



Jordi Deu i Pujal

Enginyer agrònom,
Silvagrina SL

Resum

Es proposen noves solucions basades en la natura (NBS),¹ desenvolupades a Andorra, d'utilitat per a la gestió del recurs hídric, tant des del punt de vista qualitatiu com quantitatiu.

Les que tenen relació amb la protecció en front de l'enterboliment de l'aigua per erosió hídrica intensa estan fonamentades en l'aplicació de mesures correctores per controlar l'erosió en indrets afectats per laves torrencials (*debris flow*) i consisteixen a efectuar treballs d'ovinoremeiació² per regularitzar xaragalls i per fertilitzar el sòl per apletat de ramat d'ovelles, construir microdics de ramatge per contenir les laves torrencials, i sembrar *Festuca eskia* per recobrir el sòl estèril i controlar l'erosió.

En referència a la gestió de l'aigua des del vessant quantitatiu, es proposa una nova metodologia que anomenem l'"Hidrograma sintètic de recés per a la producció d'aigua blava infiltrada", que es basa en el tractament de dades dels aforaments (mesures de cabal) a les captacions d'aigua de rius i fonts, per estimar el cabal a llarg termini (entre 300 i 400 dies des del màxim) de què es podria disposar en condicions d'estrès hídric sever, sense pluja ni fosa de neu que puguin alimentar l'aqüífer. Això permetria abordar amb molta anticipació la presa de decisions en l'aplicació de mesures adaptatives per a la gestió del recurs hídric, quan és escàs.

Paraules clau: Control erosió, xaragall, *debris flow*, microdic, ovinoremeiació, restauració ambiental, NBS, revegetació, *Festuca eskia*, Pirineus, hidrograma, aigua blava, aigua potable, aqüífer, modelització, dèficit hídric.

1- NBS: Nature Based Solutions.
2- Ovinoremeiació: ús de ramat d'ovelles per a tasques de prevenció de riscos i de restauració ambiental.



Jordi Deu i Pujal

**Noves
metodologies
andorranes,
basades en la
natura, per
millorar la gestió
tècnica del
recurs hídric, en
condicions de
canvi climàtic i
creixement
poblacional**

1. Introducció

Fruit de l'experiència professional de l'empresa andorrana d'enginyeria Silvagrina, tot seguit passem a exposar una sèrie de casos en què hem hagut de donar una solució tècnica a determinades qüestions que afecten la producció qualitativa i quantitativa d'aigua, des de les conques que proveeixen els aqüífers de vessant del Pirineu andorrà. En tots els casos, sense realment saber-ho en aquell moment, ens havíem inspirat en la natura per cercar aquestes solucions, NBS Nature-Based-Solutions (Cohen-Shacham et al., 2016).

1.1. Sobre la millora de la qualitat de l'aigua

Respecte de les solucions basades en la natura que permeten millorar la qualitat de l'aigua, farem referència als treballs efectuats a la part alta de la conca del riu de Claror, arran de la torrentada que tingué lloc en les immediacions del calm de Claror el 21 de juliol del 2015. Per al lector interessat en aquesta part del document, us recomanem llegir la publicació *Restauració ambiental a la conca del riu de Claror* (Deu et al., 2018).

Resumidament, cal comentar que amb aquella torrentada es van arribar a acumular 71 l/m² en una hora. La forta pluja va afectar les capçaleres dels rius Llueneres, Aixirivall i Auvinyà pel vessant de Sant Julià de Lòria, i el riu Claror pel que fa a la conca de Perafita a la Vall del Madriu-Perafita-Claror.

A conseqüència d'aquesta forta tempesta en uns vessants de fort pendent i pobres en vegetació, es van produir fenòmens erosius a les capçaleres de les conques i es van formar laves torrencials al vessant de Sant Julià de Lòria, que van baixar fins al poble. A la conca del riu de Claror també es van generar laves torrencials per erosió dels terregalls negres de la zona (vegeu la foto 1), que van donar lloc a la formació de xaragalls amb deposició del sediment en el primer con de dejecció de la part alta de la conca. Tot això va provocar una forta terbolesa del riu (>500 NTU), i que les aigües captades no fossin aptes per al consum humà, i que es produïssin talls de diversos dies de durada en el subministrament d'aigua potable a la parròquia d'Escaldes-Engordany. Noves pluges de molta menys intensitat i quantitat, ocorregudes entre finals de juliol i principis d'agost, van generar nous episodis erosius a la conca del riu de Claror, que van incrementar inusualment la terbolesa de l'aigua captada, un enterboliment que, en ser de llarga durada, va ocasionar nous talls en el

subministrament. A partir de les inspeccions sobre el terreny i les anàlisis sedimentogràfiques, es va arribar a la conclusió que els processos erosius ocorreguts en els terregalls havien arrencat la crosta protectora superficial, consistent en uns 10~30 cm de pedra llosenca menuda (5~15 cm de Ø major), i que havien deixat al descobert materials fins a base de graves, sorres, llims i argiles, que van quedar a lliure disposició de l'escorrentiu superficial fins que no es torni a formar la capa protectora superficial. En aquell moment es va veure la necessitat de consolidar els sediments acumulats a la zona i de frenar el procés erosiu dels xaragalls que conflueixen en el naixement del riu Claror, amb l'objectiu de reduir la magnitud i la freqüència d'episodis erosius posteriors. Pel fet de trobar-nos dins d'un paisatge cultural del patrimoni mundial, segons l'organització de les Nacions Unides per l'Educació, la Ciència i la Cultura (Unesco), la Vall del Madriu-Perafita-Claror és una zona on les intervencions antròpiques han de ser mínimes i han de respectar sempre el medi natural i el paisatge, sense perjudicar els recursos naturals de la vall. Per assolir aquest objectiu d'estabilitzar els sediments i reduir els episodis erosius de la manera més sostenible possible, es van planificar i dur a terme diversos treballs de restauració ambiental, però només ens centrarem en els més importants i originals:

- Compactació i regularització dels terregalls
- Apletat i xafoteig amb ramat d'ovelles
- Construcció de microdics de ramatge
- Revegetació
- Prova en blanc

1.2. Sobre la millora en el coneixement del comportament quantitatiu del recurs hídric en condicions de secada

Ateses les limitacions d'espai per a la publicació d'aquest article, ens centrarem a fer una breu descripció de la Metodologia per predir la producció d'aigua blava infiltrada en condicions de secada mitjançant l'hidrograma sintètic de recés, que considerem que pot ser de molta utilitat per a la gestió del recurs hídric en petites conques hidrogràfiques sense preses reguladores, i que, per tant, aprofiten el recurs d'acord amb el cabal fluent, com és el cas de les captacions d'aigua potable d'Andorra.

Hem investigat els patrons de funcionament hidrològic dels aquífers de vessant, inspirats en com ho fa la natura, i hem modelitzat el seu comportament quan funciona en condicions

de secada (manca de pluja o per gel) per sintetitzar un hidrograma³ de recés que extrapola aquest comportament al voltant d'un any vista sense aportacions noves a l'aqüífer des del màxim cabal de les fonts o rius que es presenta després de períodes humits o de fosa de neu abundant. És una eina de molta utilitat per anticipar estratègies de gestió del recurs en condicions d'estrès hídric, així com per establir el límit poblacional de les ciutats en funció del recurs hídric de què s'estima que poden disposar com a mínim amb garanties de sostenibilitat.

