



Govern d'Andorra



Resultats del balanç hídric del Principat d'Andorra - any 2023 -

Ministeri de Medi Ambient, Agricultura i Ramaderia

Andorra la Vella, Març del 2024

Informe

1	OBJECTIUS.....	3
2	DADES BASE DE PRECIPITACIÓ I TEMPERATURA	4
3	CÀLCUL DEL BALANÇ HÍDRIC	7
3.1	RESULTATS DEL BALANÇ HÍDRIC	8
4	CONTRAST DE RESULTATS	8
4.1	ANÀLISI DELS CABALS AFORATS	8
4.2	ANÀLISI DELS NIVELLS OBSERVATS	12
5	EL BALANÇ HÍDRIC EN LES UNITATS HIDROGEOLÒGIQUES.....	18
6	EL BALANÇ HÍDRIC EN DIFERENTS CONQUES HIDROGRÀFIQUES ..	33
7	CONCLUSIONS.....	39
8	BIBLIOGRAFIA	40
9	ANNEX DE DOCUMENTACIÓ. CàLCUL DEL BALANÇ HÍDRIC	41
9.1	CàLCUL DE L'EVAPOTRANSPIRACIÓ.....	42
9.1.1	Generalitats.....	42
9.1.2	Aplicació del mètode empíric de Thornthwaite	42
9.2	CàLCUL DE LA PLUJA ÚTIL	45
9.3	ESTIMACIÓ DEL DÈFICIT HÍDRIC	47
9.4	EVOLUCIÓ DE LA RESERVA D'AIGUA DEL SÒL	48

1 OBJECTIUS

Des del 2006 el Departament de Medi Ambient i Sostenibilitat duu a terme un balanç hidrometeorològic que permet estimar valors mitjos mensuals i anuals de l'evapotranspiració potencial i real, pluja útil i dèficit hídric del Principat d'Andorra. Es tracta dels resultats obtinguts amb la metodologia de Thornthwaite a partir de les dades de precipitació i temperatura subministrades pel l'ARI (Andorra Recerca i Innovació, abans CENMA)

El present estudi té per objectiu analitzar els resultats d'aquest balanç hídric calculat per l'any 2023.

Des del 2016 és l'ARI (Andorra Recerca i Innovació, abans CENMA) qui proporciona les dades base de precipitació (acumulació mensual) i temperatura (valors màxims i mínims diaris). Així mateix, l'ARI també facilita la distribució de la temperatura i precipitació per a un any mig (període 1981-2010).

Amb les dades de precipitació i temperatura mensuals, es vol caracteritzar el clima seguint els mateixos criteris que l'ARI i el Servei Meteorològic Nacional.

Els criteris són els següents:

Classificació Plugues	P _{període} respecte mitjana climàtica	Classificació Temperatura	T _{període} respecte mitjana climàtica
Molt plujós	$P_{\text{període}} > 190\%$	Molt càlid	$T_{\text{període}} \geq +3^{\circ}\text{C}$
Plujós	$110\% < P_{\text{període}} < 190\%$	Càlid	$+0,5^{\circ}\text{C} < T_{\text{període}} < +3^{\circ}\text{C}$
Normal	$90\% < P_{\text{període}} < 110\%$	Normal	$-0,5^{\circ}\text{C} < T_{\text{període}} < +0,5^{\circ}\text{C}$
Sec	$30\% < P_{\text{període}} < 90\%$	Fred	$-3^{\circ}\text{C} < T_{\text{període}} < -0,5^{\circ}\text{C}$
Molt sec	$P_{\text{període}} < 30\%$	Molt fred	$T_{\text{període}} \leq -3^{\circ}\text{C}$

Taula 1. Criteris de classificació de les pluges i temperatures anuals respecte la mitjana climàtica

Malgrat que l'ARI facilita els mapes base amb els límits administratius (territori andorrà, amb una superfície de 467,45 Km²), per a l'estimació dels recursos hídrics es treballa amb els límits de conques hidrogeològiques, abastant una superfície de 522,26 Km², que inclou territori andorrà i transfronterer. Totes les figures que es presenten en el present document fan referència a aquests límits, tot i que es podrà observar que tant es donen resultats que tracten sobre el domini andorrà (límit administratiu) com sobre el domini d'estudi (conques hidrogeològiques).

2 DADES BASE DE PRECIPITACIÓ I TEMPERATURA

Des del 2016 el model de precipitació i temperatura el proporciona l'ARI. S'elaboren mapes mensuals tenint en compte una àmplia xarxa d'estacions meteorològiques d'Andorra, amb registres en continu de dades climàtiques. Les estacions usades per aquest centre han estat:

- a) ARI: Aixàs, Bony de les Neres, Sorteny, Perafita
- b) FEDA: Ransol, Central
- c) Govern: Roc de sant Pere, Borda Vidal, La comella, Les Salines
- d) MeteoFrance: Aulus les Bains

Les dades recollides passen un control de qualitat. Per elaborar els mapes de temperatura i precipitació han utilitzat les estacions que presenten com a molt 3 dies consecutius o 5 dies no consecutius sense dades al mes, tot i que si se sap que no hi ha hagut precipitació en aquests dies, si que s'utilitza la informació del mes.

A continuació es donen els resultats de precipitació i temperatura del 2023.

El mapa de distribució de les precipitacions anuals permet veure que es tenen valors màxims propers als 1000 mm a l'est del país, i mínims per sota els 560 mm sobretot al sud-oest del país i fons de vall.

A nivell d'Andorra, el valor mig acumulat és de 774 mm (límit administratiu).

En la **figura 1** es mostra el model de distribució de les precipitacions de l'any 2023.

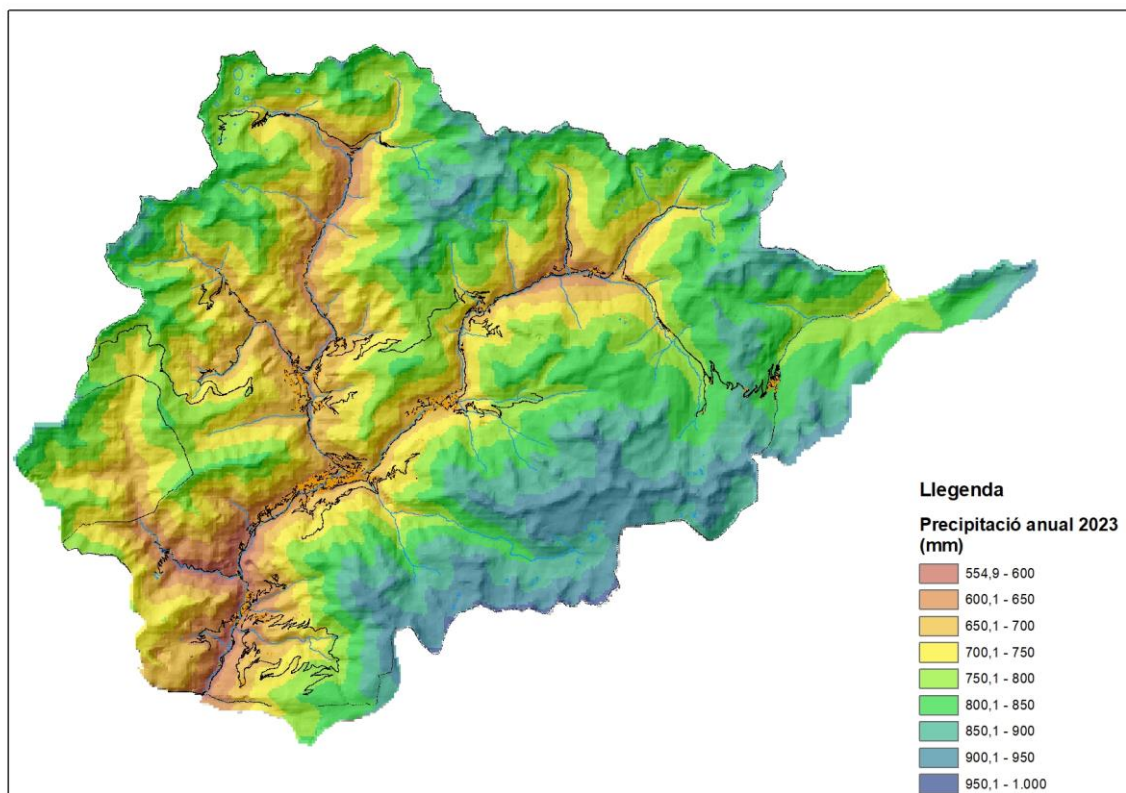


Figura 1. Mapa de distribució de les precipitacions acumulades el 2023. Dades base facilitades pel l'ARI

Si es comparen les precipitacions acumulades el 2023 amb la mitjana climàtica de 30 anys –sèrie 1981-2010 (valorat amb 1054 mm, límit administratiu), s’observa que es tracta d’un any sec. En la **figura 2** es mostra el resultat de relacionar les precipitacions del 2023 amb la mitjana climàtica.

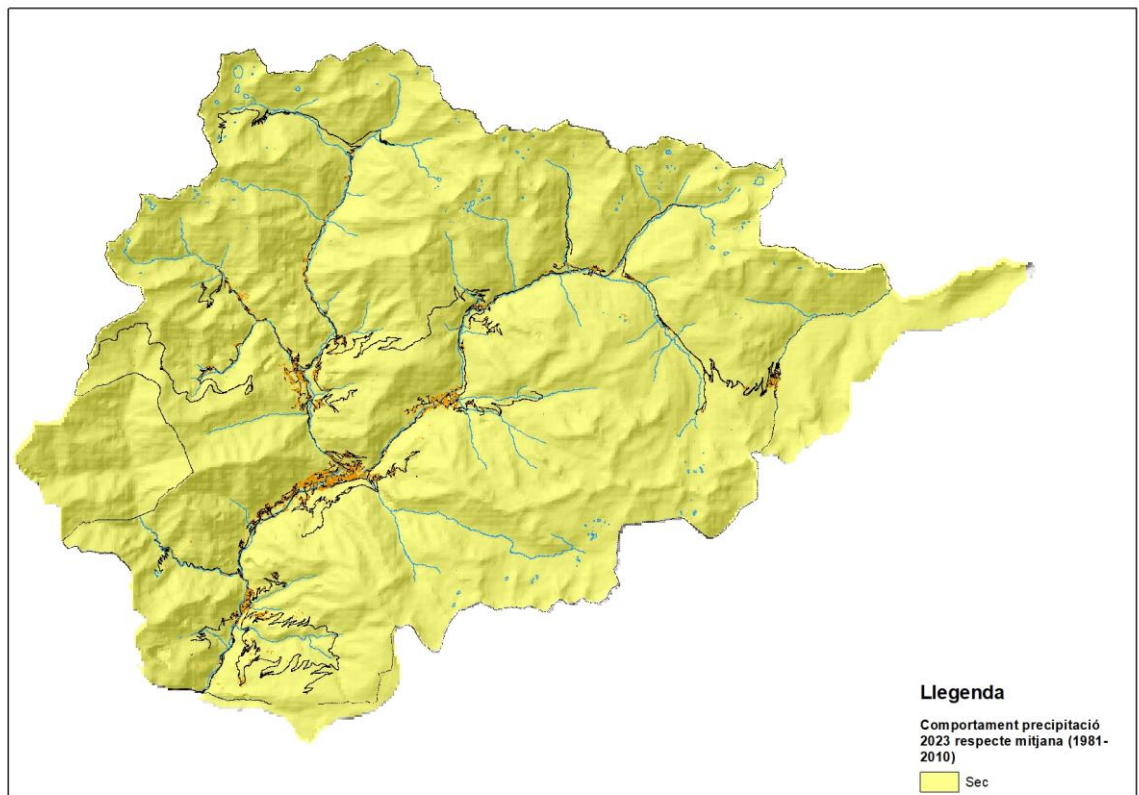


Figura 2. Mapa comparatiu de les quantitats acumulades registrades el 2023 i els corresponents valors mitjans.

En relació a la temperatura, l’any 2023 presenta un valor mig anual a nivell de país de 6.54°C (límit administratiu). Els valors mínims es detecten en el terç nord i est del Principat coincidint amb alta muntanya, amb valors de fins a 1.1°C, i les temperatures màximes es detecten al sud-oest, amb valors de fins a 13°C. En la **figura 3** es mostra el model de distribució de les temperatures de l’any 2023.

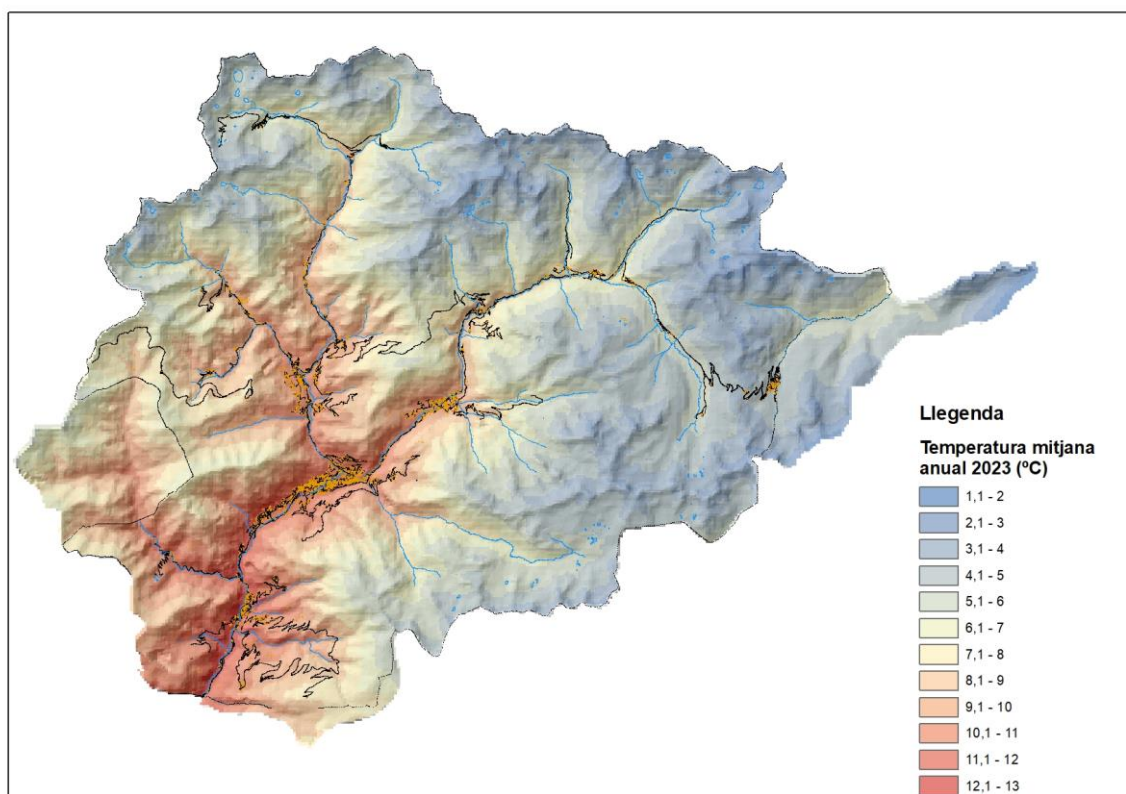


Figura 3. Mapa de distribució de les temperatures mitges del 2023. Dades base facilitades pel l'ARI

Comparant la temperatura mitja anual amb la mitjana climàtica de 30 anys (període 1981-2010 valor de 5,6°C), s'observa que les temperatures del 2023 han estat en conjunt superiors a la mitjana; s'ha tractat d'un any calorós, amb l'excepció del sector nord-oriental que han sigut normals o fins i tot més baixes.

En la **figura 4** es mostra la relació entre la temperatura estimada pel 2023 i la mitjana climàtica.

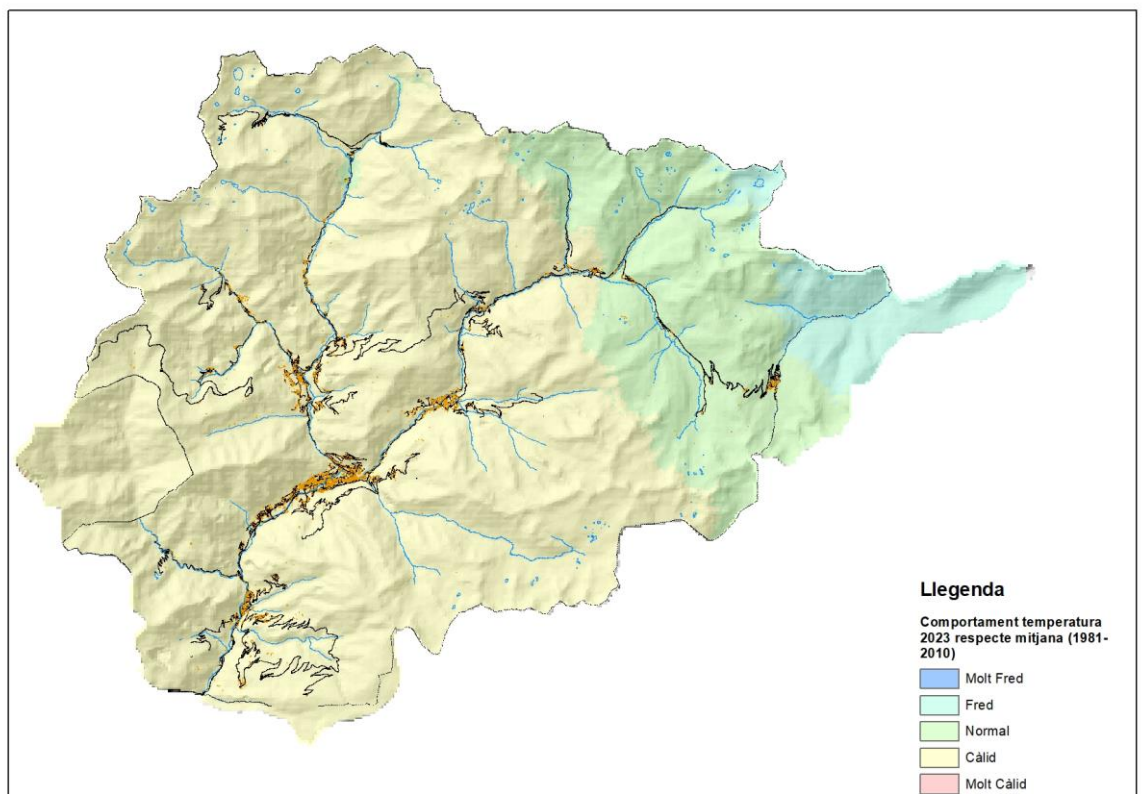


Figura 4. Mapa de les diferències de temperatura de l'any 2023 respecte la mitja.

3 CÀLCUL DEL BALANÇ HÍDRIC

De cara a estimar els recursos hídrics del 2023, que potencialment poden ésser usats per les necessitats de l'home (també anomenada pluja útil), s'ha dut a terme un balanç hidrometeorològic.

L'expressió que permet deduir la pluja útil és la següent:

$$P = ETR + Pu \pm \Delta R \dots\dots\dots(1)$$

on:

P=Precipitació total: sòlida i líquida

ETR= Evapotranspiració real

Pu=Pluja útil o excedents

ΔR =Variació de la reserva d'aigua en el sòl

3.1 RESULTATS DEL BALANÇ HÍDRIC

En la següent taula es mostra un resum del balanç hídric segons la metodologia i càlculs que s'exposen en l'**Annex de documentació**.

T mitja	P acumulada	ETR	Pluja útil (excedents)	ΔR^*
6.5	774	385	386	-4.4

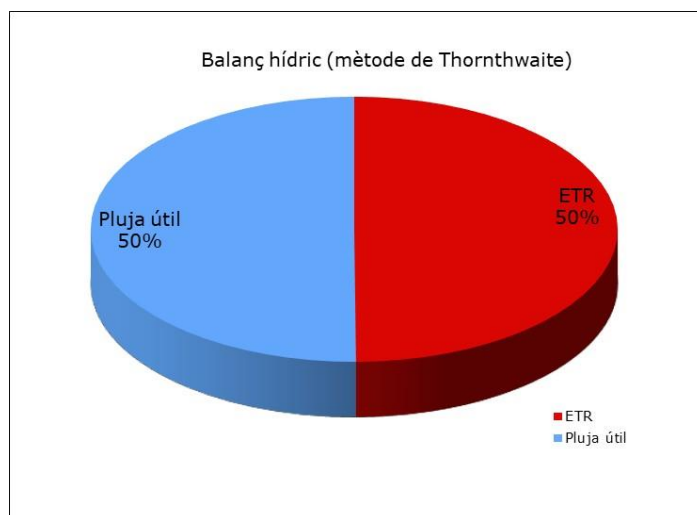
Taula 2. Resum balanç hídric en base al mètode de Thornthwaite. Superfície calculada=467,45 Km² (límit administratiu)(*) ΔR dada obtinguda directament del model. Cal saber que el ràster de precipitació (P) és d'una mida de cel.la de 90 x 90, en canvi el ràster del balanç (on hi intervé la ETR, els excedents, la reserva) està fet a 27 x 27, si es calcula la R amb l'equació 1 usant les dades de la taula 1 tindrem un valor orientatiu de la reserva.

Les entrades al sistema són les precipitacions, amb un valor mig de 774 mm/any. Les sortides es distribueixen en evapotranspiració, amb uns 385 mm i pluja útil amb 386 mm.

La reserva d'aigua en el sòl ha estat per sota els valors màxims durant quasi tot l'any, i s'ha arribat a esgotar als mesos d'estiu. En l'**Annex 8.4** es mostra l'evolució històrica de la reserva.

Segons el mètode de Thornthwaite, l'evapotranspiració (ETR) suposa el 50%, igual que la pluja útil. En el següent gràfic es mostra la distribució de les sortides segons el mètode de càlcul utilitzat.

Figura 5. Balanç hídric segons Thornthwaite (Calculat tenint en compte que la reserva d'aigua al sòl és variable segons la zona)



4 CONTRAST DE RESULTATS

4.1 ANÀLISI DELS CABALS AFORATS

Quan es parla de pluja útil s'està parlant de l'aigua que surt com a escolament superficial directe i com a escolament subterrani, i que en un balanç anual es pot interpretar que tota la pluja útil acaba drenant cap als rius.

Donant per vàlid aquest supòsit, es contrasten els resultats de la pluja útil estimada amb el model de balanç hídric, i els cabals aforats.

Per a dur a terme aquest contrast de dades s'ha fet ús dels registres de cabal diaris recollits durant el 2023 de diferents rius, per part de Forces Elèctriques d'Andorra (FEDA), la Confederació Hidrogràfica de l'Ebre (CHE), i del Departament de Medi Ambient (DMAS) i de Protecció Civil (PC) del Govern d'Andorra.

