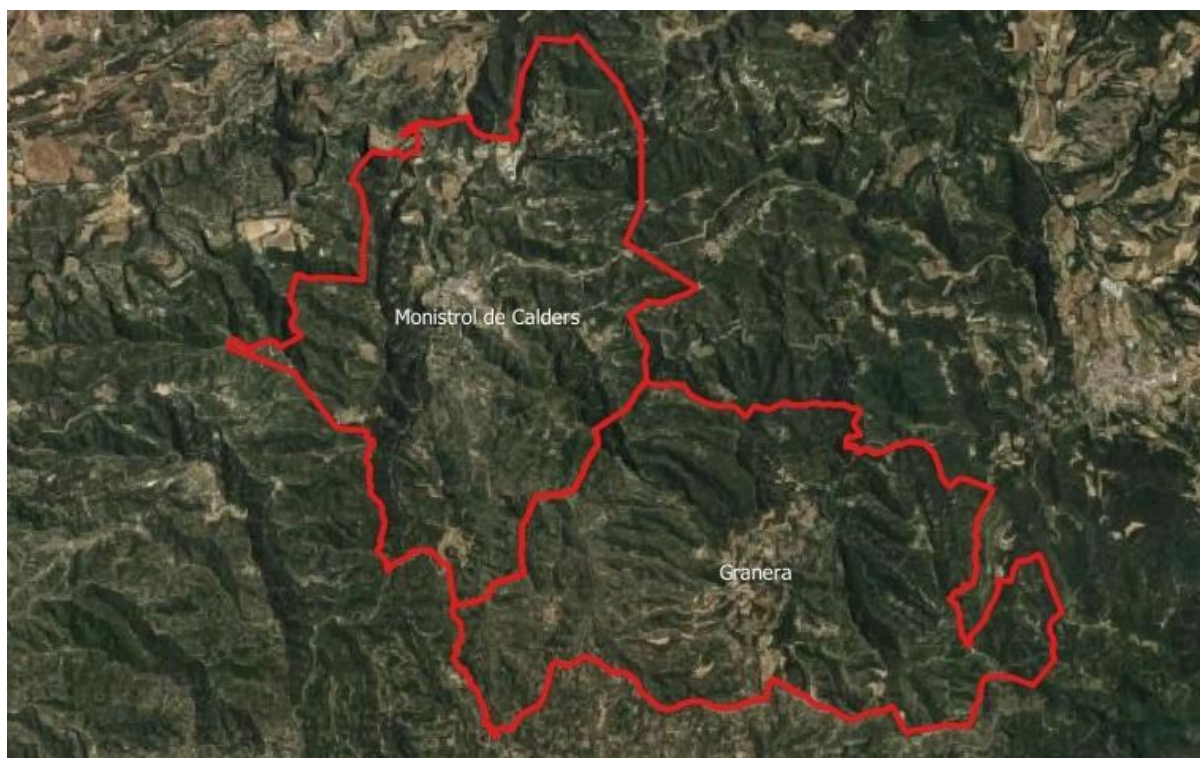




*- Redacció de projectes de millora del patrimoni natural –  
Catàleg de serveis 2021*

# ESTUDI DE SERVEIS ECOSISTÈMICS DE GRANERA I MONISTROL DE CALDERS

(Codi C015)



**Municipis: Granera i Monistrol de Calders**  
**Comarca: Moianès**

**Novembre de 2021**

## **Ens peticionari:**

Consell Comarcal del Moianès  
Àrea de Territori, Urbanisme i Canvi Climàtic

## **Centre gestor del recurs i coordinació tècnica:**

Oficina Tècnica de Planificació i Anàlisi Territorial

Gerència de Serveis d'Espais Naturals  
Edifici del Relotge, 3a planta  
C/Urgell 187, 08036 Barcelona

## **Redacció del projecte:**

Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya



Programa de Gestió Forestal Multifuncional

Aitor Améztegui González. Doctor Enginyer de Forests.  
Mario Beltrán Barba. Enginyer de Forests, Enginyer Professional Senior.  
Mar Pallarés Pascual. Enginyera de Forests.  
Eduard Busquets Olivé. Enginyer Forestal i Màster de ciència i gestió del foc.

## Contingut

1. Introducció .....	1
2. Descripció i motivació de l'encàrrec .....	2
3. Objecte de l'encàrrec .....	3
4. Resum metodològic .....	4
Àmbit d'estudi .....	4
Usos del sòl .....	4
Caracterització del règim climàtic a la zona d'estudi .....	6
Compilació de dades climàtiques històriques (1995-2021).....	6
Compilació de dades climàtiques futures (2022-2100).....	7
Caracterització del bosc a la zona d'estudi.....	8
Caracterització dels sòls a la zona d'estudi .....	11
Simulacions de dinàmica forestal i balanç hídric .....	12
Simulacions de dinàmica històrica .....	13
Simulacions futures sense gestió forestal .....	13
Simulacions futures amb gestió forestal.....	13
Indicadors i avaluació dels serveis ecosistèmics .....	13
5. Resultats.....	15
Canvis en el usos del sòl.....	15
Canvis climàtics en el període analitzat (1995-2100) .....	18
Evolució temporal del clima en l'àmbit d'estudi (1995-2100).....	18
Variació espacial del clima en l'àmbit d'estudi (1995-2100) .....	21
Quantificació històrica de la provisió de serveis ecosistèmics .....	23
Simulacions de dinàmica forestal i balanç hídric (1995 – 2050) .....	27
Variació de la provisió històrica d'aigua blava del bosc (1995-2020).....	27
Canvis en la dinàmica del bosc (2020 – 2045).....	28
Canvis en la provisió d'aigua blava (2020 – 2045).....	30
Canvis en el grau d'estrès hídric de la vegetació (2020 – 2045) .....	35
6. Conclusions .....	38
7. Agraïments .....	40
8. Bibliografia.....	40

## 1. Introducció

El present treball es desenvolupa en el marc del recurs del catàleg de serveis que ofereix la Diputació de Barcelona als ajuntaments i entitats locals de “**Redacció de projectes de millora del patrimoni natural (Codi 21261)**”. Aquest recurs es basa en la identificació dels serveis ecosistèmics que ofereix el territori i en la millora de la Infraestructura Verda municipal.

Els ecosistemes naturals i seminaturals proporcionen beneficis a les persones afavorint la seva qualitat de vida. Aquests sistemes poden estar formats per boscos, conreus, rius, etc. Els beneficis que generen se'ls coneix com a serveis ecosistèmics. Una de les funcions de la infraestructura verda és disposar d'aquesta xarxa de zones naturals i seminaturals, de manera planificada i gestionada, per tal d'aconseguir el màxim de serveis per a les persones. La millora de la infraestructura verda local consisteix en un conjunt d'actuacions dirigides a mantenir un medi natural estable amb un bon estat de conservació i actuar en la línia de diversificar, incrementar i optimitzar la prestació de serveis dels ecosistemes.

La identificació de la Infraestructura Verda municipal està definida en ***l'Informe dels espais lliures*** que ofereix la Diputació de Barcelona, seguint les directrius establertes per la Unió Europea en aquest àmbit (COM2011-244 Estratègia de la UE sobre la biodiversitat fins 2020 i COM 2013-249 Infraestructura verda: millora del capital natural d'Europa).

La Gerència de Serveis d'Espais Naturals gestiona dotze espais naturals a la província de Barcelona i ha acreditat una experiència en l'execució de projectes de millora del medi natural fruit de la gestió activa sobre el territori. Alhora també realitza planificació estratègica dels espais lliures municipals on es detecten les singularitats i els valors naturals del municipi. Seguint les directrius europees, i amb la vocació de servei al món local, la voluntat de la Gerència de Serveis d'Espais Naturals és estendre l'experiència en gestió del territori i en la millora del medi natural més enllà dels Espais Naturals que gestiona. El recurs preveu la realització d'una sèrie d'actuacions que tinguin un valor demostratiu de les principals línies d'actuació que contempla:

- a. Conservació i millora del patrimoni natural local, amb la millora de l'estat de conservació dels hàbitats i de les espècies prioritàries i dels processos ecològics, i
- b. Ordenació de l'ús públic associat a aquests espais a conservar.

## 2. Descripció i motivació de l'encàrrec

Granera i Monistrol de calders, amb unes 1.800 ha cremades, van ser dels municipis més afectats pels incendis de l'estiu de 2003, especialment amb l'incendi de l'agost iniciat a Sant Llorenç Savall (Figura 1). Els anys posteriors es va voler recuperar part de l'arbrat realitzant una plantació de roures i alzines, però el resultat de la reforestació no va complir les expectatives ja que el % de marres va ser molt elevat.

Des d'aquell estiu i amb la desforestació de la zona, es va detectar que el volum de l'aigua freàtica era molt inferior al volum previ als incendis, convenint-se en un problema ja que la captació de l'aigua del subsòl no cobreix la demanda en períodes estivals, i cada vegada durant més temps. S'han debatut possibles causes de la baixada d'aigua disponible, generalment a partir d'observacions i hipòtesis prèvies. Es considera que ha de ser rellevant la pèrdua de cobertura arbòria a les conques i a les subconques, la modificació del microclima de Monistrol i Granera i municipis limítrof per la pèrdua dels boscos i pels canvis en els patrons de precipitació de forma generalitzada derivats del canvi climàtic. El municipi més afectat és Granera on el consum d'aigua de l'estiu s'ha complementat fent portar aigua amb cisternes. Dins de l'estratègia comarcal de l'Àrea de Territori, urbanisme i canvi climàtic, hi podem trobar els diferents aspectes que es vol millorar en l'àmbit urbanístic i canvi climàtic de la comarca.

Amb l'encàrrec es pretén estudiar els serveis ecosistèmics que ofereixen els espais lliures de Granera i Monistrol de Calders, en especial els relacionats amb l'aigua blava aprofitable pel consum humà, amb la finalitat d'analitzar i modelitzar com poden afectar diferents escenaris d'evolució de la coberta forestal i els usos del sòl i en la gestió del mateix, per poder incrementar la recàrrega dels aquífers, incidint en les condicions de drenatge del sòl, en la disminució de l'escorrentiu superficial, en les condicions microclimàtiques dels àmbits municipals objecte de l'estudi, etc.

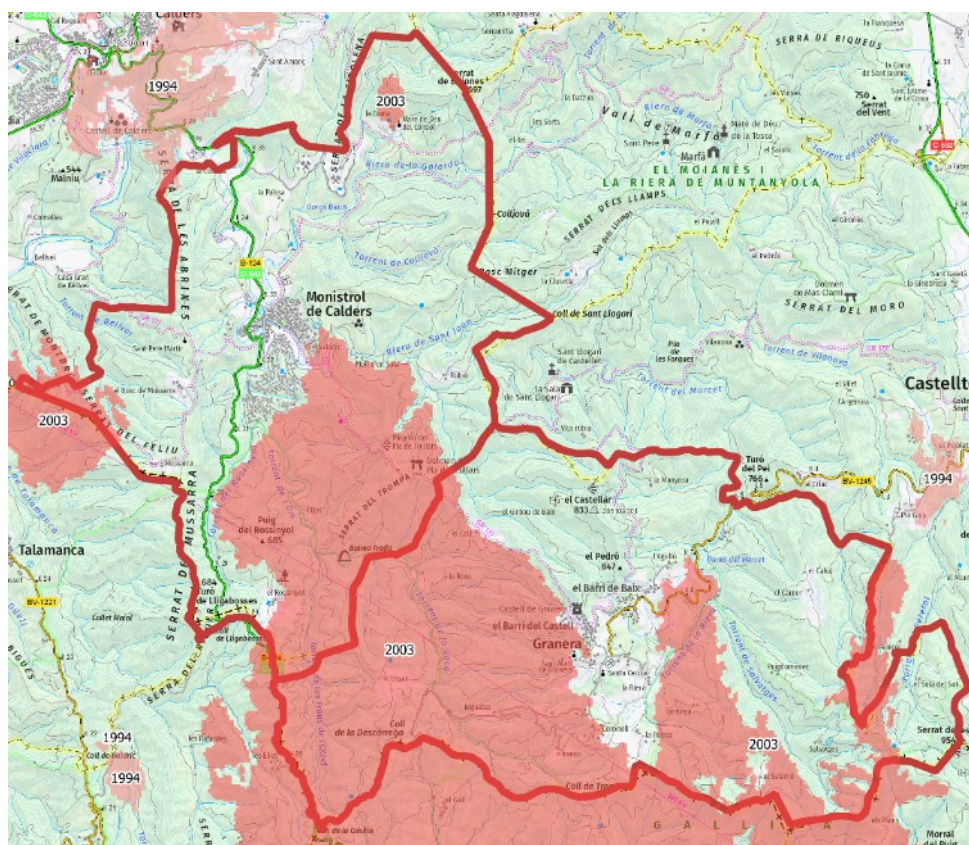


Figura 1. Superfície afectada pels diferents incendis ocorreguts a l'àmbit d'estudi.

### 3. Objecte de l'encàrrec

Els boscos ofereixen una gran varietat de serveis ecosistèmics que depenen de sistemes complexos i que estan estretament lligats al clima i al sòl, de manera que canvis en aquests elements poden implicar fortes alteracions en els processos ecològics. Donat que la societat depèn en gran mesura dels productes i serveis que es deriven del bosc, els canvis en el clima i en el sòl afecten també, de manera directa i indirecta, a les condicions de vida humanes.

La regulació del cicle de l'aigua n'és un exemple, ja que depèn de les característiques de la massa forestal i de les condicions ambientals i, a més, té un impacte directe en l'aigua blava, que és la quantitat d'aigua disponible per al consum humà.

A la comarca del Moianès i al conjunt de Catalunya, la superfície forestal ha augmentat des de la segona meitat del segle XX, tant en àrea d'ocupació com en densitat d'arbrat. Aquest canvi en l'ús del sòl i en la coberta té repercussions en el cicle hidrològic a escala local, sotmès, a escala global, als efectes del canvi climàtic. En aquest context, la gestió territorial i forestal són clau per equilibrar els processos i dinàmiques naturals i per augmentar la capacitat de retenció d'aigua i l'exportació d'aigua blava sense malmetre el sistema, i en conseqüència incrementar un recurs de necessitat bàsica, ja que permeten regular el cicle hidrològic. Els esdeveniments traumàtics, com els incendis forestals de 2003, són també un element desestabilitzador del sistema a tenir en compte a curt i llarg termini.

El present estudi té per objectiu general dissenyar escenaris d'adaptació al canvi climàtic i simular el seu impacte en els serveis ecosistèmics a mitjà-llarg termini a la comarca del Moianès. En concret, l'àrea d'estudi se centra en les conques hidrogràfiques dels municipis de Granera i Monistrol de Calders (Figura 2).

Com a objectiu específic, es pretén fer un anàlisi del passat recent, de la situació actual i la futura per tal de fer propostes de gestió del territori i de l'ús del sòl destinades a augmentar la capacitat de generació d'aigua blava a les conques seleccionades.



*Figura 2. Localització dels municipis de Granera i Monistrol de Calders a les conques del Llobregat i el Besòs.*

## 4. Resum metodològic

Per a l'estudi de la influència dels diferents elements de l'ecosistema en els serveis ecosistèmics que ofereix la coberta forestal als municipis de Granera i Monistrol de Calders, la metodologia emprada es basa en l'ús d'eines de modelització del clima, la vegetació i el sòl que s'alimenten de les dades disponibles localment i globalment i permeten realitzar projeccions a futur. D'aquesta manera es pot avaluar l'efecte de cada element en el resultat global per tal de documentar i detallar les observacions passades quant a la disponibilitat d'aigua i altres serveis i per poder fer projeccions de futur i determinar possibles línies de millora per mitigar els possibles efectes negatius futurs.

L'evolució passada i futura del clima s'analitza amb l'ús del software *meteospain* (Granda *et al.*, 2021) i *meteoland* (De Cáceres *et al.*, 2018), mentre que per a l'anàlisi de la vegetació i el sòl s'utilitza el simulador *medfate 2.3.7* (De Cáceres *et al.*, 2015; 2021). Aquestes eines permeten analitzar en detall les condicions climàtiques i de la vegetació a una escala adequada per a l'àmbit d'estudi, tot integrant el màxim de processos ecofisiològics que tenen rellevància en el funcionament de l'ecosistema forestal i especialment els relacionats amb la hidrologia.

Per una banda, la metodologia se centra a desgranar la climatologia del període històric recent, per tal de detallar els canvis del sistema que afecten la disponibilitat d'aigua. La mateixa anàlisi es realitza amb la projecció del clima per al període futur proper, per tal de documentar els canvis esperables sota determinades condicions.

Per altra banda, la metodologia analitza el funcionament de la vegetació del període històric recent, per tal de quantificar els serveis ecosistèmics que ha estat produint, especialment quant a la disponibilitat d'aigua. La simulació de l'evolució futura es realitza amb dos escenaris contrastats per tal de quantificar la projecció esperable dels serveis ecosistèmics i l'efecte que es pot aconseguir amb l'aplicació de mesures de gestió forestal.

