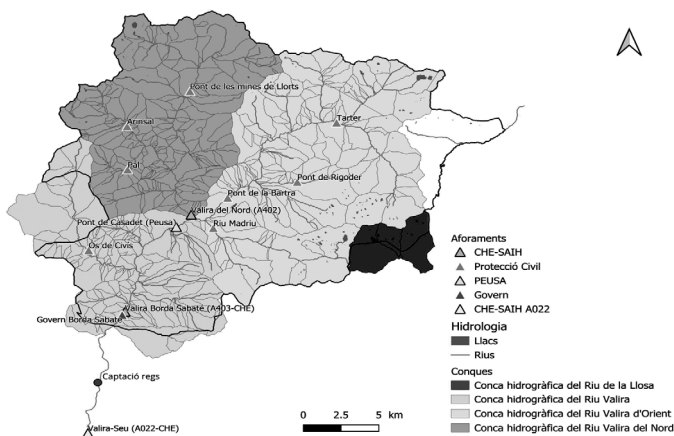
Anàlisi de les estacions hidromètriques

Actualment es disposa de diverses estacions, algunes d'elles estacions pròpiament d'aforament i d'altres que són marcs de control per a la gestió d'emergències, en les quals es registren dades relacionades amb el cabal. La majoria són estacions propietat de Protecció Civil amb històrics de dades curts, que tenen com a finalitat la detecció de calats alts per a la gestió d'emergències en situació d'avingudes. La major part d'aquestes són de llera mòbil i presenten dificultats en l'estimació dels cabals baixos.

Per utilitzar les sèries de cabal de les estacions hidromètriques en estudis hidrològics cal que aquestes sèries siguin mínimament llargues (almenys de deu anys, preferentment 30), a més de consistents (completes) i fiables (manteniment i validació regular de la corba h/Q). La fiabilitat dels cabals és normalment més alta si els cabals es deriven d'estacions hidromètriques de llera fixa, on les condicions hidràuliques són estables. En aquest sentit, set de les estacions de la conca andorrana disposen de llera fixa, però només tres disposen de

dades de cabal amb sèries de més de deu anys (SAIH Valira Borda Sabaté-A403, SAIH Valira del Nord-A402 i SAIH Valira la Seu d'Urgell-A022). Les estacions A403 i A402 no tenen el seguiment que seria desitjable per part de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE).¹ La darrera visita a les estacions va ser a l'any 2016² i, per tant, no es troben incloses en la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA).³ En canvi l'estació A022 (SAIH Valira la Seu d'Urgell) té un seguiment continu per part de la CHE. Una fortalesa addicional de les estacions de la CHE és que les seves dades són d'accés obert a través del Servicio Automático de Información Hidrológica (SAIH), fet imprescindible per fer recerca i per garantir-ne la transparència i la traçabilitat. Per aquest motiu, en aquest informe s'analitzaran les sèries hidromètriques de les estacions andorranes de la CHE ubicades al pont dels Escalls (A402) i a la borda del Sabater (A403) respecte a l'estació A022 (estació considerada com a referència en aquest estudi). Cal tenir en compte que els registres de cabal de l'estació A022 no integren els cabals que es deriven per rec en la captació que

Figura 1. Ubicació de les estacions hidromètriques de mesura de calat i/o cabal a la conca del Valira propera a Andorra

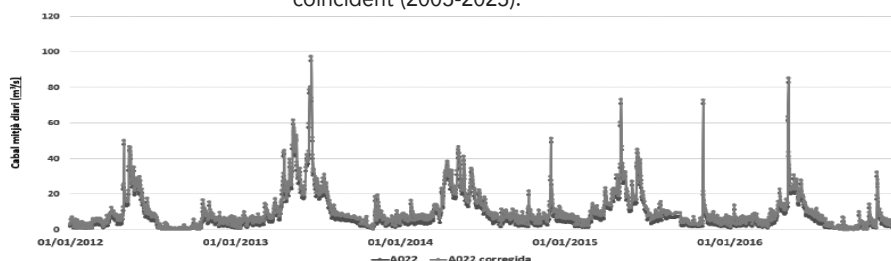


es troba entre l'estació A022 i l'A403 (vegeu la Figura 1). L'aigua que es capta entre les dos estacions (A403 i A022) té el retorn aigües avall de l'estació A022 i, per tant, és aigua que no es comptabilitza a l'estació A022. Això suposa un problema en la comparació de les diferents estacions en territori andorrà respecte a la de la Seu d'Urgell. Per tant, abans d'iniciar l'anàlisi de les sèries hidromètriques, s'estima el cabal diari que es deriva d'aquesta captació per poder-lo afegir al cabal diari mesurat a

- 1- Més informació a <http://www.saihebro.com>
- 2- Comunicació personal de la CHE, Àrea de Hidrologia y Cauces
- 3- <https://www.chebro.es/en-GB/roea>

l'estació A022 i així fer més acurada la comparació entre les estacions andorranes de la CHE i l'estació A022. A continuació, s'analitzen les sèries de cabals de les estacions A402 (vegeu la secció 01) i A403 (vegeu la secció 0) respecte a la sèrie de l'estació A022, per tal d'avaluar la consistència i robustesa de les dites sèries. Finalment, en la secció 2 es corregeix la sèrie analitzada més consistent respecte a la sèrie A022 per tal d'obtenir una sèrie de cabals de referència a Andorra.