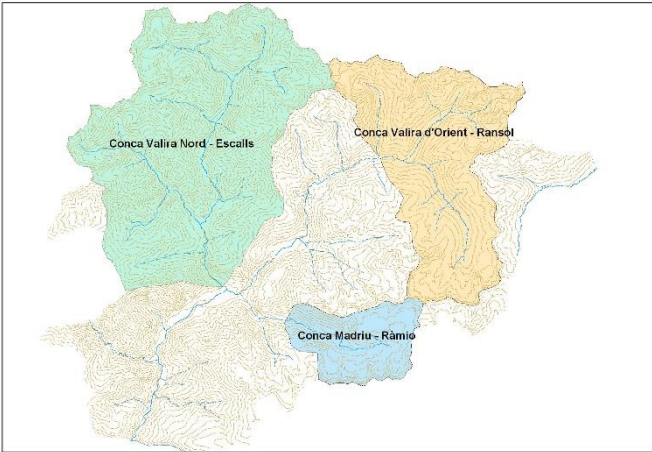
Protecció Civil té varies estacions d'aforaments, no obstant, són estacions dissenyades per detectar les grans avingudes i per tant no estan pensades ni per donar dades dels cabals mínims ni mitjos. Així mateix, en tots els casos menys en l'estació de Prada Casadet la llera del riu on hi ha l'estació és natural, això vol dir, irregular, pel que les lectures del calat, sobretot, en moments de cabals mínims, tenen molt error. En canvi al sector de Prada Casadet la llera és regular, formigonada,

i per tant és de preveure que els valors de cabals mínims siguin més aproximats. Per això, i donat el l'objectiu del present document, només s'usarà l'estació de Prada Casadet.

En la següent taula s'indica les coordenades de les estacions d'aforament utilitzades, del riu al què corresponen i la superfície de la conca hidrogràfica.

Estació d'aforament	X	Y	Riu aforat	Superfície conca hidrogràfica (Km ²)
FEDA-Ransol	542773,6	31220,0	Valira Orient	81,86
FEDA Madriu -Ràmio	537514,6	22164,2	Madriu	26,05
CHE(A402)-Pont Escalls	533986	24046	Valira Nord	145,68
Borda Sabater_medi ambient	529639,5	16525,1	Gran Valira	445,77
Prada Casadet_PC	533041	23107	Riu Gran Valira	355,2

Taula 3. Situació aproximada (coordenades Lambert III Andorra), riu aforat i superfície de la conca hidrogràfica de les estacions d'aforament utilitzades. PC: Protecció Civil



En les següents figures es mostra l'abast hidrogràfic cada estació d'aforament.

Figura 6. Mapa de situació de les conques estudiades de Valira Nord – Escalls, Conca Valira Orient Ransol i Conca Ràmio – Madriu.

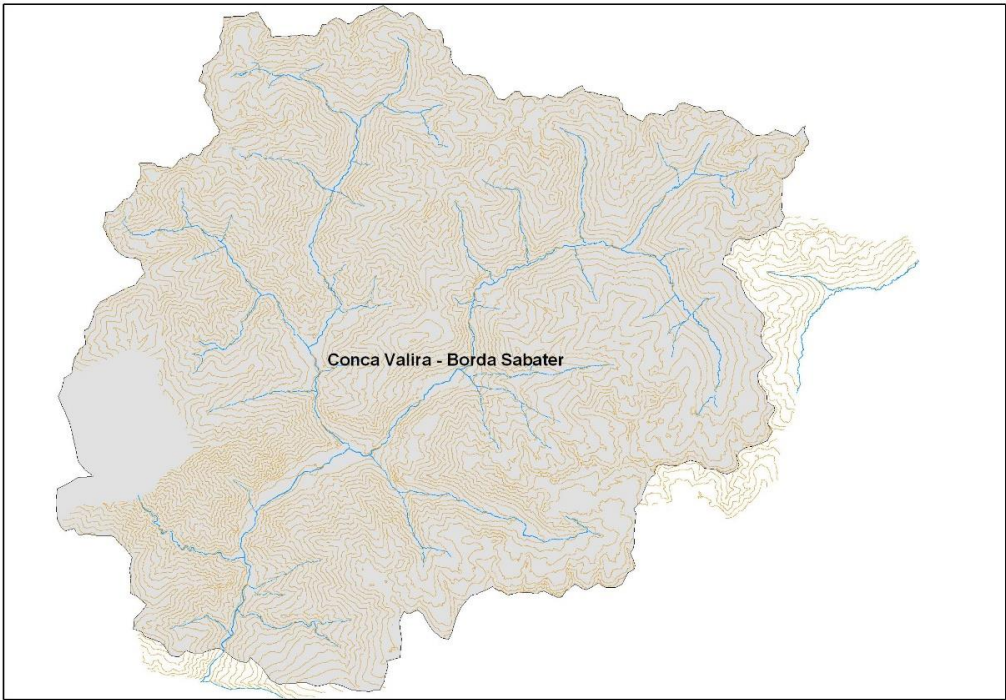


Figura 7. Mapa de situació de la conca Valira – Borda Sabater.

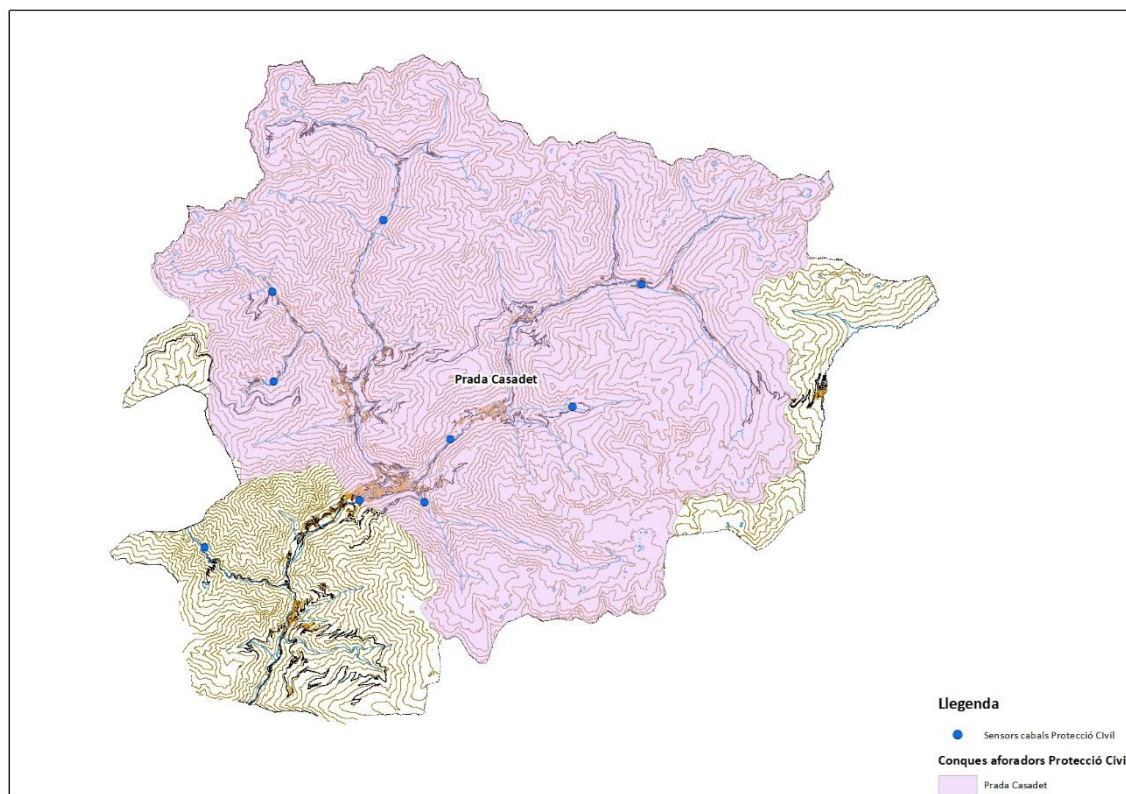


Figura 8. Mapa de situació de la conca Gran Valira a Prada Casadet (PC)

Donat que part dels cabals de fonts i torrents que drenen cap la riu Gran Valira són captats per a usos principalment domèstics i que les seves aigües no són directament abocades al riu Gran Valira sinó a la xarxa de col·lectors d'aigües residuals de l'EDAR-SUD de St. Julià, s'ha tingut en compte també el cabal procedent d'aquesta EDAR.

El cabal d'entrada a l'EDAR-SUD de St. Julià durant el 2023, segons dades facilitades pel ministeri responsable del medi ambient, ha estat de $0.37 \text{ m}^3/\text{s}$. El cabal mig del riu Gran Valira durant el 2023 ha estat de $8.18 \text{ m}^3/\text{s}$. Aquest cabal, sumat amb el procedent de l'EDAR, suposa uns $8.6 \text{ m}^3/\text{s}$, o sigui $270 \text{ Hm}^3/\text{any}$, que repartit per la superfície de la conca hidrogràfica suposa $605 \text{ L/m}^2\cdot\text{any}$.

El cabal del riu Valira del Nord, segons dades facilitades per la *Confederación Hidrológica del Ebro (CHE)* es calcula que és d'uns $0.94 \text{ m}^3/\text{s}$, o sigui $30 \text{ Hm}^3/\text{any}$. Aquest cabal, repartit per la superfície de la conca hidrogràfica suposa $203 \text{ L/m}^2\cdot\text{any}$.

El cabal del riu Valira d'Orient a Ransol, segons dades facilitades per FEDA es calcula que és d'uns $2.87 \text{ m}^3/\text{s}$, o sigui $90.4 \text{ Hm}^3/\text{any}$. Aquest cabal, repartit per la superfície de la conca hidrogràfica suposa $1105 \text{ L/m}^2\cdot\text{any}$.

El cabal del riu Madriu, segons dades facilitades per FEDA es calcula que és d'uns $0.67 \text{ m}^3/\text{s}$, o sigui $21.3 \text{ Hm}^3/\text{any}$. Aquest cabal, repartit per la superfície de la conca hidrogràfica suposa $816 \text{ L/m}^2\cdot\text{any}$.

Finalment en l'estació de Prada Casadet del riu Gran Valira, segons dades facilitades per Protecció Civil (PC) tenim valors de cabal de $5.03 \text{ m}^3/\text{s}$, que suposa un cabal específic de $447 \text{ L/m}^2\cdot\text{any}$.

En la següent taula es resumeix els valors anteriorment comentats.

Comparació		Cabals aforats			balanç hídric	
Conca	Nom de l'estació	Cabals m³/s	Cabals Hm³/any	Cabal específic (Qe) L/m²·any	Pluja útil estimada L/m²·any	Variació respecte Cabal Qe (%)
Valira Orient	FEDA-Ransol	2,87	90,42	1104,57	428,44	-61
Madriu	FEDA Madriu -Ràmio	0,67	21,26	816,21	519,27	-36
Valira Nord	CHE(A402)-Pont Escalls	0,94	29,57	202,96	367,23	81
Gran Valira (inclou EDAR)	Borda Sabater_medi ambient	8,55	269,63	604,87	381,04	-37
Riu Gran Valira	Prada Casadet_PC	5,03	158,67	446,72	397,84	-11

Taula 4. Resum dels cabals registrats durant el 2022 en diferents conques hidrogràfiques i pluja útil estimada per cada conca.

Observem en quasi tots els casos que els excedents són molt inferiors als cabals observats.

Cal tenir present que els cabals aforats poden dur associats fins un $\pm 25\%$ d'error.

En el cas de l'aforador de Borda Sabater, els cabals màxims no es poden calibrar i per tant, el valor mig global s'ha de prendre amb cautela.

A banda de les consideracions esmentades cal tenir en compte les següents limitacions en les anàlisis dutes a terme:

- En les estacions de cabal de FEDA, diàriament es procedeix a fer un balanç d'entrades (procedents de Ransol, barrancs Cortals i de Ràmio) i sortides a l'estany d'Engolasters, existint un error que no se'ns ha facilitat.

- No es té la certesa que en els aforadors utilitzats es duiguin a terme les tasques de manteniment i neteja adequades per al bon funcionament d'aquest. Així mateix tampoc es té coneixement del grau d'error associat a la corba alçades versus cabals o taula de tarat.

- En el balanç hídric les precipitacions són totes líquides (pluges) que al mateix mes ja s'incorporen en el balanç com a excedents i ETR del mes, quan en realitat hi ha mesos que les precipitacions són en forma sòlida (neu) que no s'incorpora al balanç fins mesos més tard.

- L'efecte del vent com a variador dels gruixos de neu, o l'efecte de la sublimació no es té en compte; es tenen comptabilitzades precipitacions totals (suma de pluja i neu fosa) acumulades en els pluviòmetres.

- Segons se'ns ha comentat des de l'ARI les lectures de precipitacions durant l'hivern no són sempre fiables perquè la mostra d'aigua/neu recollida en els pluviòmetres es gela i dona un registre poc real.

- La distribució de les precipitacions i temperatures es fa segons un model numèric, donat que no es disposa de suficients estacions meteorològiques.

- A l'hora de calcular la ETR es considera que tota la precipitació està disponible, no tenint-se en compte que part d'aquesta s'escapa per l'escolament superficial directe que directament alimenta a torrents i rius. En aquest sentit s'està sobrevalorant l'ETR.

- Limitacions associades al càlcul de l'ETP segons Thornthwaite que es basa exclusivament en la variable temperatura mitja mensual.

- S'està suposant que la conca és tancada, sense entrades o sortides de fora la conca, i que l'any hidrològic està tancat, o sigui que totes les precipitacions acaben descarregant o sortint de la conca al mateix any.

4.2 ANÀLISI DELS NIVELLS OBSERVATS

També per contrastar els resultats del balanç hídric es fa ús dels registres de nivells de piezòmetres/pous de la xarxa de control de les aigües de la cubeta d'Andorra la Vella, i del pla de vigilància del CTR, que gestiona el Departament de Medi Ambient i Sostenibilitat. En la següent taula i mapa s'ubica cada punt de la xarxa de seguiment piezomètric.

Seguiment piezomètric	X	Y	Z
S1	532380,9	22666,79	999,34
S2	532506,8	22643,57	1025,2
S3	532973,6	22193,23	1150,33
pou torrent	532829,6	22715,62	1025,07
S5	532795,9	22434,49	1088,42
S8b (13)	531210,4	22005,8	975,1
S7b (20)	532609,2	23071,2	994,66

Taula 5. Taula amb les coordenades Lambert III dels piezòmetres de la xarxa de seguiment

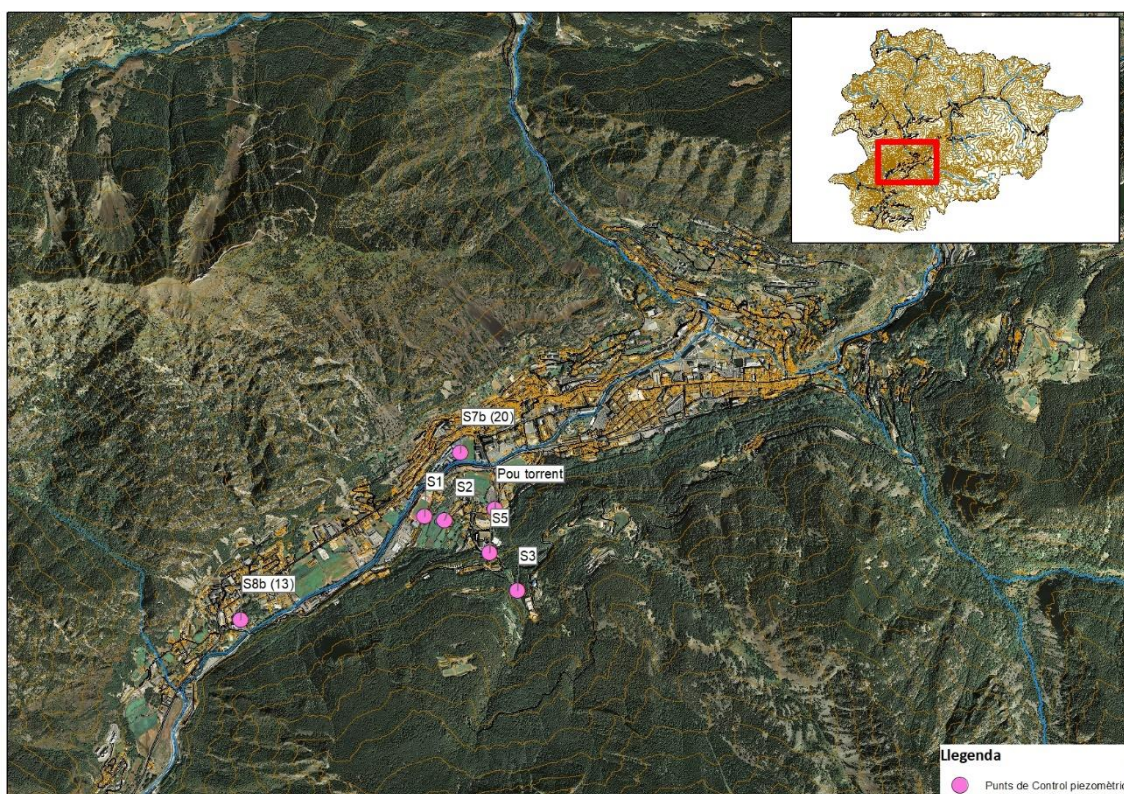


Figura 9. Mapa de situació de la xarxa de seguiment piezomètric

A continuació es presenten els gràfics amb el resum anual:

Es pot observar en l'evolució dels excedents (i precipitacions) que es tenen valors baixos entre el 2016 i el 2019 i també al 2022 i 2023 (excedents), i valors més alts al 2020 i 2021. En canvi els nivells freàtics segueixen dos models d'evolució, l'S8b que es manté molt constant al llarg dels anys, i l'S1, S2 i pou del torrent que descriuen un moviment oscil·latori amb mínims al 2017 i 2022. El pou del torrent és el que presenta més variació, i també presenta valors baixos al 2019.

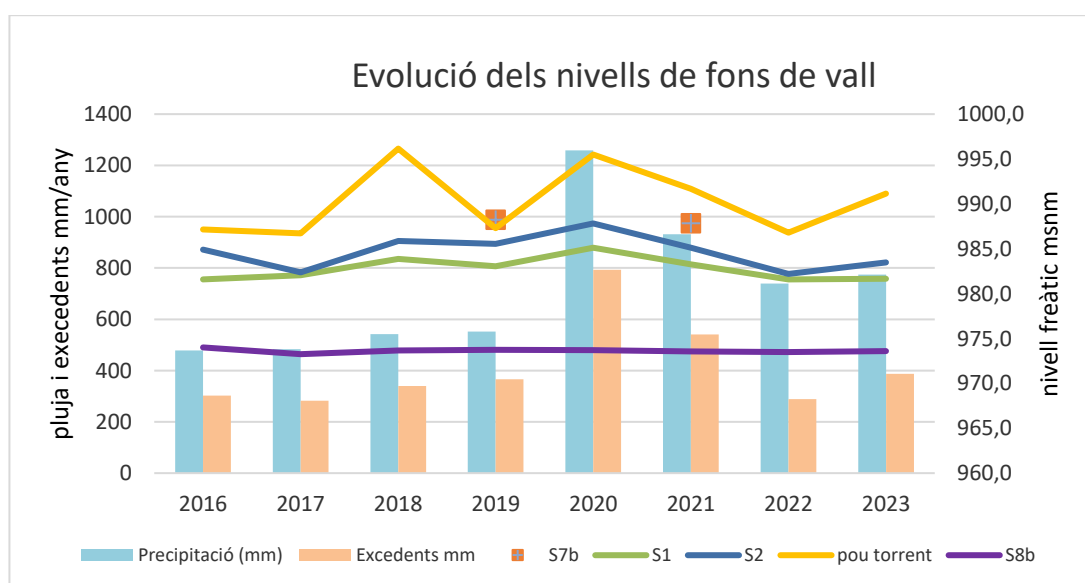


Figura 10. Evolució dels nivells piezomètrics dels punts S7b, S1, S2, pou del Torrent i S8b

De l'S5, ubicat als Serradells, s'observa una tendència a la baixa des del 2016, tot i que hi ha anys que el descens no és tan marcat o es manté, com el 2023.

L'S3, ubicat sota les instal·lacions del CTR, té una tendència a l'alça fins al 2020. Al 2021 s'impermeabilitza la llera del torrent del Forn, i observem que els nivells baixen, fins a valors mínims aquest 2023 (fins i tot ha quedat el pou sec en algun moment), amb un descens de més de 5 metres respecte els observats al 2016.