### Àmbit d'estudi

La zona pilot de l'estudi són els municipis de Monistrol de Calders i Granera, amb una superfície total de 4.580 ha. Ambdós municipis se situen a l'altiplà del Moianès, al límit del Pla del Bages, i a l'àrea d'influència del massís de Sant Llorenç del Munt. La conca principal és la del riu Calders, que se situa al límit centre-oriental del sistema del riu Llobregat.

L'anàlisi dels serveis ecosistèmics amb les eines de modelització comentades es realitza a escala de unitat de vegetació, que pot tenir una superfície tan detallada com sigui possible per les dades disponibles (assimilable al "rodal" o "unitat d'actuació" en termes de planificació forestal operativa).

### Usos del sòl

Segons les dades del Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya v1.0 (ICGC, 2018), un 93% de l'àmbit és superfície forestal, amb més de 3.000 ha de zones arbrades i més de 1.100 ha de formacions forestals de matollar, arbrat esclarissat i regeneració incipient després dels incendis de 2003 (Figura 3).

Pel que fa a la coberta forestal arbrada, com a element principal per a la gestió forestal encaminada a la modulació hidrològica a escala operativa, les espècies forestals amb més representació a la zona d'estudi són el pi blanc, el pi roig, la pinassa i el roure martinenc

(Figura 4), segons les dades del Mapa Forestal d'Espanya 1:25.000 (DGDRPF, 2016). A més a més, la superfície de cultius s'estima en unes 200 ha, més unes 110 ha de cobertura artificial.

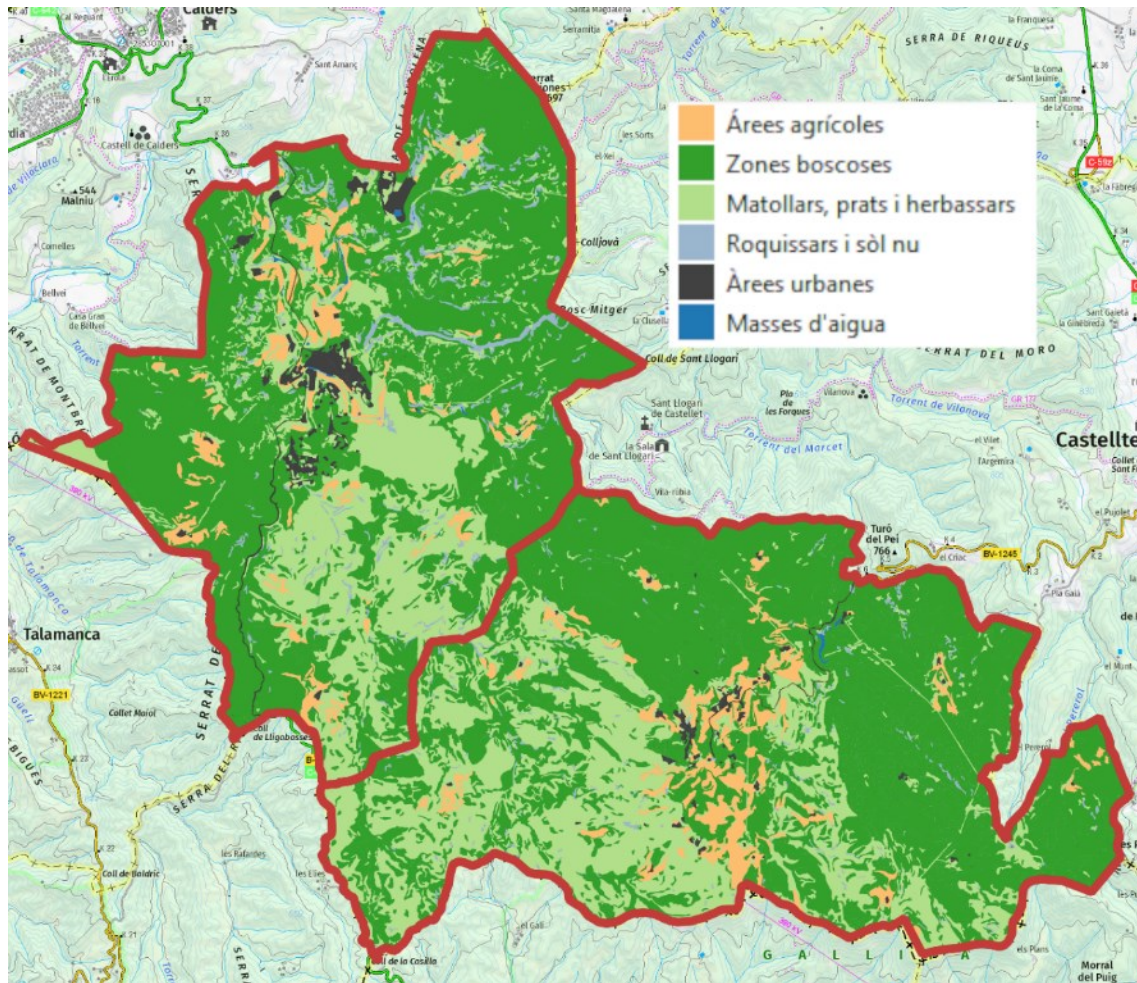


Figura 3. Usos del sòl als municipis de Granera i Monistrol de Calders segons el MCSCv1 (ICGC, 2018).

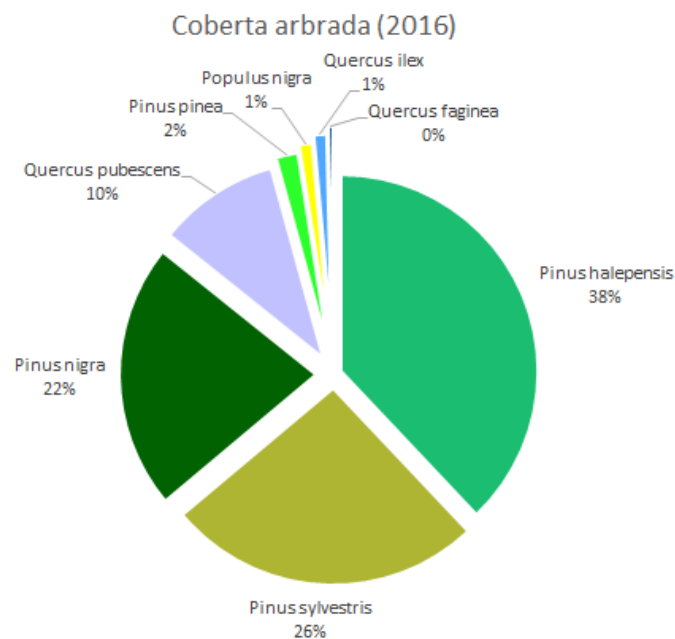


Figura 4. Percentatge de coberta forestal arbrada segons l'espècie dominant (inclou masses pures i mixtes) identificada segons el MFE25 (DGDRPF, 2016).



## Caracterització del règim climàtic a la zona d'estudi

### Compilació de dades climàtiques històriques (1995-2021)

Per caracteritzar el clima de l'àmbit d'estudi hem descarregat i processat les dades meteorològiques existents per les 2 principals xarxes d'estacions meteorològiques: les de l'AEMET i les del meteocat. La selecció i processament de les estacions que serviren com a fons de dades meteorològiques s'ha fet en base a criteris de distància a l'àrea d'estudi i disponibilitat de sèries completes de dades de temperatura, precipitació i humitat relativa almenys des de l'any 1995. Aquests criteris han portat a una selecció final de 13 estacions (Figura 5), totes de la xarxa de meteocat, les principals característiques de les quals es poden trobar a la Taula 1. La selecció i descàrrega de les dades meteorològiques de les estacions s'ha fet amb la llibreria *meteospain* (Granda *et al.*, 2021), desenvolupada pel llenguatge de programació R, i que ha donat com a resultat els valors diaris de temperatura màxima, mínima, i mitja, precipitació, velocitat del vent i hores d'insolació de cada estació.

La informació climàtica descarregada, que conté informació puntual de les estacions meteorològiques seleccionades, s'ha processat amb el software *meteoland* (De Cáceres *et al.*, 2018), per tal d'interpol·lar la informació puntual i generar informació espacialment contínua al territori. Aquesta interpolació no es du a terme tenint en compte només la distància de l'estació meteorològica a cada punt del territori, sinó que també es consideren les característiques derivades de l'orografia, elevació i orientació.

Taula 1. Altitud, temperatura mitja anual i precipitació de les estacions meteorològiques processades per generar el clima de l'àrea d'estudi.

Estació	Altitud (m)	Temp. Mitja anual (°C)	Precipitació anual (mm)
Vacarisses	343	13,8	652,7
la Roca del Vallès - ETAP Cardedeu	156	14,0	562,0
el Pont de Vilomara	210	14,1	496,8
Cerdanyola del Vallès	84	13,9	494,2
Rellinars	421	14,0	629,4
Sant Llorenç Savall	528	13,0	690,0
Tagamanent - PN del Montseny	1030	11,6	768,2
Vilanova del Vallès	126	14,3	684,0
Viladrau	953	11,3	1061,8
Castellbisbal	147	15,9	562,2
Puig Sesolles (1.668 m)	1668	7,5	985,9
Sant Cugat del Vallès - CAR	158	15,8	519,2
Granollers	210	15,3	522,7

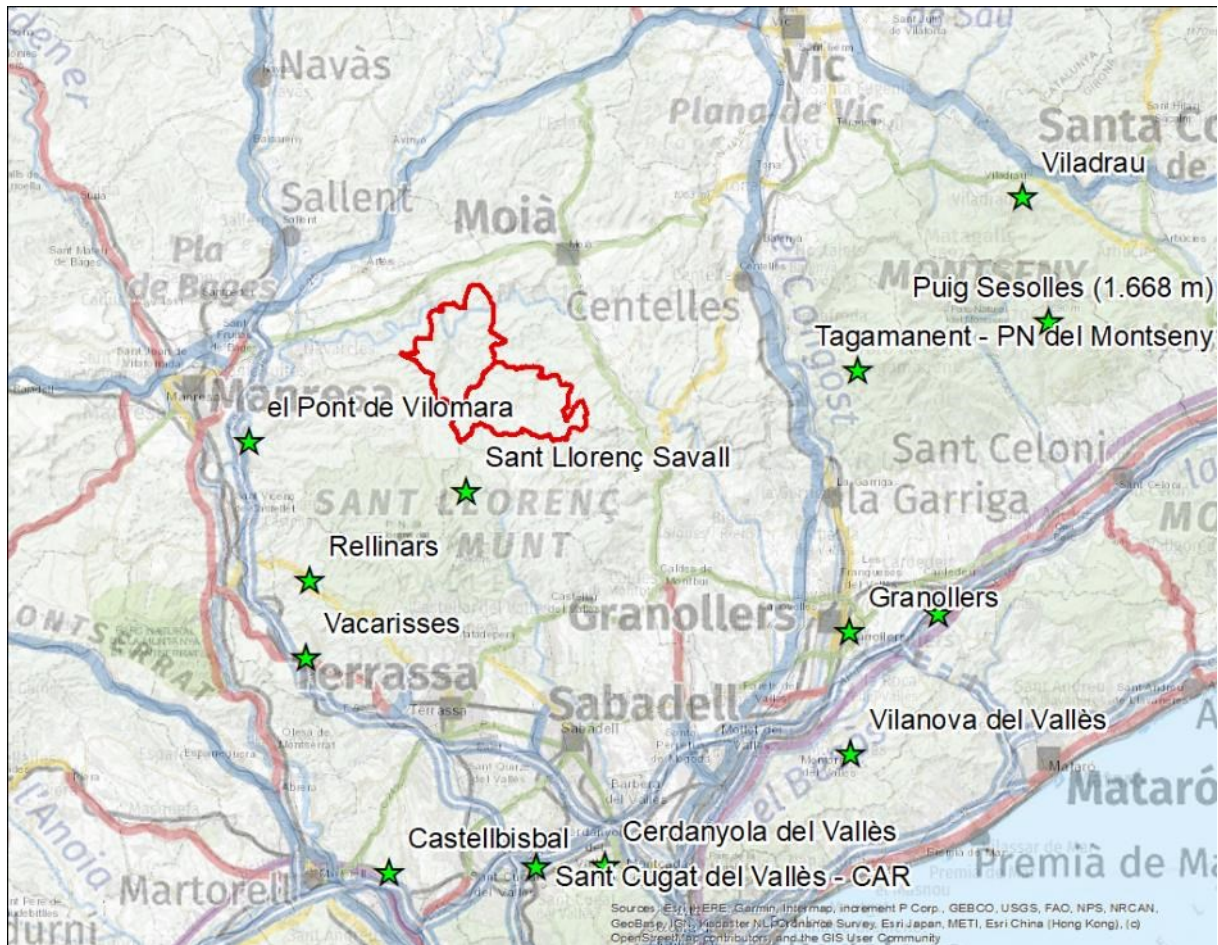


Figura 5. Ubicació de les estacions meteorològiques processades amb meteoland (De Cáceres et al., 2018).

### Compilació de dades climàtiques futures (2022-2100)

La informació climàtica corresponent al període futur ha d'obtenir-se a partir de projeccions elaborades per agències meteorològiques, que es recopilen en cada un dels informes generats pel Panel Intergovernamental sobre el Canvi Climàtic (IPCC). Aquestes projeccions s'elaboren per a diferents trajectòries de concentració representativa (RCP, per les seves sigles en anglès), que són trajectòries de concentració de gasos d'efecte hivernacle en funció del context socioeconòmic i les mesures de mitigació considerades. Per aquest treball s'han fet servir les projeccions elaborades per la cinquena avaluació de l'IPCC (AR5), i en concret s'ha considerat un escenari de canvi climàtic moderat (RCP4.5), en el qual les emissions assoleixen un màxim al voltant de 2040, per després establir-se o disminuir lleugerament (Figura 6).

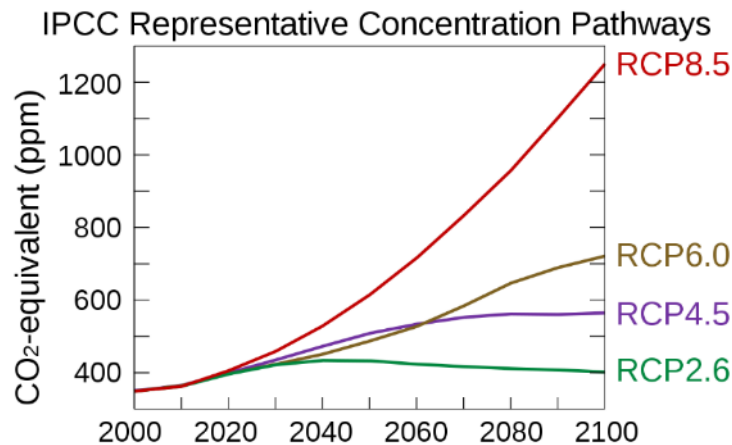


Figura 6. Valors de equivalents de CO<sub>2</sub> al llarg del segle XXI segons les projeccions de les diferents trajectòries de concentració representativa (RCP) elaborades pel cinquè informe de l'IPCC.

Es van obtenir les projeccions climàtiques pel període 2022-2100 elaborades pel projecte EU-CORDEX, disponibles en la Earth System Grid Federation (ESGF; <http://esgf.llnl.gov/>). En concret vam descarregar les prediccions diàries de precipitació, temperatura màxima i mínima, humitat relativa, radiació i velocitat del vent, segons les prediccions del model CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 regionalitzades per Europa a una resolució de 11 km. Per obtenir projeccions a resolucions més detallades, vam fer servir el paquet de R *meteoland* (De Cáceres *et al.*, 2018), que permet corregir els biaixos i augmentar la resolució de les projeccions regionals.

Les dades meteorològiques obtingudes es van utilitzar per generar un gràfic amb la evolució de la temperatura mitjana anual i la precipitació a l'àrea d'estudi entre 1995 i 2100. Així mateix, per tal d'analitzar els patrons espacials dels canvis climàtics i poder identificar les zones amb majors i menors canvis, es va comparar, per cada píxel d'una malla de 50 m, el clima mitjà actual (període 2010-2020) amb el clima projectat cap a mitjans de segle (període 2040-2050).