2. Material, mètodes i resultats

2.1. Noves tècniques de control de l'erosió

2.1.1. Ovinoremeiació



Foto 1. Estat de la capçalera del riu de Claror després de la torrentada del 21 de juliol del 2015

2.1.1.1. Compactació i regularització dels terregalls

OBJECTIU: compactar el sòl i suavitzar la secció dels xaragalls a la zona dels terregalls negres mitjançant tècniques d'ovinaremeiació, que hem definit com: l'ús de ramats d'ovelles per a tasques de prevenció de riscos i de restauració ambiental.

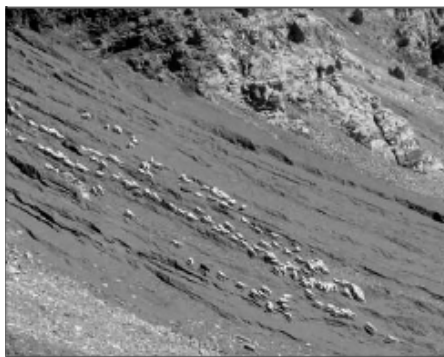
PROCEDIMENT: es van fer diversos passatges en sentit descendent del ramat d'ovelles per la zona dels terregalls aixaragallats. Aquest procediment es va dur a terme entre els mesos d'agost i octubre del 2015 (experimental) i 2016 (vegeu les fotos 2). Cal destacar el gran paper del pastor en aquesta tasca de portar el ramat a indrets on les ovelles normalment no volen anar, ja que perden pes i corren el risc d'estimar-se.

3- Els hidrogrames són els gràfics de l'evolució del cabal de la font o el riu amb el temps. Quan no hi ha aportacions hídriques a l'aqüífer, llavors l'hidrograma és sempre descendent, i aquesta part del gràfic s'anomena *hidrograma de recés*.

RESULTATS: amb el pas del ramat, es va accelerar el procés de consolidació natural deixant els xaragalls més còncaus, en comptes de rectangulars amb parets verticals (morfologia després de la torrentada), a més de compactar les terres superficials. Els resultats foren espectaculars. Tot això va fer els terregalls més estables, i va limitar que hi hagués material fi fàcilment a disposició dins del tàlveg dels xaragalls, ja que aquest és el màxim responsable de l'increment de la terbolesa al riu de Claror.

En les parts més baixes, on hi va haver deposició del sediment, el pasatge del ramat va regularitzar i compactar la superfície, clavant la grava en el sòl i deixant més terra superficial, fet que va facilitar la germinació de la sembra amb gèspit (*Festuca eskia*).

2.1.1.2. Apletat i xafoteig amb ramat d'ovelles



Fotos 2. Treballs d'ovinaremeiació amb el ramat d'ovelles, que mitjançant el xafoteig van compactar, regularitzar i suavitzar els xaragalls produïts per la torrentada del 2015 als terregalls negres

OBJECTIU: apletat del ramat d'ovelles a la zona on es preveu fer la revegetació, amb l'objectiu de bogar-la abans de la sembra per fertilitzar el substrat mineral estèril. Al mateix temps, el xafoteig del ramat ajuda a compactar i estabilitzar el sòl. L'apletat s'aplica tant a la zona que ha estat objecte de l'erosió (amb els horitzons subsuperficials exposats), com en el con de dejecció on aquest material erosionat ha estat dipositat (vegeu la foto 3). Es tracta d'enriquir uns sòls orfes de matèria orgànica i fertilitat mineral.

PROCEDIMENT: apletat del ramat en diverses parcel·les durant les nits, des de finals d'agost fins a principis de novembre, a la zona de sòls estèrils neoformats. En intervals de quatre a sis dies, es va anar canviant la pleta de lloc, amb



Foto 3. Apletat del ramat d'ovelles per fertilitzar el sòl nu i estèril, abans de la sembra

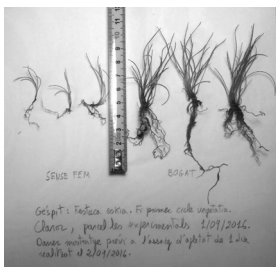


Foto 4. Comparació del creixement de *Festuca eskia* en una parcel·la sense apletat (esquerra), i l'altra fertilitzada per apletat del ramat (dreta). La producció de biomassa a la fi del primer cicle vegetatiu es va multiplicar per vuit

l'objectiu que el xerri i els orins de les ovelles fertilitzessin el substrat que calia revegetar. El ramat, durant el període d'apletat, va constar d'entre 1.450 i 1.300 ovelles. Amb l'objectiu d'homogeneïtzar millor el repartiment de la fertilitat, la densitat d'apletament emprada fou de mitjana a baixa (entre 0,85 i 0,35 ovins/m²). Aquesta variabilitat ha estat generada a propòsit, amb caràcter experimental, per tal de poder detectar quines densitats poden ser més eficients en la restauració ambiental dels diferents sectors encara pendents de tractament, així com per a d'altres indrets que en el futur es vulguin reconquerir per al control de l'erosió, ja que no s'han pogut trobar experiències assimilables en la bibliografia.

RESULTATS: mitjançant l'apletat del ramat s'aconsegueix una aportació de nitrogen, fòsfor, potassi i micronutrients vital per al creixement dels vegetals. Els resultats que es desprenen de la comparativa entre dos parcel·les experimentals de 16 m² cadascuna, sembrades durant la tardor del 2015, l'una bogada i l'altra no, en el control de la fi del primer cicle vegetatiu, parlen per si sols (vegeu la foto 4).

2.1.2. Construcció de microdics de ramatge

OBJECTIU: construir microdics de ramatge a la zona dels terregalls fortament aixaragallada (vegeu la foto 1), amb l'objectiu de contenir el transport massiu dels sediments que s'hi vehiculen, principalment en forma de lava torrencial amb matriu de llim i argila, o de flux hiperconcentrat, i controlar-ne així l'erosió.

PROCEDIMENT: els microdics de ramatge es construeixen amb branques d'avellaners helitransportades. Els microdics s'executen perpendicularment a l'eix del xaragall i a equidistàncies en relació inversa amb el pendent del vessant. Les rames petites es disposen en forma de filtre vegetal, i els troncs s'aprofiten per fer els pals de subjecció, col·locats en forma de V i també verticalment, clavats fins a una fondària d'aproximadament 1 metre (vegeu la foto 5). La brancada i els troncs es lliquen amb corda vegetal, de manera que els microdics són totalment biodegradables i, a partir de la fi de la seva vida útil (5 a 7 anys), s'aniran descomponent. La coronació dels microdics es deixa sensiblement per sota de la rasant del terregall, per tal d'evitar el desbordament lateral de la lava cap a altres zones del terregall no erosionades. També cal destacar que la realització d'aquest tipus de microdics ha

estat experimental, ja que no es va trobar bibliografia relativa a aquesta tècnica de restauració ambiental.

RESULTATS: els microdics, per efecte de barrera, han retingut les laves torrencials que hi circulen durant les tempestes estivals i durant la fosa de la neu, i, per efecte de filtre, també han retingut els arrossegaments menors del tipus flux hiperconcentrat (fluid no newtonià) i avinguda d'aigua (fluid newtonià) en maximitzar la pèrdua d'energia per fricció del fluid, evitant així que els xaragalls es fessin encara més profunds. Fins avui, el funcionament ha estat molt bo, sense desbordament lateral dels xaragalls així protegits, i molts ja han estat reblerts de material i es mantenen estables (vegeu la foto 5), fins a l'extrem que en els xaragalls més grans se n'ha hagut de construir per sobre una segona tongada. Tampoc no s'han constatat interferències entre les estructures i el ramat mentre es duïen a terme les tasques d'ovimoremeiació a la zona dels xaragalls (vegeu la foto 2).