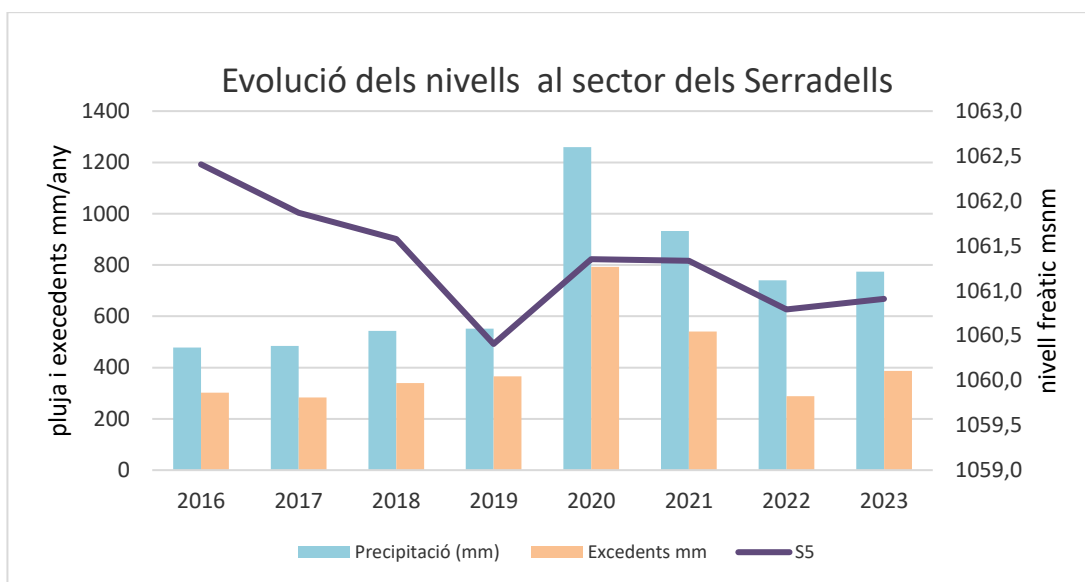


Figura 11. Evolució dels nivells piezomètrics dels punts S5

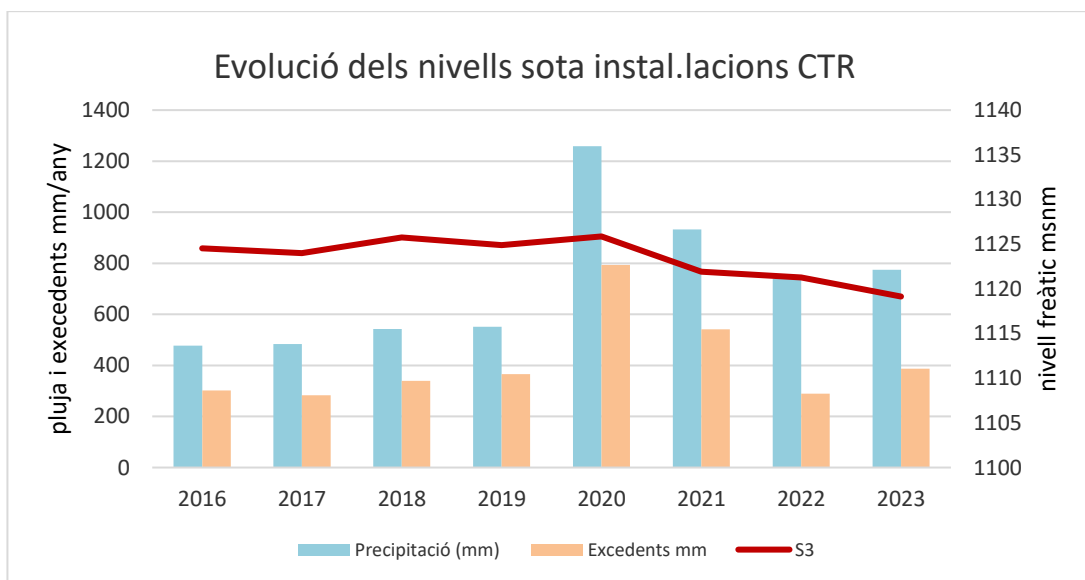


Figura 12. Evolució dels nivells piezomètrics dels punts S3

Amb més detall, els excedents mensuals tenen una evolució en dents de serra amb tendència a la baixa a partir del 2020. Observem que presenten valors màxims a la tardor i puntualment a la primavera.

Aquests valors no tenen en compte l'efecte de la neu: en moments de baixes temperatures, a l'hivern, el recurs disponible en forma de neu, no és realment disponible fins que fon, una part al mateix mes i la resta en els mesos posteriors i per tant s'incorpora l'aigua fosa al medi uns dies-mesos més tard, al llarg de la primavera.

L'anàlisi mensual en l'S1 i S2, permet veure que tenen una evolució molt similar. Tenen un comportament també en dents de serra, irregular, però a l'alça fins a mitjans del 2020 i a la baixa a partir d'aleshores.

No s'observa una relació directa i immediata entre els nivells i els excedents o pluja útil. Els nivells sembla que responen a un model exponencial de recàrrega, en el qual van incorporant l'aigua infiltrada de diferents distàncies i temps de trànsit. Amb les dades del moment, podríem parlar d'aigües que de mitjana poden tenir fins i tot un any.

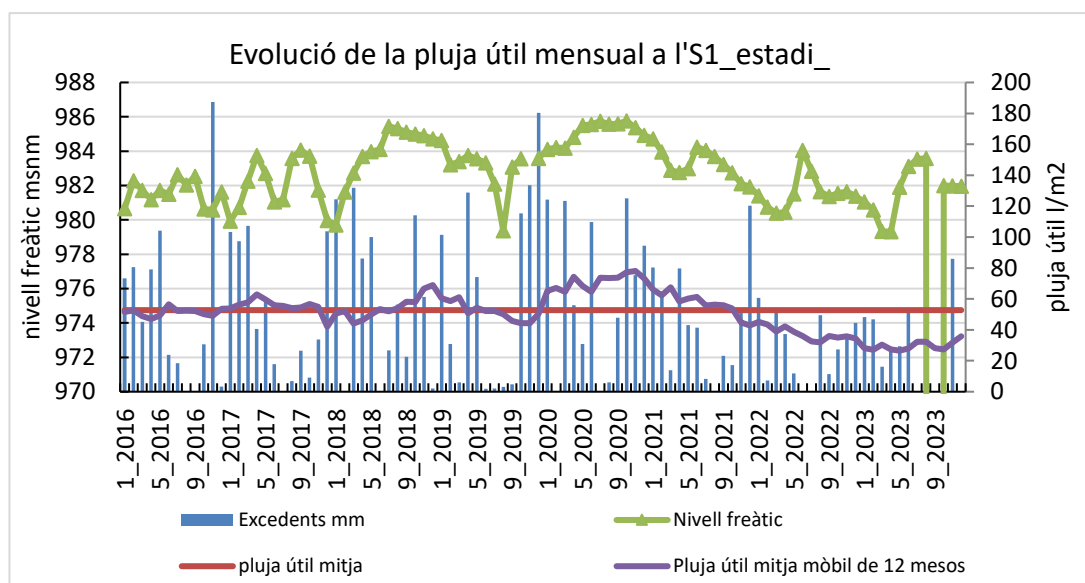


Figura 13. Evolució mensual dels nivells de l'S1 i dels excedents estimats (mitja país)

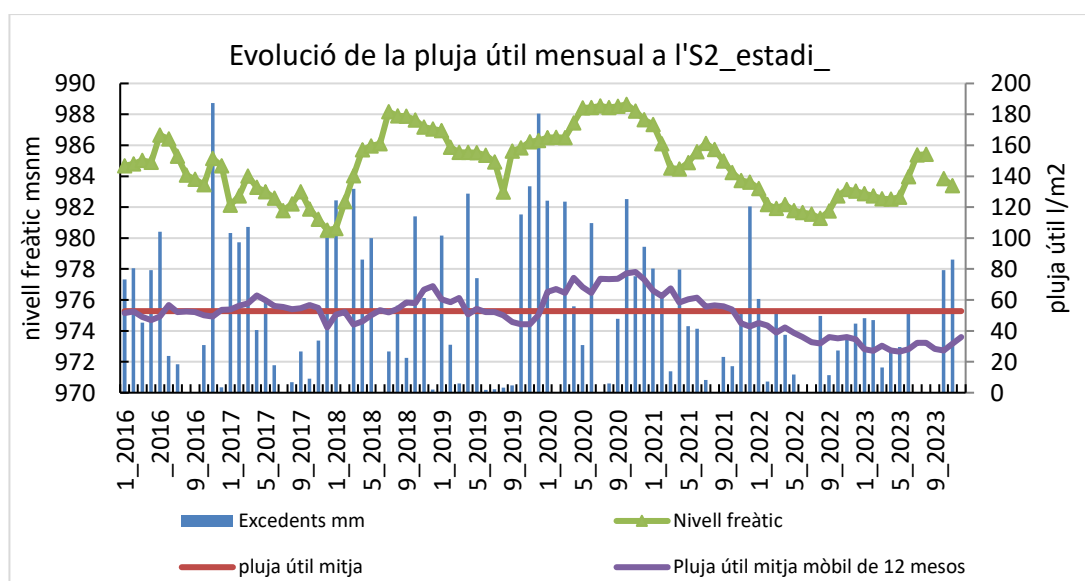


Figura 14. Evolució mensual dels nivells de l'S2 i dels excedents estimats (mitja país)

En el cas del pou del torrent, té un patró similar a l'S1 i S2, amb valors més baixos abans del maig del 2020 i alts fins a finals del mateix 2020. En detall es tenen nivells baixos des dels inicis del 2016 fins al desembre del 2019. Pugen suaument fins al març del 2020 i més intensament fins al maig del 2020, que s'estabilitzen fins a l'octubre del 2020, moment que s'inicia un descens suau fins al maig del 2021 i més fort fins al juliol. Després semblen recuperar-se fins al setembre del 2021 i tornen a caure fins al mes de maig del 2023. A l'estiu (fins al juliol) del 2023 es recuperen amb valors similars als del 2020, i fins a finals del 2023 disminueixen suaument.

Com en el cas de l'S1 i S2 el decalatge entre les pluges i la recàrrega de l'aquífer no sembla immediat, podent ser de varis mesos..

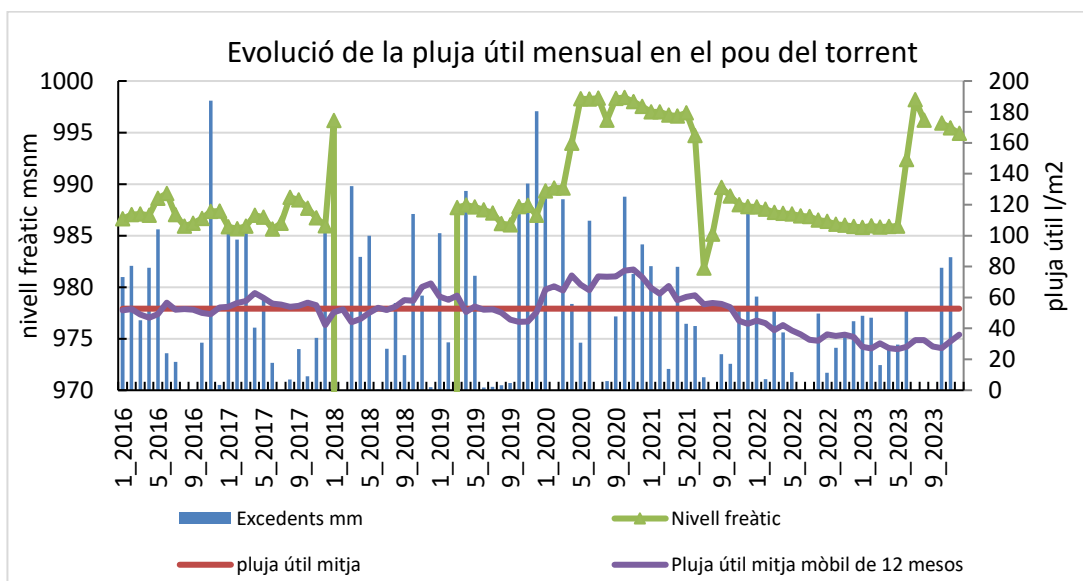


Figura 15. Evolució mensual dels nivells el pou del torrent i dels excedents estimats (mitja país)

En l'S3 s'inicia el seguiment amb nivells mitjos que remunten de manera irregular fins a la primavera del 2017 moment que inicien un descens fins a un nivell mínim al gener del 2018. Tendeix a augmentar fins al març del 2020, tot i que entre aquestes dates hi ha també moments d'alts (primavera del 2018 i 2019) i baixos (estiu del 2019). A partir de finals d'hivern del 2020 els nivells comencen a baixar, irregularment.

En l'S5 la tendència del nivell és a la baixa des de l'inici del seguiment fins a finals del 2022, tot i que presenta una evolució sinusoidal amb moments de nivells més alts.

En el cas del seguiment fet a l'S3 i S5 sembla que els nivells i els excedents també tenen un decalatge d'uns mesos entre la infiltració i la recàrrega de l'aquífer, però no tan dilatada com en l'aquífer de l'S1 i S2.

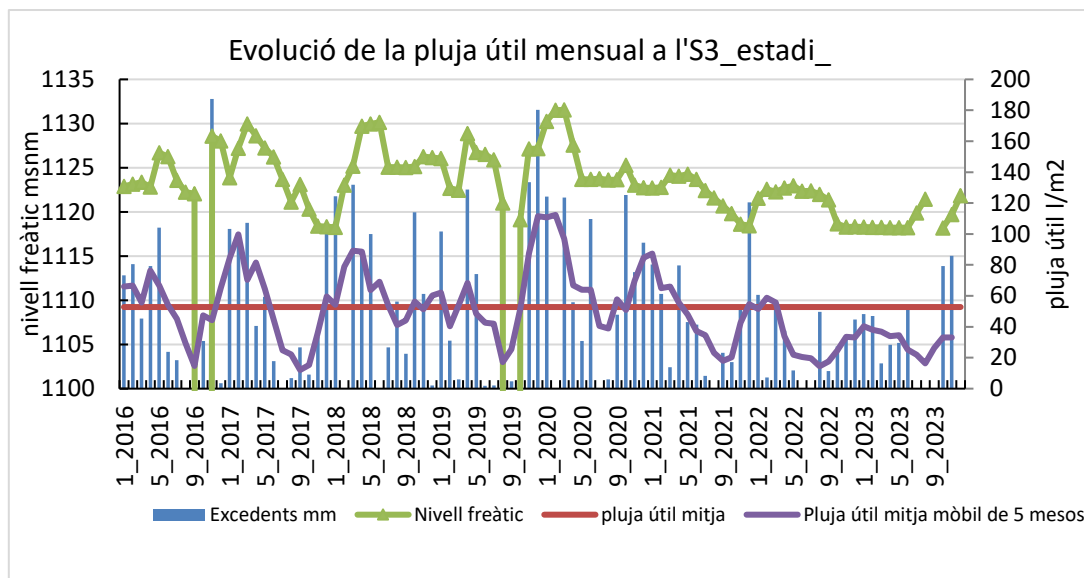


Figura 16. Evolució mensual dels nivells de l'S3 i dels excedents estimats (mitja país)

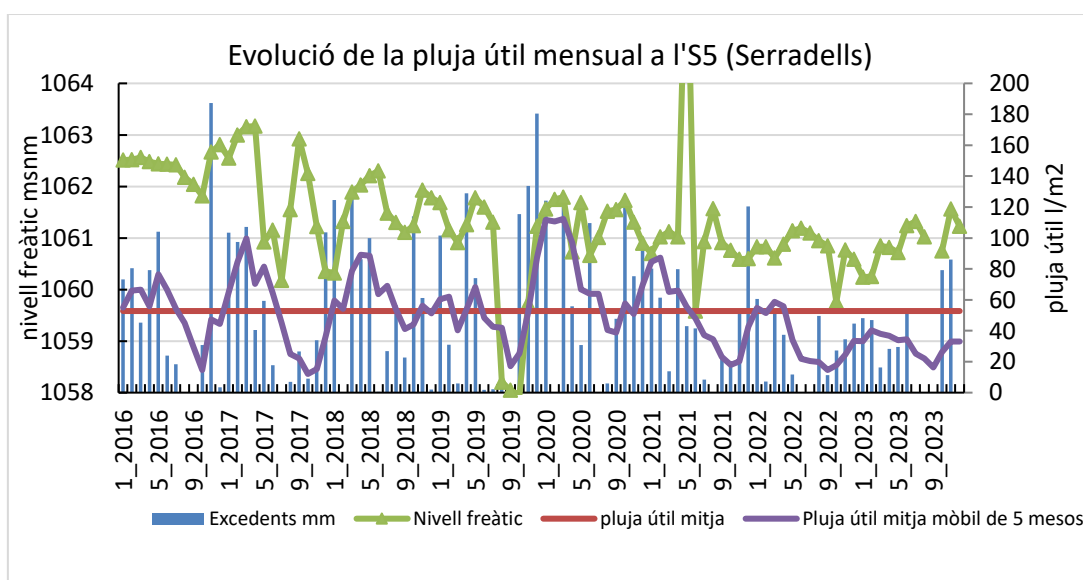


Figura 17. Evolució mensual dels nivells de l'S5 i dels excedents estimats (mitja país)

En el cas de l'S8b, la tendència del nivell freàtic és també a la baixa, es parteix de nivells alts al gener del 2016, i va baixant, amb certes remuntades puntuals, com la de mitjans del 2023.

Amb les dades que tenim no acabem de trobar l'ajust entre infiltració i nivells. En el següent gràfic s'ha pensat en un decalatge de varis mesos.

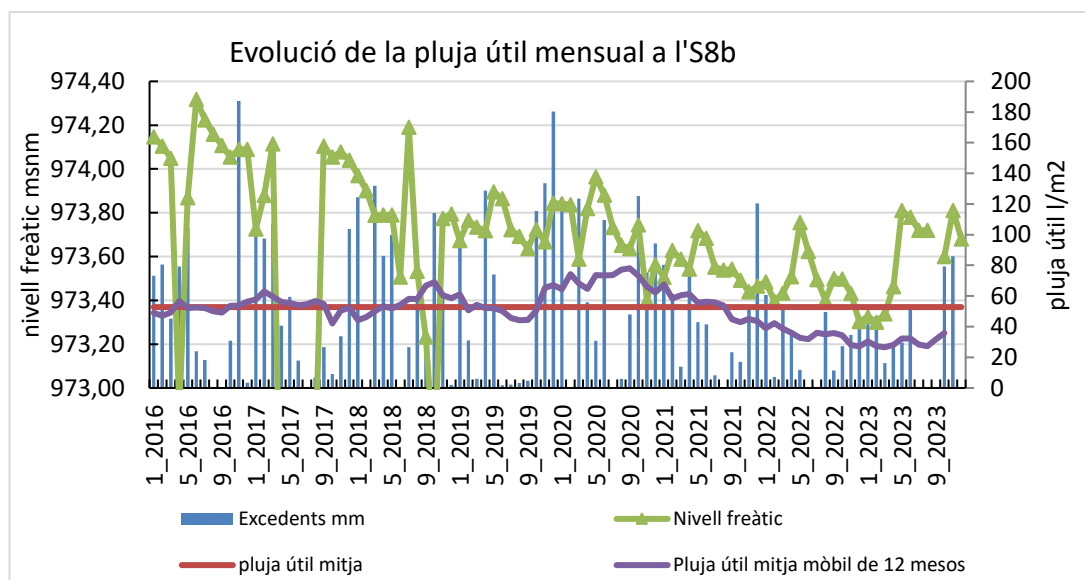


Figura 18. Evolució mensual dels nivells de l'S8b i dels excedents estimats (mitja país)

Del sondeig S7 no es tenen dades dels darrers anys.

5 EL BALANÇ HÍDRIC EN LES UNITATS HIDROGEOLÒGIQUES

De les diferents unitats hidrogeològiques identificades en l'estudi de les *Aigües subterrànies del Principat d'Andorra* (Govern d'Andorra, 2007) es mostra una taula resum amb els resultats del balanç hídric dut a terme.

El mètode de càlcul per estimar la pluja útil de cada unitat ha estat mitjançant el càlcul de l'ETP segons Thornthwaite.

En el conjunt del territori estudiat (que tal i com s'ha comentat es treballa a nivell de conques hidrogeològiques que inclouen tota la conca hidrogràfica del Valira i conca hidrogràfica del riu de l'Arieja, i és de 522 Km²) la pluja útil ha estat el 2023 d'uns 203 Hm³/any, calculats mitjançant el balanç hídric amb el mètode de Thornthwaite, i d'aquests, 182 Hm³/any són disponibles, doncs es fixa la xifra del 10% de la pluja útil com a aigua destinada als ecosistemes aquàtics -cabals ecològics mínims estimats-.

Repartit entre el territori andorrà (467 Km²), la pluja útil estimada mitja del 2023 representa uns 181 Hm³/any. D'aquests, 163 Hm³/any serien disponibles, reservant-se el 10% com a cabals "ecològics mínims estimats".

Nom	Superfície (m2)	ETR (mm)	Excedents (mm)	P (mm)	T (°C)	Precipitació (Hm3/any)	ETR (Hm3/any)	Excedents (Hm3/any)	Cabal disponible (Hm3/any)	Precipitació respecte mitjana (%)	Temperatura respecte mitjana (°C)	Comportament segons P	Comportament segons T
Arinsal	16.551.735,91	339,71	445,57	785,50	6,14	13,00	5,62	7,37	6,64	70,00%	1,69	Sec	Càlid
Ariège	45.628.658,41	381,38	452,67	834,48	4,04	38,08	17,40	20,65	18,59	70,10%	-0,70	Sec	Fred
Coll de la Gallina	17.321.678,00	395,58	283,82	682,33	9,74	11,82	6,85	4,92	4,42	72,45%	2,12	Sec	Càlid
Conca d'Erts	15.149.624,07	414,34	289,47	711,83	8,43	10,78	6,28	4,39	3,95	71,50%	1,52	Sec	Càlid
Conca de Setúria	6.664.367,23	393,81	364,74	772,90	7,18	5,15	2,62	2,43	2,19	71,64%	2,06	Sec	Càlid
Cubeta Encamp	768.145,17	459,64	192,43	667,71	9,92	0,51	0,35	0,15	0,13	77,33%	0,69	Sec	Càlid
Cubeta d'Andorra	2.268.308,61	431,65	177,82	623,92	11,91	1,42	0,98	0,40	0,36	77,71%	1,46	Sec	Càlid
Cubeta d'Incles	399.509,12	424,09	252,24	688,00	6,27	0,27	0,17	0,10	0,09	66,00%	-0,08	Sec	Normal
Dels Orris	12.728.986,14	401,82	389,57	797,45	5,86	10,15	5,11	4,96	4,46	75,24%	0,69	Sec	Càlid
El Forn	2.632.292,26	438,60	276,27	736,13	6,88	1,94	1,15	0,73	0,65	71,87%	0,68	Sec	Càlid
Encamp	9.831.249,34	434,27	308,13	745,33	7,85	7,33	4,27	3,03	2,73	76,48%	0,78	Sec	Càlid
Enclar	16.449.982,02	402,12	276,70	680,56	9,99	11,20	6,61	4,55	4,10	73,77%	1,83	Sec	Càlid
Engolasters-Pessons	23.004.376,30	398,97	431,72	832,13	6,02	19,14	9,18	9,93	8,94	79,72%	1,01	Sec	Càlid
Estall Serrer	256.289,80	410,94	422,27	841,64	6,53	0,22	0,11	0,11	0,10	82,05%	0,93	Sec	Càlid
Juclar	17.448.266,46	348,01	459,66	807,36	3,71	14,09	6,07	8,02	7,22	68,45%	-0,34	Sec	Normal
La Bartra	227.795,13	444,44	213,30	663,36	10,68	0,15	0,10	0,05	0,04	80,24%	0,97	Sec	Càlid
La Cortinada-Sornàs	240.503,74	441,70	178,01	638,43	9,79	0,15	0,11	0,04	0,04	69,89%	0,96	Sec	Càlid
Llorts - Arans	434.935,60	439,35	167,81	630,11	9,34	0,27	0,19	0,07	0,07	67,11%	0,89	Sec	Càlid
Madriu	40.121.360,95	374,82	501,91	876,46	5,68	35,16	15,04	20,14	18,12	82,53%	1,12	Sec	Càlid
Montmalús	7.594.231,04	370,62	534,76	903,70	4,14	6,86	2,81	4,06	3,65	78,58%	0,53	Sec	Càlid
Ordino	16.960.118,50	424,01	287,91	722,65	7,82	12,26	7,19	4,88	4,39	72,30%	1,02	Sec	Càlid
Padern	6.040.215,34	461,34	223,74	694,05	10,19	4,19	2,79	1,35	1,22	79,80%	1,26	Sec	Càlid
Pardines	5.125.714,31	400,67	249,95	656,91	10,86	3,37	2,05	1,28	1,15	74,99%	1,74	Sec	Càlid
Pla de l'Ingla	96.831,14	404,20	449,26	859,13	6,04	0,08	0,04	0,04	0,04	81,49%	0,93	Sec	Càlid
Prat Primer	13.956.181,56	415,59	336,58	756,37	8,73	10,56	5,80	4,70	4,23	80,74%	1,65	Sec	Càlid
Pui Olivesa - Runer	400.975,76	401,90	160,56	583,48	12,42	0,23	0,16	0,06	0,06	73,62%	1,39	Sec	Càlid
Riu Muntaner	6.750.482,65	417,86	307,98	730,46	8,48	4,93	2,82	2,08	1,87	76,44%	1,64	Sec	Càlid
Ràmio	231.213,47	443,02	309,83	759,92	8,37	0,18	0,10	0,07	0,06	82,23%	1,04	Sec	Càlid
Salines	18.401.587,26	356,40	389,41	746,34	6,25	13,73	6,56	7,17	6,45	68,46%	1,10	Sec	Càlid
Sant Julià	33.250.793,13	405,69	347,26	756,82	8,85	25,16	13,49	11,55	10,39	79,10%	1,81	Sec	Càlid
Sornàs-Pont d'Ordino	259.304,35	463,34	158,24	645,54	10,17	0,17	0,12	0,04	0,04	72,95%	1,01	Sec	Càlid
Valira del Nord	45.880.845,18	329,71	445,00	774,80	5,29	35,55	15,13	20,42	18,38	68,30%	0,84	Sec	Càlid
Òs de Civís	22.777.602,33	393,55	346,07	740,77	8,26	16,87	8,96	7,88	7,09	71,18%	2,53	Sec	Càlid
Coma Ransol	98.512,69	403,94	286,37	696,90	6,12	0,07	0,04	0,03	0,03	66,05%	0,25	Sec	Normal
Valira d'Orient	77.701.776,81	372,87	416,58	791,01	4,68	61,46	28,97	32,37	29,13	70,49%	0,35	Sec	Normal
Montaup	16.994.092,97	389,26	392,15	786,89	6,07	13,37	6,62	6,66	6,00	72,87%	0,84	Sec	Càlid
Cubeta Montaup	286.720,34	401,46	338,74	750,38	5,55	0,22	0,12	0,10	0,09	69,51%	0,75	Sec	Càlid
Aldosa	7.713.967,17	439,67	279,80	723,83	8,51	5,58	3,39	2,16	1,94	76,79%	1,10	Sec	Càlid
Conca de Sispony	11.643.664,71	419,09	303,87	728,21	8,44	8,48	4,88	3,54	3,18	74,10%	1,68	Sec	Càlid
Cubeta de la Massana	1.970.611,14	454,68	183,42	653,17	10,38	1,29	0,90	0,36	0,33	74,74%	1,22	Sec	Càlid
Nous Límits	522.263.506,11	385,20	388,13	776,27	6,51	405,42	201,17	202,71	182,44	73,64%	0,94	Sec	Càlid
Límits administratius	467.451.286,71	384,88	386,25	774,16	6,55	361,88	179,91	180,55	162,50	73,09%	1,00	Sec	Càlid