### Caracterització del bosc a la zona d'estudi

L'estudi de la dinàmica del bosc i els seus efectes sobre la provisió de serveis requereix un coneixement el més detallat possible de la composició i estructura inicial del bosc, a partir de la qual se realitzaran les simulacions de dinàmica forestal i balanç hídric. Per tal de caracteritzar la vegetació dels municipis estudiats de la manera més detallada possible, hem utilitzat dos fonts de informació:

- **Parcel·les de l'inventari forestal nacional (IFN)** dins dels termes municipals objecte d'estudi. En concret s'han utilitzat 40 parcel·les de l'IFN2 (mesurades en setembre de 1991), 37 parcel·les de l'IFN3 (mesurades l'any 2000) i 17 parcel·les de l'IFN4 (mesurades l'any 2015). La reducció de parcel·les pel IFN4 respon a la menor intensitat de mostreig d'aquest inventari.
- **Inventaris realitzats en la zona en el marc dels Instruments d'Ordenació Forestal (IOFs) vigents.** La superfície inclosa en IOFs vigents és extensa en la zona d'estudi (3.137 ha), per la qual cosa es disposa d'informació detallada per a la zonificació i caracterització de l'estructura forestal en bona part de l'àmbit (Figura 7). Aquesta informació, cedida per la Diputació de Barcelona i el Centre de la Propietat Forestal (CPF), permet incrementar de manera important la xarxa de parcel·les, tot disposant

d'informació d'estructura més detallada espacialment també agafant la rodalització dels IOFs. En concret es va disposar d'informació d'inventari i perímetre de 288 parcel·les procedents d'IOFs.

En total s'ha pogut disposar de més de 300 punts d'inventari, distribuïdes segons es mostra a la Figura 8. La ubicació dels punts d'inventari dels IOFs correspon al centre geogràfic de la unitat d'actuació de la qual se n'han extret les dades.

La Figura 9 mostra la coberta forestal que es pren com a base per a les simulacions d'evolució vegetal a l'àmbit. És la composició segons els IOFs vigents actualment, més la identificació de base del MFE25 en cas de zones sense IOF.

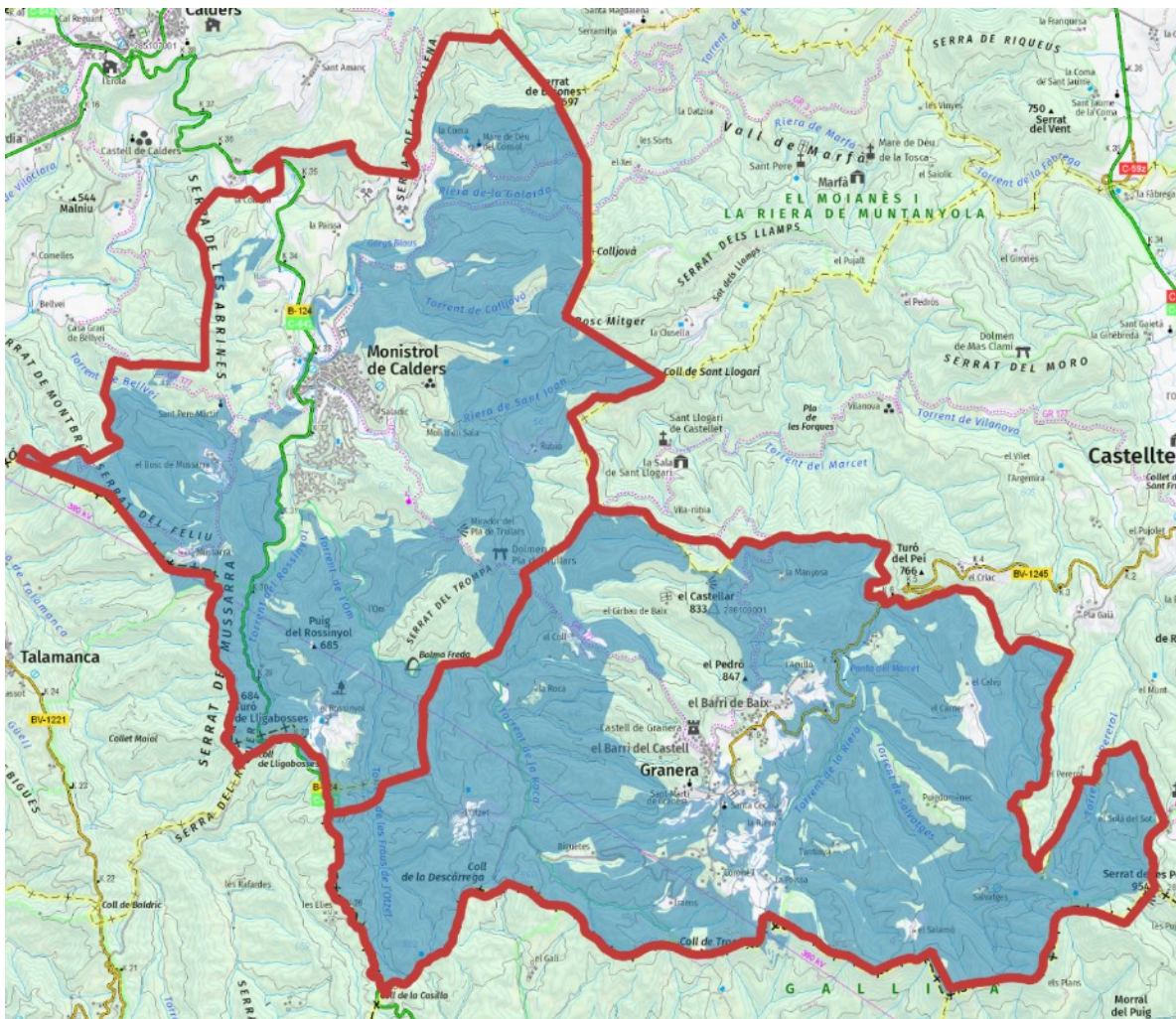


Figura 7. Superfície forestal d'on es disposa informació de Projectes d'Ordenació i Plans Tècnics de Gestió i Millora Forestal a la zona d'estudi (ombra blava) vigents a 2021.

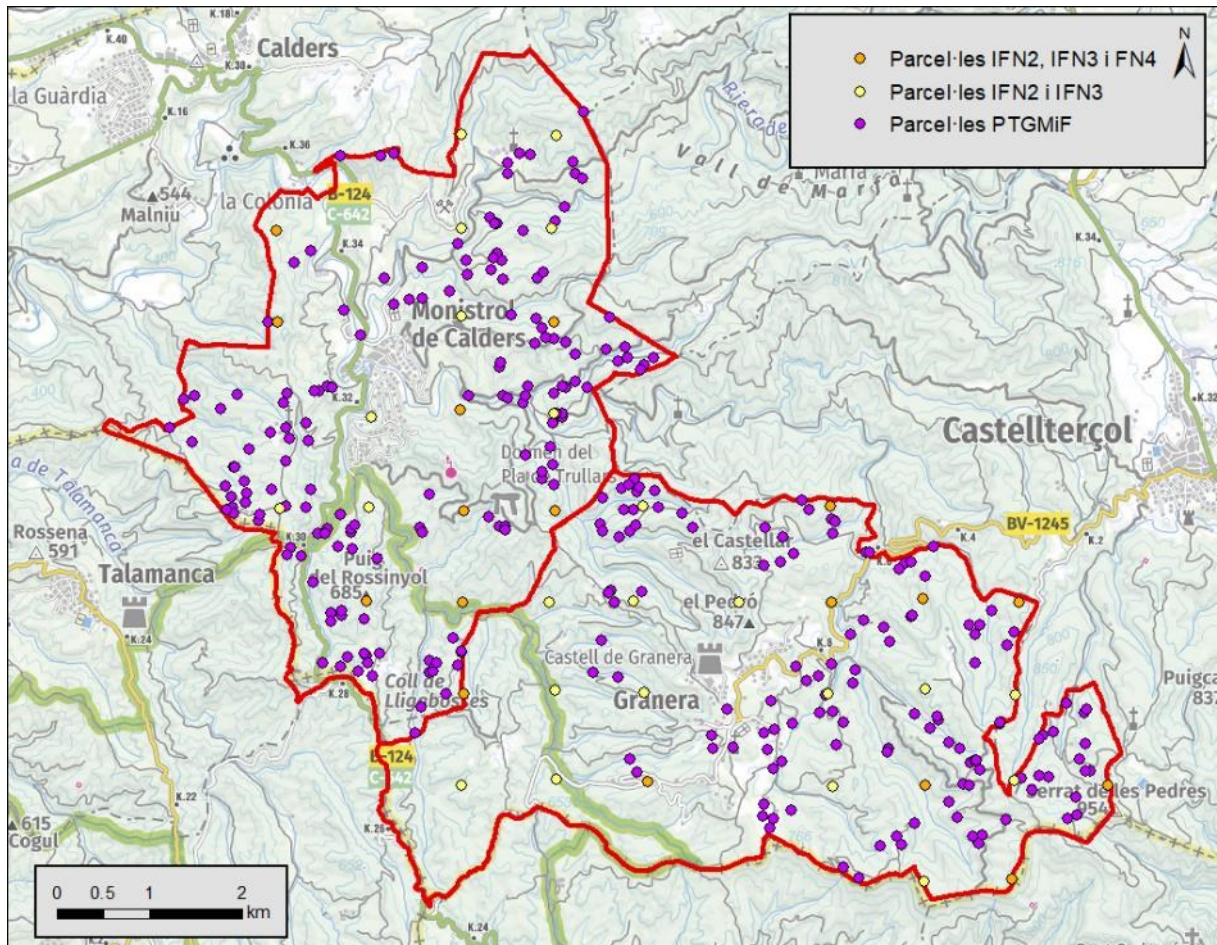


Figura 8. Ubicació dels punts d'inventari utilitzats per caracteritzar la composició i estructura de les masses forestals als municipis de Monistrol de Calders i Granera. Les dades IFN són parcel·les d'inventari, mentre que les dades de PTGMIF són ubicacions centrals de les unitats d'actuació.

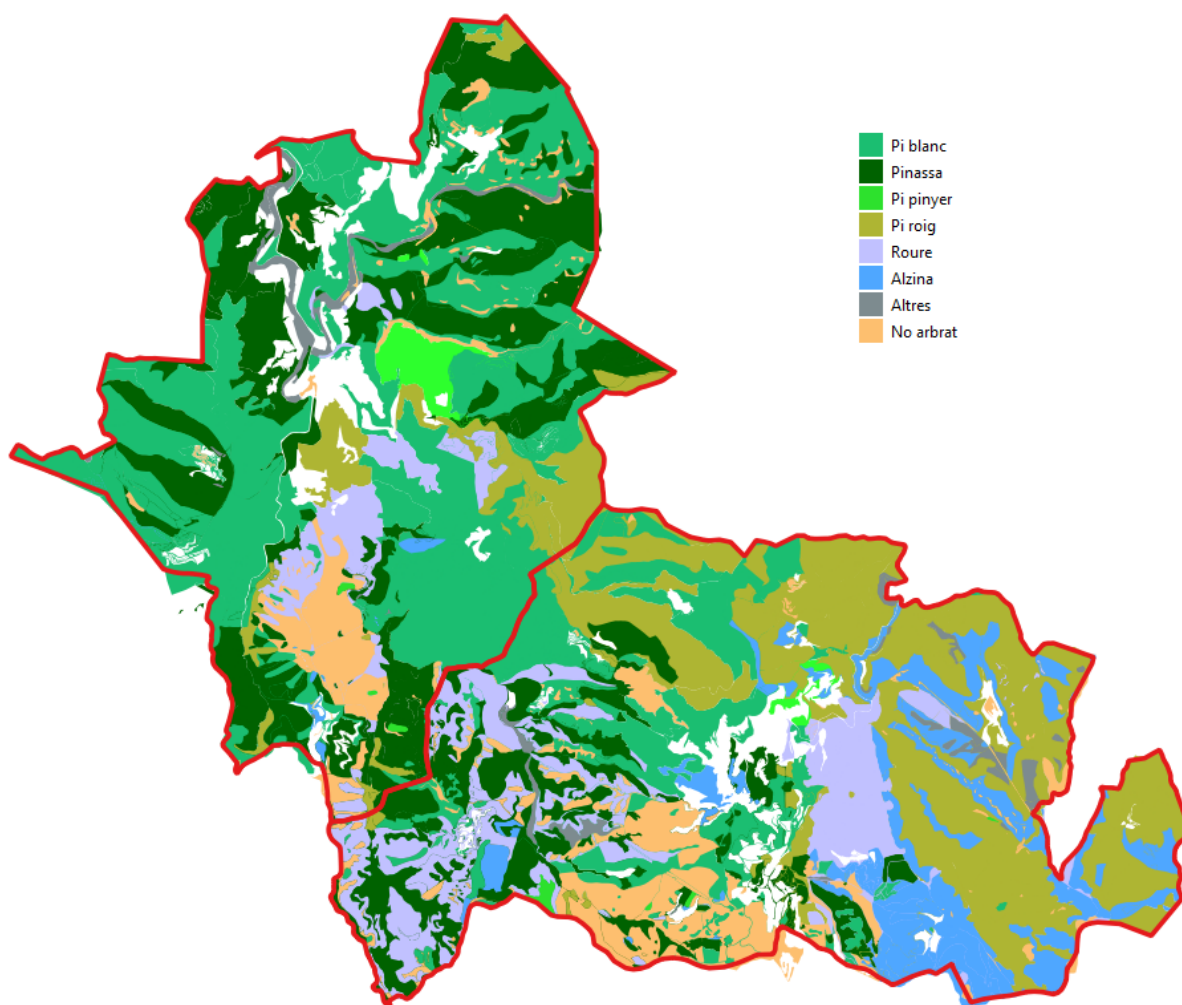


Figura 9. Coberta forestal segons espècie dominant (inclou masses pures i mixtes) segons les diferents fonts d'informació (MFE25, IOFs) utilitzada com a base per a les simulacions d'evolució.

### Caracterització dels sòls a la zona d'estudi

La realització de les simulacions de balanç hídric de les parcel·les forestals amb el model *medfate* requereix, a més de conèixer la estructura de la vegetació i el clima, tenir informació sobre els sòls a l'àrea d'estudi, ja que el tipus de sòl (profunditat, textura, rocositat...) determinarà els fluxos hídrics al seu interior i la disponibilitat hídrica de les plantes. Malauradament, no existeix informació acurada de la composició i tipus de sòls de la zona a la resolució necessària, ja que als inventaris dasomètrics no es mostregen aquestes variables. Per aquesta raó vam descarregar la informació necessària del projecte SoilGrids (Hengl *et al.*, 2017), que va elaborar un mapa continu amb les principals característiques dels sòls mundials a una resolució de 250 metres, que s'ha considerat suficient per aquest estudi (Figura 10) i que sol ser emprat en estudis d'aquest tipus.

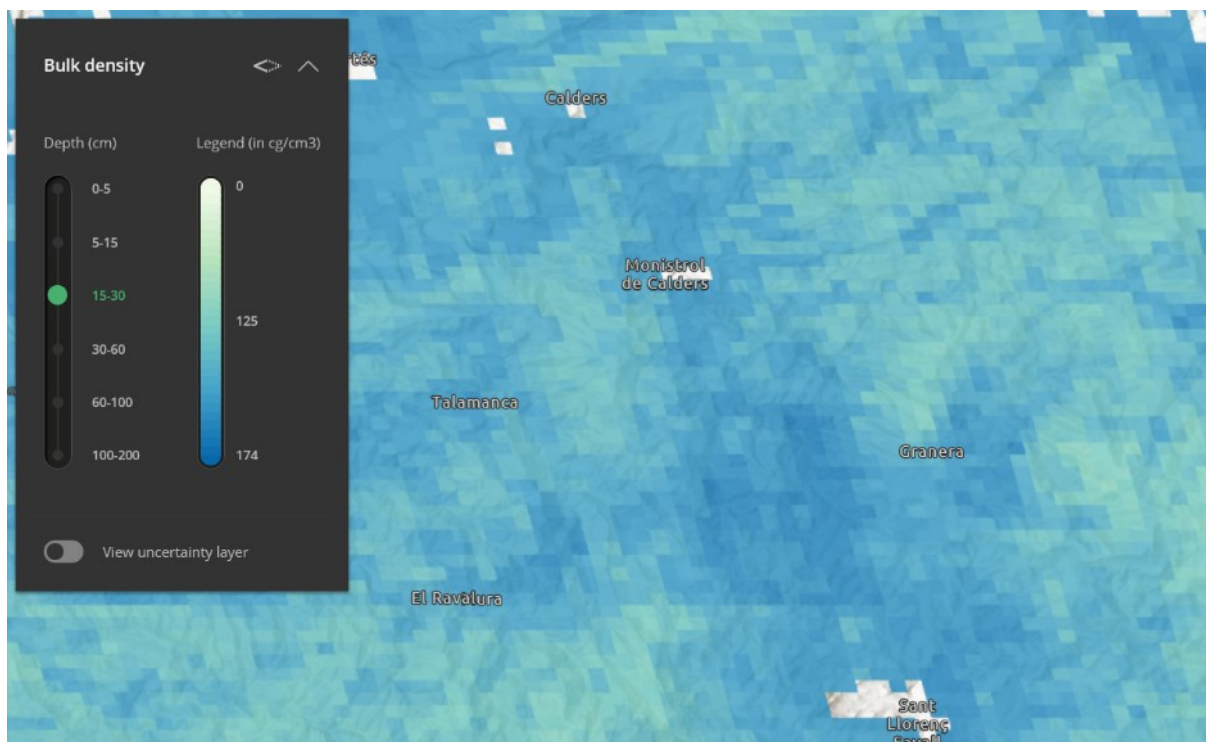


Figura 10. Mapa de densitat aparent del sòl per la capa de 15 a 30 cm de profunditat per la zona d'estudi. Font: SoilGrids (<https://soilgrids.org/>).