2.1.3. Revegetació dels sediments dipositats

OBJECTIU: la revegetació del sòl nu té per objectiu establir els sediments i el material erosionat de recent exposició superficial. Mitjançant l'establiment d'una coberta herbàcia, es pretén donar protecció davant l'impacte directe de les gotes de pluja sobre el sòl (*splash erosion*), i també per causa de l'increment de cohesió en el sòl que proporcionen les arrels i la matèria orgànica, això sense menystenir l'increment de rugositat hidràulica que proporcionen les fulles del gèspit que, fent de filtre, limiten l'erosió laminar. S'estima que l'erosionabilitat d'un sòl nu és 150 vegades (factor C de l'equació universal de pèrdua de sòl segons criteris universals *soil loss equation*) superior al del mateix sòl totalment recobert (>95%) amb herbàcies, *ceteris paribus* (Cárdenas de Llano et al., 1998). L'espectacularitat d'aquestes xifres fa que aconseguir una ràpida revegetació de zones ermes sigui vital per poder controlar l'enterboliment de l'aigua.

PROCEDIMENT: per qüestions de màxim respecte ambiental, i per limitar els riscos de deriva genètica, es va optar per renunciar a les típiques fórmules de pradenques a base de llavor comercial d'espècies domesticades destinades a la revegetació d'espais degradats en altitud (en general, pistes d'esquí), a la utilització de fertilitzants de síntesi, i als fixadors de llavor. Quant a la llavor, ens vam arriscar amb el monoconreu de gèspit (*Festuca eskia*), ja que és la planta més

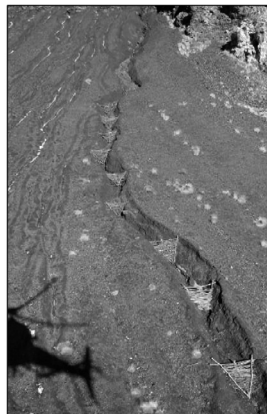


Foto 5. Microdics de ramatge per a la contenció de laves torrencials

predominant a les pastures del voltant de la zona que calia estabilitzar, i pràcticament l'única que colonitza amb elevat recobriment els sòls més pobres i amb més pendent (observada en configuració esglaonada en vessants de fins a 34°). A més a més, es tracta d'una planta rústica, poc apreciada pel bestiar, de reproducció vegetativa predominant, i molt ben adaptada al rigor del clima de l'alta muntanya. De fet, es tracta d'un endemisme pirinenc. Tenint en compte la inexistència de llavor comercial d'aquesta espècie, durant el mes d'agost es recull manualment llavor local de gèspit. També hem assajat la recollida mecanitzada, però amb resultats controvertits per causa de la gran quantitat d'impropis que cal separar a posteriori, fet que rebaixa el rendiment inicial de la recollida mecanitzada. Després de la collita cal procedir a l'assecat i la purificació de la llavor. La sembra es fa manualment a final del mes d'octubre, just abans de les primeres nevades. Per poder cobrir més superfície, es fan franges de sembra d'un metre d'amplada cada dos metres (metre sembrat - metre erm), i les llavors, si l'indret no és gaire ventós, es poden cobrir amb jaç protector (*mulch*) de palla per protegir-les de l'erosió hídrica i eòlica, del fred durant la germinació i, sobretot, de la dessecació del sòl durant les sequeres de l'estiu. No obstant això, en les zones molt ventades també és possible efectuar una sembra directa amb aplicació de *mulch* de la mateixa grava superficial que obtenim per rasclejat previ, sembra, i rasclejat en contra direcció per colgar lleument la llavor.

RESULTATS: s'observa una gran taxa de germinació en condicions de camp de les llavors de gèspit (fins a un 20%) i de supervivència de les plàntules (fins a un 50% després de l'estiu), però és molt variable en funció del tipus de sòl, orientació i climatologia de l'any en qüestió. És fonamental fertilitzar durant els primers 3 a 5 anys postsembra per pilotar el desenvolupament inicial fins que el sistema radicular estigui prou desenvolupat. Ens ha donat molt bons resultats l'aportació del fem d'ovella previ a la sembra per apletat del ramat. Uns resultats molt bons per a una revegetació amb llavors d'una planta autòctona, no domesticada, i a una altitud d'entre 2.300 i 2.600 m. En aquest sentit, val a dir que el fem d'ovella, amb les dosis aplicades per apletat del ramat, aporta nutrients fins al tercer any, i després cal continuar fent-ne el seguiment per si cal complementar amb fertilització. En alguns casos, quan la meteorologia acompanya, els resultats són

espectaculars, de manera que a finals del segon cicle vegetatiu s'aconsegueix un aspecte "assimilable" a les pastures de gésper de l'entorn, amb les primeres mates espigades, tancant ja el cicle vegetatiu amb la ressembrança natural. És un resultat francament inesperat pels tècnics d'aquest projecte de restauració ambiental, i sense parangó amb els resultats obtinguts a la parcel·la sense bogar.

Va ser tal l'èxit obtingut (vegeu la foto 6), que els tècnics del projecte Montclima es van fixar en la publicació a la revista del CENMA (Deu et al., 2018), i possiblement també en algunes ponències que havíem fet al respecte els autors Benjamin Komac i Jordi Deu, i van contractar a Silvagrana, SL la redacció d'una guia metodològica per al control de l'erosió en alta muntanya (Deu, 2022), en què vam aprofundir en la descripció tècnica dels treballs efectuats, quantificant els costos econòmics de les diferents tècniques innovadores de control de l'erosió emprades, perquè, com a avantprojecte, puguin ser utilitzades per d'altres enginyers especialitzats en restauració ambiental.

En aquest sentit cal destacar que vam desenvolupar un nou mètode de sembra raonada a partir de plantes/m², que hem anomenat Mètode Claror (Deu, 2022, p. 35-51), i que permet optimitzar el procediment de revegetació aplicat a zones inaccessibles amb maquinària emprant un helicòpter per transportar la palla, el personal, els materials, i realitzant la sembra manualment, inclosos els treballs d'ovimoreiament (apletat i regularització del terreny), a un preu de cost total de 2,5 €/m² (any 2016). Aquest preu resulta competitiu, comparat amb els preus del mercat d'hidrosembra comercial, amb la diferència fonamental que amb el Mètode Claror se sembra l'espècie corresponent a la vegetació clímax, amb llavor local. No hi ha comparació possible amb les hidrosembres convencionals des del punt de vista ambiental. A més, les anàlisis de sòl ens han revelat que aquesta espècie pot fixar unes 460 t CO₂eq/ha, fet que podria comportar per a aquests projectes de restauració la possibilitat d'autofinançament parcial mitjançant crèdits de carboni (uns 2 €/m²).

2.1.4. Prova en blanc

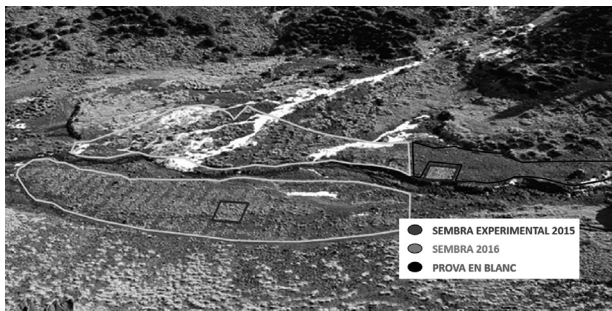
OBJECTIU: atès el caràcter netament experimental dels treballs de revegetació duts a terme, la majoria dels quals no compten amb experiències prèvies conegudes, ni referències bibliogràfiques, es va considerar oportú, a efectes de poder

contrastar resultats i obtenir aprenentatge, reservar una zona de prova en blanc, afectada per la torrentada del 2015, on no es va apletar ni sembrar.