Figura 2. Evolució de les sèries de cabal mitjà diari (m^3/s) de les estacions A402 i A022 (2003-2023)⁴ (només es representa aquí les dades corresponents al període 2012-2016)

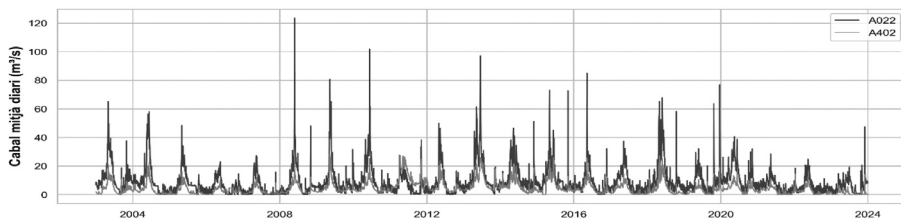


Anàlisi de l'estació A402 respecte a l'estació A022

A continuació es presenta la sèrie de cabals mitjans diaris de l'estació SAIH Valira del Nord-A402, situada al pont dels Escalls (vegeu la Figura 12), respecte a la sèrie de cabals mitjans diaris de l'estació A022 per al període històric màxim coincident (2003-2023).

Analitzant les sèries històriques de cabals de les dos estacions, es detecta un patró estacional comú en el qual els valors augmenten de forma generalitzada i transitòria durant els mesos de primavera (degut al desgel, principalment, i a les precipitacions) i durant els mesos de tardor (degut a les precipitacions). No obstant això, el cabal de l'estació A022 presenta unes oscil·lacions setmanals que no presenta l'estació A402 (vegeu la Figura 3). Això és degut al fet que l'estació A402, que representa la conca del Valira del Nord (vegeu la Figura 1), no té el règim alterat per la captació i el turbinatge de l'estació hidroelèctrica d'Encamp, situada al Valira d'Orient. Per contra, el cabal de l'estació A022 sí que presenta les oscil·lacions, ja que recull l'aigua també del Valira d'Orient. En teoria, la magnitud dels cabals associats a l'estació A022, que es troba aigües avall de l'estació A402, hauria de ser superior a la magnitud dels cabals d'aquesta última. No obstant això, en certs períodes, aquesta premissa no es compleix (vegeu la Figura 3). A continuació s'analitzen amb detall aquestes inconsistències.

4- Accés al gràfic interactiu https://ari.ad/images/projectes/observacions_cabals/A402_A022.html



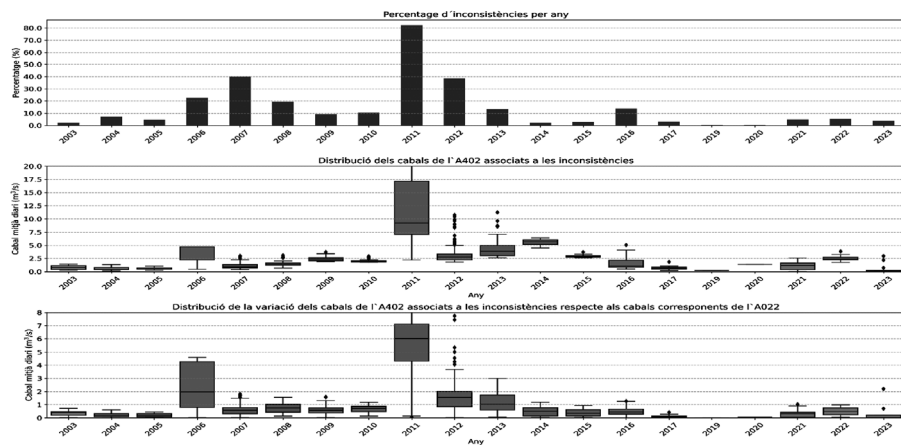
Inconsistències de la sèrie A402 respecte a la sèrie A022

En aquest apartat, es defineix una inconsistència quan el cabal de la sèrie A402 supera el cabal corresponent de la sèrie A022 situada aigües avall (és a dir, quan $A022 - A402 < 0$). S'han analitzat exclusivament els cabals inconsistents d'ambdós sèries i s'ha calculat el percentatge d'inconsistències respecte al nombre total de cabals anuals (vegeu la Figura 4a), la distribució dels cabals inconsistents de l'A402 per any (vegeu la Figura 4b) i la variació absoluta dels cabals de l'A402 associats a inconsistències respecte als cabals corresponents de l'A022 (vegeu la Figura 4c).

El percentatge d'inconsistències varia segons els anys. Assoleix un màxim del 80% el 2011, mentre que en altres períodes es redueix per sota del 10%. A excepció de l'any 2006 i del període 2011-2015, les inconsistències tendeixen a concentrar-se en cabals (de l'A402) inferiors o propers als 2,5 m³/s. La diferència entre els cabals de l'A402 i l'A022 associats a les dites inconsistències sol ser inferior a 1 m³/s.