### Simulacions de dinàmica forestal i balanç hídric

Per simular la dinàmica de la vegetació al llarg de les properes dècades i el seu efecte sobre la provisió de serveis ecosistèmics (i en concret sobre la provisió d'aigua blava), i sobre l'estat hídric de la vegetació vam fer servir el model *medfate*. Es tracta d'un model a escala de rodal, on el balanç hídric es fa tenint en compte la vegetació, la meteorologia i els sòls, així com la seva interacció. Amb això, el model simula els següents processos:

- **Balanç hídric del sòl** (De Cáceres *et al.*, 2015), que permet determinar, per a cada període desitjat (dia, mes, any), la quantitat d'aigua disponible al sòl, el drenatge profund, l'escorrentiu o l'evapotranspiració, entre d'altres components.
- **Hidràulica de la vegetació, transpiració i fotosíntesis** (De Cáceres *et al.*, 2021) determina, en funció del clima i la disponibilitat hídrica, els principals processos fisiològics de la vegetació, tenint en compte les particularitats de cada espècie arbòria i arbustiva.
- **Creixement i dinàmica de la vegetació** (De Cáceres *et al.*, en preparació). Els paràmetres fisiològics s'utilitzen per determinar els principals processos demogràfics de la vegetació: creixement, mortalitat, reclutament.
- **Gestió forestal** (De Cáceres *et al.*, en preparació). El model inclou un mòdul de gestió forestal flexible, que permet especificar la silvicultura a aplicar a cada una de les parcel·les en base a diferents indicadors i variables. *Medfate* permet implementar tant gestió per masses irregulars, basada en tallades parcials amb una certa recurrència, com una gestió per masses regulars, que consisteix en règims d'aclarides i tallades finals.

Tenint en compte tots aquest factors i processos, es van definir els escenaris a simular per l'àrea d'estudi, que inclou tres casos: històric, futur sense gestió i futur amb gestió forestal.

#### *Simulacions de dinàmica històrica*

Un dels principals objectius del treball és determinar l'efecte que va tindre sobre el règim hídic els incendis forestals de l'any 2003, que van afectar una bona part de l'àrea d'estudi. Per tal d'avaluar com ha canviat el bosc i la seva provisió d'aigua blava al llarg dels últims anys es va partir de la informació de composició i estructura del bosc disponible a l'IFN3 i a les parcel·les dels PTGMF, i es va simular la seva dinàmica durant el període 1995-2020.

#### *Simulacions futures sense gestió forestal*

Un segon objectiu d'aquest treball és caracteritzar les dinàmiques previstes en la provisió d'aigua blava i altres serveis, per avaluar patrons espacials i tendències temporals que permetin identificar les zones més vulnerables en les properes dècades. Per tal de respondre a aquests objectius vam realitzar un conjunt de simulacions partint de les estructures forestals més recents (IFN4 i PTGMF), i vam analitzar la seva evolució pel període 2020 – 2050, tenint en compte els canvis en el clima previstos per aquest període. En aquest escenari s'ha mantingut la coberta forestal sense alteracions significatives per acció de gestió. La vegetació es desenvolupa per les seves pròpies dinàmiques, continuant els processos d'expansió i densificació observats en zones sense pressió de gestió.

#### *Simulacions futures amb gestió forestal*

Finalment, volíem quantificar el paper potencial de la gestió forestal per reduir la vulnerabilitat del bosc i millorar la provisió d'aigua blava en els boscos dels dos municipis estudiats. Tot i que no es van testar diferents alternatives de gestió forestal – ja que transcendeix els objectius d'aquest estudi – sí es va poder determinar l'ordre de magnitud dels canvis esperats si s'aplica gestió forestal als boscos del Moianès, de manera que ens permeti avaluar el paper real que cal atorgar a la gestió com a eina de atenuació dels efectes del canvi climàtic i com a instrument per garantir una major aportació d'aigua als aqüífers de la zona.

Per tal de determinar precisament aquest paper potencial de la gestió forestal, vam assumir que es realitzava gestió a tots els rodals actualment delimitats per un IOF vigent, els quals veuran modificades les característiques de la coberta forestal per simular l'efecte de la gestió. La gestió aplicada consistia en l'extracció d'un 30% d'àrea basal sempre que la massa arribés als 18 m<sup>2</sup>/ha, i assegurant sempre que no hi haguessin tallades amb una rotació menor de 7 anys. El període simulat va ser idèntic a l'indicat en l'apartat anterior (2020-2050), per poder comparar els dos escenaris. Cal tenir en compte que els rodals sense cobertura arbòria suficient o en situacions topogràfiques que impossibiliten la gestió forestal no tenen cap model de gestió assignat.

### **Indicadors i avaluació dels serveis ecosistèmics**

Amb la informació disponible de les diferents simulacions efectuades es quantifiquen diferents aspectes, com ara la composició i estructura del bosc, el seu estat hídic, i diferents serveis ecosistèmics, essent l'aigua blava el principal objectiu del present estudi.

- **Dinàmica forestal:** s'avalua, per cada parcel·la i pel conjunt de l'àmbit d'estudi, la densitat mitjana, diàmetre mitjà quadràtic i àrea basal al llarg del temps (1995-2050). També es poden determinar aquestes variables per cadascuna de les principals



espècies dominants en l'àrea d'estudi: pi roig (*Pinus sylvestris*), pi blanc (*Pinus halepensis*); pinassa (*Pinus nigra*) i carrasca (*Quercus ilex sbsp. ballota*).

- **Estat hídric de la vegetació:** el model utilitzar permet caracteritzar l'estat hídric de cada una de les espècies llenyoses presents en les parcel·les, determinant el grau d'estrès hídric a una resolució diària. D'acord als treballs previs en boscos mediterranis (Ameztegui *et al.*, 2017), és possible determinar quan un determinat nivell de estrès hídric pot resultar en una elevada probabilitat de mortalitat per cavitació generalitzada. Per a aquest treball hem agregat les dades generades a resolució anual, i hem determinat el nombre de dies anuals amb un nivell d'estrès elevat.
- **Aigua exportada.** El total d'aigua que arriba a una parcel·la pot seguir diferents camins, incloent ser absorbida per la planta o evaporada a l'atmosfera. Aquí hem considerat com servei ecosistèmic l'aigua blava, que és la suma de la fracció d'aigua que marxa de la parcel·la per escorrentiu superficial i l'aigua exportada als aqüífers per drenatge profund. Com que el total d'aigua blava produïda depèn enormement de la precipitació, aquesta variable presenta una elevada variació interanual que de vegades dificulta detectar tendències temporals. Per detectar millor els canvis en aigua blava deguts a la vegetació i a la gestió forestal, hem calculat, per cada parcel·la i any, l'aigua blava relativa a la precipitació d'aquell any, que per tant varia entre 0 i 100%. També s'ha determinat el total d'aigua blava (m<sup>3</sup>) exportada anualment per cada parcel·la.

Cadascuna d'aquestes variables es va calcular amb una resolució anual, i per cada una de les parcel·les simulades (i en alguns casos per espècies). Això ens ha permès centrar l'anàlisi de l'estudi en dos components:

- La variació temporal de les variables d'interès pel període simulat (1995-2050) utilitzant el conjunt de parcel·les simulades. Aquesta informació permet avaluar els canvis esperats a l'àrea d'estudi, identificar els efectes d'anys particularment extrems quant a la meteorologia, i determinar el grau de variabilitat en els canvis que podem esperar a la zona.
- La provisió agregada d'alguns serveis (aigua blava, carboni) per cada una de les parcel·les d'estudi i per dos períodes de referència: 2020-2030 com indicador de la situació actual i el futur proper; i 2040-2050, com a indicador d'un futur a mig termini. Per als dos períodes d'anàlisi, la quantificació de l'evolució dels serveis ecosistèmics i els altres indicadors es realitza per comparació entre la situació final i inicial. Aquests càlculs ens permeten realitzar un anàlisi espacial dels patrons previstos, identificant les zones on es preveuen majors canvis, aquelles amb major vulnerabilitat als canvis climàtics, i aquelles on la gestió forestal pot induir una major atenuació de les condicions esperades.

## 5. Resultats

### Canvis en el usos del sòl

Pel que fa als usos del sòl, gairebé la totalitat de l'àmbit d'estudi està cobert per terrenys forestals, tret d'una petita superfície de terrenys agrícoles al voltant dels dos nuclis de població. Els canvis observats en el període estudiat estan principalment relacionats amb els diversos incendis forestals de 2003, que van provocar la transició des de zones boscoses al 1997 (Figura 11) cap a classificacions d'usos amb la categoria de "matollars" en la majoria dels casos (Figura 12). Un exemple d'aquest tipus de transició es pot observar a la fotografia de la Figura 13.

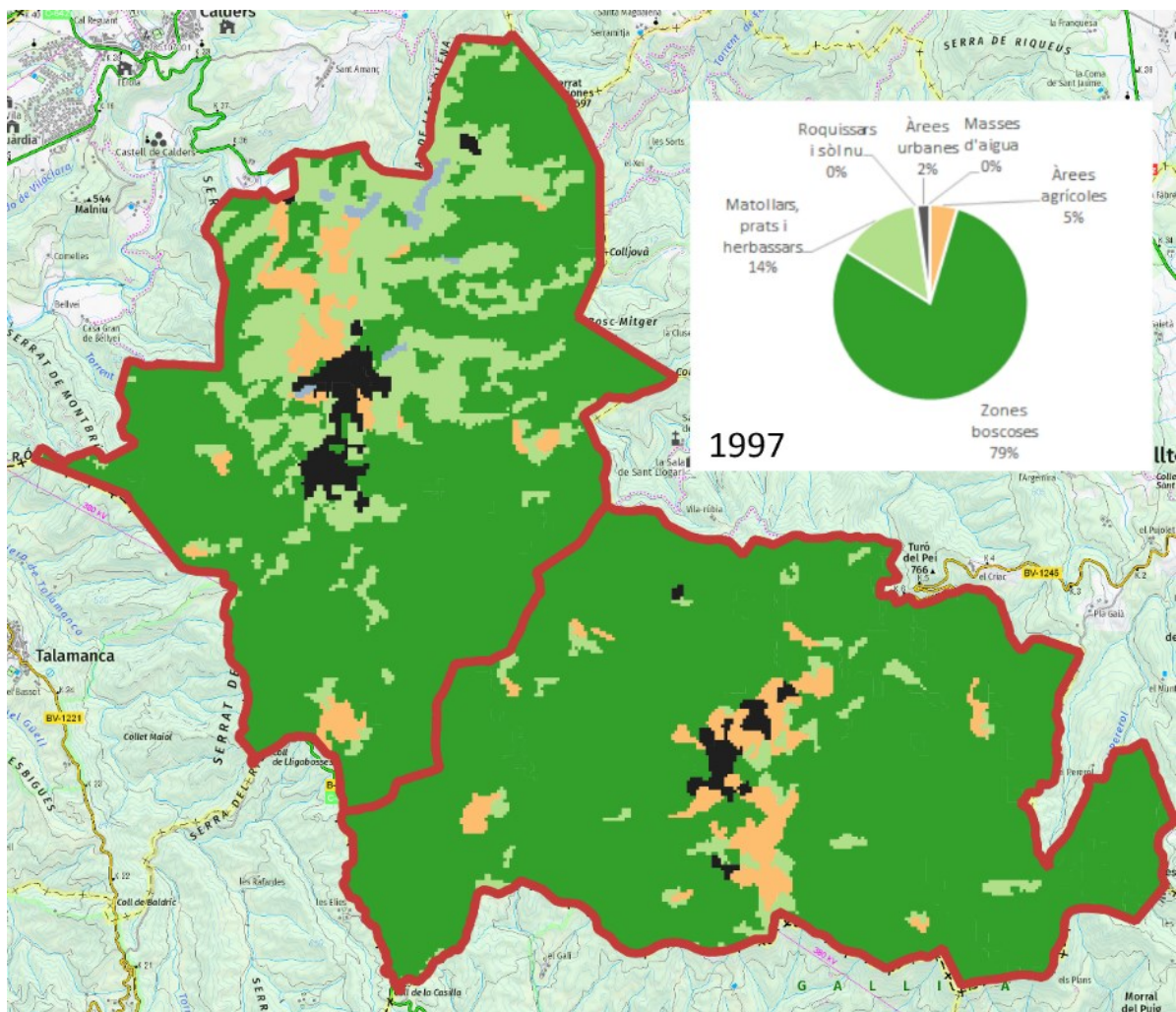


Figura 11. Usos del sòl als municipis de Granera i Monistrol de Calders al 1997 segons ICGC (2018).

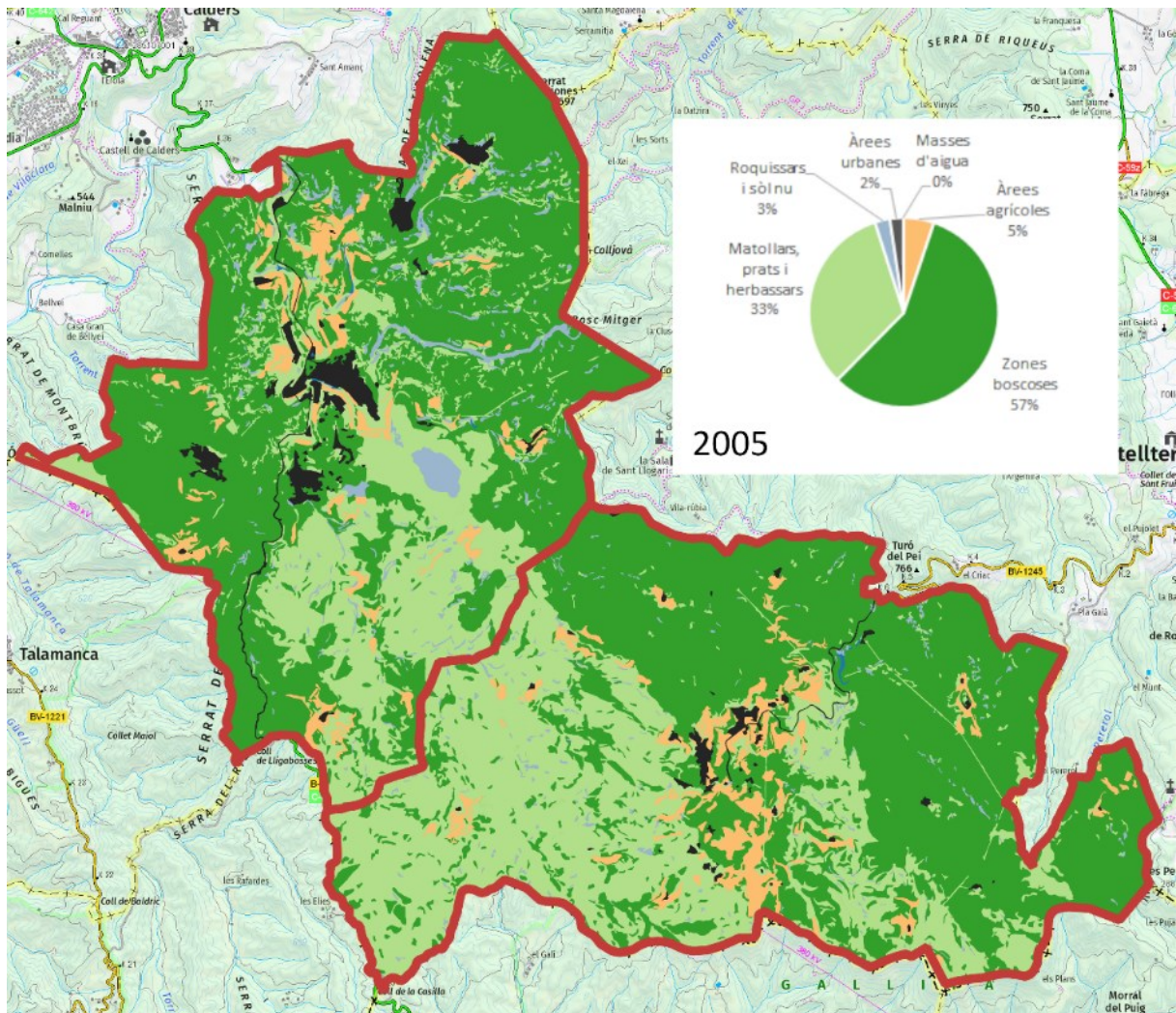


Figura 12. Usos del sòl als municipis de Granera i Monistrol de Calders al 2005 segons CREAM (2010).



Figura 13. Zona afectada per l'incendi del 2003 i considerada com a "matollar" en els mapes de cobertes del sòl posteriors.