PROCEDIMENT: la zona escollida per a la prova en blanc se situa a l'inici del primer con de dejecció que travessa el riu de Claror, de dimensions aproximades 35 m x 25 m (vegeu la foto 6).

RESULTATS: a efectes pràctics, aquesta zona es pot considerar nua de vegetació. El recobriment de la superfície destinada a la prova en blanc set anys després d'haver fet les sembres a la resta del terreny era encara inferior al 5%; per tant, no tenia capacitat de control de l'erosió.

Foto 6. Resultat de la revegetació al con de dejecció (comparar-lo amb l'estat inicial, foto 3). Cal fixar-se en les bandes de sembra (metre sembrat, metre erm), que estaven amb un recobriment de gèspit del 70% a la zona sembrada, i del 20% a la zona no sembrada cinc anys després de la sembra, sense haver-hi fet cap manteniment posterior. La parcel·la deixada com a prova en blanc continuava erma set anys després de la catàstrofe



2.2. Metodologia per a la generació i l'aplicació pràctica de l'hidrograma sintètic de recés per a la producció d'aigua blava infiltrada, en condicions de manca de pluja i de fosa de neu

Amb algunes excepcions puntuals, o potser no tant, ja han passat a la història les corporacions i les mútues privades que subministraven aigua potable sense comptadors ni a les captacions, ni a la sortida de dipòsits, ni tampoc als abonats, ja que per facturar els consums usaven el sistema arcaic de les plomes d'aigua, consistent en un fort constrenyiment en forma d'orifici de petit diàmetre a l'escomesa que alimenta l'edifici de l'abonat, que genera unes grans pèrdues de càrrega i que limita el cabal màxim que es pot servir. Era una època en què no importaven el malbaratament i les fuites a la xarxa, perquè la disponibilitat del recurs era tan evident que no era necessària una gestió tècnica acurada.

Amb vistes a un futur, per qüestions de canvi climàtic, i sovint també per l'increment de la demanda d'aigua potable a causa

del creixement poblacional, la gestió de l'aspecte quantitatiu del recurs hídic haurà de ser més acurada per poder fer front als riscos d'escassetat, que cada cop són més evidents.

Efectivament, per al cas andorrà, l'anàlisi de l'històric de les dades de precipitació a les estacions meteorològiques més antigues del país, propietat de FEDA (Encamp, Engolasters i Ransol), amb 88 anys de registres (des de 1935 fins l'any 2023), ens mostra un descens preocupant de les precipitacions a partir del canvi de segle, i aquesta reducció de les precipitacions és especialment notable a l'estació de Ransol (la que té més altitud). Mitjançant una anàlisi de regressió polinòmica, en aquesta estació es constata que les precipitacions anuals mitjanes estimades s'han reduït en un preocupant 37%, ja que han passat de ser de 1.128 mm en el màxim del període a la dècada dels anys 1970, a ser de 709 mm de mitjana en els darrers 5 anys (vegeu la figura 1). La tendència a les estacions d'Engolasters i d'Encamp és similar, si bé a Encamp el descens de precipitació no és tan acusat. Cal depurar dades i aprofundir en l'estudi amb indicadors de secada, però hi ha una tendència preocupant sobre la qual caldria centrar l'atenció i desenvolupar amb urgència mesures preventives.

Per mitigar els efectes lligats a la mancança de recurs hídic, Silvagrina disposa d'una metodologia pròpia per a la

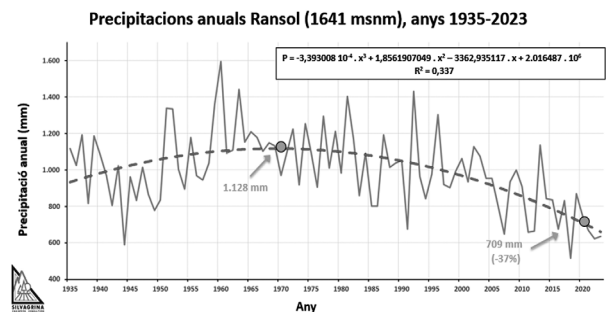


Figura 1. Precipitacions de l'estació de Ransol (FEDA). Anàlisi tendencial per regressió polinòmica

modelització del comportament dels aqüífers de vessant. Es tracta d'un mètode sobre com evoluciona el cabal de fonts i captacions superficials que creiem que podria ser de molta utilitat per als organismes amb competències en la gestió de l'aigua dins la conca hidrogràfica, per a una gestió acurada del recurs, i també per a la planificació urbanística.

A l'empresa hem dut a terme aforaments de cabal de captacions d'aigua per a diversos clients durant força anys, de manera que, treballant les dades dels hidrogrames resultants d'aquests aforaments (vegeu les figures 4 i 5), vam aconseguir trobar una estratègia de realització de la sistemàtica d'aforaments, així com de resolució gràfica i analítica, que ens permet modelitzar l'hidrograma sintètic de recés per a la producció d'aigua blava⁴ infiltrada en condicions de manca d'aportacions hídriques (secada provocada per absència de precipitacions líquides o de fosa de neu). En alguns casos dels estudis que hem efectuat es poden fer prediccions de fins a més de 300 dies vista des del cabal màxim registrat a posteriori de període humit, és a dir, de precipitacions abundants i continuades que recarreguen l'aquífer, o post fosa de neu equivalent (vegeu la figura 4).

Es tracta d'una modelització empírica del comportament hidrològic de cada captació que, en conseqüència, permet fer previsions de manca de recurs hídric, i alhora ajustar les potencialitats de suportar població amb garanties de subministrament, i per tant cercar recursos hídrics addicionals, o bé ajustar el sostre poblacional en condicions de sostenibilitat. Per desgràcia, massa sovint el sostre poblacional en relació amb el recurs hídric és totalment mancat de realisme i base tècnica.

Ho plantejem com una eina de gestió que es pot implementar amb certa facilitat si es disposa de dades d'aforaments de les captacions.

2.2.1. Aplicació pràctica de la metodologia. Etapes

2.2.1.1. Condicionament de la captació

Si no està condicionada, cal preparar la captació per poder fer aforaments sistemàtics al llarg de l'any. Aquests aforaments es farien segons les regles de l'art de la hidràulica de canals oberts, és a dir, en règim de làmina lliure. En el disseny de l'aforador (punt de mesura de cabal) caldrà analitzar la metodologia d'aforament més apropiada segons el cas, d'entre les diverses tècniques i estratègies disponibles, tenint en compte que la precisió ha de ser elevada per a cabals baixos, i que pot ser més laxa per a cabals elevats, propis de moments amb excedents i menys limitatius en la gestió del recurs.

2.2.1.2. Realització d'aforaments

Un cop condicionada la captació, es fan els aforaments

4- L'aigua blava es correspon amb la que procedeix de la pluja, de la fusió de la neu o del desgel i que s'escorre superficialment fins a rius, llacs i embassaments, o que s'infiltra en el subsòl fins als aquífers, i que finalment acaba brollant per les fonts que alimenten el riu.

sistemàtics del cabal total que aporta el recurs, ja sigui d'una font o bé d'un curs d'aigua superficial com un riu. El tècnic responsable dels aforaments ha de vetllar perquè es facin en moments específics en què no hi hagi escolament superficial dins de la conca, o en què sigui insignificant; altrament, les dades no serien vàlides per a l'aplicació d'aquesta metodologia. Per tant, a l'hora de mesurar cabals, cal esperar un temps prudencial després de les pluges o dels períodes amb fosa de neu; típicament entre mig dia i un dia un cop finalitzat l'escolament superficial, després d'un episodi de pluja i/o desgel.