Taula 6. Resum balanç hídric de les unitats hidrogeològiques. Any 2023. Mitja del període 1981-2010

La distribució de les precipitacions, ETR, temperatura i pluja útil en les diferents unitats hidrogeològiques es mostra en les següents figures. En relació a les precipitacions s'observa el següent:

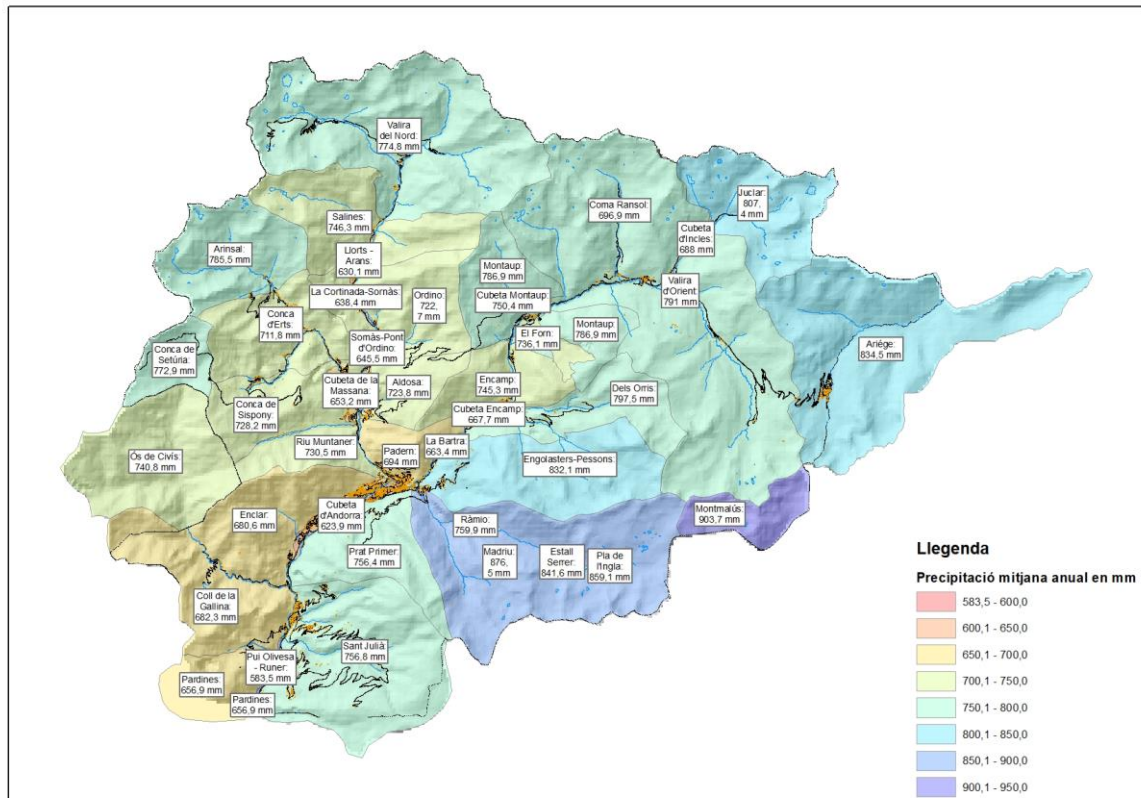


Figura 19. Mapa de distribució de les precipitacions en les diferents unitats hidrogeològiques descrites en l'estudi del M.I. Govern, 2007

Les unitats amb precipitacions superiors són les ubicades a l'est del país, per exemple a Montmalús, amb 900 mm/any, i les que han presentat valors més baixos, són les del sud-oest, per exemple a la unitat de les Pardines, amb 650 mm.

Si ho comparem amb la mitjana climàtica de 30 anys 1981-2010 observem que es tracta d'un any sec en tot el país.

Comportament de la precipitació anual per Unitat hidrogeològiques. Any 2023

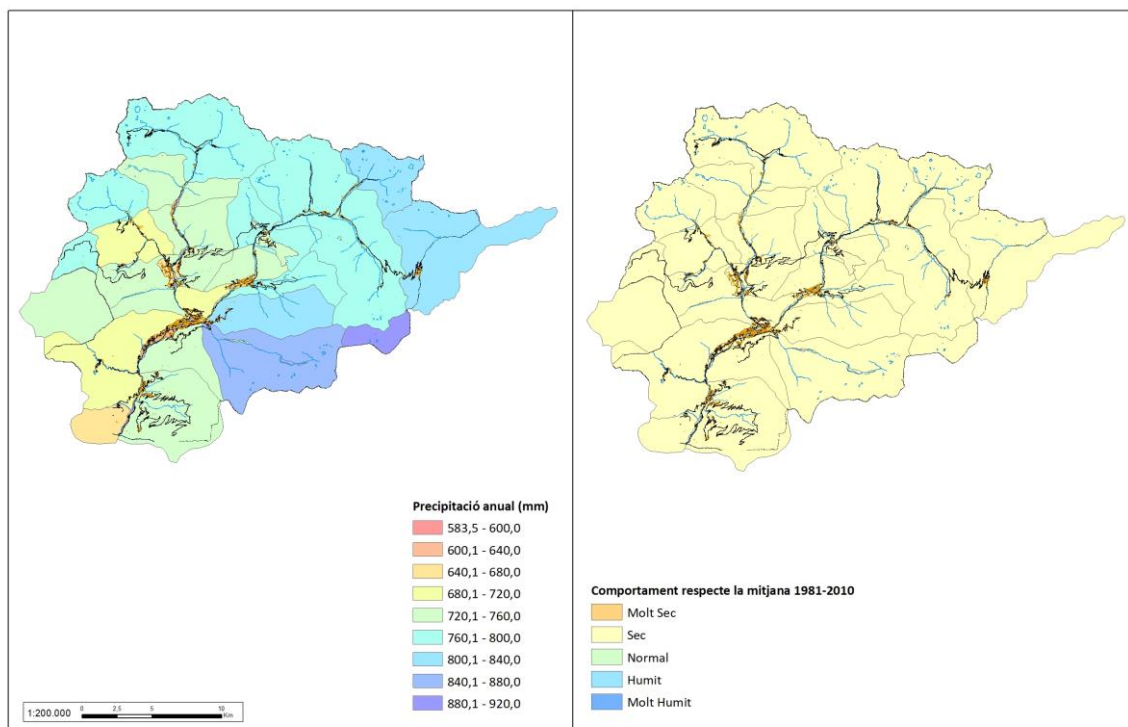


Figura 20. Mapa comparatiu de les precipitacions del 2023 amb la mitjana climàtica 1981-2010 en les diferents unitats hidrogeològiques

L'anàlisi estacional (hivern correspon a les lectures del mes de gener-març, la primavera a les lectures d'abril-juny, l'estiu a les del juliol-setembre, i les de la tardor a octubre-desembre) i comparant amb la mitjana 1981-2010, permet veure que ha estat sec tot l'any i a tot el país, excepte a l'hivern que en alguns sectors de la meitat occidental, i a la primavera, en tot el perímetre més oriental, s'han registrat valors més normals.

Comportament de la precipitació hivern per unitats hidrogeològiques. Any 2023

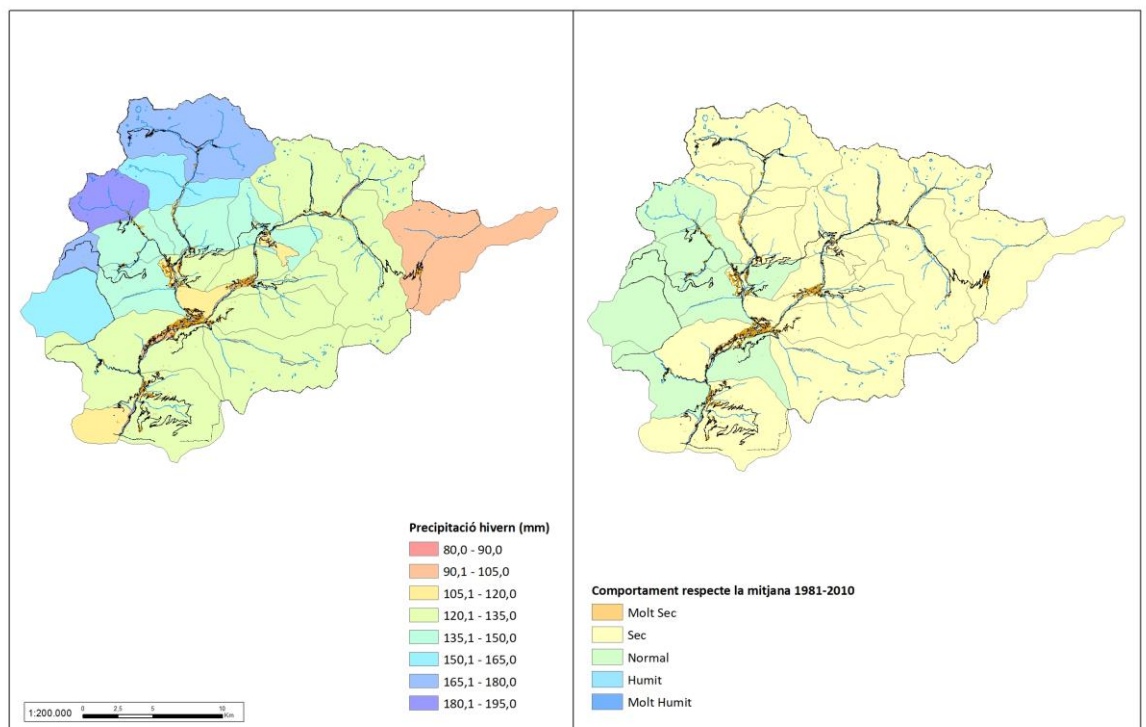


Figura 21. Mapa comparatiu de les precipitacions de l'hivern del 2023 amb la mitjana climàtica 1981-2010 en les diferents unitats hidrogeològiques

Comportament de la precipitació primavera per unitats hidrogeològiques. Any 2023

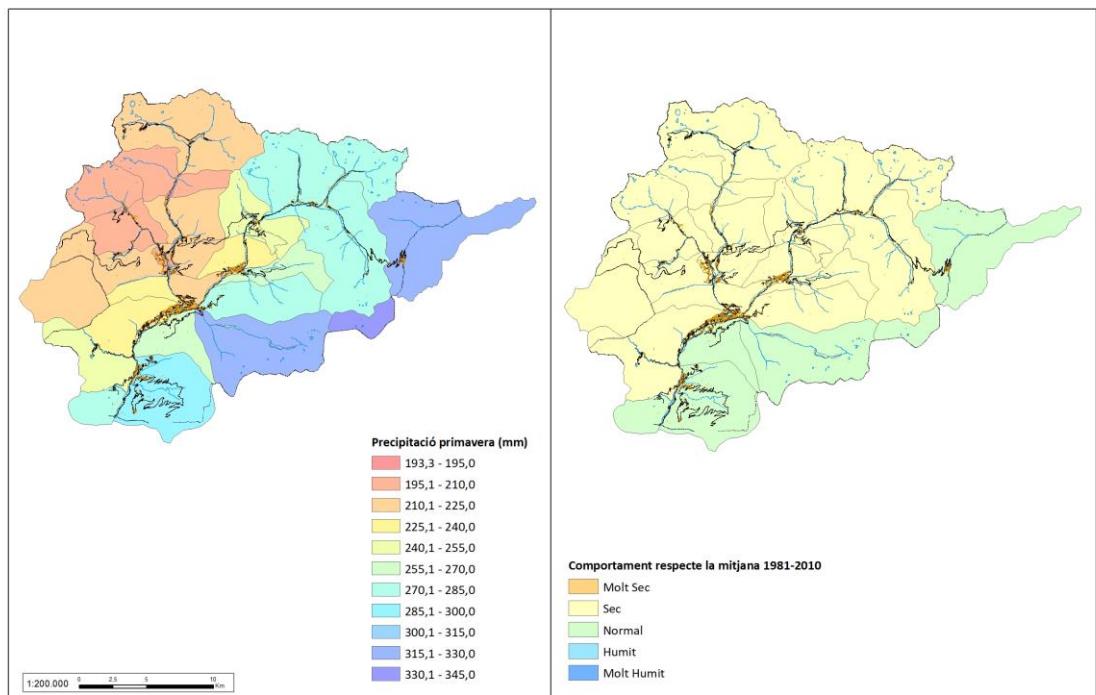


Figura 22. Mapa comparatiu de les precipitacions de la primavera del 2023 amb la mitjana climàtica 1981-2010 en les diferents unitats hidrogeològiques

Comportament de la precipitació estiu per unitats hidrogeològiques. Any 2023

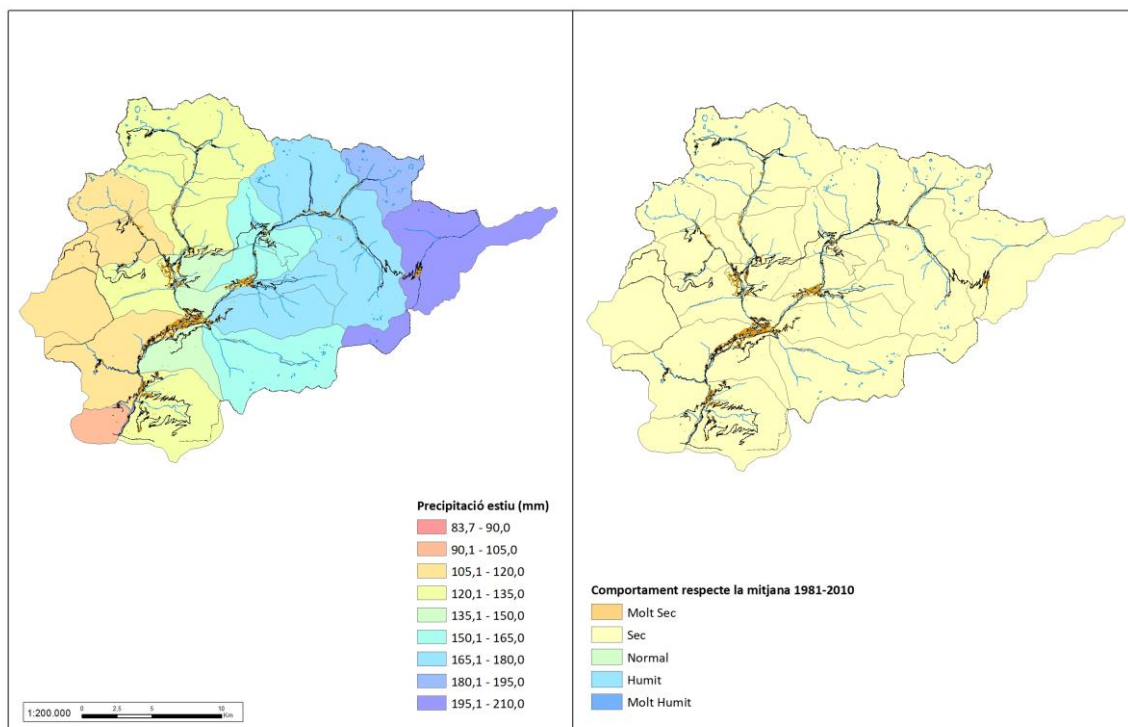


Figura 23. Mapa comparatiu de les precipitacions de l'estiu del 2023 amb la mitjana climàtica 1981-2010 en les diferents unitats hidrogeològiques

Comportament de la precipitació tardor per unitats hidrogeològiques. Any 2023

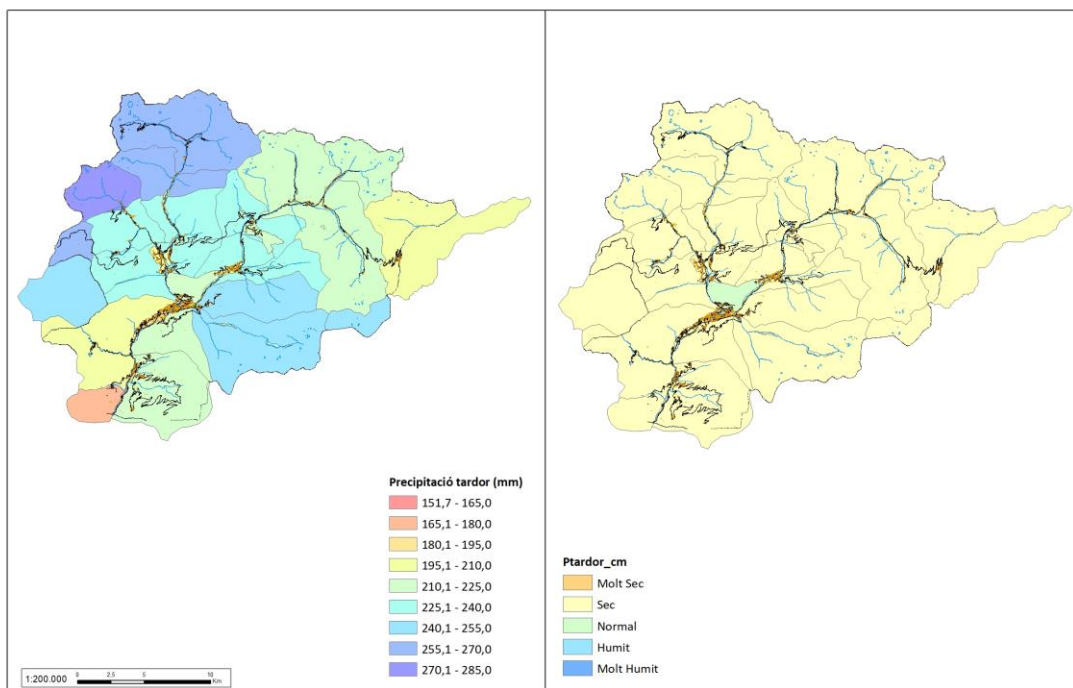


Figura 24. Mapa comparatiu de les precipitacions de la tardor del 2023 amb la mitjana climàtica 1981-2010 en les diferents unitats hidrogeològiques

Si mirem el mapa de temperatures de l'hivern, s'observa que de mitjana s'arriba a -5.8°C , i la franja amb una temperatura mitjana per sota els 0°C se situa en la part més oriental, fora dels fons de vall.