Des de llavors, els canvis produïts han estat escassos, i tendents cap a una certa recuperació de la coberta boscosa, si bé també ha augmentat la superfície destinada a conreus. En termes quantitius, la superfície coberta per terrenys forestals s'ha incrementat en 25,54 ha, la destinada a l'agricultura ha augmentat 14,27 ha des de 2005, el sòl improductiu artificial ha disminuït 23,72 ha i la superfície ocupada per aigües continentals ha augmentat 0,71 ha (Figura 14).

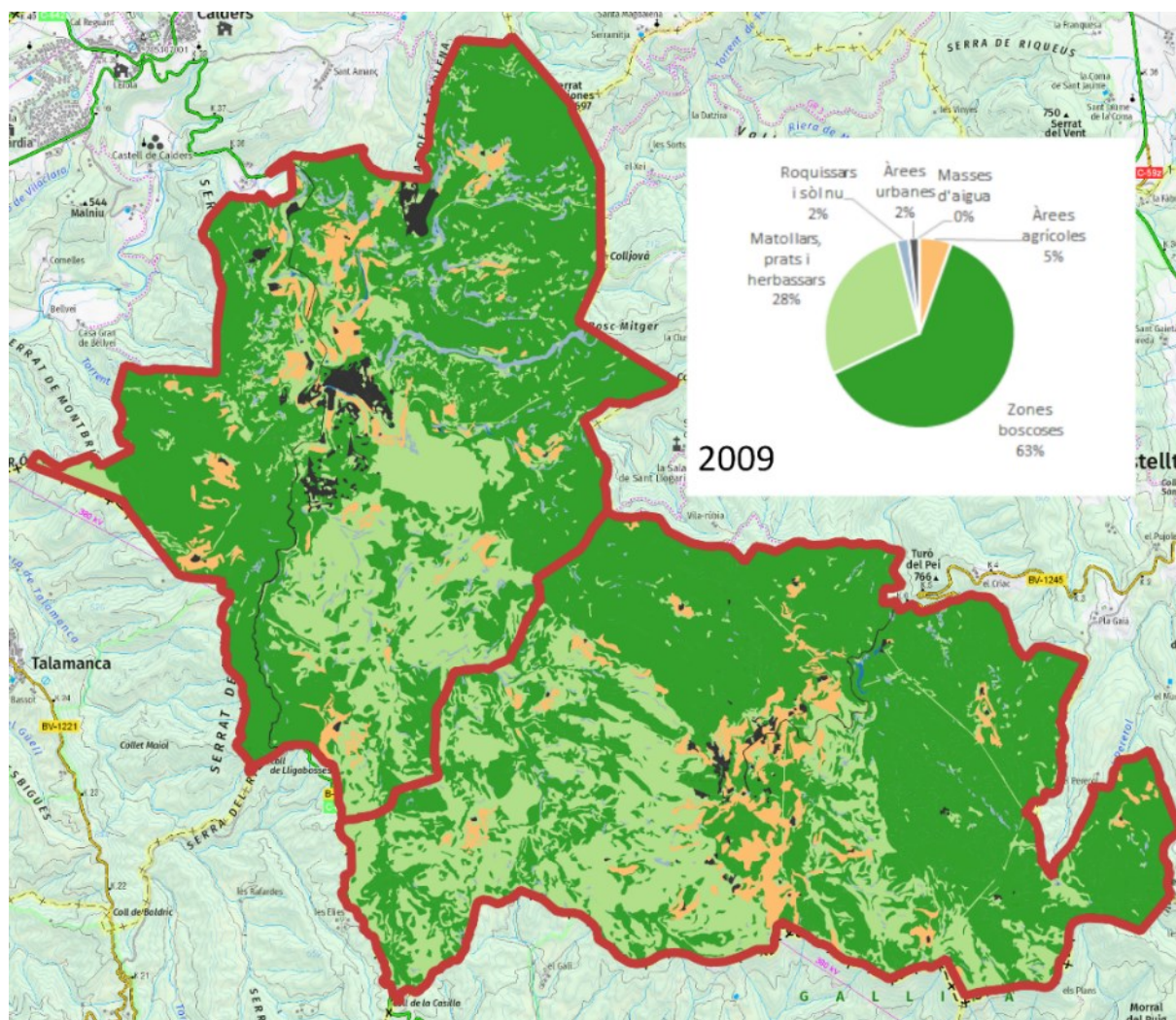


Figura 14. Usos del sòl als municipis de Granera i Monistrol de Calders al 2009 segons CREAM (2013).

No obstant això, cal tenir en compte que els canvis ocorreguts des de 2005 són petits, i poden fàcilment respondre a les millores metodològiques entre versions de la cartografia d'usos i cobertes del sòl disponible a l'ICGC, no pas a canvis substancials en l'ús que es fa del territori. De fet, els canvis en el període 2009-2018 són gairebé nuls (Figura 15).

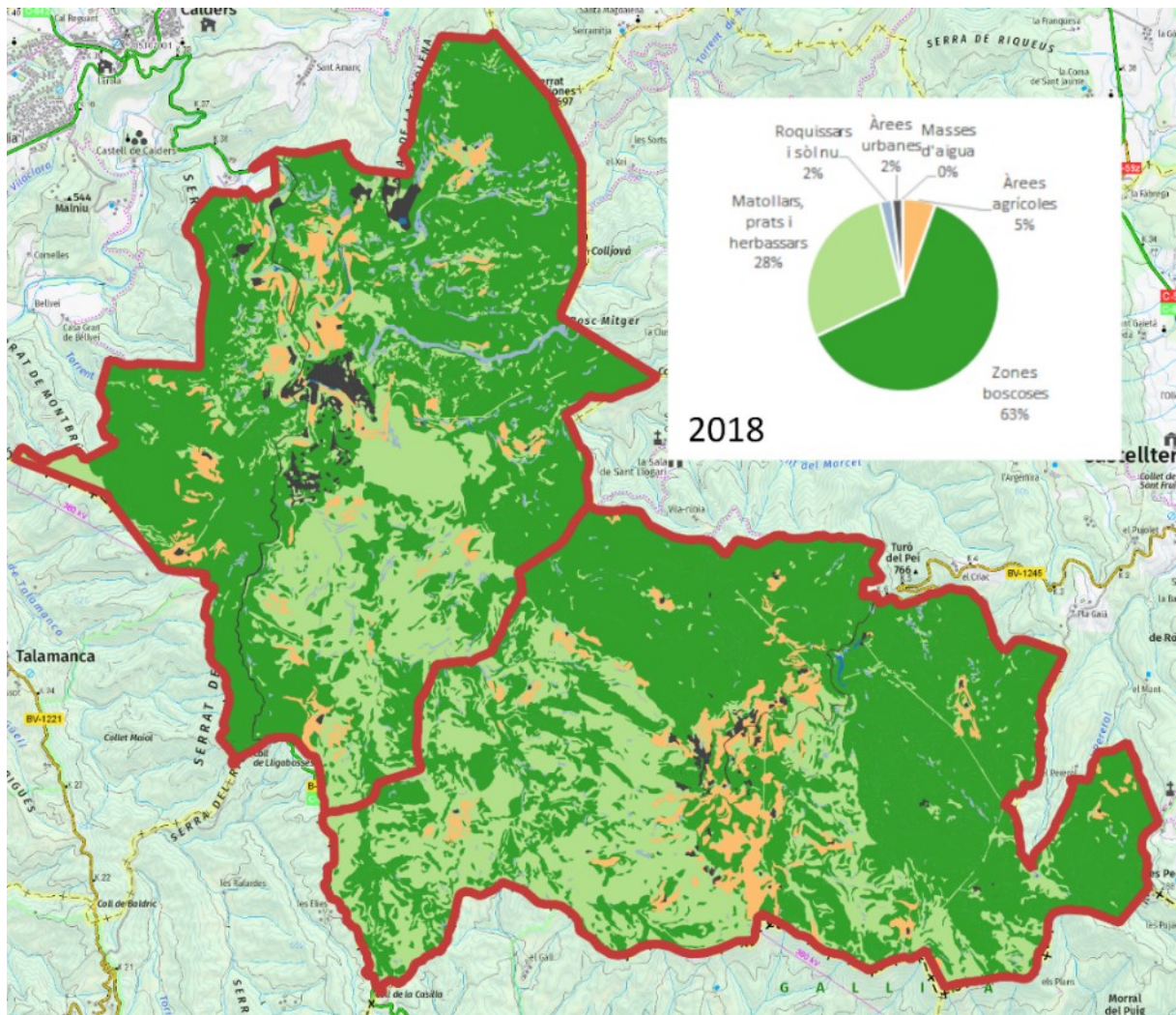
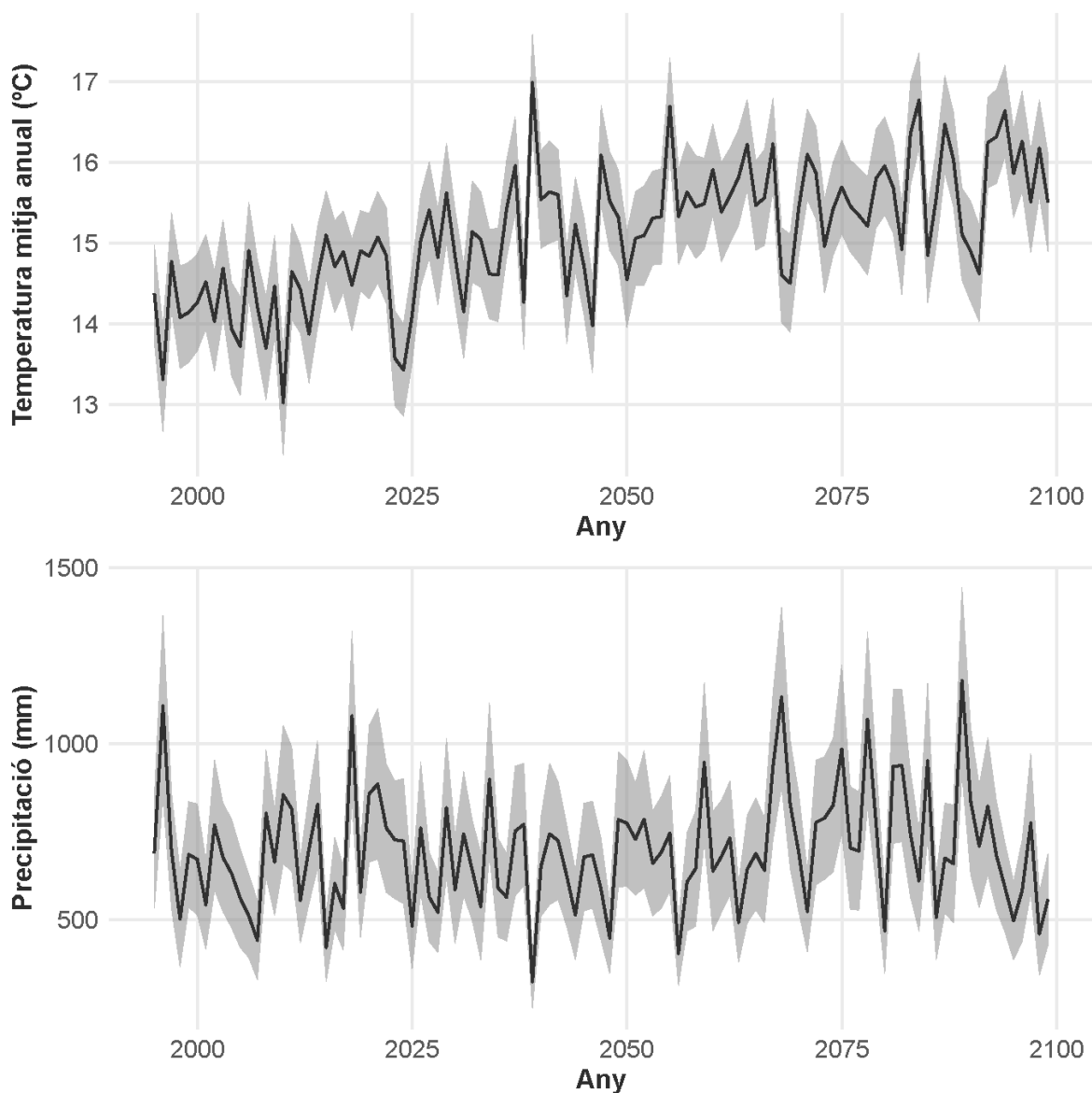


Figura 15. Usos del sòl als municipis de Granera i Monistrol de Calders al 2018 segons ICGC (2018).

## Canvis climàtics en el període analitzat (1995-2100)

### *Evolució temporal del clima en l'àmbit d'estudi (1995-2100)*

La conjunció de les dades descarregades dels observatoris meteorològics i les dades futures generades sota l'escenari RCP 4.5 mostren una pujada clara de la temperatura a la zona d'estudi, passant de temperatures mitjanes anuals properes als 14°C a principis de segle XXI, a valors per sobre dels 16°C cap a finals de segle (Figura 16). En canvi, no s'observa cap patró clar en l'evolució de les precipitacions, més enllà de la típica variabilitat interanual d'aquesta variable.



*Figura 16. Evolució de la temperatura mitja anual i la precipitació entre 1995 i 2100 als municipis de Monistrol de Calders i Granera. Les dades entre 1995 i 2020 corresponen a interpolacions basades en valors observats per estacions meteorològiques properes, mentre que els valors pel període 2020-2100 corresponen a previsions segons l'escenari d'emissions RCP4.5.*

Malgrat no s'observi una davallada clara en el total d'aigua rebuda com a precipitació al llarg d'un any típic, hem de tindre en compte dos aspectes. En primer lloc, la pujada de les temperatures portarà a una major necessitat hídrica per part de la vegetació, tant bosc, com matoll o conreus, que no és correspondrà amb una major disponibilitat del recurs hídric. Això pot comportar un augment de la freqüència, durada i/o intensitat dels períodes de sequera. Si construïm el climograma (figura que mostra els valors de temperatura i precipitació mensual durant un any "típic") de la zona d'estudi pel període actual, i el comparem amb el que cal esperar cap a finals de segle, observen un increment de la intensitat de la sequera, que respon més a una pujada de les temperatures durant l'estiu que no pas a una reducció dràstica de les precipitacions (Figura 17).