Si per qualsevol motiu se sospita que hi pot haver escolament superficial, s'ha d'anotar en la llibreta de camp, atès que això facilitarà la interpretació dels resultats obtinguts a l'hora d'usar-los en la modelització. Quan les precipitacions són aïllades i poc rellevants (típicament, de menys de 15 mm), especialment a l'estiu (en moments amb forta evapotranspiració i sòl sec), i no es preveu escolament superficial ni infiltració profunda, llavors no cal fer l'aforament, ja que la precipitació únicament produeix aigua "verda", que és evapotranspirada per la coberta vegetal (vegeu la figura 2). Per aquests motius, els tècnics responsables de les lectures han de disposar d'un mínim de coneixements en hidrologia per poder decidir els moments idonis per mesurar cabals. Segons la nostra experiència al Pirineu, cal comptar com a terme mitjà amb la realització d'uns 18 aforaments anuals, tot

Aqüífer de vessant en alta muntanya. Secció transversal.

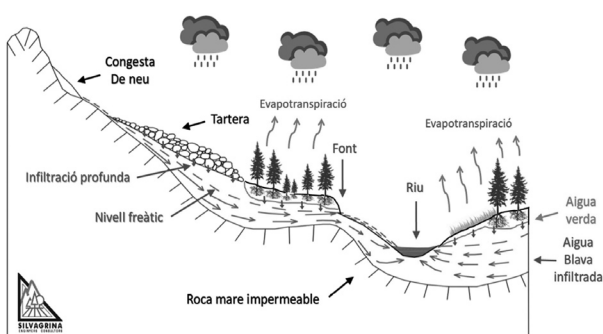


Figura 2. Esquema simplificat del funcionament d'un aqüífer de vessant en alta muntanya, per a la producció d'aigua blava infiltrada, que és la que estima el model de l'hidrogràfic sintètic de recés proposat

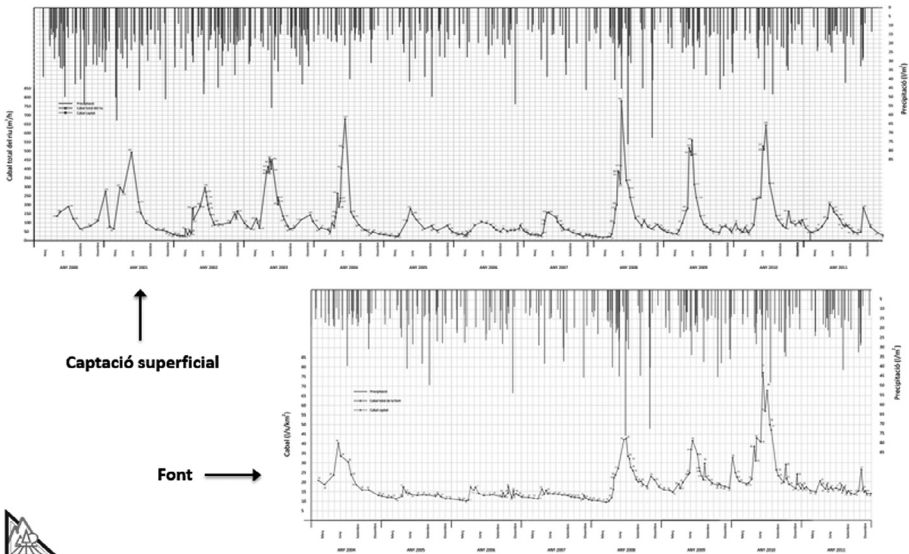
i que alguns anys en cal fer 24, i d'altres, amb 12 n'hi hauria prou. En períodes sense pluges i amb gelades, es recomana fer lectures de cabals de com a mínim una al mes, però si hi ha disponibilitat i se'n fan cada 15 dies, millor. Cal remarcar que la mesura de cabals també és imprescindible per a la gestió de la metodologia proposada, atès que, després dels períodes humits amb increment de cabal, cal fer un aforament per poder actualitzar les dades de cabal i relançar l'hidrograma sintètic de recés de l'aigua blava infiltrada.

2.2.1.3. Representació gràfica dels aforaments

Un cop es disposa de prou dades, es representen gràficament en doble eix d'ordenades els aforaments efectuats (hidrograma) i les precipitacions ocorregudes (hietograma) durant el mateix període a l'estació més propera o representativa (vegeu la figura 3). És a partir d'aquestes dades que es podrà abordar l'obtenció de l'hidrograma sintètic de recés per produir aigua blava infiltrada del punt de captació en qüestió.

2.2.1.4. Obtenció de l'hidrograma sintètic de recés per a la producció d'aigua blava infiltrada

Figura 3. Hidrograma i hietograma d'exemple de dues captacions de comportament molt diferent. Davant les mateixes precipitacions, es constata que la captació superficial registra puntes de cabal més elevades, i descensos més acusats respecte de una captació de font. Es pot doncs esperar diferències importants en cabals segons el tipus d'aqüífer i les característiques de la conca



Un cop es disposa de l'hidrograma i el hietograma (vegeu la figura 3), es fa un tractament de les dades amb mètodes de resolució gràfica que es complementen amb tractaments estadístics i ajustaments matemàtics, per generar l'hidrograma sintètic de recés⁵ per obtenir aigua blava infiltrada, en condicions d'absència d'aportacions hidriques a l'aquífer, i aconseguir la corba d'ajustament per regressió i l'equació que modelitza el comportament mitjà del cabal que podem esperar en un futur en situacions hipotètiques pessimistes, és a dir, en condicions de secada (vegeu la figura 4).

Per als casos que hem treballat amb prou quantitat de dades, l'R2 de l'equació de regressió s'ajusta a valors superiors al

5- L'hidrograma el sintetitzem emprant únicament els registres obtinguts en condicions de secada; per tant, el cabal sempre és decreixent, d'aquí el nom d'hidrograma sintètic de recés.

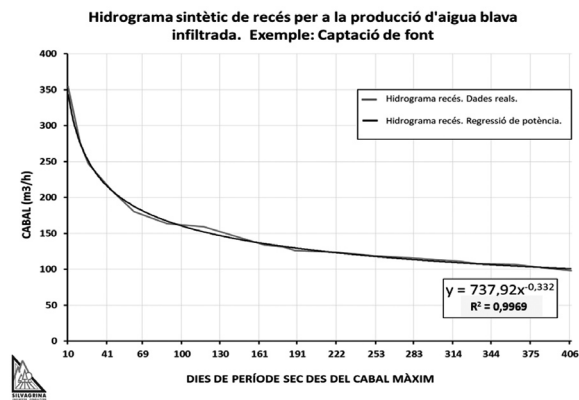
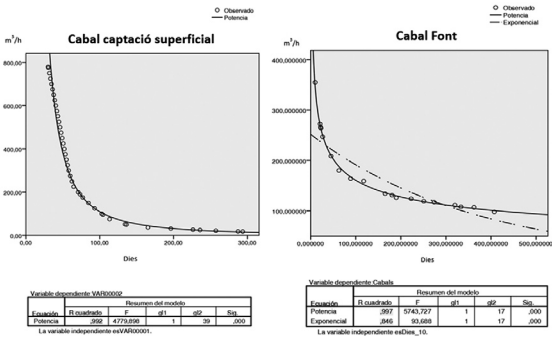


Figura 4. Exemple d'hidrograma sintètic de recés. Cal destacar la bondat de l'ajustament entre dades reals i la regressió

99% de la variabilitat observada que és explicada pel model. Cal tenir en consideració que, des del punt de vista de l'enginyeria, molt sovint se sol considerar satisfactòria l'obtenció de valors de $R^2 > 70\%$. Com a exemple dels resultats finals del tractament de dades, presentem dos gràfics en format esborrany, obtinguts amb un programa de tractament estadístic (vegeu la figura 5).