Figura 3. Detall en l'interval temporal (2011- 2013) sobre l'evolució de les sèries de cabal mitjà diari (m³/s) de les estacions A402 i A022

Figura 4. a) Percentatge del nombre anual de cabals mitjans diaris de l'estació A402 que es troben per sota dels cabals corresponents de l'estació A022 respecte al total de cabals anuals. b) Distribució dels cabals mitjans diaris de l'A402 superiors als cabals corresponents de l'A022 ($A022 - A402 < 0$). c) Distribució de la variació dels cabals de l'A402 associats a les inconsistències respecte als cabals corresponents de l'A022



5- Els residuals estandarditzats s'obtenen a partir dels residuals (diferència entre els valors observats i els estimats pel model) dividits per la desviació estàndard dels dits residuals.

Anàlisi de regressió lineal

Un cop identificades i analitzades les inconsistències, es modelitza la sèrie de cabals de l'A402 (variable dependent) en funció de la sèrie de l'A022 (variable explicativa) mitjançant una regressió lineal definida pels paràmetres β i α (vegeu la Figura 5).

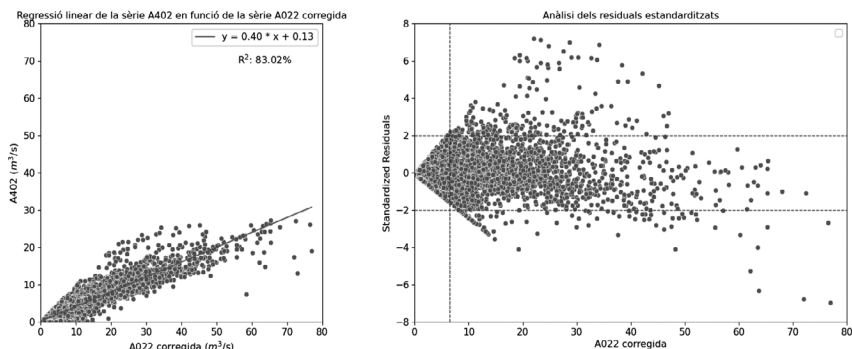
$$\text{Cabal mitjà diari}_{A402} = \beta * \text{Cabal mitjà diari}_{A022} + \alpha$$

En aquesta modelització no es consideren els cabals associats a les inconsistències, ja que podrien donar peu a un biaix significatiu. El model explica el 83% de la variància de la sèrie de cabals de l'estació A402. Malgrat la solidesa de la relació lineal entre les variables, els residuals estandarditzats⁵ no segueixen una distribució normal. Tampoc presenten una distribució homocedàstica (variància constant) en funció dels valors de la variable explicativa. Això significa que el model no aconsegueix capturar correctament tots els patrons subjacents de les dades.

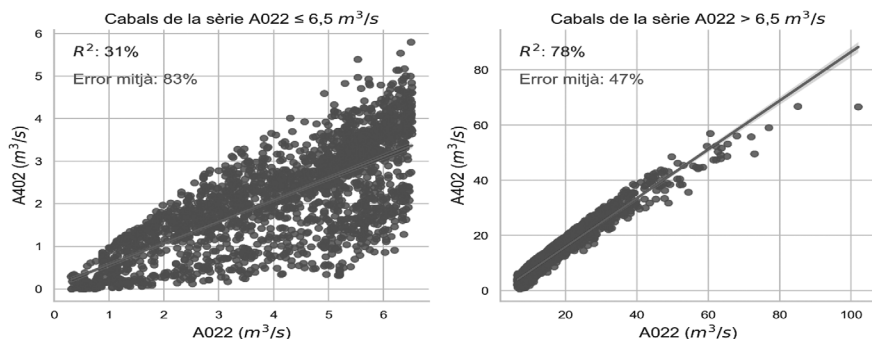
No obstant això, la variància dels residuals augmenta de manera molt accentuada per cabals baixos de la sèrie A022 fins a 6,5 m³/s aproximadament (mediana de la sèrie A022 en el període 2003-2023). Per cabals de la sèrie A022 superiors a 6,5 m³/s, els residuals presenten una distribució normal (p-valor > 5% pel test Kolgomorov-Smirnov) i una distribució homocedàstica (p-valor > 5% pel test Breusch-Pagan) respecte als valors de l'eix horitzontal (a partir de 18 m³/s).

Així doncs, el model no aconsegueix capturar els patrons subjacents de les dades per al rang de cabals baixos de la sèrie A022 però sembla adequar-se millor per a cabals alts (superiors a 6,5 m³/s).

Figura 5. Dispersió de les sèries de cabal mitjà diari (m³/s) de les estacions A402 i A022 considerant tot el període 2003-2023 (a l'esquerra). Gràfic de dispersió dels residuals estandarditzats (residuals / desviació estàndard dels residuals) obtinguts a partir de la regressió de la sèrie de cabals de l'estació A402 en funció de la sèrie de l'estació A022 (2003-2023) (a la dreta). La línia vertical blava correspon a la mediana de la sèrie A022 del període 2003-2023 (6,5 m³/s)



Si es modelitzen (per separat) els cabals de la sèrie A402 en funció de la sèrie A022 per a dos rangs diferenciats —cabals baixos (inferiors o iguals a $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$) i cabals alts (superiors a $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$)—, es poden identificar clarament diferents règims hidrològics (vegeu la Figura 6). En el rang de cabals baixos, la correlació lineal entre ambdós sèries és baixa (30%), cosa que dificulta l'aplicació d'una regressió lineal en aquest interval, amb un error mitjà elevat del 80%. En canvi, en el rang de cabals alts, la correlació lineal és molt significativa (al voltant del 80%), fet que indica que la regressió lineal és més adequada en aquest interval, amb un error mitjà reduït al 47%.