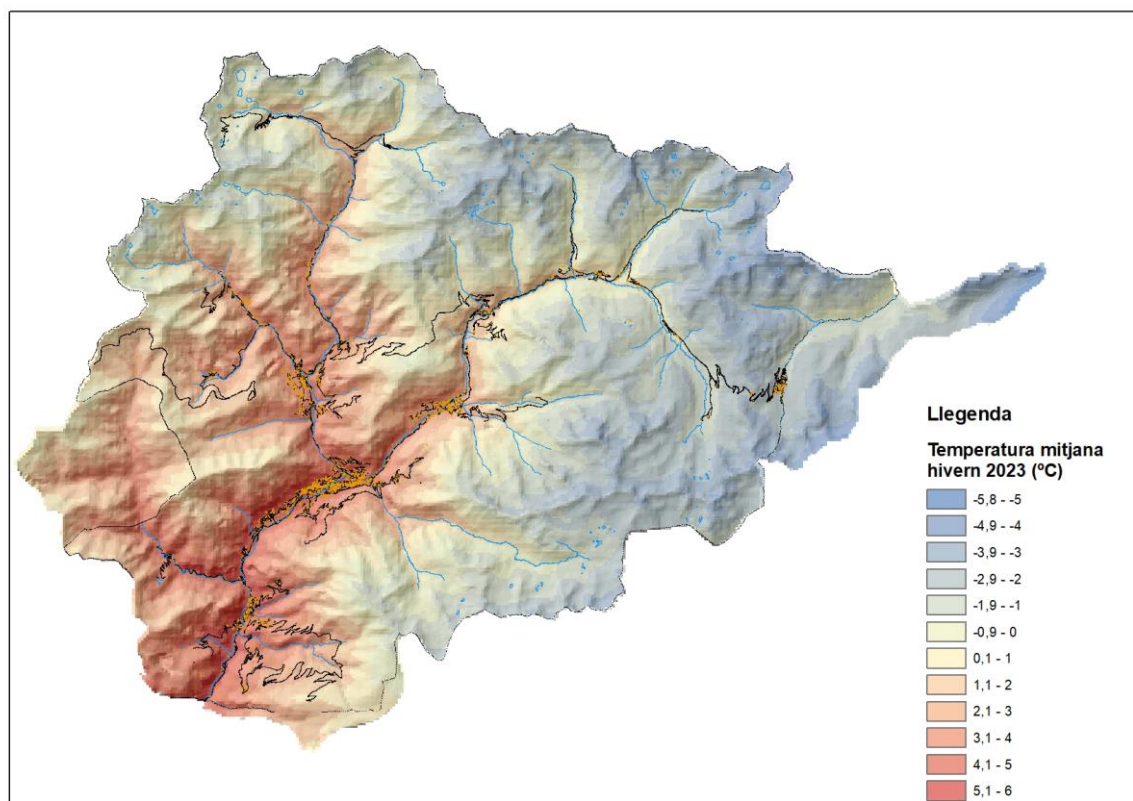


Figura 25. Mapa comparatiu de la temperatura a l'hivern del 2023

Les temperatures, quan també les comparem amb la mitjana 1981-2010 veiem que han estat càlides al conjunt del territori, tendint a normals i fredes cap a l'extrem nord-oriental.

Comportament de la temperatura anual per unitats hidrogeològiques. Any 2023

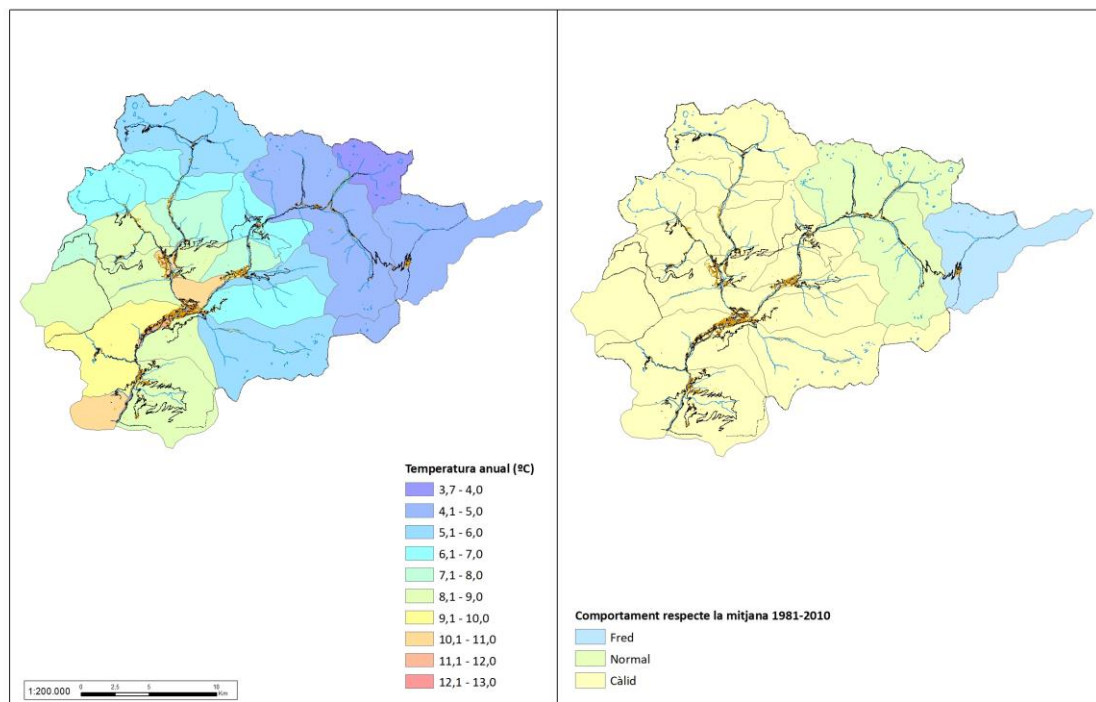


Figura 26. Mapa comparatiu de la temperatura del 2023 amb la mitjana climàtica 1981-2010 en les diferents unitats hidrogeològiques

Trimestralment, s'observa que al conjunt del territori i al llarg de l'any, les temperatures han estat més càlides, amb l'excepció de la franja més nord-oriental que ha estat normal tot l'any o fins i tot més freda a l'hivern i primavera.

Comportament de la temperatura hivern per unitats hidrogeològiques. Any 2023

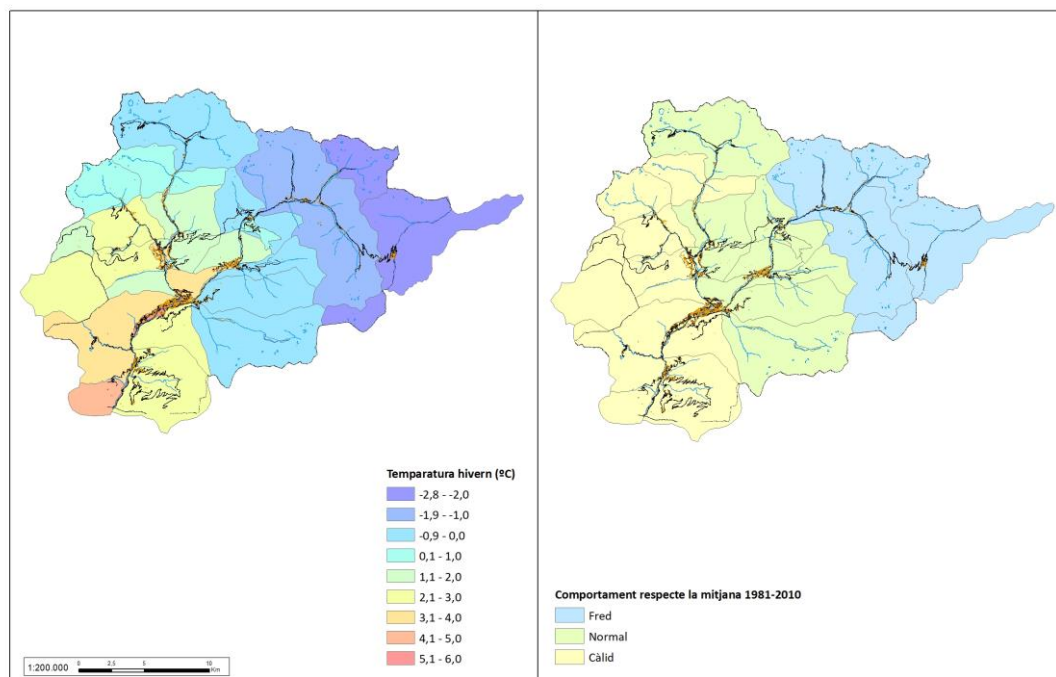


Figura 27. Mapa comparatiu de la temperatura de l'hivern del 2023 amb la mitjana climàtica 1981-2010 en les diferents unitats hidrogeològiques

Comportament de la temperatura primavera per unitats hidrogeològiques. Any 2023

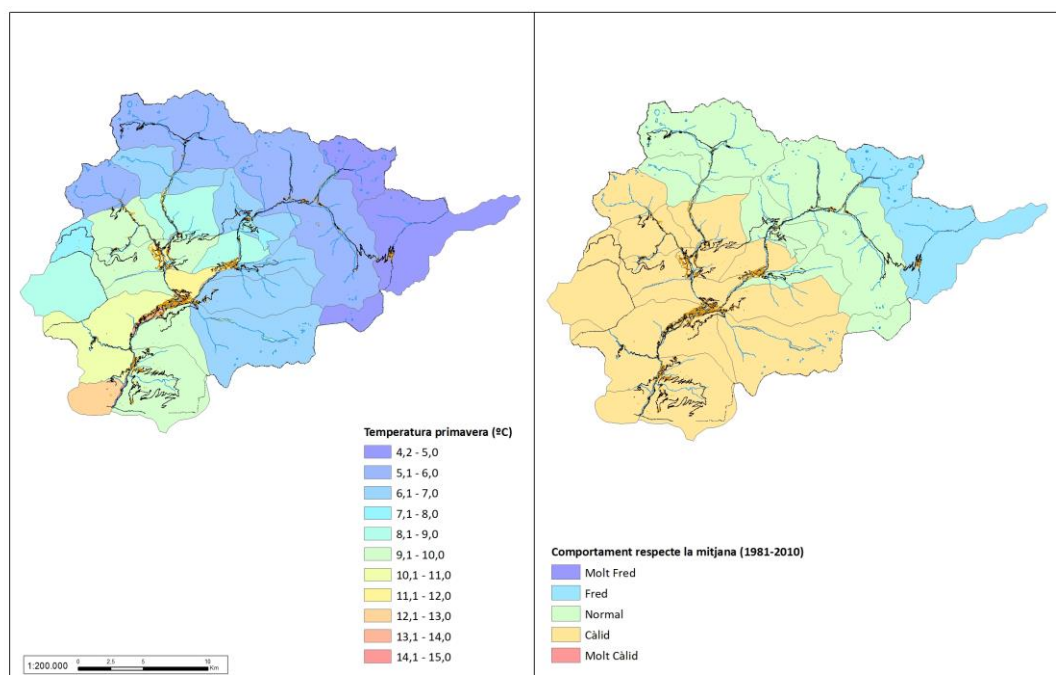


Figura 28. Mapa comparatiu de la temperatura de la primavera del 2023 amb la mitjana climàtica 1981-2010 en les diferents unitats hidrogeològiques

Comportament de la temperatura estiu per unitats hidrogeològiques. Any 2023

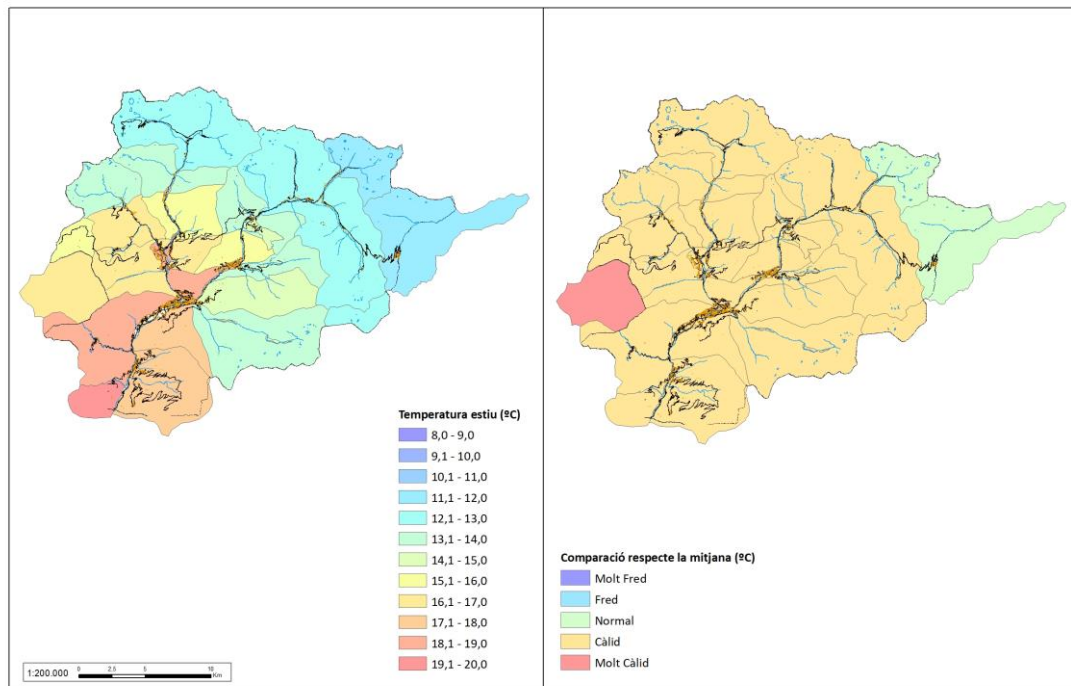


Figura 29. Mapa comparatiu de la temperatura de l'estiu del 2023 amb la mitjana climàtica 1981-2010 en les diferents unitats hidrogeològiques

Comportament de la temperatura tardor per unitats hidrogeològiques. Any 2023

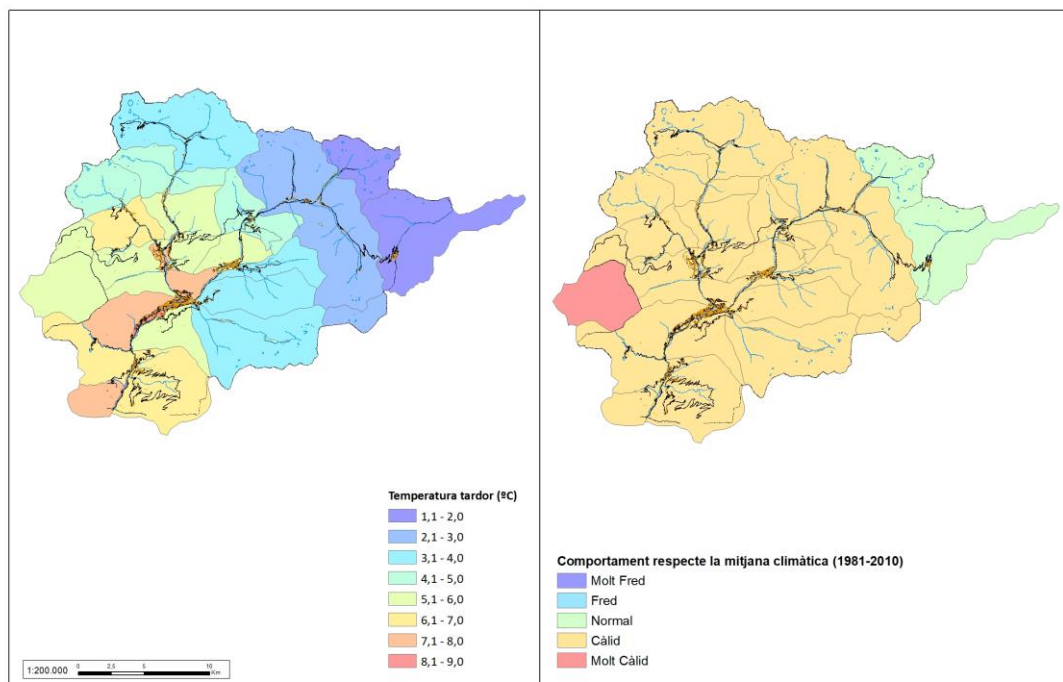


Figura 30. Mapa comparatiu de la temperatura de la tardor del 2023 amb la mitjana climàtica 1981-2010 en les diferents unitats hidrogeològiques

En relació a l'ETR, trobem valors màxims en les unitats de fons de vall i centre i sud del país, per exemple a la UH de Sant Julià i Pardines, amb valors per sobre els 400 mm, i valors més baixos en les unitats del nord, com a Arinsal i Valira del Nord.

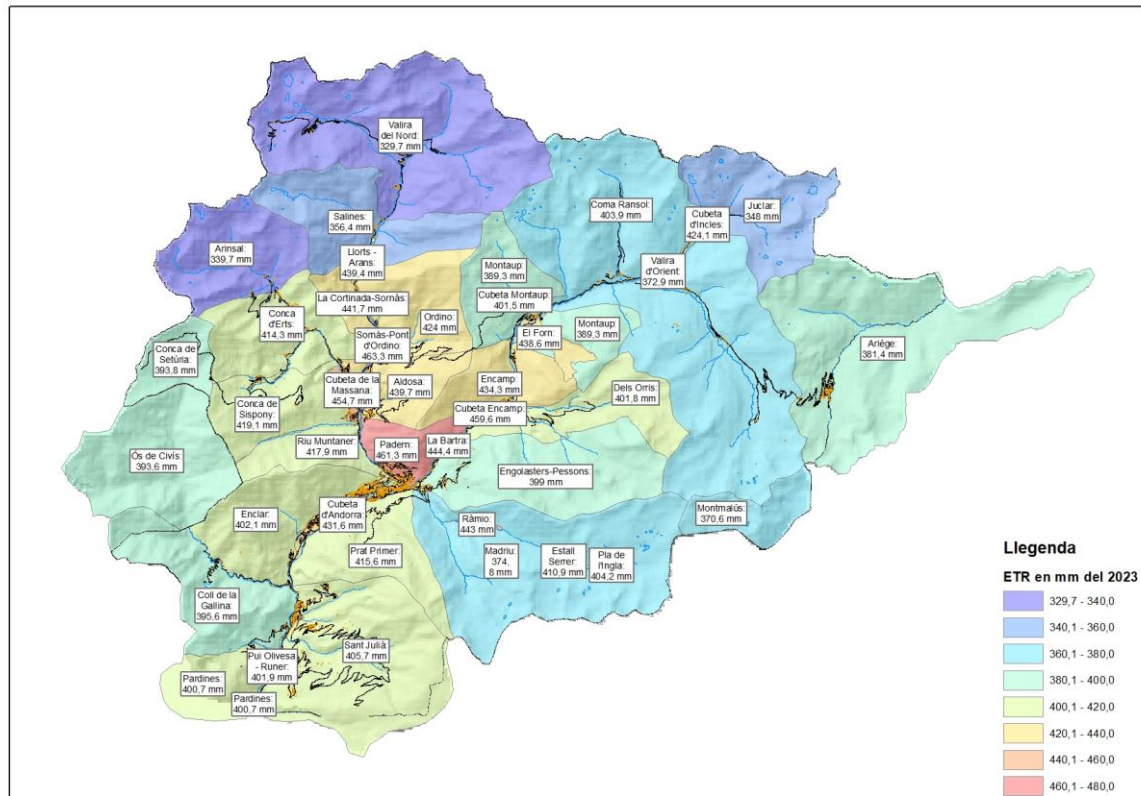


Figura 31. Mapa de distribució de l'ETR en les diferents unitats hidrogeològiques descrites en l'estudi del M.I. Govern, 2007

En relació als excedents d'aigua, les unitats hidrogeològiques amb valors superiors són les ubicades a l'est i nord del país (Madriu, Montmalús, Arieja), en contraposició amb les que presenten valors més baixos, les del sud i centre, com Padern i Pardines.

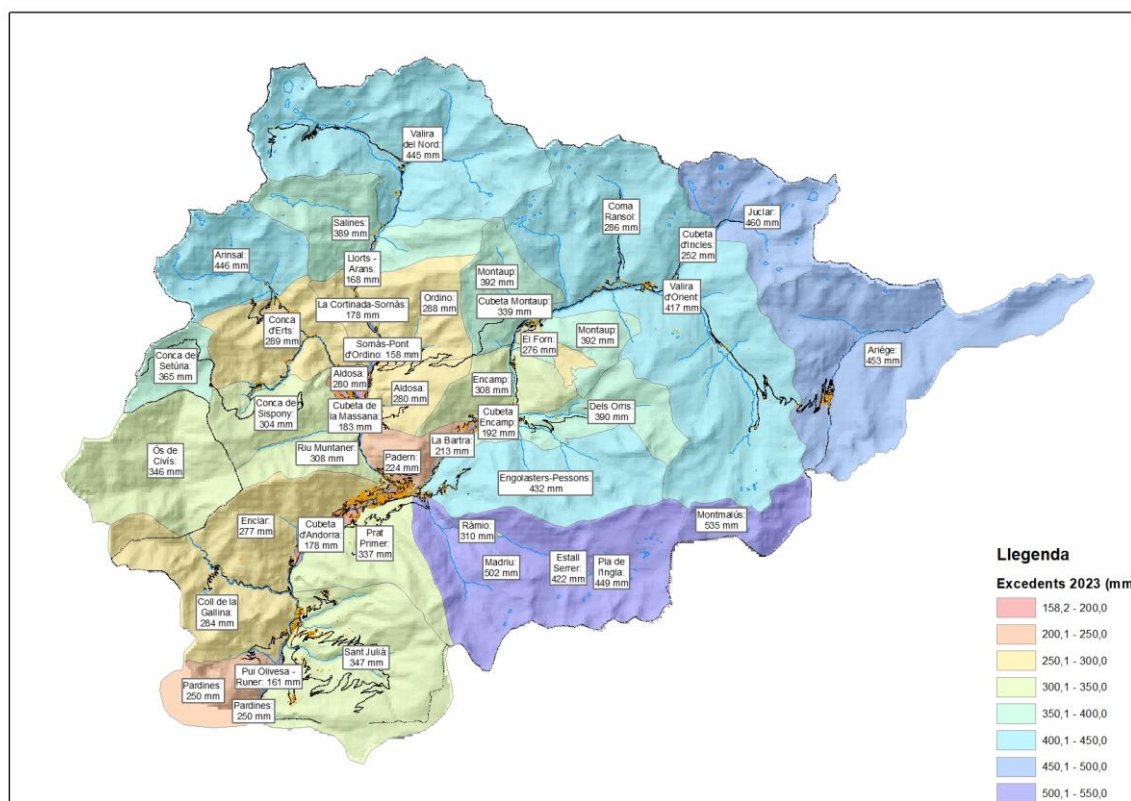


Figura 32. Mapa de distribució de la pluja útil en les diferents unitats hidrogeològiques descrites en l'estudi del M.I. Govern, 2007

En la següent figura es representa els excedents de cada conca com a percentatge de desviació respecte el valor mig per al període 1981-2010. Es pot observar que en la majoria de UH els excedents han estat per sota la mitjana, entre un 20 i uns 60%.