Cal destacar les grans diferències que s'aprecien tant a la banda alta com a la banda baixa de cabals, segons el tipus

Figura 5. Comparació entre hidrogrames sintètics de recés d'una font i d'una captació superficial. Al gràfic de la font hi hem afegit la corba de la regressió exponencial, que és la que usen altres investigadors considerant la producció d'aigua blava, inclòs l'escolament superficial, a diferència de nosaltres, que l'eliminem de l'equació



d'aquífer que es tracti, molt diferents en aquest exemple entre una font i un curs superficial, però en què també influeix molt el tipus de conca hidrològica d'acord amb la seva altitud, orientació, tipus de sòl, geomorfologia, vegetació, etc. Per aquest motiu, és molt important disposar de dades empíriques que puguin validar els resultats de la modelització. Una altra observació pertinent que cal tenir en compte és el fet que el gràfic que s'obté (vegeu les figures 4 i 5) és una entelèquia, ja que no es reproduirà mai en la realitat en la seva totalitat, ja que, com és lògic, poc o molt, sempre hi haurà aportacions a l'aquífer que en faran créixer el cabal. Únicament té interès a efectes de gestió abstracta del recurs hídric, perquè ens prediu el pitjor dels escenaris possibles a llarg termini.

2.2.1.5. Calibratge i validació continuada

Val a dir que el procediment de modelització es compon de dos etapes temporals, la de calibratge del model i la de validació. Un cop es disposa de prou dades, es fa el calibratge del model i, amb aquesta corba, vistos els valors d' R^2 que s'obtenen, ja es pot treballar amb una confiança considerable. Per millorar l'ajust del model es recomana anar fent una validació continuada durant diversos anys, especialment durant els moments de secada, però sobretot per verificar la variància. Amb un banc de dades més gran, es pot treballar la resolució analítica (que ja hem assajat amb resultat satisfactori), obtenint a més una corba envoltant als valors mitjans de valors factibles.

S'aprofitaran les dades dels aforaments que cal anar fent durant els anys posteriors a la implementació de la metodologia, perquè millori així la fiabilitat i l'abast de les prediccions.

2.2.1.6. Aplicació pràctica del model

Un cop es disposa de l'equació definitiva de cada captació que alimenta la xarxa d'aigua, cal tenir en consideració que, per qüestions hidrològiques, aquests gràfics són sumatius i, per tant, es pot saber el recurs hídric total de què es disposarà en un termini determinat senzillament sumant els valors obtinguts als gràfics de les diferents captacions que alimenten la mateixa xarxa. Així doncs, aplicant aquesta metodologia a conques petites, atès que els gràfics són sumatius, també es pot modelitzar una conca més gran en direcció aigües avall. Tanmateix, cal fer un aclariment: els pous no es poden modelitzar amb aquesta metodologia; cal fer assajos de

bombeig, o bé obtenir la potencialitat de bombeig segons l'alçària del nivell freàtic, a partir de la informació empírica equivalent que tingui el gestor del pou. Un cop es disposi d'aquesta informació, també es pot incorporar el cabal aportat pel pou sumativament al mètode general a què ens referim (vegeu la figura 6).

Mitjançant la consideració dels dos paràgrafs anteriors, es genera la corba de l'oferta en condicions de secada del recurs hídric mínimament disponible. Confrontant aquesta oferta amb la corba de la demanda (de la qual el gestor hauria de disposar), obtenim la data en l'horitzó en què si l'aquífer no es recupera amb noves aportacions hídriques, llavors s'han de començar a aplicar restriccions.

L'aplicació pràctica de la metodologia, un cop es disposa de la modelització de cada captació i de la corba de la demanda, consisteix a generar l'algorisme corresponent i preparar un programa informàtic. Es pot començar amb un full de càlcul de tipus Excel, i més endavant millorar-lo preparant un programari (*software*) específic que pugui complementar la presentació en pantalla al panell de control del qual se suposa que disposarà la gestora de conca.

Un cop obtinguda l'equació de regressió bijectiva del tipus $f(t)=Q$ (vegeu la figura 4), es calcula la funció inversa del tipus $f^{-1}(Q)=t$, que és la que s'utilitzarà amb la metodologia proposada per calcular a partir d'un aforament concret de valor Q el valor del dia (t), expressat en termes relatius dins la corba.

Posteriorment es reprèn la primera funció per generar les parelles de valors de dia-cabal, i establint un calendari obtenim les parelles de valors data-cabal fins a la fi del domini empíric de la funció, entre 300 i 400 dies des de l'origen de coordenades (vegeu les figures 4 i 5). Val a dir, però, que, si és necessari, el bon ajust de la regressió ens permet anar fins i tot més enllà del domini empíric de dades disponibles contrastades amb força confiança.

Periòdicament, especialment després de les temporades amb precipitacions abundants o fosa de neu que hagin pogut recarregar l'aquífer, cal fer un nou aforament de les captacions per actualitzar les previsions, posant al dia el sistema, de manera que entrant les dades de cabal recents es tornaria a generar l'escenari futur més desfavorable, amb dates concretes i cabals mínims esperables, amb els que cal comptar en l'horitzó pessimista de gestió (vegeu la figura 6).

Efectivament, casant aquestes dades amb les de la corba de la demanda (consums de la xarxa d'aigua, variable segons època de l'any), es pot saber com de lluny es troba la fatídica data en què començarà a faltar aigua a la població si no hi ha recàrrega, i així poder anticipar-se amb molta antelació i planificar les decisions de gestió a curt i mitjà terminis més escaients, com ara:

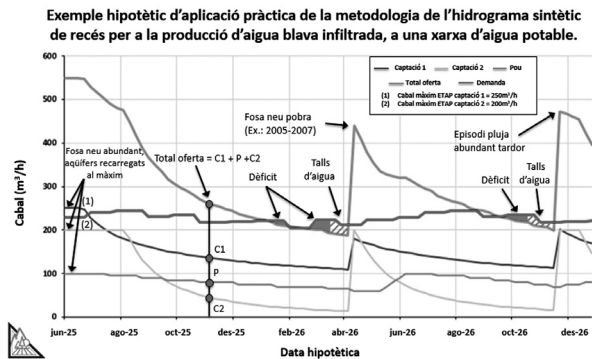
Reducció de la demanda:

- Campanyes de sensibilització enfocades a l'estalvi d'aigua.
- Increment tarifari segons els diferents usos de l'aigua.
- Campanya de detecció de fuites i millora de l'eficiència de la xarxa.
- Imposició de restriccions en determinats usos o activitats.
- Talls programats en el subministrament per sectors, si cal.

Increment de l'oferta:

- Aportació d'aigua amb cisternes des d'altres conques.
- Activació de captacions existents en desús, de pitjor qualitat.