A continuació, es fa la mateixa anàlisi per a l'estació A403 per tal de veure si la sèrie de cabals es pot modelitzar en funció de la sèrie A022 d'una manera més robusta, sobretot per a cabals baixos.

Anàlisi de l'estació A403 respecte a l'estació A022

A continuació s'analitza la sèrie de l'estació andorrana de la conca del riu Valira situada a la borda del Sabaté (A403) respecte a l'estació de referència A022 en el període temporal màxim en què existeixen dades per a ambdós estacions (2009-2023). L'estació A403 és l'estació andorrana més propera a l'estació A022 i ambdós estan afectades per l'activitat de la central hidroelèctrica de FEDA, ja que recullen aigua de la conca del Valira d'Orient. Tal com es pot observar a la Figura 7, l'evolució de les sèries temporals dels cabals de les estacions A022 i A403 presenta els mateixos patrons periòdics al llarg de cada any:

Patró setmanal en el qual els cabals de les dos estacions, que es troben aigües avall del desguàs de la central hidroelèctrica

Figura 6. Gràfics de dispersió de les sèries de cabal mitjà diari (m^3/s) de les estacions A402 i A022 considerant tot el període 2003-2023 per a cabals baixos (esquerra) i alts (dreta)

d'Encamp, segueixen una evolució que reflecteix el model d'explotació del llac d'Engolasters per part de FEDA durant la major part de setmanes del període estudiat.

Patró estacional en el qual els valors augmenten de forma generalitzada i transitòria durant els mesos de primavera (degut al desgel, principalment, i a les precipitacions) i durant els mesos de tardor (degut a les precipitacions). Aquest patró també s'observa a la sèrie de cabals de l'estació A402 estudiada prèviament.

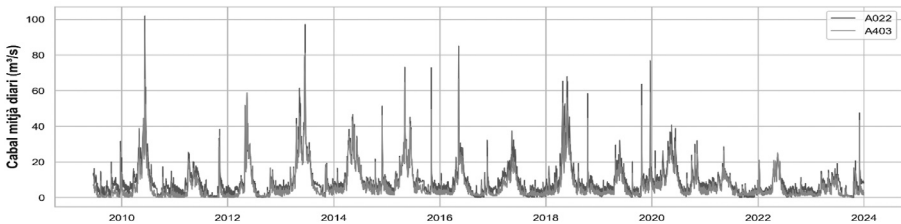


Figura 7. Evolució de les sèries de cabal mitjà diari (m^3/s) de les estacions A403 i A022 (després de la correcció per afegir el canal de Rec dels Quatre Pobles) (2009-2023)⁶

No obstant això, la sèrie de cabals de l'estació A403, a l'igual que la sèrie de cabals de l'estació A402, presenta inconsistències significatives, amb períodes en què els cabals mitjans diaris superen els de l'estació A022, situada aigües avall. A continuació, s'analitzen en detall aquestes inconsistències.

Inconsistències de la sèrie A403 respecte a la sèrie A022

De la mateixa manera que per a l'anàlisi de les inconsistències de la sèrie A402, en aquest apartat es defineix una inconsistència quan un cabal de la sèrie A403 presenta un valor superior al cabal corresponent de la sèrie A022 (és a dir, quan $A022 - A403 < 0$). Analitzant exclusivament els cabals inconsistents d'ambdós sèries, s'ha calculat el percentatge d'inconsistències respecte al nombre total de cabals anuals (vegeu la Figura 8a), la distribució dels cabals inconsistents de l'A402 per any (vegeu la Figura 8b) i la variació (en termes absoluts) dels cabals de l'A403 associats a inconsistències respecte als cabals corresponents de l'A022 (vegeu la Figura 8c).

A l'igual que per la sèrie A402, el percentatge d'inconsistències associades a la sèrie A403 és altament variable i segueix un patró semblant, però, en aquest cas, no supera el 20% durant el període 2009-2023. Exceptuant l'any 2022 i el període 2010-2015, les inconsistències tendeixen a concentrar-se en cabals inferiors a $1 \text{ m}^3/\text{s}$ i pràcticament mai superen els $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (vegeu la Figura 9). Tanmateix, la variació

6- Accés al gràfic interactiu https://ari.ad/images/projectes/observacions_cabals/A403_A022.html

dels cabals de la sèrie A403 respecte als cabals de la sèrie A022 associats a les inconsistències és inferior a 1 m³/s pràcticament sempre excepte l'any 2010, la qual cosa indica una certa consistència durant els anys.