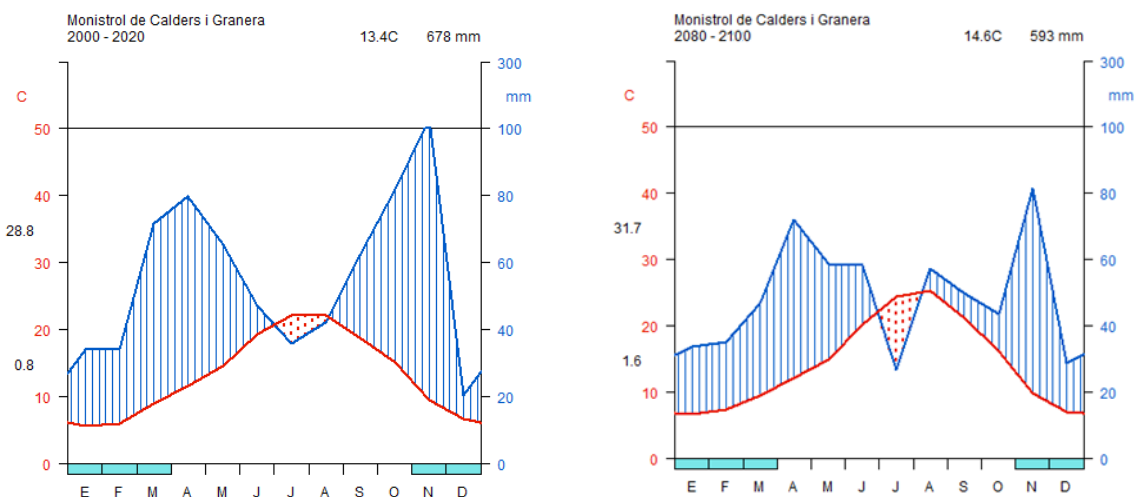
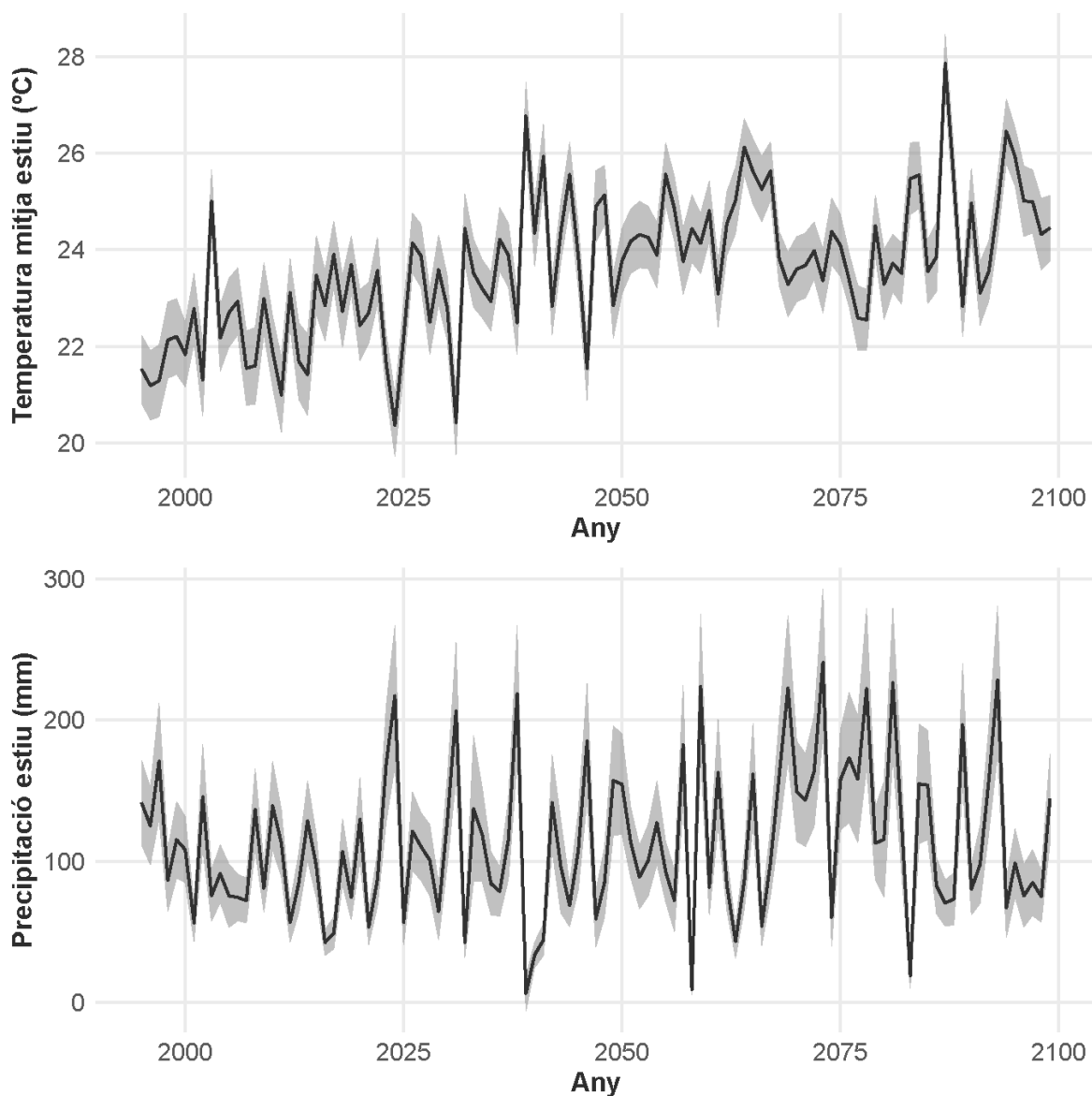


Figura 17. Comparativa del climograma mig per la zona d'estudi pels períodes 2000-2020 (esquerra) i 2080-2100 (dreta). El període de sequera ve indicat per la part de l'any durant la qual la corba de temperatures (vermella) es troba per sobre de la de precipitacions (blava). La intensitat de la sequera és l'àrea marcada amb punts vermells.

En segon lloc, la major part dels models futurs preveuen un canvi en el règim de precipitacions, de forma que la mitjana de pluja total que pugui caure en una zona pot ser la mateixa, però ho farà en menys episodis, de més intensitat, amb períodes molt llargs sense a penes pluja, i major variabilitat entre anys. Podem veure aquest patró analitzant els canvis esperats en el clima si considerem només el període d'estiu (Figura 18). Observem, en primer lloc, com la pujada de temperatures prevista a l'estiu és més gran que la prevista per la mitja anual: en aquest cas la pujada és de gairebé 3°C, amb anys on podria arribar als 27 o 28°C, front als 21°C actuals. S'observa també l'esmentat augment de la variabilitat en la precipitació d'estiu: si bé no sembla haver-hi cap tendència en la quantitat total, sí s'observen anys amb valors molt baixos, fins i tot propers a 0 mm en tot l'estiu.



*Figura 18. Evolució de la temperatura mitja estival i la precipitació estival entre 1995 i 2100 als municipis de Monistrol de Calders i Granera. Les dades entre 1995 i 2020 corresponen a interpolacions basades en valors observats per estacions meteorològiques properes, mentre que els valors pel període 2020-2100 corresponen a previsions segons l'escenari d'emissions RCP4.5.*

#### *Variació espacial del clima en l'àmbit d'estudi (1995-2100)*

És ben conegut que el clima té un marcat component local, que pot provocar que zones molt properes en l'espai presenten característiques climàtiques i evolucions ben diferents en funció d'aspectes com la topografia, l'exposició, el règim de vents o insolació a escala local... Malgrat les dificultats de traslladar les previsions climàtiques de l'IPCC elaborades a escales regionals i amb resolucions de poc detall a les especificitats de nivell comarcal, l'eina utilitzada en aquest treball (el software *meteoland*) té en compte els principals factors que determinen aquestes variacions. Per tant, es poden avaluar les tendències espacials en la variació del clima, identificant aquelles àrees on els canvis poden resultar particularment importants.



En relació a la temperatura, s'observa que les previsions marquen pujades generalitzades per tota la superfície estudiada ja cap a meitat de segle (entre 0,8 i 1,3 °C més que a la última dècada), sense grans diferències espacials, si bé és cert que les àrees amb pujades més fortes semblen trobar-se cap a l'est del terme municipal de Monistrol de Calders i el sud de Granera (Figura 19). Sí s'observen majors diferències quant als canvis previstos en precipitació (Figura 20), on les principals reduccions de precipitació es preveuen al municipi de Granera, sobre tot a la part sud, mentre que a bona part del terme municipal de Monistrol de Calders es preveuen canvis poc significatius o fins i tot petits increments en la precipitació, sobre tot a la part nord del municipi.

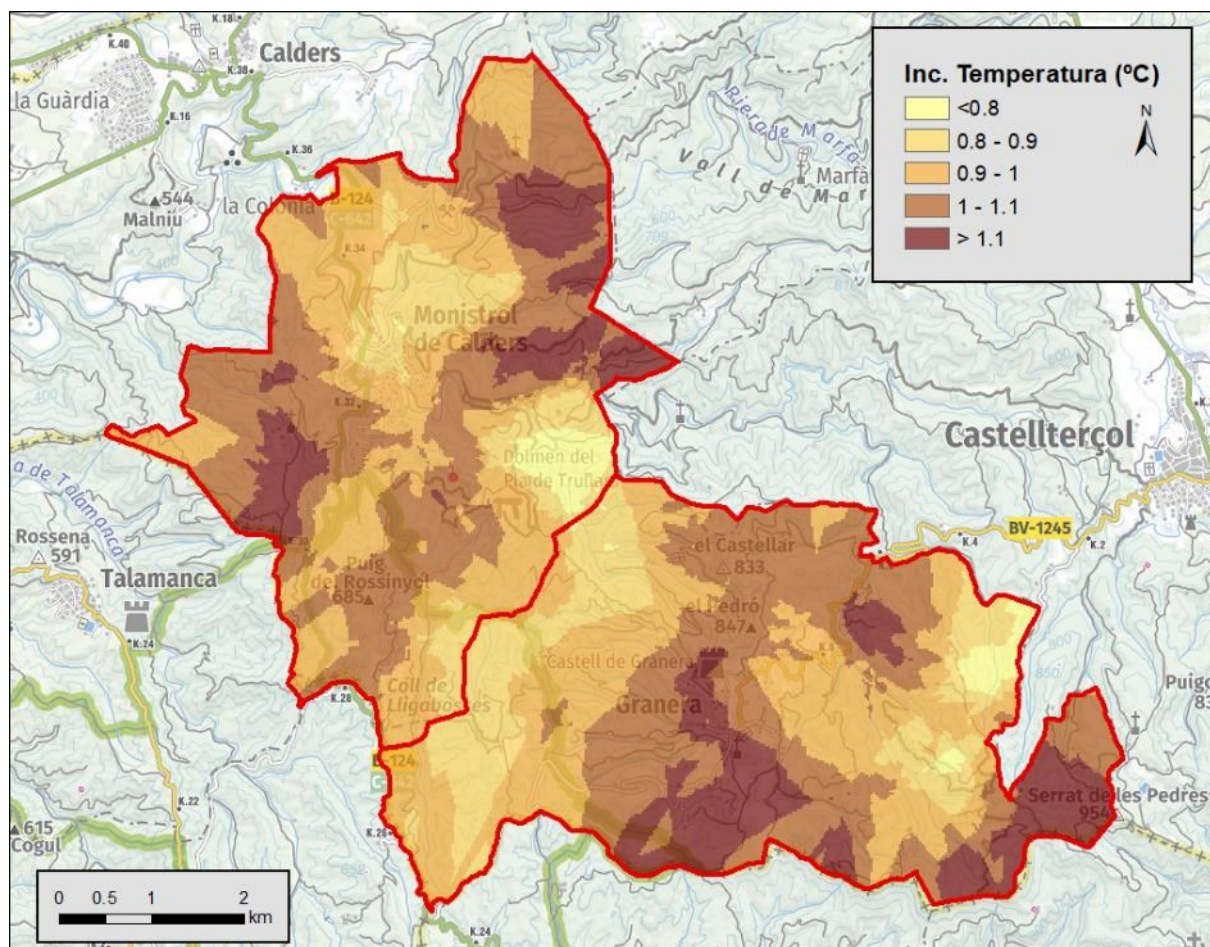


Figura 19. Distribució espacial de les diferències en temperatura comparant el clima previst pel període 2040-2050 respecte al observat durant els anys 2010 – 2020

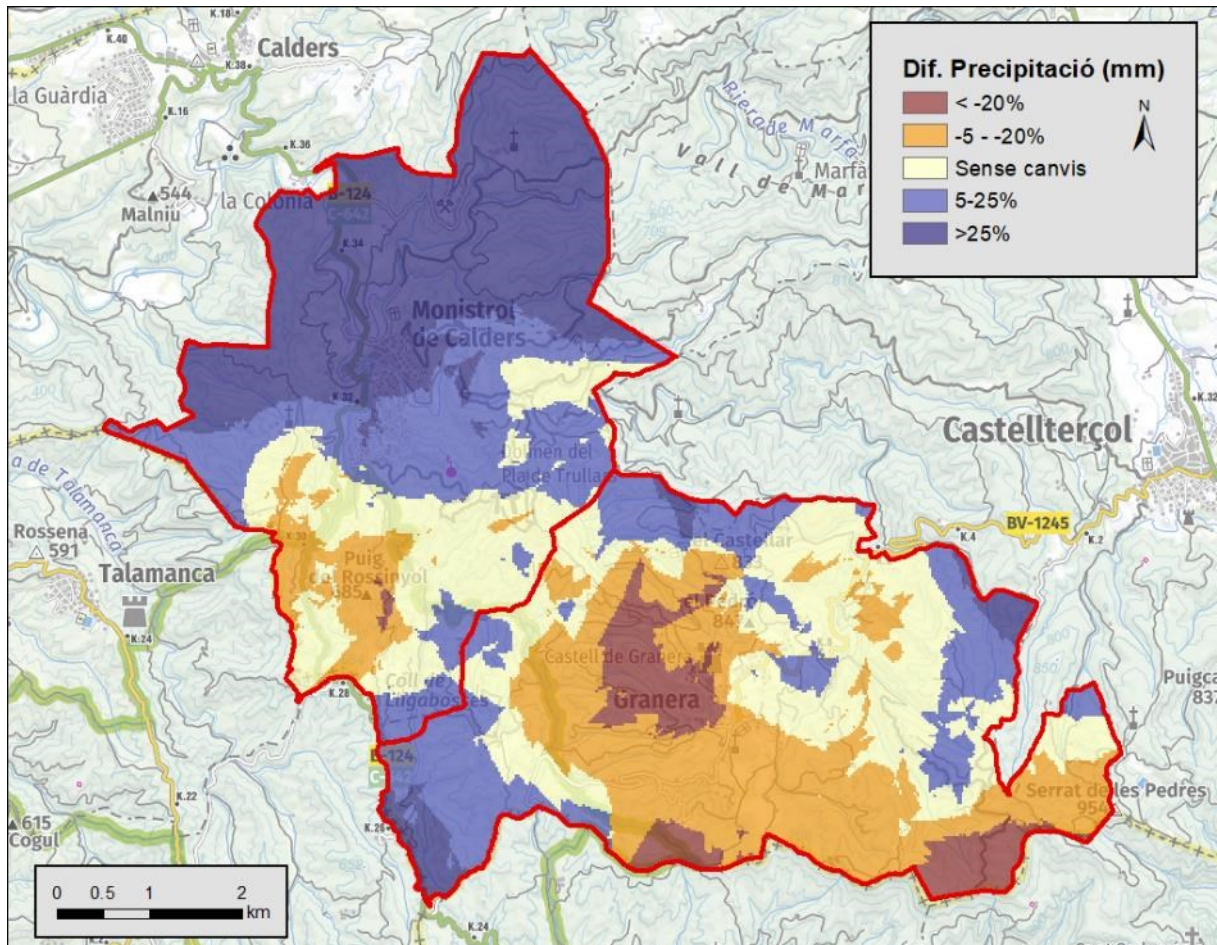


Figura 20. Distribució espacial de les diferències en precipitació comparant el clima previst pel període 2040-2050 respecte al observat durant els anys 2010 - 2020

### Quantificació històrica de la provisió de serveis ecosistèmics

S'ha avaluat de manera quantitativa la producció dels següents serveis ecosistèmics:

- **Producció d'aigua blava o aigua exportada (%)**. S'avalua la proporció d'aigua que surt de la conca respecte el total de la precipitació (De Cáceres *et al.*, 2015). Hi influeixen els patrons climàtics i el consum intern a la conca per part de la vegetació.
- **Erosió mitigada (t/ha·any)**, entesa com la diferència entre el potencial màxim d'erosió sense cobertura vegetal i la taxa d'erosió estimada amb la cobertura existent. Hi influeixen els patrons climàtics, l'orografia i les característiques de la vegetació existent (espècies, estructura i estat de desenvolupament).
- **Carboni atmosfèric segrestat per la vegetació (t/ha·any)**, incloent la part aèria i part subterrània. Hi influeixen els patrons climàtics, l'orografia i l'edafologia i les característiques de la vegetació (espècies, estructura i estat de desenvolupament).
- **Creixement net de l'arbrat (m<sup>3</sup>/ha·any)**. Hi influeixen els patrons climàtics, l'orografia i l'edafologia, les característiques de la vegetació (espècies, estructura i estat de desenvolupament) i les accions que impliquin eliminació de vegetació arbrada (gestió forestal o mortalitat natural per factors biòtics i abiòtics).

- **Producció de bolets comestibles** (kg/ha·any) segons de-Miguel *et al.* (2014). Hi influeixen els patrons climàtics, l'orografia i l'edafologia i les característiques de la vegetació (espècies, estructura i estat de desenvolupament).

El carboni segrestat i el creixement de l'arbrat es calculen per comparació, per tant no es mostren resultats per a 1990.

Els resultats de la provisió d'aquests serveis es mostren a la Figura 21. L'efecte dels incendis de 2003 s'observa en la taxa de carboni segrestat, ja que a 2016 encara és negativa respecte de l'any 2000, de manera que la coberta forestal encara no ha recuperat l'estoc de carboni emès per la combustió de la vegetació. Malgrat això, els canvis en la taxa de creixement net de l'arbrat i de la producció de bolets indiquen que la coberta forestal es troba en plena dinàmica de densificació, la qual cosa també afecta a la quantitat d'aigua disponible que surt de la massa forestal pel major consum de la vegetació.