Figura 6. Exemple hipotètic d'aplicació pràctica de la metodologia a una xarxa d'aigua potable. Per obtenir el moment a partir del qual cal aplicar restriccions en el subministrament mitjançant talls d'aigua als abonats, s'ha considerat un volum de la reserva als dipòsits equivalent al consum mitjà de la xarxa en 24 h



2.2.2. Beneficis addicionals de la metodologia

- Aquesta metodologia podria servir per fixar i gestionar el cabal ecològic que cal respectar pel que fa a la captació.
- Permet simular els cabals esperables als rius en condicions de manca d'aportacions hidriques de conques regulades amb preses, com si no existissin, en el seu estat natural. És d'interès per simular potencials ecològics de fauna i flora de ribera, entre altres.
- La modelització també pot ser de molta utilitat quan s'han de fer obres de reparacions, millora o manteniment en alguna

captació o ETAP⁶ associada, que per les característiques dels treballs s'hagi de deixar fora de servei, i sigui necessari saber quant de temps pot deixar-se la xarxa d'aigua potable sense aquest recurs, i alimentar-la amb les captacions restants aprofitant moments amb excedents d'aigua, a fi de planificar les actuacions, i, si fos el cas, fixar el termini màxim que cal indicar en la licitació de les obres, per tal que no es pugui posar en risc el subministrament.

- Una altra de les utilitats de la modelització, potser la més important, és que permet avaluar amb coneixement de causa la necessitat de buscar nous recursos, d'acord amb el creixement poblacional de determinats indrets o noves demandes que calgui atendre. Ens permetrà, doncs, determinar la capacitat de càrrega màxima de la població, i fixar el límit poblacional sostenible, amb un nivell controlat i acceptable dels riscos assumibles tenint en compte els recursos hídrics disponibles. El límit poblacional sostenible es podria fixar d'acord amb els criteris de període de retorn, procedint similarment a com es fa en urbanisme amb la hidrologia torrencial.

- La metodologia, en millorar el coneixement dels cabals disponibles en un futur, incorpora una dosi de diligència en la gestió que permet optimitzar la monetització del turbinatge en centrals hidroelèctriques, i també l'emissió de GEH.⁷

- En cas que arribi un període de secada extrem, en què la zona servida es quedi sense prou aigua potable i s'hagin de fer talls en el subministrament als abonats, llavors, des del punt de vista de la comunicació, el titular del servei podrà argumentar davant dels usuaris que s'ha gestionat el recurs amb una metodologia avançada i validada científicament,⁸ deixant clar que no s'ha improvisat prenent decisions intuïtives, tal com succeeix en l'actualitat. Aquests arguments tenen importants conseqüències des del punt de vista jurídic per poder capejar, o directament aturar, les demandes judicials de responsabilitat civil contra l'oficina de gestió del recurs, així com contra els tècnics responsables de la gestió. Això també pot limitar les conseqüències polítiques, si es pot argumentar davant d'una catàstrofe natural de secada extrema que s'ha actuat amb diligència.

- Mitjançant aquesta manera de procedir hi podria haver una millora de la comunicació amb els usuaris i, en conseqüència, un augment de la confiança en la gestió.

6- ETAP: Estació de tractament d'aigua potable.

7- GEH: Gasos d'efecte hivernacle.

8- Estem treballant en la preparació d'un article científic de revisió per parells per a una revista especialitzada en hidrologia conjuntament amb l'UDL.

2.2.3. Aplicació del model sense disposar de dades històriques d'aforaments

En el supòsit que no es disposi de les dades d'aforaments de les captacions per iniciar la modelització, llavors caldrà dur a terme una campanya d'aforaments fins que es disposi d'un banc de dades suficient que permeti encetar la modelització de cada captació. Tenint en compte que el model que proposem emprar és de base empírica, la durada de la realització d'aforaments per poder efectuar la modelització i la validació posterior no es pot determinar a priori, atès que dependrà de la fortuna que es tingui amb la coincidència de la realització dels aforaments de les captacions durant períodes de forta secada. En una primera aproximació, cal comptar que, pel cap baix, caldrà disposar almenys d'uns 3-5 anys de dades per començar a tenir informació suficient sobre com es comporta l'aqüífer de vessant, per poder configurar l'hidrograma de recés amb prou fiabilitat com per poder començar a usar-lo en la gestió.

No obstant el que s'ha esmentat, Silvagrina disposa d'una base de dades confidencial de diverses fonts i cursos d'aigua superficials aforats en bona part del territori andorrà en moments de secada intensa durant un dels períodes més secs dels darrers 88 anys, és a dir, entre 2004 i 2008 (vegeu la figura 1). Aquestes dades, mitjançant l'aplicació de la tècnica dels escenaris comparats, poden servir per començar a generar un hidrograma sintètic de recés orientatiu, un cop es disposi d'un mínim de punts de l'hidrograma per a la captació que permetin marcar tendències amb un mínim de fiabilitat. Alguns aforaments s'haurien de fer simultàniament també a la conca de referència assimilable escollida per similituds de la qual es coneix l'hidrograma o els cabals crítics, per poder fer ajustaments per comparació.

Complementàriament, val a dir que el bon ajustament de la regressió (vegeu les figures 4 i 5) facilita molt el procés d'inferència amb poques dades, sempre que estiguin prou separades entre si. Cal fer notar que precisament la part més interessant de l'hidrograma sintètic és la que representa els cabals baixos, a partir del moment en què tenim en general més de 200 dies de secada acumulada, i en aquest tram de la corba, el comportament és gairebé rectilini, fet que en facilitaria l'extrapolació.

D'entre les dades de què disposa Silvagrina, caldrà veure quines es poden adaptar millor segons condicions assimilables de la conca hidrològica: superfície, pendent mitjà,

orientació, altitud, tipus de sòls, coberta vegetal, geomorfologia, etc. La gràfica s'aniria millorant progressivament a mesura que es vagi disposant de més aforaments reals. D'aquesta manera, el gestor del servei d'aigua podria disposar en pocs anys d'una gràfica provisional, que podria ser de gran ajuda per anticipar la gestió del recurs amb molt de temps abans que hi hagi algun episodi de secada especialment complicat, el qual, paradoxalment, serviria per millorar el model per al futur, ja que permetria allargar la representació real de l'hidrograma a un termini predictiu més gran.

2.2.4. Limitacions de la metodologia

- El model únicament estima l'aigua blava infiltrada que drenarà per la conca. Som incapaços d'estimar l'increment de cabal per recàrrega de l'aquífer amb pluja o fosa de neu amb un mínim de precisió comptant únicament amb dades de temperatura (màxima i mínima) i pluviometria acumulada en 24 h. Cal fer aforaments.
- A principis d'hivern, si arriba un període amb fortes glaçades, sense que la neu hagi recobert els cursos superficials d'aigua (els protegeix davant el glaç), s'arriben a formar cordons de gel a l'interior i al voltant dels torrents, que retenen una part important del cabal drenat. En aquestes condicions, el model sobreestima el cabal fins que el curs superficial d'aigua no es recobreix amb neu.
- Pronostiquem possibles limitacions d'aplicació en zones amb glaceres, per alliberament brusc d'acumulacions d'aigua internes, i també en massissos càrstics per eventuais fenòmens de sifonat.
- L'anisotropia de les precipitacions sobre el territori fa que la metodologia s'hagi d'aplicar a conques relativament petites. Per a una conca gran, si no es vol perdre precisió, cal fer el sumatori de les subconques que la componen.
- Variacions importants en els usos del sòl de la conca de recepció que afectin la infiltració relativa entre zones o la recàrrega de l'aquífer poden fer que s'hagi de recalibrar l'hidrograma de recés.
- Obtenim l'hidrograma de recés a partir dels valors mitjans dels períodes de secada analitzats, amb regressions molt vàlides. No obstant això, en determinats trams de l'hidrograma s'observen desviacions que caldria tenir en consideració marcant una envoltant.

- Aquesta metodologia és encara incipient; ha funcionat molt bé en els pocs casos en què l'hem aplicat al Pirineu andorrà en conques petites. Caldria, però, assajar-la en més casos, i aplicar-la en d'altres condicions a més baixa altitud, on la innivació sigui menys rellevant.