Figura 8. a) Percentatge del nombre anual de cabals mitjans diaris de l'estació A403 que es troben per sota dels cabals corresponents de l'estació A022 respecte al total de cabals anuals. b) Distribució dels cabals mitjans diaris de l'A403 superiors als cabals corresponents de l'A022 ($A022 - A403 < 0$). c) Distribució de la variació dels cabals de l'A403 associats a les inconsistències respecte als cabals corresponents de l'A022

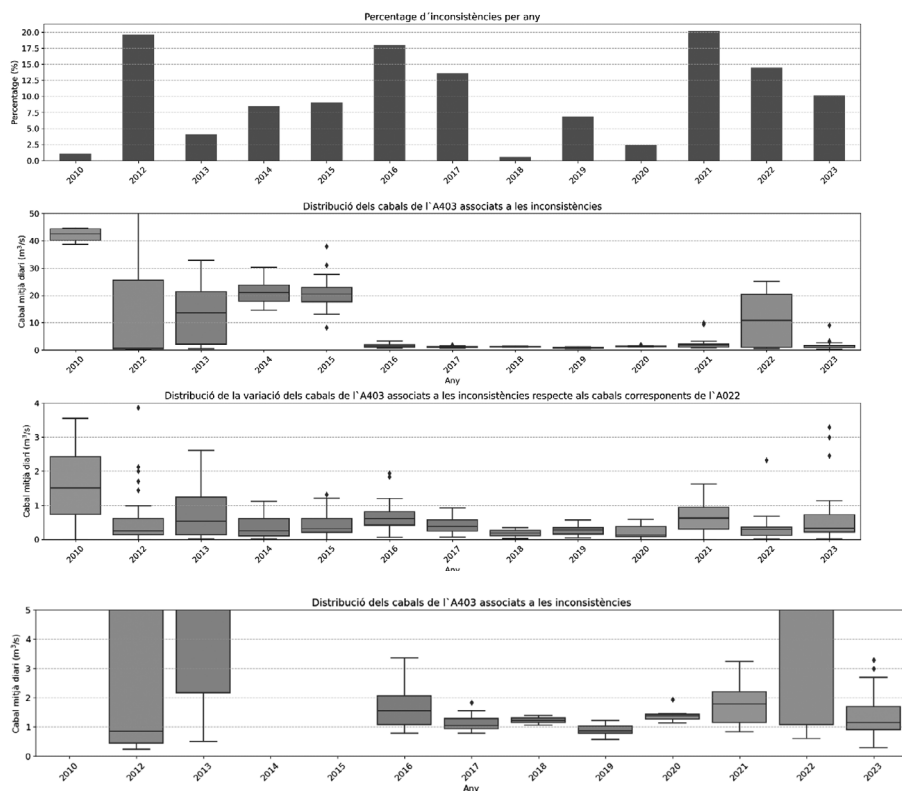


Figura 9. Distribució dels cabals mitjans diaris de l'A403 superiors als cabals corresponents de l'A022 ($A022 - A403 < 0$) per un rang inferior a 5 m³/s

7- Els residuals estandarditzats s'obtenen a partir dels residuals (diferència entre els valors observats i els estimats pel model) dividits per la desviació estàndard de dits residuals.

Anàlisi de regressió lineal

Un cop identificades i analitzades les inconsistències, es modelitza la sèrie de cabals de l'A403 (variable dependent) en funció de la sèrie de l'A022 (variable explicativa) mitjançant una regressió lineal definida pels paràmetres β i α (vegeu la Figura10):

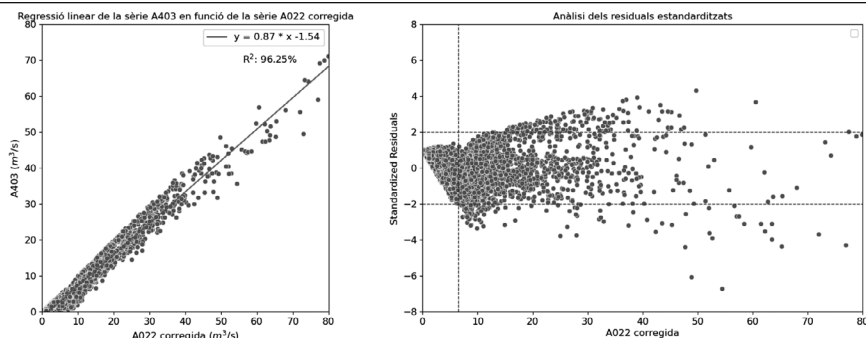
$$\text{Cabal mitjà diari}_{A403} = \beta * \text{Cabal mitjà diari}_{A022} + \alpha$$

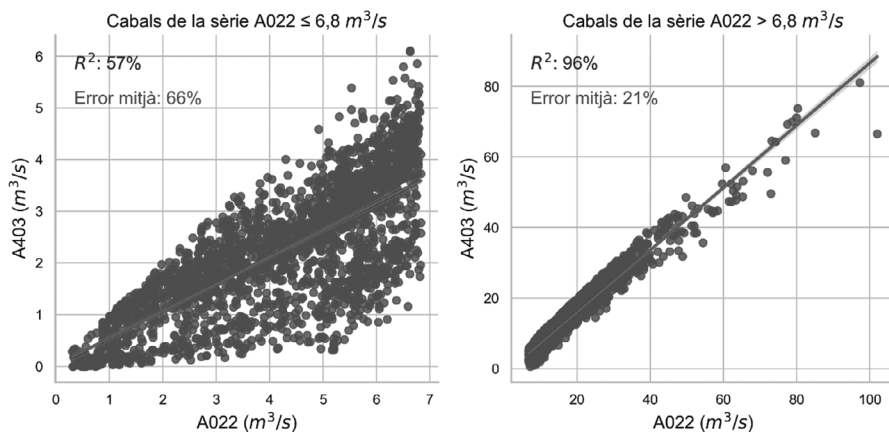
En aquesta modelització tampoc es consideren els cabals associats a les inconsistències, ja que podrien donar peu a un biaix significatiu. En aquest cas, el model explica el 96% de la variància de la sèrie de cabals de l'estació A403. No obstant això, malgrat la solidesa de la relació lineal entre les variables, els residuals estandarditzats⁷ tampoc segueixen una distribució normal ni presenten una distribució homocedàstica (variància constant) en funció dels valors de la variable explicativa. Globalment, el model tampoc captura correctament tots els patrons subjacents de les dades.