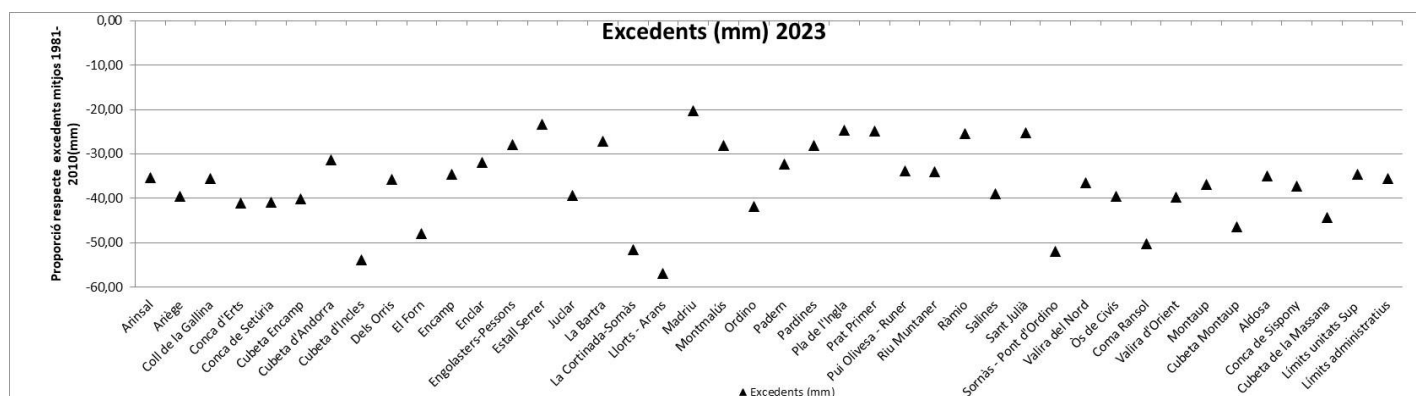


Figura 33. Gràfic de distribució dels excedents en les diferents unitats hidrogeològiques descrites en l'estudi del M.I. Govern, 2007. Si el valor mig representa el 100%, els valors del gràfic representen el percentatge per sobre o per sota la mitjana.

En detall, si comparem els excedents del 2023 amb la mitjana veiem que ha estat un any sec.

Comportament dels excedents anuals per unitats hidrogeològiques. Any 2023

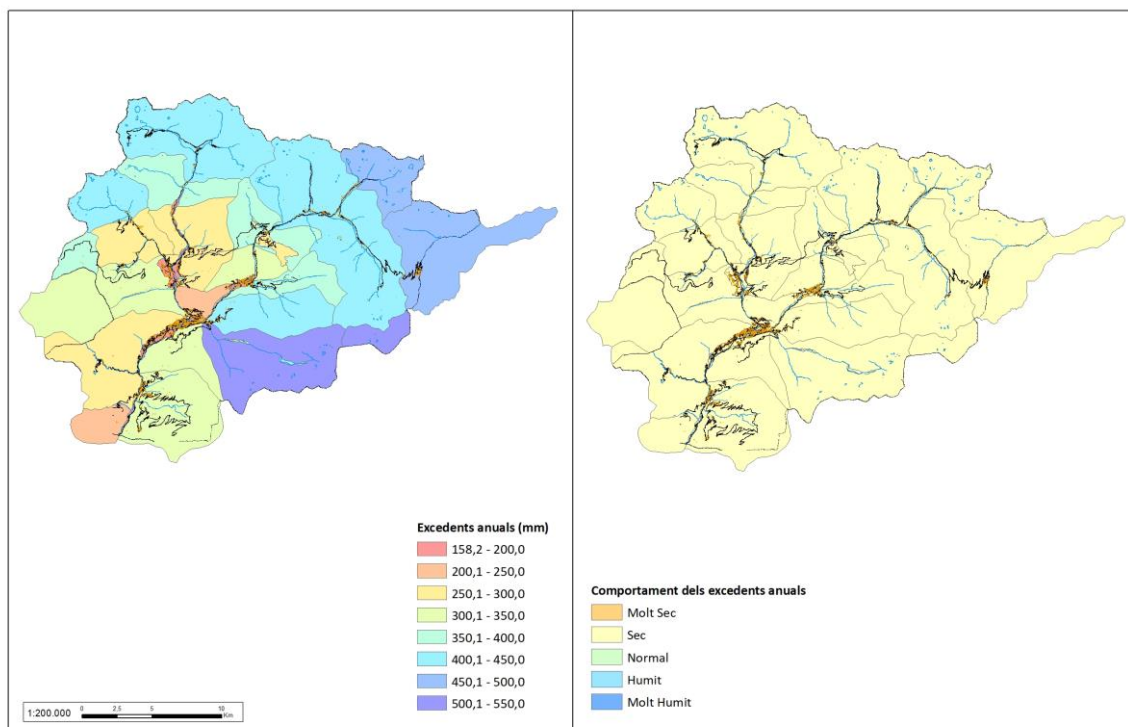


Figura 34. Mapa comparatiu dels excedents estimats del 2023 amb la mitjana climàtica 1981-2010 en les diferents unitats hidrogeològiques

Estacionalment, s'observa que ha estat sec en el conjunt del territori i al llarg de l'any, tot i que a l'estiu fins hi tot ha estat molt sec. A la primavera, els sectors perimetrals més orientals presenten valors més normals per l'època de l'any.

Comportament dels excedents hivern per unitats hidrogeològiques. Any 2023

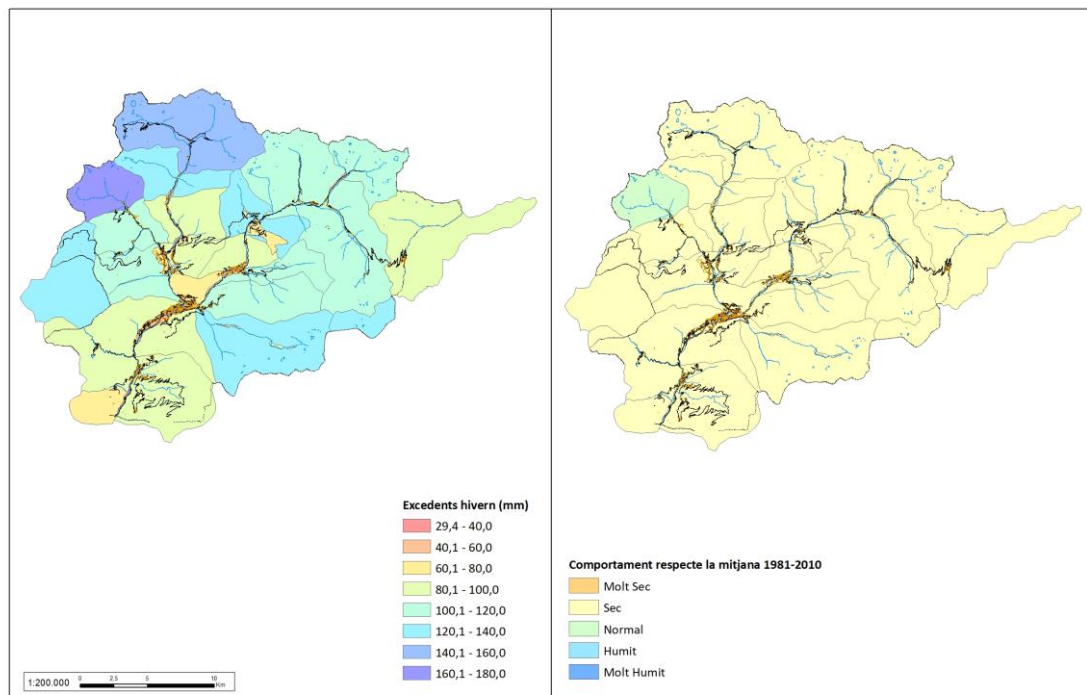


Figura 35. Mapa comparatiu dels excedents estimats a l'hivern del 2023 amb la mitjana climàtica 1981-2010 en les diferents unitats hidrogeològiques

Comportament dels excedents primavera per unitats hidrogeològiques. Any 2023

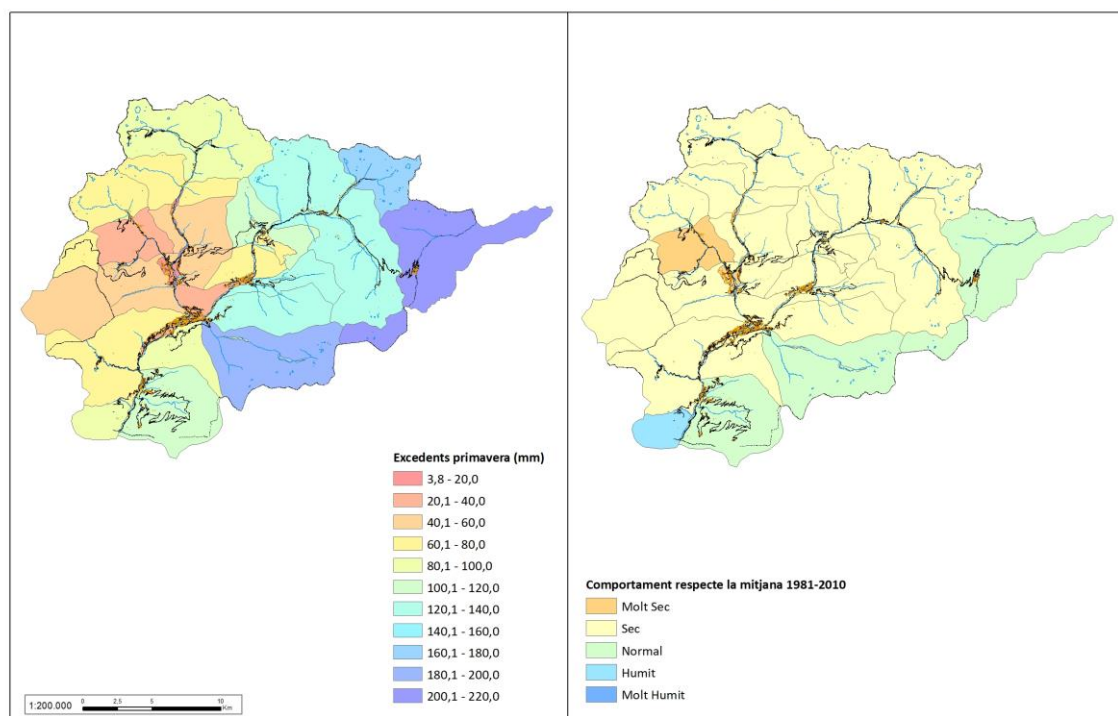


Figura 36. Mapa comparatiu dels excedents estimats a la primavera del 2023 amb la mitjana climàtica 1981-2010 en les diferents unitats hidrogeològiques

Comportament dels excedents estiu per unitats hidrogeològiques. Any 2023

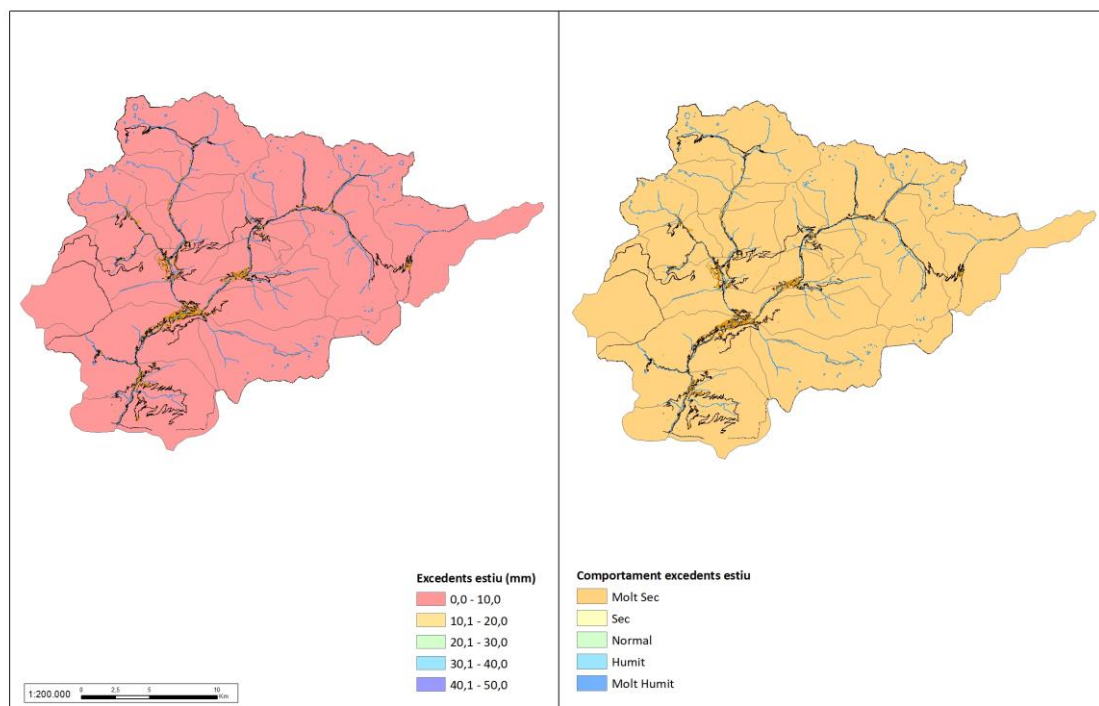


Figura 37. Mapa comparatiu dels excedents estimats a l'estiu del 2023 amb la mitjana climàtica 1981-2010 en les diferents unitats hidrogeològiques

Comportament dels excedents tardor per unitats hidrogeològiques. Any 2023

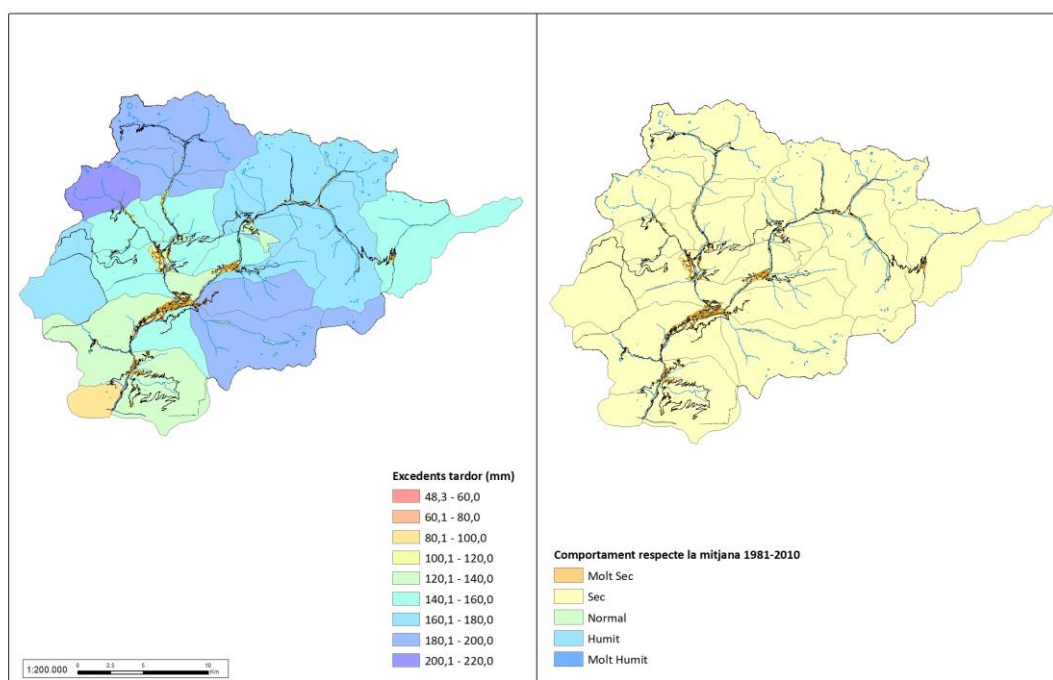


Figura 38. Mapa comparatiu dels excedents estimats a la tardor del 2023 amb la mitjana climàtica 1981-2010 en les diferents unitats hidrogeològiques

6 EL BALANÇ HÍDRIC EN DIFERENTS CONQUES HIDROGRÀFIQUES

Els resultats del balanç hídric també han permès estimar els recursos per a diferents conques hidrogràfiques. En les següents figures es mostra la ubicació de les conques analitzades,

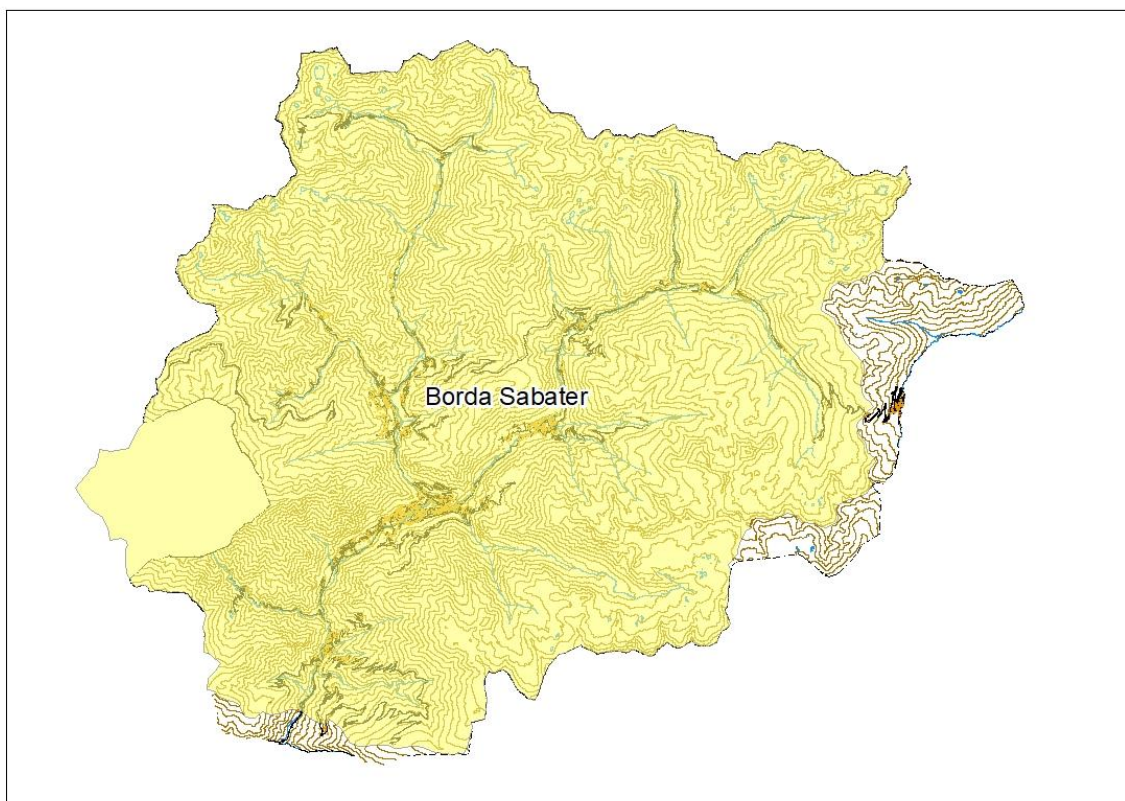


Figura 39. Mapa de situació de les diferents conques analitzades: Borda sabater

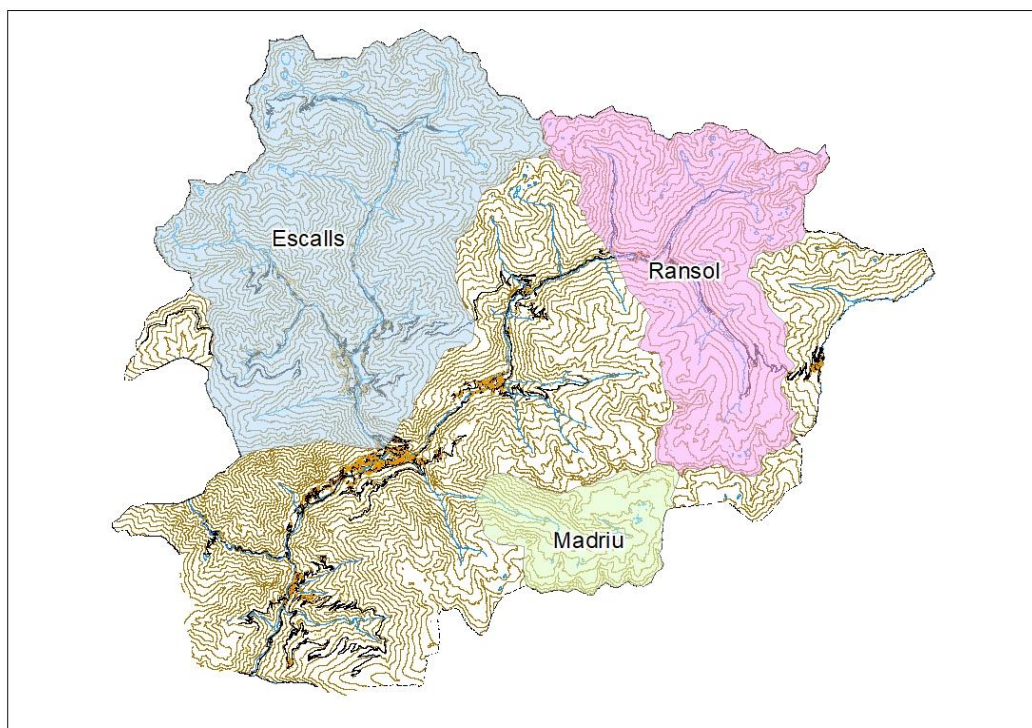


Figura 40. Mapa de situació de les diferents conques analitzades: Escalls, Madriu feda, Ransol-Valira Orient

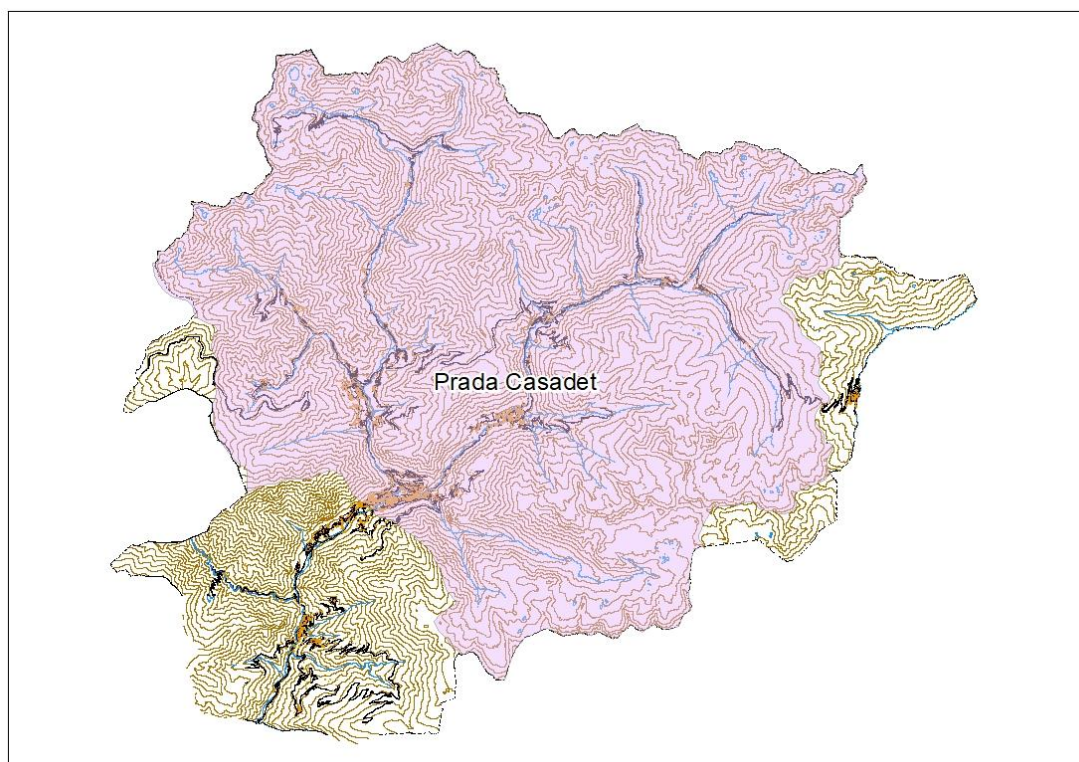


Figura 41. Mapa de situació de les diferents conques analitzades: Prada Casadet

En els següents gràfics es dona el valor de la precipitació, temperatura i cabals estimats per diferents conques hidrogràfiques i es compara amb els seus corresponents valors mitjos (1981-2010). La representació es fa anualment, i trimestralment. En el cas de l'anàlisi trimestral, s'ha considerat el primer trimestre com a representatiu de l'hivern -gener-març-, el segon, de la primavera -abril-juny-, el tercer, a l'estiu -juliol-setembre- i el quart, a la tardor -octubre-desembre.