3. Conclusions

Els treballs d'ovinoremeiació aplicats en les mesures correctores a la conca de Claror han donat resultats molt satisfactoris, en harmonia amb el medi ambient, i demostren les potencialitats d'integrar l'activitat pastoral per aconseguir sinergies amb les necessitats de qualitat ambiental que la societat actual demana. Efectivament, la compactació i la suavitització dels xaragalls no hauria estat possible d'abordar amb maquinària o manualment amb operaris en condicions de seguretat (vegeu les fotos 1 i 2). Cal destacar també el fet que la revegetació amb gèspit sobre sòl estèril prèviament bogat amb el ramat per apletat ha estat realment espectacular si el comparem amb la prova en blanc (vegeu la foto 6).

Quant als microdics de ramatge col·locats dins dels xaragalls, de moment es comprova que els han estabilitzat i que ja han retingut laves torrencials de certa consideració, sense crear interferències amb el bestiar.

Amb els diferents treballs de restauració ambiental –alguns d'ells pioners en el paper d'estabilització de terrenys malmesos per processos erosius intensos– duts a terme a la zona afectada per la torrentada, és important tenir en consideració que, segons la nostra experiència, són necessaris com a mínim de tres a cinc anys de seguiment postseembra, continuar amb l'aplicació de mesures correctores per completar i mantenir els microdics i, sobretot, per aconseguir fixar la vegetació fins al punt que el recobriment vegetal es pugui considerar reeixit i, en conseqüència, l'erosió estigui controlada als nivells d'abans de la torrentada, o que estigui fins i tot millor. Aquests treballs acceleraran força la fixació de gran part dels sediments més fins que causen gran terbolesa a l'aigua del riu de Claror i minimitzaran el risc de talls en el subministrament d'aigua a la població d'Escaldes-Engordany. Val a dir que, en aquest sentit, des del moment en què es van construir els microdics, i un cop germinat el gèspit sembrat, no hi ha hagut cap més tall en el subministrament d'aigua potable per terbolesa extrema a la parròquia d'Escaldes-Engordany, tot i que des del 2017 hi ha hagut diverses

tempestes a la zona, alguna de fins a 100 mm/24 h i amb un total acumulat de 200 mm en una setmana, com l'any 2023.

La revegetació de sòls degradats en altitud mitjançant la llavor local de *Festuca eskia* per aplicació del Mètode Claror és molt prometedora. Efectivament, a banda de controlar eficaçment l'erosió d'aquestes zones de sòls fràgils, altament erosionables, es fixen al sòl grans quantitats de carboni atmosfèric, amb un efecte embornal a llarg termini innegable, i a un cost econòmic baix, atès que el preu/m² d'aquestes sembres es troba al mateix nivell que les hidrosembres que es fan a les pistes d'esquí amb espècies comercials, no autòctones, que especialment a les zones de més altitud i amb sòls pobres no acaben de reeixir, i deixen amb el pas dels anys el sòl desprotegit i gairebé sense haver fixat carboni en el sòl. Entenem que, essent una metodologia pionera a escala internacional i d'origen andorrà, el Departament de Medi Ambient del Govern d'Andorra hauria de valorar aquests recursos per, si escau, fomentar la utilització del Mètode Claror intervenint-hi normativament, de manera que els treballs de revegetació que es fan als camps de neu, abocadors i talussos de carreteres, especialment a les parts altes i en les zones més erosionables, es facin aplicant el mètode Claror. Cal tenir en consideració que els resultats d'aquesta restauració ens avalen, ja que han estat valorats com de gran utilitat per part d'experts de la UE, atès que mitjançant el programa de recerca Montclima es va contractar a Silvagrina la redacció d'una guia metodològica per al control de l'erosió en alta muntanya (Deu, 2022), document que neix amb la vocació de servir com a referència a la zona Sudoe (sud-oest d'Europa) per a la restauració en altitud de sòls malmesos per fenòmens erosius intensos.

La gestió quantitativa del recurs hídic, per causa de l'increment dels períodes de secada extrema motivats pel canvi climàtic, s'enfronta a un gran repte de sostenibilitat. Pel que fa al cas andorrà, la reducció del 37% de la precipitació mitjana anual respecte de la que teníem als anys 70 (vegeu la figura 1) és un avís seriós, contundent i preocupant. El repte és encara més gran per a les poblacions que no disposen de preses reguladores, i que, per tant, han de ser gestionades d'acord amb la disponibilitat de cabal fluent del moment, com és el cas del subministrament d'aigua potable a Andorra.

Preocupada pel desafiament que suposa aquest perillós escenari de futur per a la nostra societat, Silvagrina ha

Referències

- LÓPEZ CÁRDENAS DE LLANO, F. [et al.] (1998). *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*. Ed. Tragsa, Tragsatec, Ministerio de Medio Ambiente, Ediciones Mundi-Prensa, 945 p.
- COHEN-SHACHAM, E., WALTERS, G., JANZEN, C., & MAGINNIS, S. (eds.). (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN International Union for Conservation of Nature.
- DEU, J., DOMINGO, D., KOMAC, B., & ROQUET, M. (2018). Restauració ambiental a la conca del riu de Claror. *Revista del CENMA*, (9), 40-51.
<https://www.iea.ad/images/CENMA/revista/09/11.pdf>
- DEU J. (2022). *Guía de actuación. Mitigación del impacto del cambio climático en alta montaña Pirenaica: Control de la erosión hídrica mediante soluciones basadas en la naturaleza*. Proyecto INTERREG-SUDOE-MONTCLIMA. NEIKER | Guías Montclima - Control erosión 1.0.indd
<https://www.montclima.eu/en/file/381>
https://www.montclima.eu/sites/default/files/info_material/docs/guias_montclima_control_erosion_es_br.pdf

desenvolupat una metodologia pròpia, de base empírica, amb poques limitacions d'aplicació pràctica, que permet una gestió proactiva del recurs hídic a partir de modelitzar en condicions de secada el comportament dels aqüífers lliures de vessant, com ara els que alimenten majoritàriament les captacions d'aigua potable del Pirineu.

Concretament, es planteja la generació de l'hidrograma sintètic de recés per a la producció d'aigua blava infiltrada en condicions de manca d'aportacions hídriques significatives a l'aqüífer, de manera que per aplicació d'aquesta metodologia d'elevada precisió predictiva (vegeu la figura 4) es posa en relleu la pitjor de les hipòtesis de disponibilitat del recurs, i s'ofereixen previsions de cabal d'entre 300 a 400 dies vista des del màxim. Aquests valors de disponibilitat del recurs hídic es confronten mitjançant l'aplicació d'un programa informàtic amb la corba de la demanda per trobar la data a partir de la qual, si no hi ha recàrrega de l'aqüífer, caldrà aplicar racionaments d'aigua (vegeu la figura 6). Aquest fet suposa importants implicacions pràctiques en una gestió diligent del recurs que anticipa la cerca de solucions davant la manca d'aigua que el model albira en l'horitzó.

Conèixer el comportament de l'hidrograma de recés comporta utilitats addicionals, d'entre les quals potser la més destacable sigui el fet que permet determinar el límit poblacional sostenible a partir de criteris de període de retorn, similarment a com es fa en urbanisme amb la hidrologia torrencial.

La natura, per selecció natural, és resiliència en estat pur. Cercar solucions als problemes de l'home inspirant-nos en com la natura els ha afrontat (NBS) ens proporcionarà la resiliència necessària per adaptar-nos i superar els efectes adversos del canvi climàtic.