La variància dels residuals augmenta de manera pronunciada en el rang de cabals baixos de la sèrie A022, fins a aproximadament 6,8 m³/s, que correspon a la mediana de la sèrie per al període 2010-2023 (vegeu la Figura 10). Tanmateix, a diferència del comportament observat en el cas de la sèrie A402, el model aplicat a la sèrie A403 subestima els cabals quan els valors de l'A022 són propers a 0 m³/s (generant residuals positius) i els sobreestima quan els valors de l'A022 s'acosten a 6,8 m³/s (generant residuals negatius).

Figura 10. Gràfic de dispersió de les sèries de cabal mitjà diari (m³/s) de les estacions A403 i A022 considerant tot el període 2009-2023 (esquerra).

Gràfic de dispersió dels residuals estandarditzats (residuals / desviació estàndard dels residuals) obtinguts a partir de la regressió de la sèrie de cabals de l'estació A403 en funció de la sèrie de l'estació A022 (2009-2023) (dreta). La línia vertical blava correspon a la mediana de la sèrie A022 del període 2009-2023 (6,8 m³/s)





Aquest patró indica que el model mostra un biaix sistemàtic en aquest rang de cabals. A partir de 7 m³/s, el biaix ja no és tan aparent. La mitjana dels residuals tendeix a 0 i a partir de 20 m³/s i fins a 60 m³/s els residuals presenten una distribució pràcticament homocedàstica (p-valor > 5% pel test Breusch-Pagan).

Si es modelitzen (per separat) els cabals de la sèrie A403 en funció de la sèrie A022 per a dos rangs diferenciats —cabals baixos (inferiors o iguals a 6,8 m³/s) i cabals alts (superiors a 6,8 m³/s)—, es poden identificar també diferents règims hidrològics (vegeu la Figura 11). Per a cabals baixos, s’observa una correlació lineal significativa (57%) entre ambdós sèries i un error mitjà (66%) inferior a l’error obtingut en el cas de la sèrie A402 (83%). Aquesta anàlisi suggereix que el biaix identificat es deu a la influència dels cabals superiors a 6,8 m³/s en el model general. Per a cabals alts, els resultats també són millors que en el cas de la sèrie A402.

Correcció de les inconsistències

Un cop analitzades les sèries hidromètriques de les estacions andorranes A402 i A403 respecte a la sèrie de referència de la Seu d’Urgell A022, en aquesta secció procedim a elaborar les sèries hidromètriques que serviran de referència a Andorra. Aquestes sèries de referència s’han elaborat a partir de la sèrie A403, ja que:

- Hi ha un 9% d’inconsistències a la sèrie A403 (2009-2023),

Figura 11. Gràfics de dispersió de les sèries de cabal mitjà diari (m³/s) de les estacions A403 i A022 considerant tot el període 2009-2023 per a cabals baixos (esquerra) i alts (dreta)

mentre que a la sèrie A402 n'hi ha un 14% si es considera el període complet 2003-2023 i un 13% si es considera només el període 2009-2023.

- El percentatge d'inconsistències de la sèrie A403 no supera en cap any del període el 20% mentre que sí que ho fa la sèrie A402, per exemple l'any 2011, amb un 80% d'inconsistències.
- La distribució dels cabals de la sèrie A403 associats a les inconsistències és menys variable d'any a any (durant el període 2015-2023, sobretot) que en el cas de la sèrie A402.
- La relació lineal és més robusta entre la sèrie A403 i la sèrie A022 tant per a cabals baixos com per a cabals alts.

A continuació s'han corregit les inconsistències detectades en la sèrie A403 per tal d'obtenir una sèrie més robusta i fiable que es podrà utilitzar com a sèrie de referència de les conques andorranes. Tenint en compte que els cabals de les estacions A403 i A022 estan influenciats per la central hidroelèctrica d'Encamp, s'ha implementat un tractament relatiu al turbinatge de la central hidroelèctrica de FEDA per tal d'obtenir, addicionalment, una sèrie de referència sense la influència de la hidroelèctrica. Ambdós sèries de referència poden descarregar-se des del web d'Andorra Recerca + Innovació.⁸ L'elecció d'una o altra sèrie en estudis hidrològics dependrà de la ubicació de cada cas d'estudi.

Tal com s'ha mostrat en la secció 1, en funció del rang de cabals de l'estació A022, la relació lineal entre els cabals de l'A403 i l'A022 varia significativament i s'identifiquen dos règims hidrològics diferents, per a cabals baixos i per a cabals alts. Per tal d'ajustar el model amb major precisió per a cada rang específic, es planteja modelitzar per separat els cabals baixos i els cabals alts mitjançant una regressió segmentada (*piecewise regression*) dels cabals de l'A403 en funció dels cabals de l'A022. Aquesta tècnica permet ajustar diferents models lineals a diferents intervals d'un conjunt de dades. És especialment útil quan la relació entre les variables no és uniforme en tot l'interval de dades, sinó que presenta "canvis de tendència" o punts de trencament (*breakpoints*) a partir dels quals la relació entre les variables canvia.