Els cabals estimats (excedents transformats a cabals) aquest 2023 són similars a la mitjana en la conca del riu Valira d'Orient (Ransol), del riu Madriu i a la conca del Valira del Nord, i inferiors en la resta de conques. Estacionalment segueixen el mateix patró tot i que a l'estiu s'exagera moltíssim.

En relació a les precipitacions, anualment veiem que han estat inferiors a la mitjana en totes les conques estudiades. Estacionalment també s'observa en tots els períodes tot i que a la conca del Valira del Nord no és tan exagerat.

Sobre la temperatura, observem valors més alts en totes les conques excepte en la del riu Valira d'Orient (Ransol), que presenta temperatures similars a la mitjana. Estacionament es manté aquest patró, excepte a l'hivern, que s'estimen temperatures inferiors a la mitjana al Valira d'Orient.

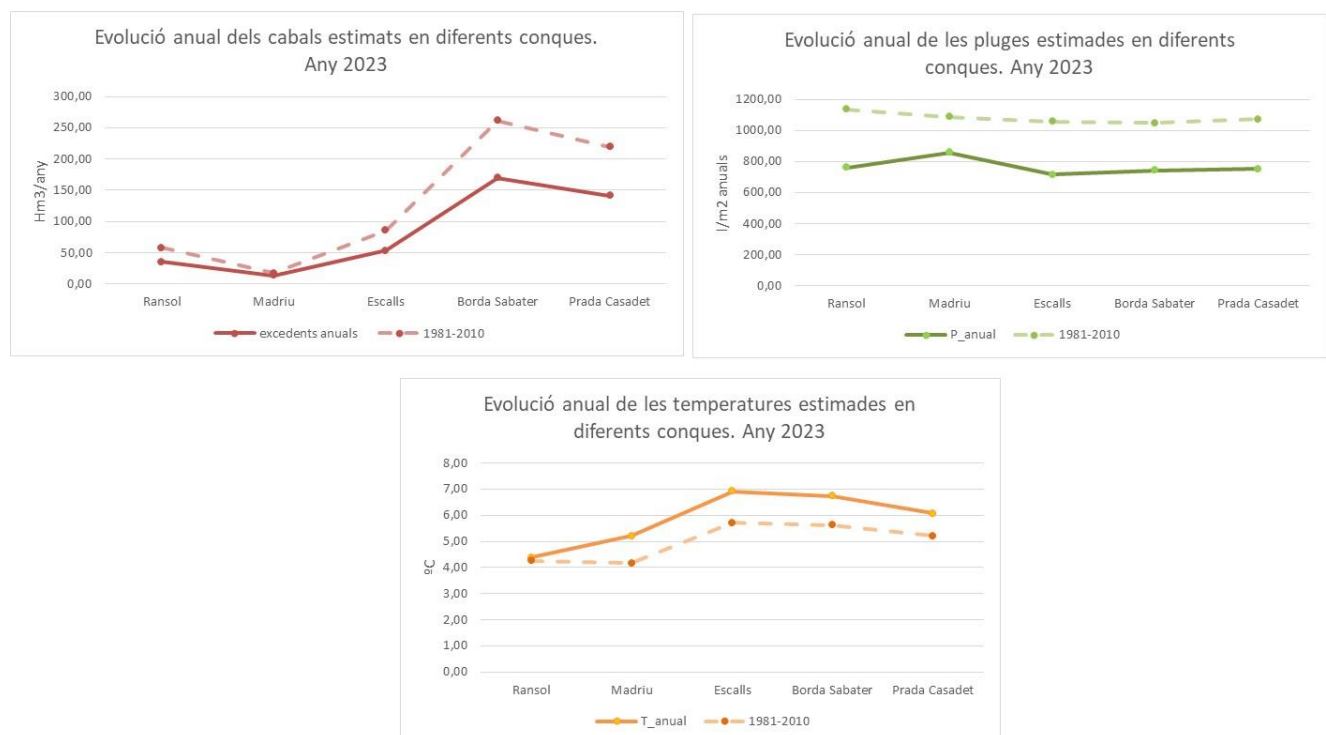


Figura 42. Anàlisi anual dels cabals estimats, de les precipitacions i de la temperatura en les diferents conques.

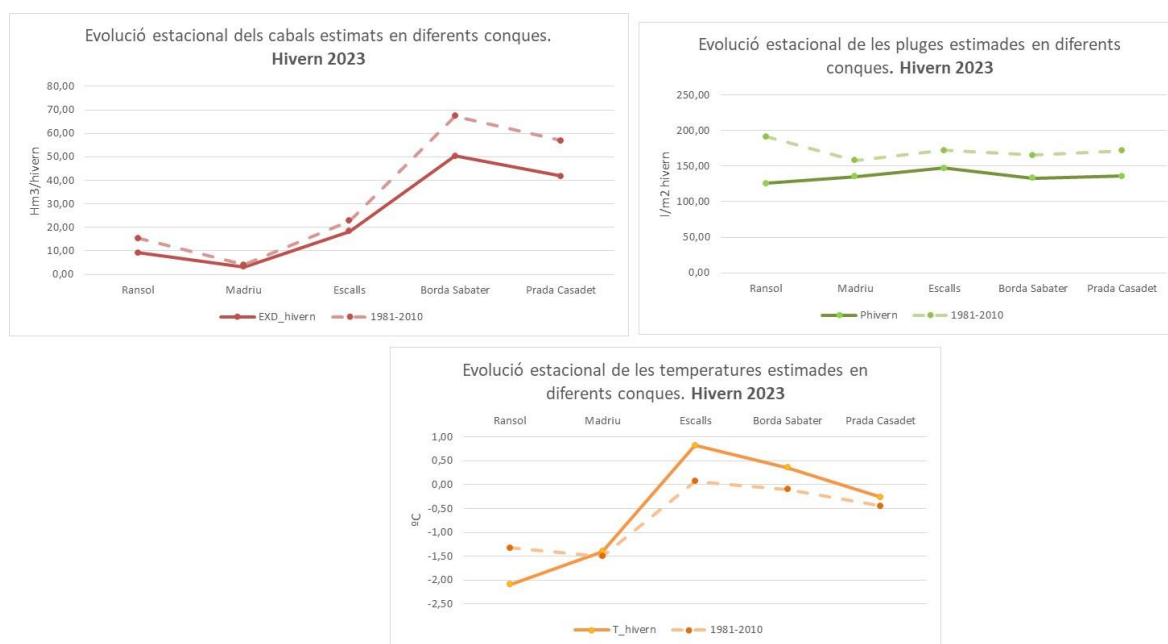


Figura 43. Anàlisi de l'hivern dels cabals estimats, de les precipitacions i de la temperatura en les diferents conques.

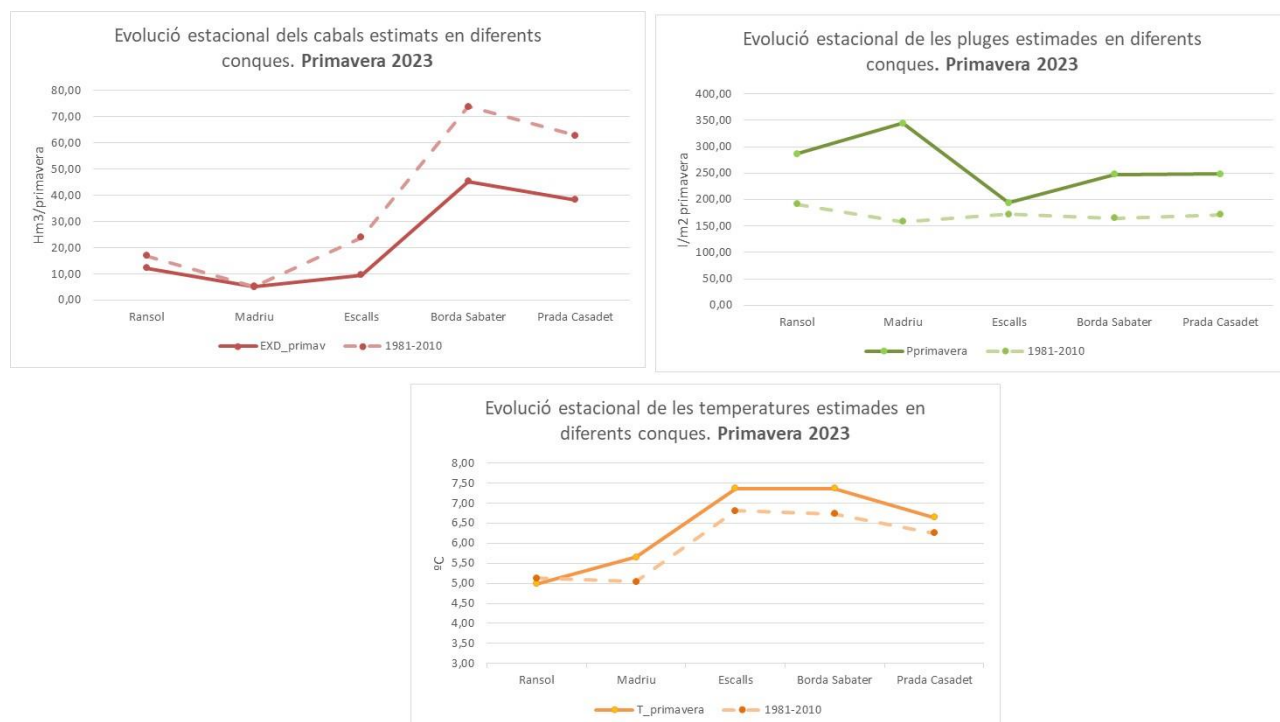


Figura 44. Anàlisi de la primavera dels cabals estimats, de les precipitacions i de la temperatura en les diferents conques.

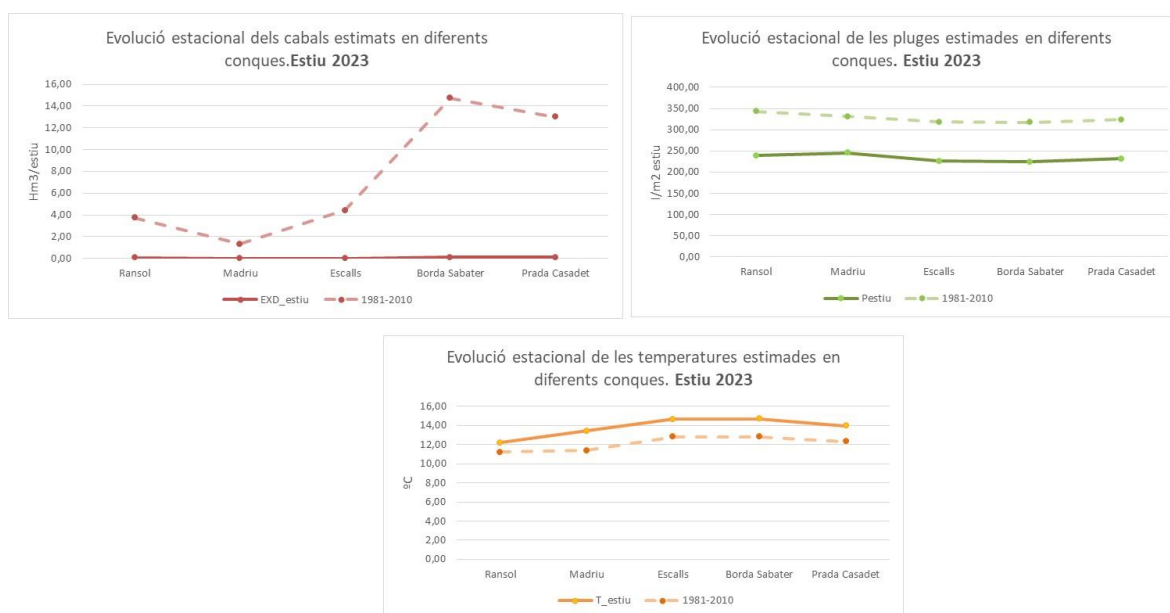


Figura 45. Anàlisi de l'estiu dels cabals estimats, de les precipitacions i de la temperatura en les diferents conques.

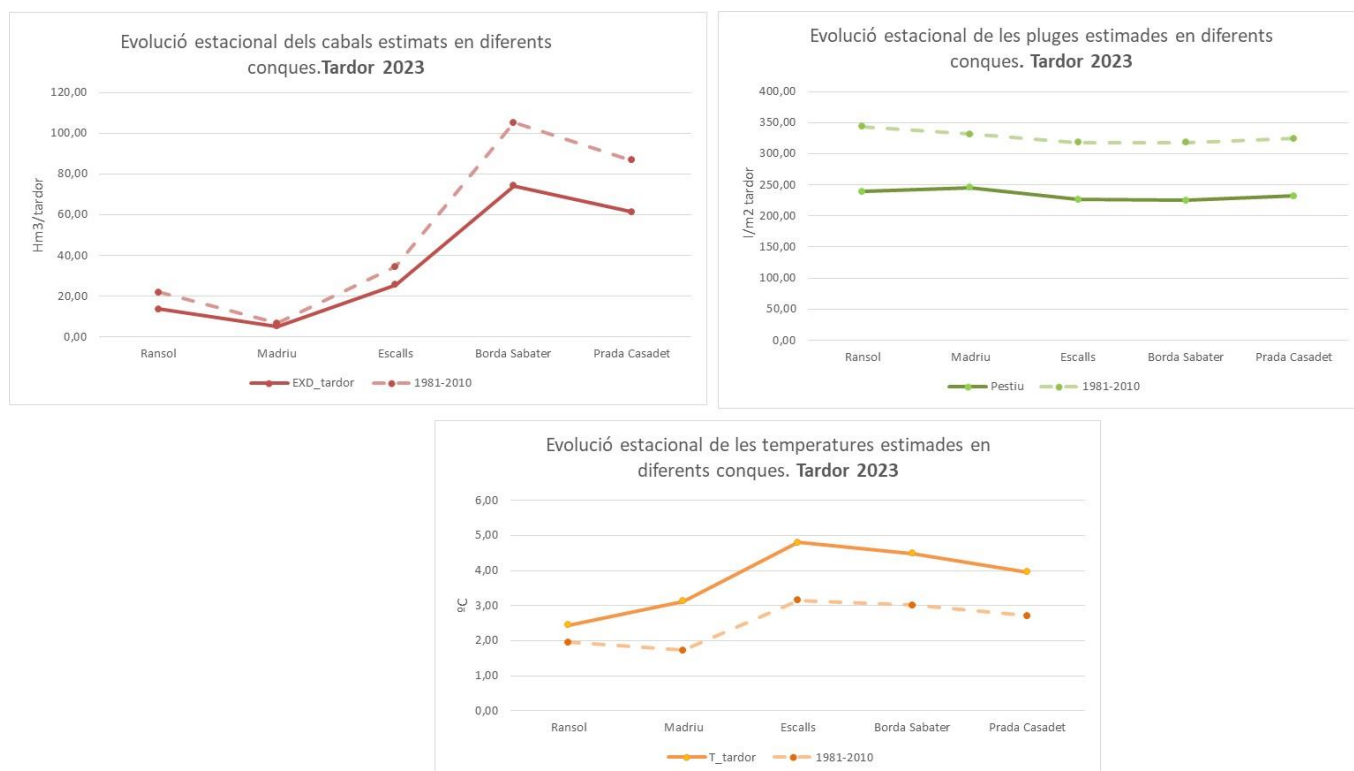


Figura 46. Anàlisi de la tardor dels cabals estimats, de les precipitacions i de la temperatura en les diferents conques.

Interanualment, en aquestes conques observem un descens en la precipitació i en els excedents del 2020 al 2022 i una lleugera recuperació al 2023, i un augment de la temperatura anual entre el 2020 i el 2022, i una estabilització al 2023.

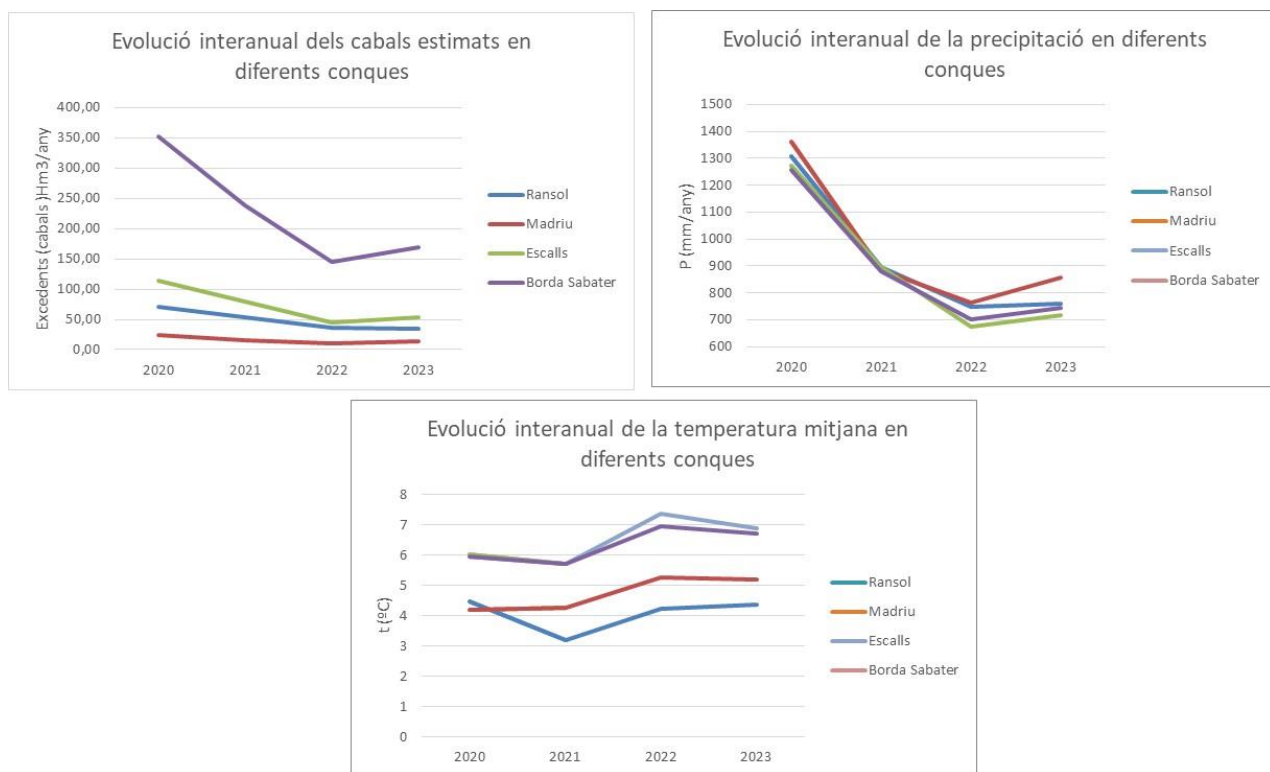


Figura 47. Evolució interanual de la precipitació, temperatura i excedents en les diferents conques

7 CONCLUSIONS

Aquest 2023 el mòdul de precipitació mig del territori andorrà s'estima que és de 774 mm quan la mitja de 30 anys se situa als 1054 mm. Ha estat un **any sec** si es compara amb la mitjana de precipitacions de 30 anys pel període 1981-2010, segons dades base facilitades per l'ARI.

La temperatura mitja del 2023 s'estima que ha estat de 6.54 °C, quan la mitja de 30 anys és de 5.6 °C. Comparant la temperatura mitja anual amb la mitjana climàtica, s'observa que les temperatures d'aquest any han estat en conjunt de superiors a la mitjana, **s'ha tractat d'un any calorós**, amb l'excepció del sector nord-oriental que han sigut normals o fins i tot més baixes.

El mètode de càlcul per estimar la pluja útil de cada unitat ha estat mitjançant el càlcul de l'ETP segons Thornthwaite, a través d'un balanç hidrometeorològic.

En el conjunt del territori estudiat (que tal i com s'ha comentat es treballa a nivell de conques hidrogeològiques que inclouen tota la conca hidrogràfica del Valira i conca hidrogràfica del riu de l'Arieja, i és de 522 Km²) la pluja útil ha estat el 2023 d'uns 203 Hm³/any, calculats mitjançant el balanç hídric amb el mètode de Thornthwaite, i d'aquests, 182 Hm³/any són disponibles, doncs es fixa la xifra del 10% de la pluja útil com a aigua destinada als ecosistemes aquàtics -cabals ecològics mínims estimats-.

Repartit entre el territori andorrà (467 Km²), la pluja útil estimada mitja del 2023 representa uns 181 Hm³/any. D'aquests, 163 Hm³/any serien disponibles, reservant-se el 10% com a cabals "ecològics mínims estimats".

Estacionalment, s'ha tractat d'un any sec a tot el país, excepte a l'hivern on en alguns sectors de la meitat occidental, i a la primavera, en tot el perímetre més oriental, s'han registrat valors més normals. Les temperatures han estat més càlides, en tots els quatre trimestres, amb l'excepció de la franja més nord-oriental que ha estat normal o fins i tot més freda a l'hivern i primavera. A l'hivern, s'observa que la temperatura mitjana més baixa arriba a -5.8°C.