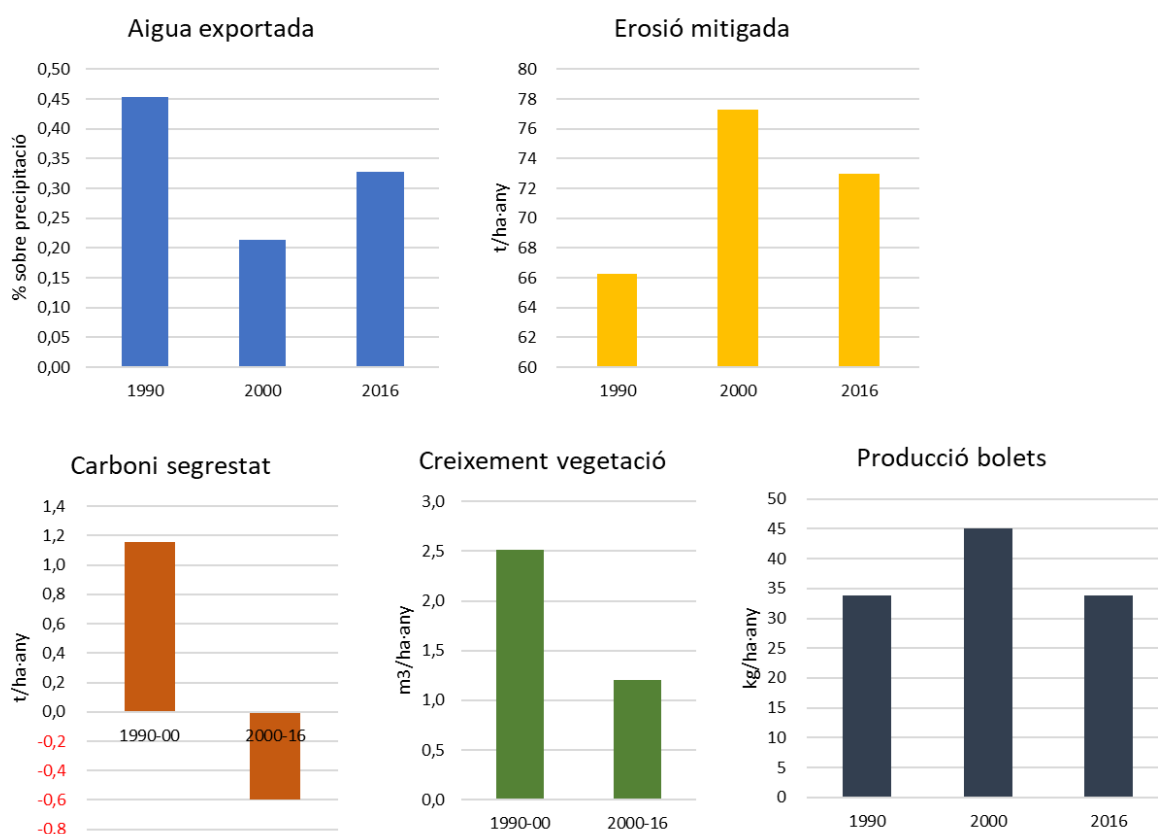


Figura 21. Diferents serveis ecosistèmics avaluats amb les dades disponibles per als municipis de Granera i Monistrol de Calders, processats amb la FES app del Laboratori forestal.

En aquest sentit, l'aigua blava (part de la precipitació que queda disponible per escorrentia i drenatge en la conca), disminueix entre 1990 i 2000 pel mateix fenomen (principalment), però els incendis de 2003 van eliminar part del consum vegetal i van fer que augmentés entre 2000 i 2016. És previsible que l'aigua blava disminueixi a mesura que la vegetació augmenta, tot i que els canvis són més complexos per les interrelacions dels factors (humitat ambiental, vents, temperatures...).

En general aquestes tendències s'interpreten com que són les condicions de la coberta vegetal les més determinants en els canvis observats, en menor mesura respecte als canvis del clima, en la línia de l'observat en general en l'entorn mediterrani (Roces-Díaz *et al.*, 2021).

Per últim, també cal fer notar els canvis en l'aprofitament dels recursos hídrics. La Figura 22 mostra el consum d'aigua (domèstic i comercial) declarat per facturació als municipis de l'àmbit. Malgrat la diferència de magnitud entre Granera i Monistrol de Calders, tots dos municipis experimenten un augment en el consum anual entre 2012 i 2020. Tot el sistema d'abastament, aprofitament i desguàs de les aigües a la zona d'estudi és determinant per acabar d'interpretar l'efecte de cada factor en els canvis de disponibilitat hídrica observats.

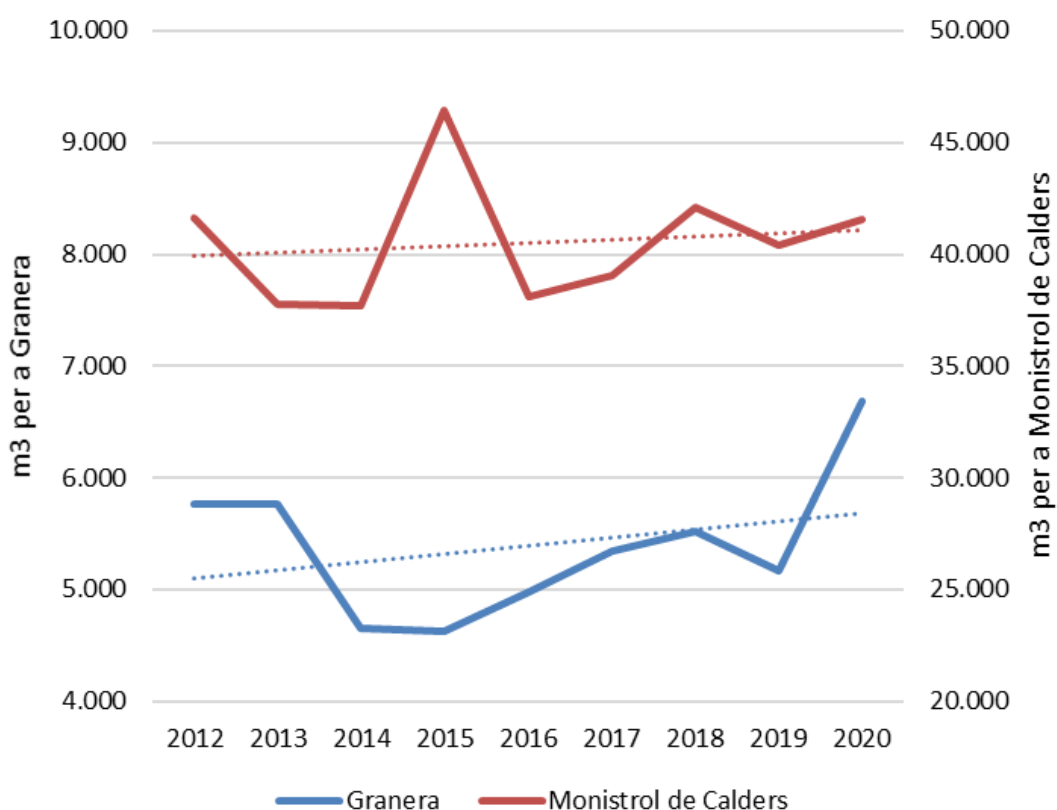


Figura 22. Consum anual d'aigua segons la facturació dels municipis de Granera i Monistrol de Calders, a partir de les dades de l'Agència Catalana de l'Aigua.

La Figura 23 mostra la ubicació de les fonts i els pous declarats a la zona d'estudi, més la ubicació de l'estació depuradora de Monistrol de Calders. La Figura 24 mostra el cabal diari bombat cada mes en el període de 2010 a 2021 al dipòsit de Saladich, a Monistrol de Calders. Tot i que la quantitat total també depèn del consum i altres factors, com les condicions pròpies de la infraestructura, es considera que un cabal més alt aportat al dipòsit està vinculat a més disponibilitat d'aigua al subsol. S'observa una alta variabilitat interanual, amb un cert descens del cabal des dels primers anys amb dades i una recuperació posterior.

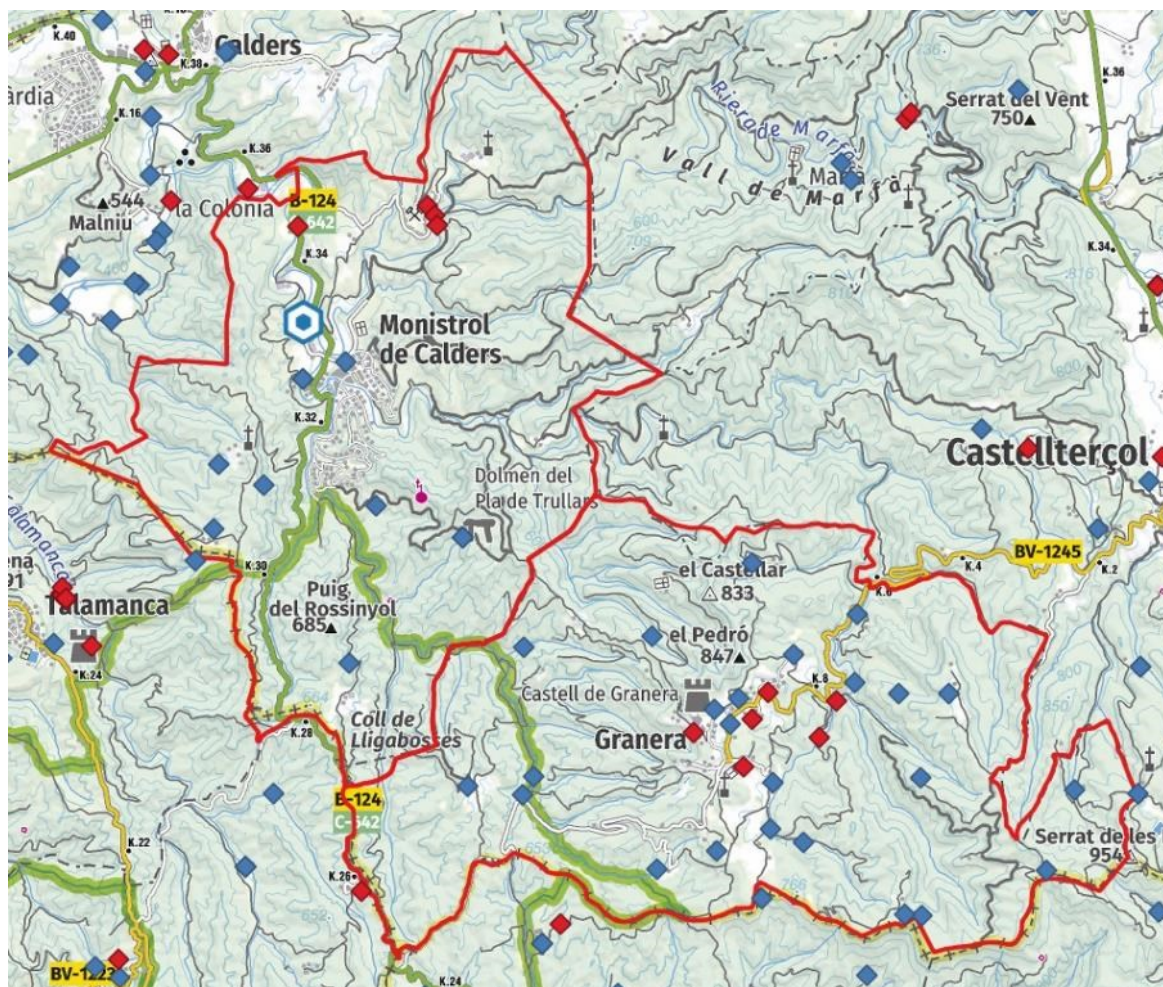


Figura 23. Ubicació de les fonts (marca blava), pous (marca vermella) a la zona d'estudi, i estació depuradora de Monistrol de Calders, segons les dades disponibles per l'Agència Catalana de l'Aigua.

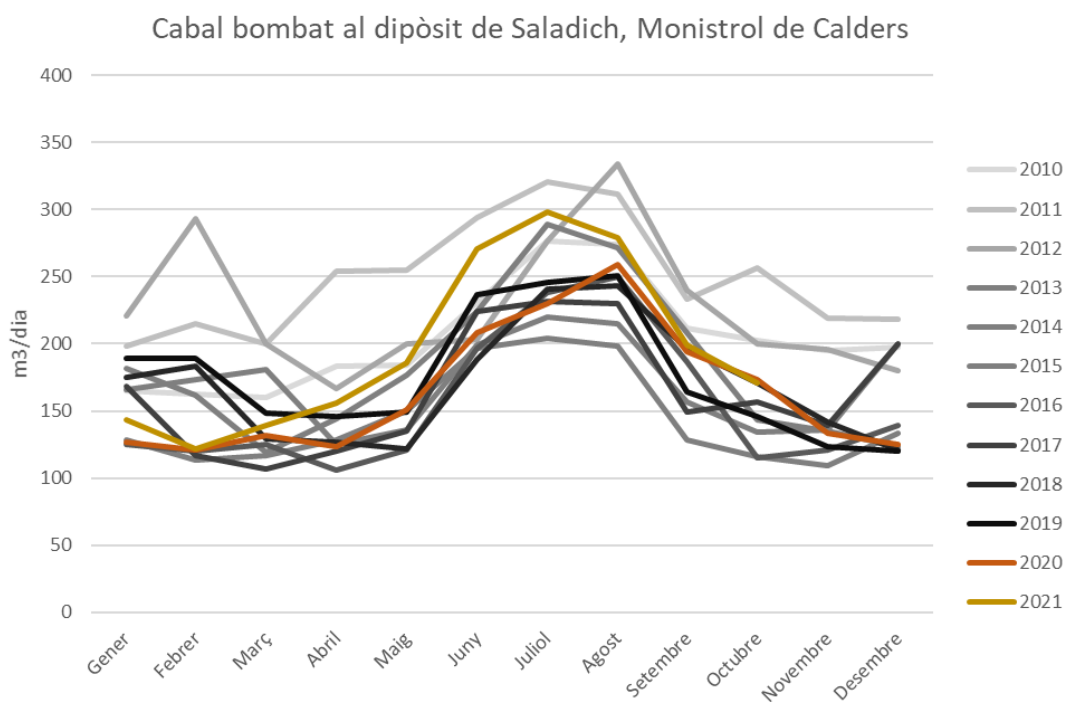


Figura 24. Cabal diari aportat al dipòsit principal de Monistrol de Calders per cada mes des de 2010.

## Simulacions de dinàmica forestal i balanç hídric (1995 – 2050)

### Variació de la provisió històrica d'aigua blava del bosc (1995-2020)

Hem analitzat aquí la quantitat d'aigua lliure (suma d'escorrentiu superficial i drenatge profund) produïda pels boscos dels dos municipis entre 1995 i 2020. Aquestes simulacions pretenen avaluar si hi ha haguts canvis dràstics en el clima o la demanda de la vegetació, i per tant en l'aportació d'aigua als aqüífers per part dels boscos.

Es pot observar com en el període entre 1995 i 2020 es va produir una gran variabilitat interanual en la quantitat d'aigua blava que va aportar el bosc (Figura 25). Aquestes diferències entre anys responen fonamentalment a les variacions típiques del clima, sent els anys més plujosos els que permeten que un major volum d'aigua arribi als aqüífers.

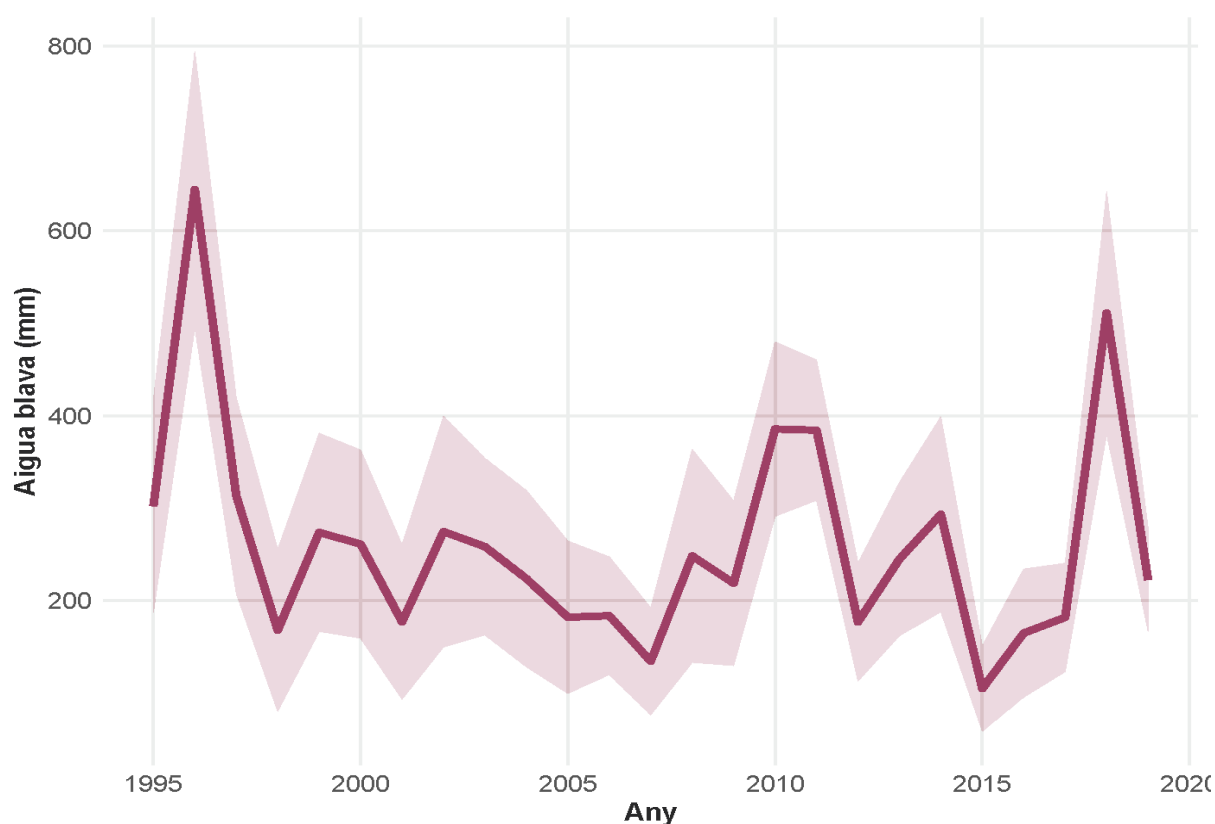


Figura 25. Variació de la provisió d'aigua blava (mm/any) entre 1995 i 2020 als boscos de Monistrol de Calders i Granera, segons les simulacions desenvolupades amb el software medfate. La línia gruixuda representa el valor mitjà per les 300 parcel·les analitzades, mentre que l'àrea ombrejada recull la variabilitat entre parcel·les.