Per dur a terme la regressió segmentada, es modelitza la sèrie de cabals de l'estació A403 a partir del model següent (Pilgrim, 2021):

8- Sèries disponibles a https://ari.ad/images/projectes/observacions_cabals/series_a403_referencia.csv

$$y = \alpha x + c + \beta(x - \psi)H(x - \psi) + \zeta$$

on:

y: cabal estimat de l'A403 a partir del model.

x: cabal observat de l'A022 corregit.

α : coeficient de regressió del primer segment (corresponent als valors de l'A022 compresos entre 0,8 m³/s i el punt de trencament, sense incloure aquest darrer).

c: constant d'intersecció amb l'eix y del primer segment.

β : diferència entre el coeficient de regressió del primer segment i el segon ($\alpha_2 - \alpha_1$) (és a dir, el canvi de pendent entre els dos segments).

ψ : cabal de l'A403 que defineix el punt de trencament.

$H(x - \psi)$: funció de Heaviside (*Heaviside step function*), que pren el valor 1 si x és superior o igual a ψ , i 0 si x és inferior a ψ .

ζ : error associat a x, que segueix una distribució normal $N(0,1)$.

Aquest enfocament permet modelitzar la transició entre diferents règims de cabals amb precisió, capturant tant la variació en la tendència com en la dispersió. Tenint en compte que el nombre d'inconsistències i el rang de cabals de la sèrie A403 associat a les inconsistències varia en funció dels anys (sobretot durant els primers anys de període), es decideix fer la modelització per a cada any de forma independent.

A continuació, es presenten els resultats de la regressió segmentada (considerant tots els cabals en un mateix model) per dos anys en concret: un any humit, el 2020, marcat per unes precipitacions notablement superiors a la mitjana, amb un hivern plujós segons l'SPI,⁹ i un any sec, el 2022, que es va registrar com un dels més càlids a l'estació central de FEDA des de 1950, amb precipitacions per sota de les del període de referència.¹⁰

En el cas de l'any humit, la regressió segmentada no presenta un biaix significatiu en el rang de cabals baixos (de la sèrie A022) i els residuals presenten una distribució normal i una

9- Standardized Precipitation Index o índex de precipitació estàndard. En trobareu més detalls a <https://ari.ad/projectes/butlleti-recurs-hidric>

10- Més informació a <https://ari.ad/noticies/tanquem-2022-calid-lestacio-central-fed>

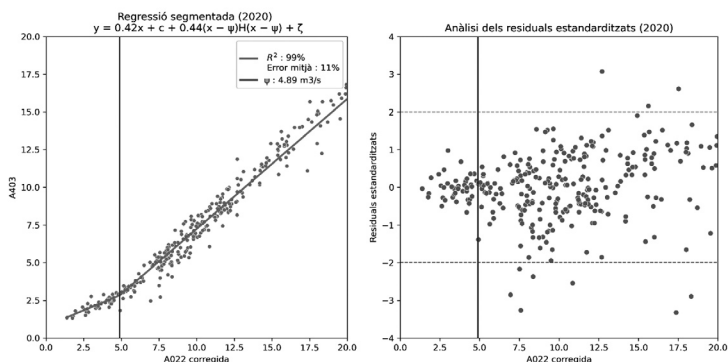


Figura 12. Regressió segmentada de les sèries de cabal mitjà diari (m^3/s) de l'estació A403 en funció de l'estació A022 considerant només l'any humit 2020 (esquerra). Gràfic de dispersió dels residuals estandaritzats (residuals / desviació estàndard dels residuals) obtinguts a partir de la regressió segmentada presentada (dreta)

distribució pràcticament homocedàstica tant per als cabals baixos com per als alts (vegeu la Figura 12). En el cas de l'any sec, es pot dir el mateix que s'ha mencionat en el paràgraf anterior, amb la diferència que la distribució dels residuals presenta una certa heterocedasticitat (vegeu la Figura 13).

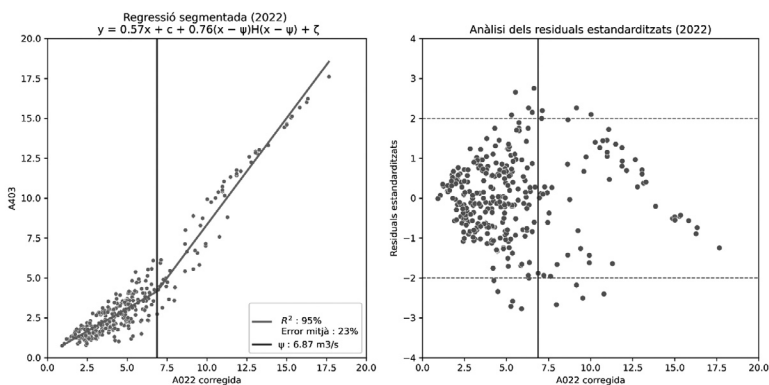
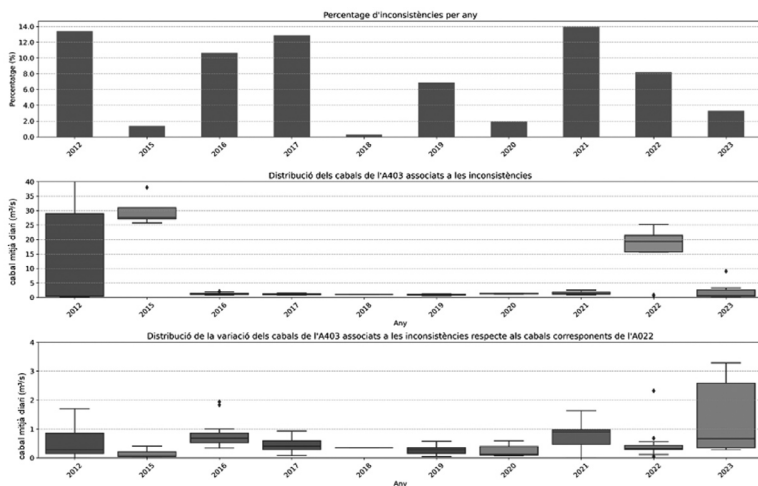