El 2023 s'ha tractat d'un any sec d'excedents, amb una disminució d'entre el 20 i el 60% respecte la mitjana.

8 BIBLIOGRAFIA

Govern d'Andorra, 2007. Estudi de les aigües subterrànies del Principat d'Andorra

Govern d'Andorra, 2015. Estudi de per a l'elaboració anyal del balanç hídric del Principat d'Andorra. Període 1971-2000 i 2006-2012

Govern d'Andorra, juny 2023. Estudi de per a l'elaboració anyal del balanç hídric del Principat d'Andorra. Any 2022

Àurea Ponsa i Vidales

Llicenciada en Geologia, d'Hídric

Num. Decret: 42142/2005

Pau Ferrer i Roura (col·laborador)

Llicenciat en Geologia

Sant Julià de Lòria, 18 de març del 2024

9 ANNEX DE DOCUMENTACIÓ. CÀLCUL DEL BALANÇ HÍDRIC

9.1 CÀLCUL DE L'EVAPOTRANSPIRACIÓ

9.1.1 Generalitats

Existeixen diferents mètodes per a realitzar el càlcul de l'evapotranspiració, des de mètodes de camp, fins a mètodes empírics. Entre els mètodes més comuns per elaborar els mapes d'evapotranspiració potencial destaquen els següents:

- Radiació: aquest mètode precisa disposar de dades mensuals de temperatura mitja, humitat relativa mitja, nombre d'hores de sol i velocitat del vent diürn.
- Penman: aquest mètode requereix disposar de temperatures mitges mensuals, humitats relatives mitja i màxima, nombre d'hores de sol, velocitat del vent i estimació de la relació entre velocitats del vent diürnes i nocturnes.
- Blaney-Criddle: es basa en les dades de temperatura mitja, humitat relativa mínima, nombre d'hores de sol i velocitat diürna del sol.
- Turc: Permet estimar l'evapotranspiració potencial en base a la humitat disponible del sòl i del poder evaporant de l'atmosfera, intervenint en els càlculs la temperatura mitja, la humitat relativa de l'aire i la radiació solar. Així mateix, mitjançant una relació directa entre les precipitacions i les temperatures mitges anuals, permet estimar l'evapotranspiració real anual.
- Thornthwaite: tan sols requereix les dades de temperatura mitja mensuals, i permet calcular l'evapotranspiració potencial (ETP) mensual. El càlcul de la pluja útil parteix de la següent expressió $P = ETP + \text{Pluja útil} - \text{Dèficit hídric}$

Entre els mètodes més utilitzats, per la seva simplicitat per al càlcul de l'evapotranspiració hi ha el mètode de Thornthwaite. El mètode de Thornthwaite és un dels mètodes empírics més pràctics per a realitzar càlculs detallats de balanços anuals i mensuals d'aigua, i àmpliament usat, destacant l'aplicació que en fan des de la Conferència hidrogràfica del Ebro, amb bona part de la conca emplaçada al Pirineu. El mètode de Thornthwaite aporta valors acceptables en zones més o menys humides, en canvi no funciona bé per a les zones àrides o semiàrides (Custodio, E et al 2001).

La manca d'informació d'observacions meteorològiques de paràmetres com la humitat, la radiació, la velocitat del vent, etc. i el fet que es disposi d'una xarxa d'estacions termopluviomètriques amb registres diaris, ha conduït a estimar l'evaporació i el balanç hídric mitjançant l'aplicació del mètode empíric de Thornthwaite (1948).

9.1.2 Aplicació del mètode empíric de Thornthwaite

Per dur a terme els càlculs de balanç hídric s'ha iniciat l'any hidrològic al mes de gener, s'ha considerat la reserva d'aigua del sòl del desembre de l'any anterior, i s'ha tingut en compte les precipitacions totals, suma de pluja i neu registrada al mateix mes.

L'evapotranspiració potencial ETP s'estima per cada mes, utilitzant les dades de temperatura, segons les expressions següents (Thornthwaite, 1948, 1951, 1957):

$$Epa = 16 * \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad (2)$$

On

Epa és l'evapotranspiració potencial no corregida, calculada per un dia amb 12 hores de sol.

T és la temperatura mitjana mensual

I és un índex anual de calor i equival a la $\sum i$ pels 12 mesos de l'any.

i és l'índex de calor mensual (3)

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514} \quad (3)$$

a és un exponent que s'obté a partir de l'expressió (4)

$$a = 0,000000675 * I^3 - 0,0000771 * I^2 + 0,01792 * I + 0,49239 \quad (4)$$

La correcció de l'EPA a ETP es fa segons l'expressió següent:

$$ETP(mm/mes) = Epa \frac{N}{12} * \frac{NDM}{30} \quad (5)$$

on *N* és el nombre d'hores d'insolació (està tabulat en funció de la latitud, ajustant-se a latitud de 42°)

NDM és el nombre de dies considerat

Una de les correccions que s'ha hagut de dur a terme és el de suposar que a temperatures mitges mensuals inferiors o iguals a zero, l'EPA és nul·la.

Per a l'estimació de l'evapotranspiració s'ha tingut en compte les precipitacions totals, de la pluja i neu. El desconeixement sobre com la neu intervé en el balanç hídric és important (relació entre acumulació de neu i neu que arribi a fondre, a sublimar, la distribució del gruix de neu al Principat, efectes del vent sobre la coberta de neu, etc.) per això s'ha tractat la neu conjuntament amb la pluja, com a precipitacions totals, que és com les estacions meteorològiques proporcionen les dades, i sense aplicar cap correcció.

De cara a estimar l'ETR s'ha realitzat un balanç hídric per cada cel·la de 27.5 m*27.5 m, duent-se a terme les següents suposicions:

- Mentre les precipitacions i la reserva del sòl ho permetin, l'ETR serà igual a l'ETP. Quan això és possible, es parla d'excedents (o pluja útil) si l'ETR no esgota totes les precipitacions. Quan les precipitacions no són prou importants, s'usa aigua de la reserva del sòl fins a esgotar-la, si és necessari; quan la reserva està buida, l'ETR serà inferior a l'ETP i aleshores es parla de dèficit hídric.
- Per al càlcul de l'evapotranspiració real se suposa que aquesta és igual a la potencial sempre i quan hi hagi aigua disponible; ja sigui procedent de les precipitacions o bé de la reserva útil. La reserva màxima del sòl que correspon a la d'un sòl saturat és variable en funció de la pedologia i del pendent topogràfic. En termes mitjos s'obté un valor de **8.6 mm** per al país (M.I.Govern d'Andorra, 2015).
- Cada any hidrològic s'inicia amb la reserva del darrer mes de l'any anterior. L'any 2023 s'inicia amb la reserva del desembre del 2022, que era de **8.5 mm** i finalitza el desembre del 2023 amb la reserva a **4.1 mm**.

El mapa de distribució de l'ETR anual presenta un valor mig de 385 mm/any, amb valors màxims al voltant dels 540 mm i mínims inferiors als 230 mm. L'ETR es troba condicionada per la temperatura, i l'aigua disponible, ja sigui en forma de precipitacions o bé en forma de reserva en el sòl. Els valor mínims es detecten en les capçaleres, on la temperatura és menor a causa de l'alçada de la zona. Igualment, en aquests punts el sòl és de tipus litosòl, fet que comporta una baixa reserva d'aigua.

Per contra, les zones amb alta ETR acostumen a aparèixer en els fons de valls, on tant la temperatura com la reserva del sòl és més elevada, tot i tenir precipitacions significativament inferiors respecte a cotes altes.

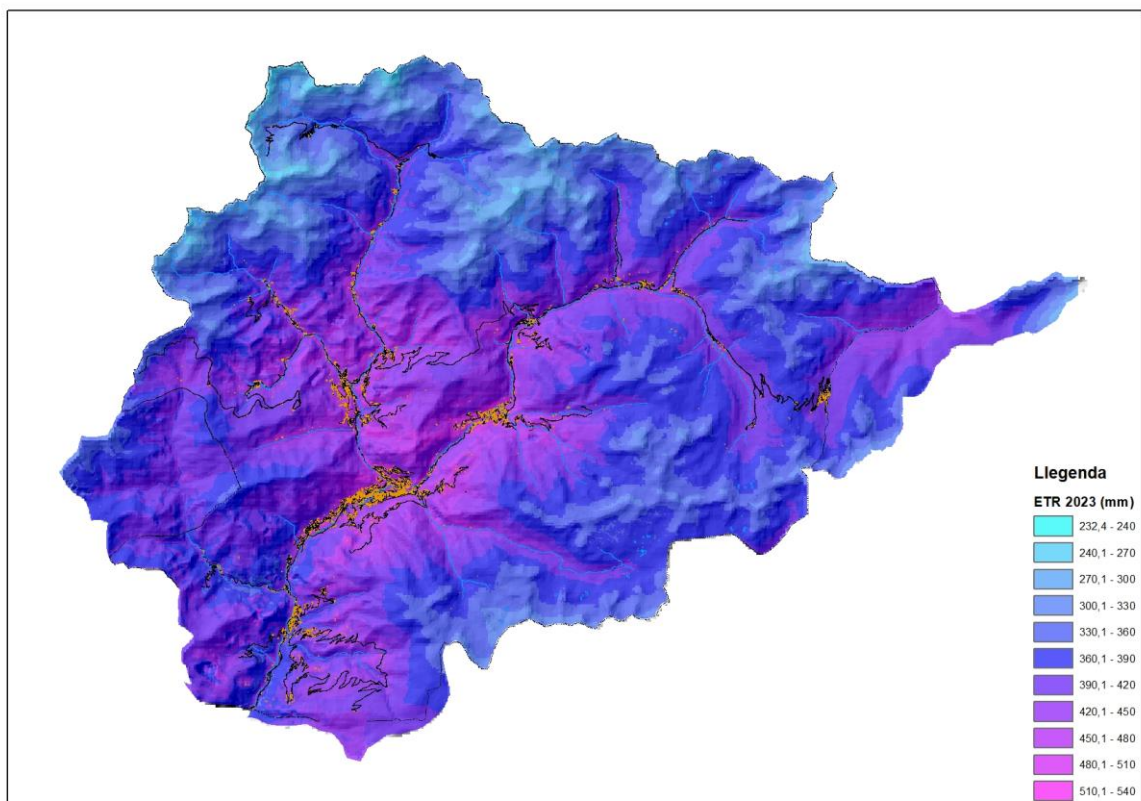


Figura 48. Mapa de distribució de l'ETR_2023

9.2 CÀLCUL DE LA PLUJA ÚTIL

Tal i com s'ha comentat, es parla de pluja útil o excedents a la precipitació que escapa de l'evapotranspiració i de la reserva del sòl.

Quan es parla de pluja útil és refereix a aigua que surt com a escolament superficial directe i com a escolament subterrani. En un balanç anual es pot interpretar que els excedents acaben drenant cap als rius més tard o més d'hora.

Els mapes de distribució dels excedents anuals, estimant l'ETP segons Thornthwaite mostren les següents distribucions de resultats.

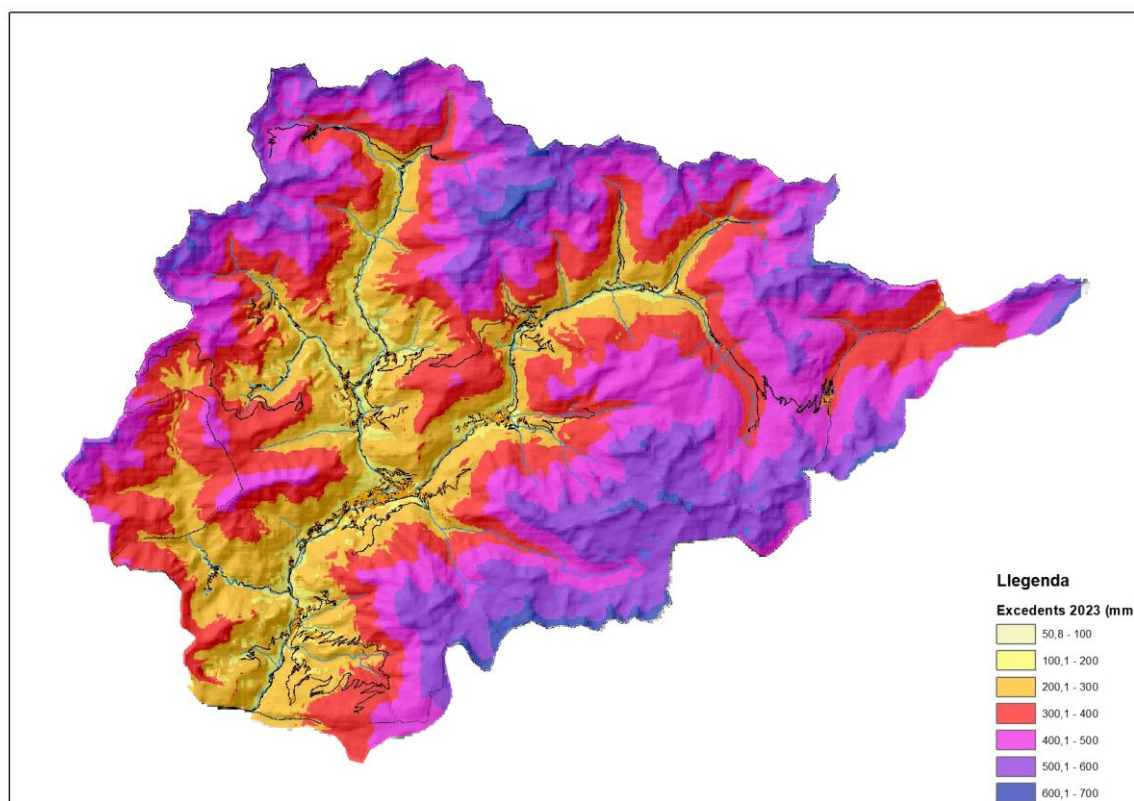


Figura 49. Mapa de distribució de la pluja útil o excedents estimats per l'any 2023

La pluja útil o excedents estimats presenten un valor mig de 389 mm. Els valors màxims són d'uns 700 mm a l'extrem nord i est del país, coincidint amb sectors emplaçats en cotes altes, amb una major precipitació, menor temperatura i baixa ETR. Els valors més baixos són al voltant de 50 mm, s'emplacen cap al sud i en tots els fons de vall.

9.3 ESTIMACIÓ DEL DÈFICIT HÍDRIC

Es parla de dèficit quan les precipitacions i la reserva del sòl no poden garantir que l'ETR sigui igual a l'ETP.

El mapa de dèficit anual calculat en base a l'ETR obtinguda amb el mètode de Thornthwaite, permet veure que en termes mitjos el dèficit ha estat baix a l'extrem nord-est, amb valors per sota els 40 mm, i per sobre dels 80 mm en la resta del país, fins a valors màxims de 400 mm al sud i fons de la vall.

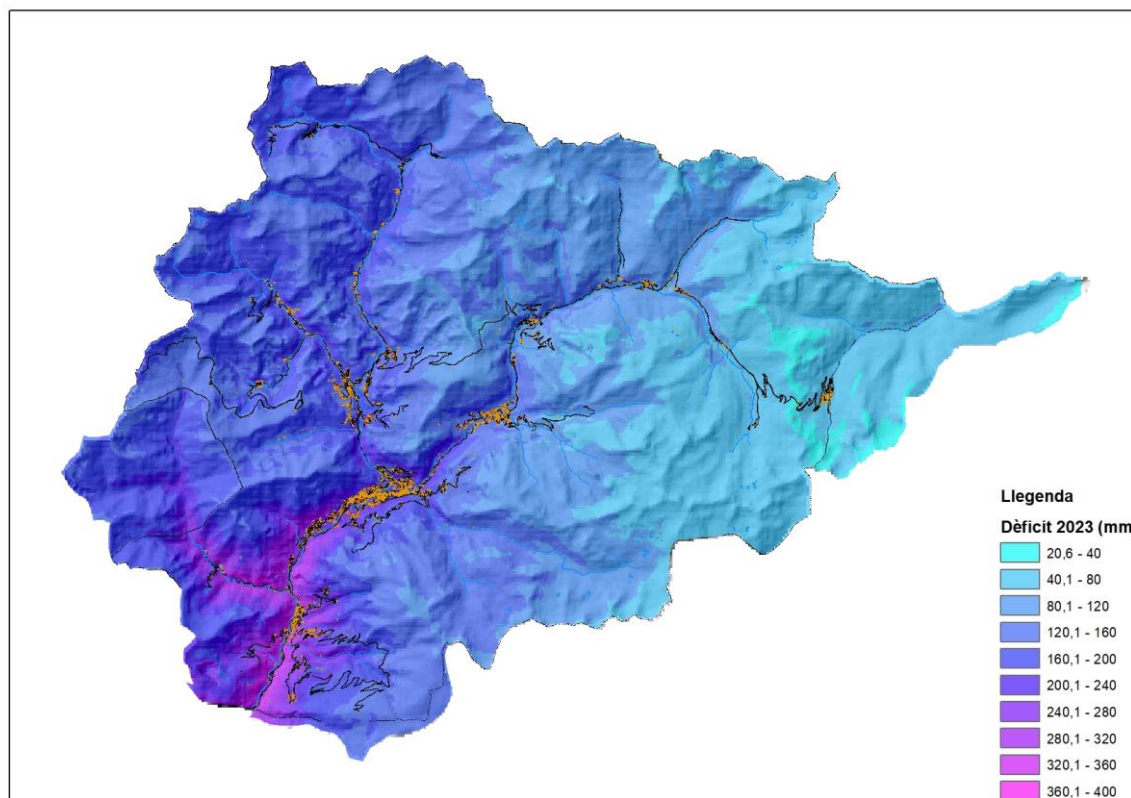
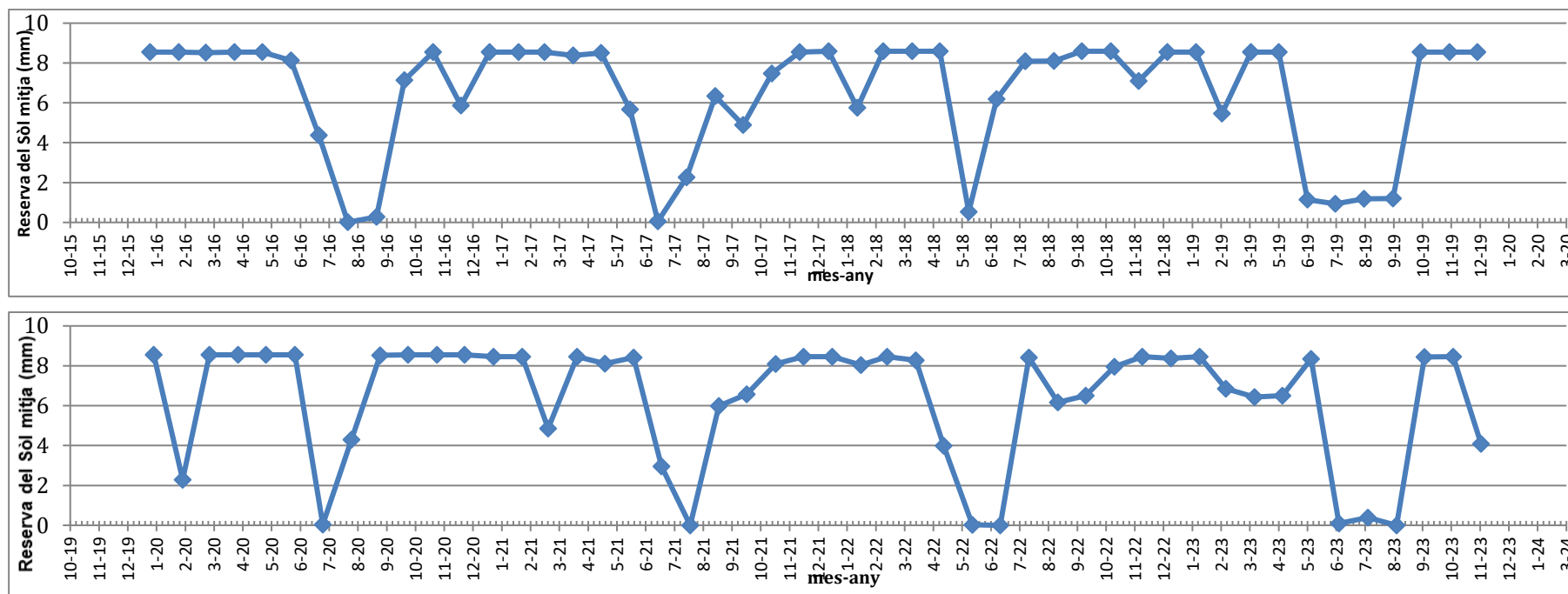


Figura 50. Mapa de distribució dels dèficits estimats per l'any 2023. R= variable, seguint el mètode de Thornthwaite El mètode de càlcul ha consistit en la diferència entre ETP i ETR quan no hi ha reserva disponible.

9.4 EVOLUCIÓ DE LA RESERVA D'AIGUA DEL SÒL

El cicle per a un any climatològicament normal vindria a ser el següent: de mitjans de primavera fins a inici d'estiu la reserva està plena, al màxim. A l'estiu es va buidant, fins a nivells mínims, podent esgotar-se del tot. A finals d'estiu-mitjans de tardor es torna a omplir. Aquest model es compleix en l'any 2017, 2019, 2020 i 2022, tal i com es veu representat en el següent gràfic. La metodologia de càlcul de la reserva mitja del sòl s'explica en *Govern d'Andorra, 2015*.

En els anys més secs, es trenca aquesta ciclicitat, durant l'estiu es buida fins a esgotar-se la reserva i a la tardor hi ha recuperació però no és completa, com succeeix al 2016, 2018 i també al 2021 i 2023.



Any	Variació de la reserva (mm)
2015	-6,12
2016	3,69
2017	2,68
2018	-1,46
2019	1,46
2020	0,00
2021	-0,10
2022	0,00
2023	-4,37

Figura 51. Evolució de la reserva mitja mensual d'aigua del sòl des del 2016 fins al desembre del 2023. Dades obtingudes del balanç hídric efectuat a nivell de límit administratiu (S=467.45Km2)

NOTA: Aquest valor de reserva es calcula en base al càlcul del balanç hídric (modelització). Cal saber que el ràster de precipitació (P) és d'una mida de cel.la de 90 x 90, en canvi el ràster del balanç (on hi intervé la ETR, els excedents, la reserva) està fet a 27 x 27.



Govern d'Andorra

Informe

www.mediambient.ad