Figura 13. Regressió segmentada de les sèries de cabal mitjà diari (m^3/s) de l'estació A403 en funció de l'estació A022 considerant només l'any 2022 (esquerra). Gràfic de dispersió dels residuals estandaritzats (residuals / desviació estàndard dels residuals) obtinguts a partir de la regressió segmentada presentada (dreta)

Globalment, es pot afirmar que la regressió segmentada ofereix resultats més robustos que la regressió lineal i que, per tant, és més òptima per corregir les inconsistències de la sèrie de referència. La correcció de les inconsistències es fa amb l'estimació dels cabals de la sèrie A403 a partir dels cabals de la sèrie A022 (que estan associats a les inconsistències) mitjançant el model

de regressió segmentada per any. Un cop fetes les correccions, la proporció d'inconsistències totals durant el període 2009-2023 baixa del 9 al 5%, dels quals el 4,1% corresponen a cabals baixos de l'A022 (inferior o igual a 6,8 m³/s). Els resultats de la correcció per any es presenten a la Figura 14. El nombre d'inconsistències baixa a 0% en els anys 2009-2011 i 2013-2014, i es redueix per sota del 14% en els anys 2012 i 2015-2023.



Conclusions

Aquest estudi ha proporcionat una anàlisi exhaustiva de les sèries hidromètriques de la conca del Valira a Andorra, que ha abordat les inconsistències detectades en les estacions amb un registre de dades històric més llarg (A402 i A403). Els resultats obtinguts han permès desenvolupar dos sèries de referència¹¹ robustes i consistents per a la conca del Valira a Andorra, basades en l'estació hidromètrica A403. Aquestes sèries esdevenen una eina clau per a l'anàlisi hidrològica en contextos científics i de gestió. L'aplicació d'una metodologia de correcció basada en regressions segmentades ha permès minimitzar els biaixos i les inconsistències de la sèrie de dades, la qual cosa ha reduït significativament les discrepàncies observades entre la sèrie A403 i la sèrie de referència A022. Les troballes d'aquest estudi evidencien la importància d'un calibratge rigorós i d'un seguiment continu de les estacions

Figura 14. a) Percentatge corresponent al nombre anual de cabals mitjans diaris de l'estació A403 que es troben per sota dels cabals corresponents de l'estació A022, respecte al total de cabals anuals després d'aplicar la correcció. b) Distribució dels cabals mitjans diaris de l'A403 superiors als cabals corresponents de l'A022 ($A022 - A403 < 0$). c) Distribució de la variació dels cabals de l'A403 associats a les inconsistències respecte als cabals corresponents de l'A022

11- Sèries disponibles a https://ari.ad/images/proyectos/observacions_cabals/series_a403_referencia.csv

Referències bibliogràfiques

AR+I (2022). *Millora de les dades d'observacions de cabals de les conques fluvials d'Andorra*. https://ari.ad/images/projectes/observacions_cabals/informe_observacions_cabals.pdf

BEGUERÍA, S., SÁNCHEZ-PÉREZ, J. M., ANTIGÜEDAD, I., CABALLERO, Y., LAMBÁN, L. J., QUINTANA-SEGÚI, P., LLASAT, C., PESADO, C., VIDAL, J.-P., & JÓDAR, J. (2019). Evaluation of water resources of the Pyrenees in a context of climate change and adaptation strategies. *Geophysical Research Abstracts*, 21 (April), 1. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=asn&AN=140494002&site=ehost-live>

PILGRIM, C. (2021). Piecewise-regression (aka segmented regression) in Python. *Journal of Open Source Software*. <https://doi.org/10.21105/joss.03859>

hidromètriques, especialment en conques sotmeses a una pressió antròpica elevada i a impactes del canvi climàtic, com és el cas d'Andorra. Les noves sèries de referència serviran com a base per a futures recerques sobre els recursos hídrics a la regió, incloent-hi l'estimació de cabals ambientals i l'adaptació al canvi global. En definitiva, aquest estudi no només aporta solucions tècniques per a la gestió hidrològica d'Andorra, sinó que també constitueix un model metodològic replicable en altres conques amb característiques similars. L'adopció d'aquest enfocament contribuirà a millorar la resiliència hídrica del territori, alineant-se amb els reptes actuals de sostenibilitat i transició energètica.