Per minimitzar l'efecte de les variacions en precipitació i capturar millor el paper de la vegetació en la producció d'aigua blava és habitual treballar amb valors relatius, de manera que es calcula, per cada any i rodal, el percentatge que suposa l'aigua blava respecte al total de precipitació d'aquell any. Podem observar que aquesta variable efectivament suavitza l'efecte del clima (Figura 26), tot i que no l'elimina totalment. Així, veiem que la producció d'aigua blava pot assolir fàcilment el 50% del total de pluja en el cas dels anys humits, mentre que en els anys més secs (com ara 2015), a penes supera el 20%.

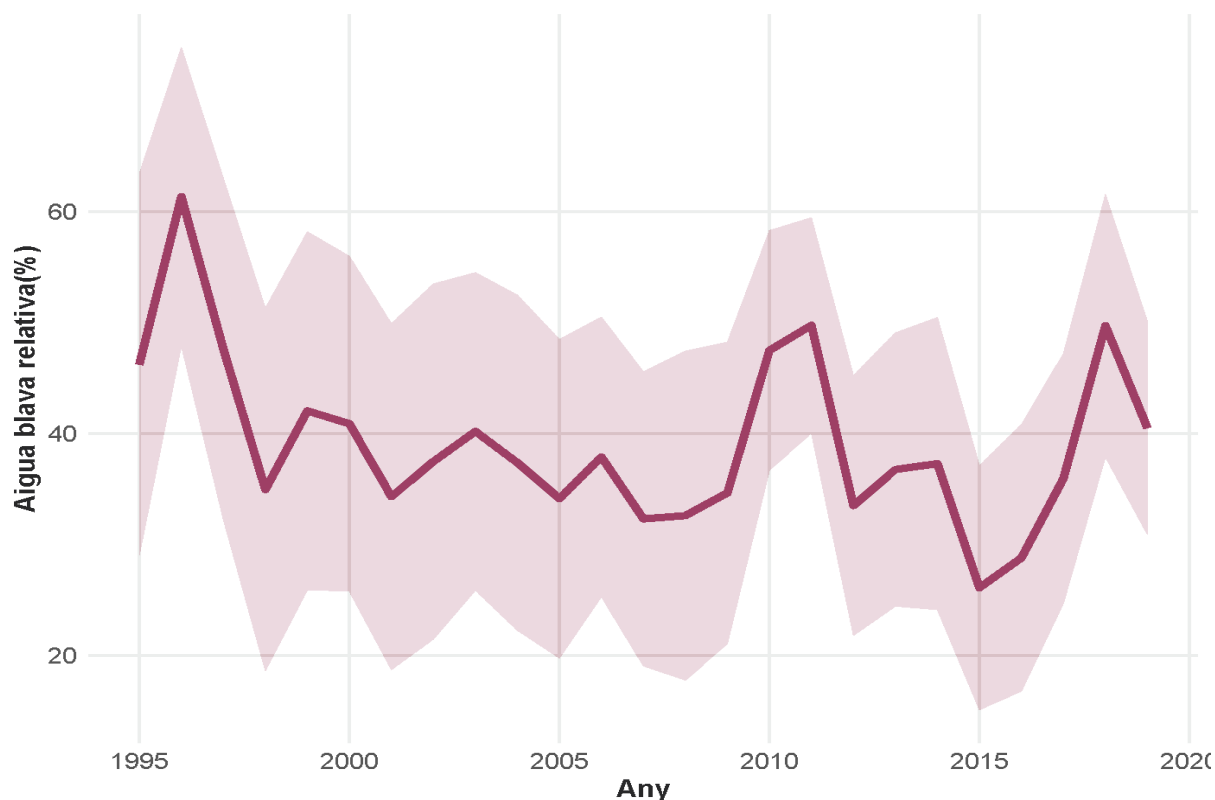


Figura 26. Variació de la provisió d'aigua blava relativa a la precipitació (%) entre 1995 i 2020 als boscos de Monistrol de Calders i Granera, segons les simulacions desenvolupades amb el software medfate. La línia gruixuda representa el valor mitjà per les 300 parcel·les analitzades, mentre que l'àrea ombrrejada recull la variabilitat entre parcel·les.

#### Canvis en la dinàmica del bosc (2020 – 2045)

Per avaluar els canvis futurs en l'estructura i composició dels boscos de Monistrol de Calders i Granera hem dut a terme simulacions amb el model *medfate* i amb dos escenaris: un considerant que es realitza gestió forestal, i un altre on no es realitza cap tipus de gestió. Els resultats van encaminats a avaluar el paper potencial de la gestió forestal en la provisió de serveis, sobre tot la producció d'aigua blava, i es presenten per tant comparant els valors en aquests dos escenaris.

Es pot observar com, en un escenari sense gestió, es preveu que continuï la tendència cap a l'acumulació de vegetació als boscos de la zona. Així, veiem com l'àrea basal aniria augmentat de manera progressiva, des del voltant de 20 m<sup>2</sup>/ha que trobem actualment de mitjana, fins assolir 30 m<sup>2</sup>/ha cap a meitat de segle (Figura 27). L'increment és encara més important si considerem la densitat arbòria, que es multiplica per 5 passant de menys de 1.000 peus per hectàrea a fregar els 7.500.

Observant la dinàmica d'ambdues variables concloem que l'increment d'àrea basal previst no s'assoleix tant degut al creixement en diàmetre dels arbres, si no més aviat a la incorporació d'un gran nombre d'individus de petita mida, consolidant la tendència observada actualment de boscos poc capitalitzats, amb excés de densitats d'arbres petits i poc creixement dels mateixos.

L'escenari és diferent si es contempla la possibilitat que es realitzi gestió en totes les parcel·les actualment planificades amb un IOF vigent. En aquest escenari, l'àrea basal presenta un

comportament una mica més estable, amb petites pujades i baixades corresponent als diversos cicles de tallades previstos. Tanmateix, la densitat és manté en tot moment en valors per sota dels 2.000 – 2.500 peus/ha (Figura 27).



Figura 27. Evolució de l'àrea basal i la densitat entre 2020 i 2045 als municipis de Monistrol de Calders i Granera, segons dos escenaris: amb i sense gestió forestal. La línia sòlida marca el valor mitjà de les més de 300 parcel·les d'inventari, mentre que l'àrea ombrejada indica la variabilitat entre parcel·les

Podem representar la mateixa informació per les principals espècies forestals de la zona, i observem que les tendències són molt similars: per les 3 espècies de pins, la gestió forestal estabilitza les tendències de creixement pràcticament descontrolat de l'àrea basal, mantenint-la en valors similars als observats actualment (Figura 28). En canvi, l'alzina no presenta pràcticament diferències entre els dos escenaris, probablement degut al tipus de gestió que s'ha aplicat i a l'estructura que presenten la major part dels alzinars a la zona (molts boscos de rebrot amb arbres de petites dimensions).



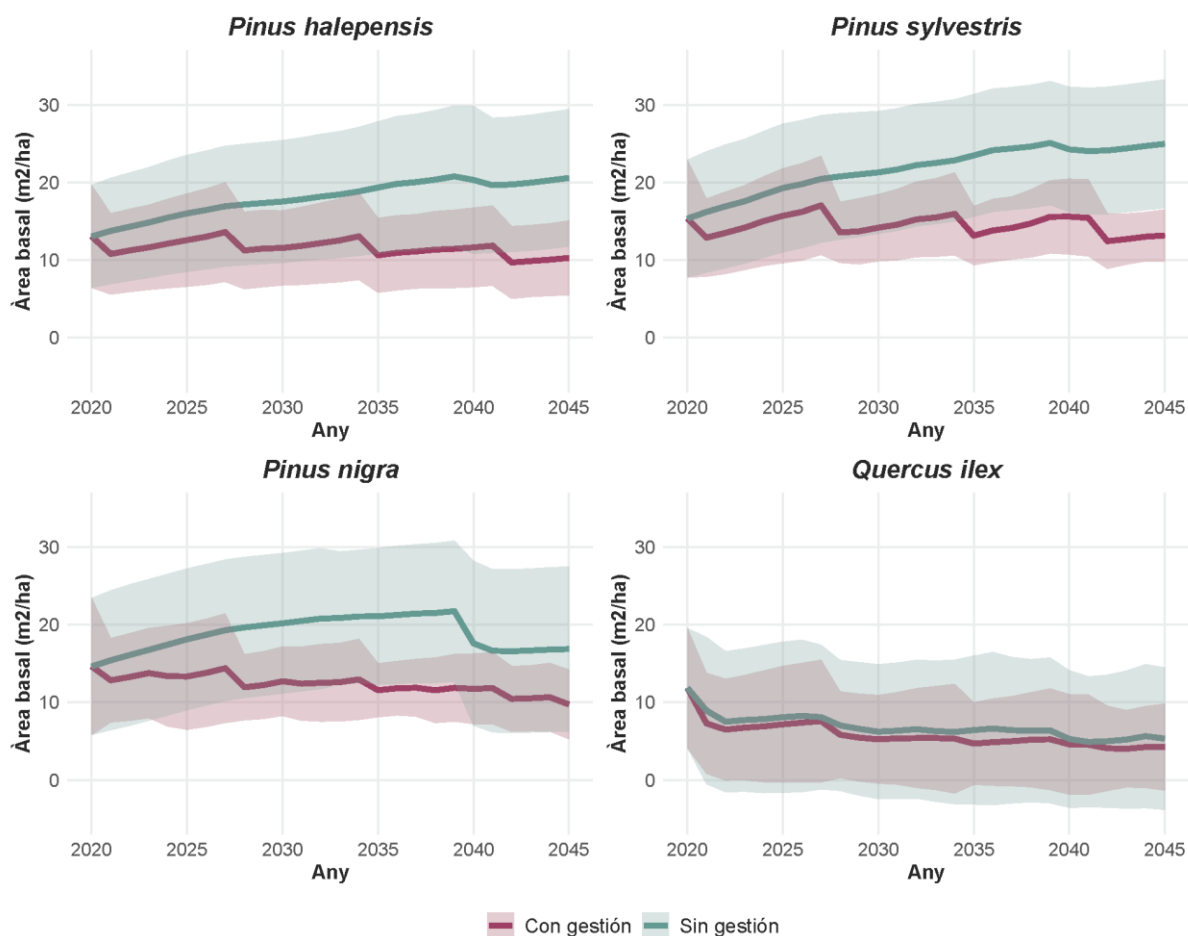


Figura 28 Evolució de l'àrea basal i la densitat entre 2020 i 2045 per les 4 principals espècies forestals als municipis de Monistrol de Calders i Granera, segons dos escenaris: amb i sense gestió forestal. La línia sòlida marca el valor mitjà de les més de 300 parcel·les d'inventari, mentre que l'àrea ombrejada indica la variabilitat entre parcel·les.

### Canvis en la provisió d'aigua blava (2020 – 2045)

De la mateixa manera que a l'analitzar les series històriques, observem com la producció d'aigua blava prevista per les properes dècades presenta una alta variabilitat entre anys, encara més pronunciada que l'actual. Els anys molt humits es preveu obtenir fins a 600 mm d'aigua blava (és a dir, 600 l/m<sup>2</sup> o 6.000 m<sup>3</sup>/ha), però els anys humits aquest valor no supera els 200 mm (Figura 29). La gestió forestal clarament incrementa la producció d'aigua blava dels boscos, sobre tot en els anys humits, on les diferències poden arribar a ser de 100 mm. Els anys més secs, però, la menor disponibilitat hídrica fa que no s'alliberi tanta aigua, i els efectes de la gestió són pràcticament nuls.

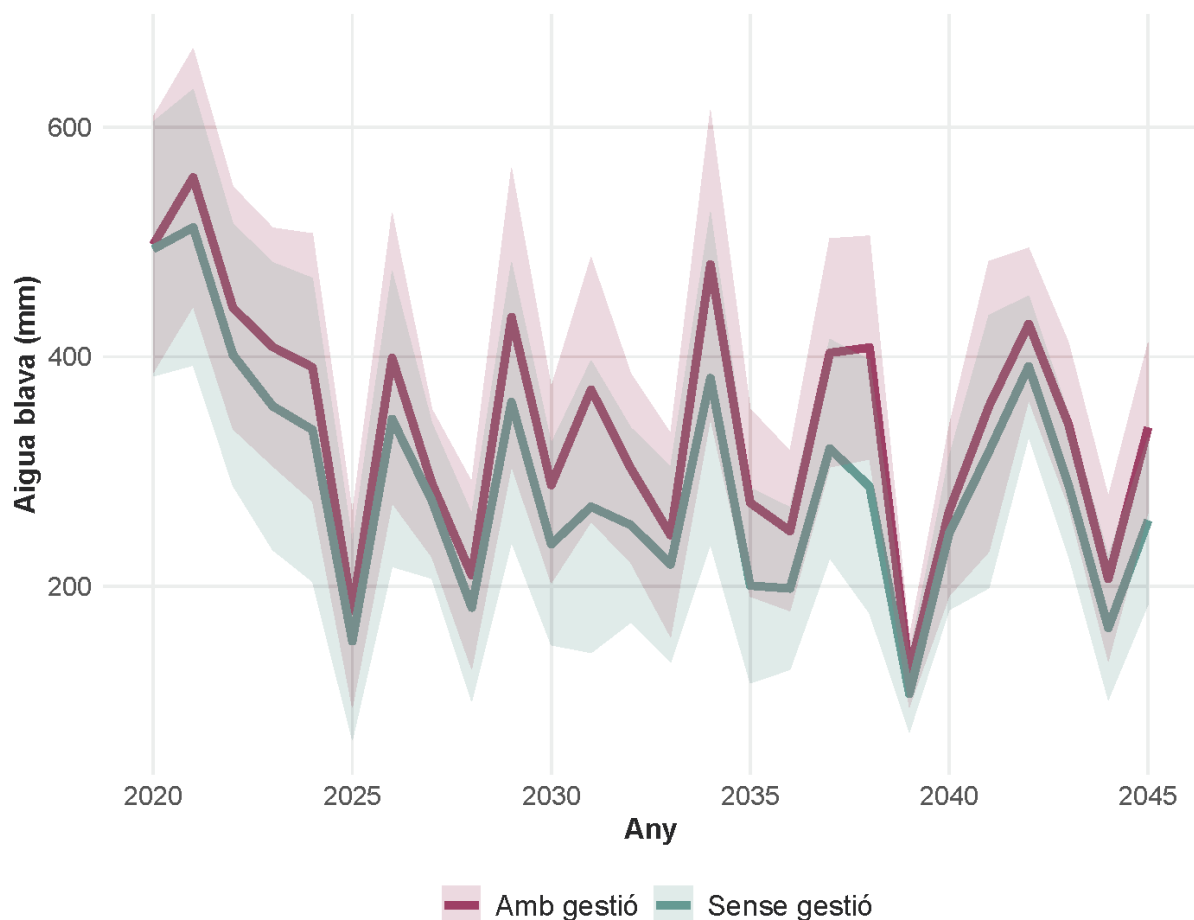


Figura 29. Variació de la provisió d'aigua blava (mm/any) entre 2020 i 2045 als boscos de Monistrol de Calders i Granera, segons les simulacions desenvolupades amb el software medfate sota dos escenaris de gestió. La línia gruixuda representa el valor mitjà per les 300 parcel·les analitzades, mentre que l'àrea ombrejada recull la variabilitat entre parcel·les.

Aquesta producció o aport d'aigua blava no es dona de manera homogènea en tot el territori, com pot observar-se de l'alta variabilitat de les figures anteriors. Podem avaluar la quantitat d'aigua blava produïda per cada una de les parcel·les analitzades durant tot el període estudiat (2020-2045), de manera que podrem tenir una millor comprensió de la variabilitat espacial d'aquest recurs (Figura 30). Igualment, si comparem per exemple l'aigua blava produïda durant el període 2040-2050 amb la produïda entre 2020 i 2030 tindrem una representació acurada de les àrees en les que s'espera una major reducció del recurs aigua degut al clima, tant sense gestió com amb ella (Figura 31).

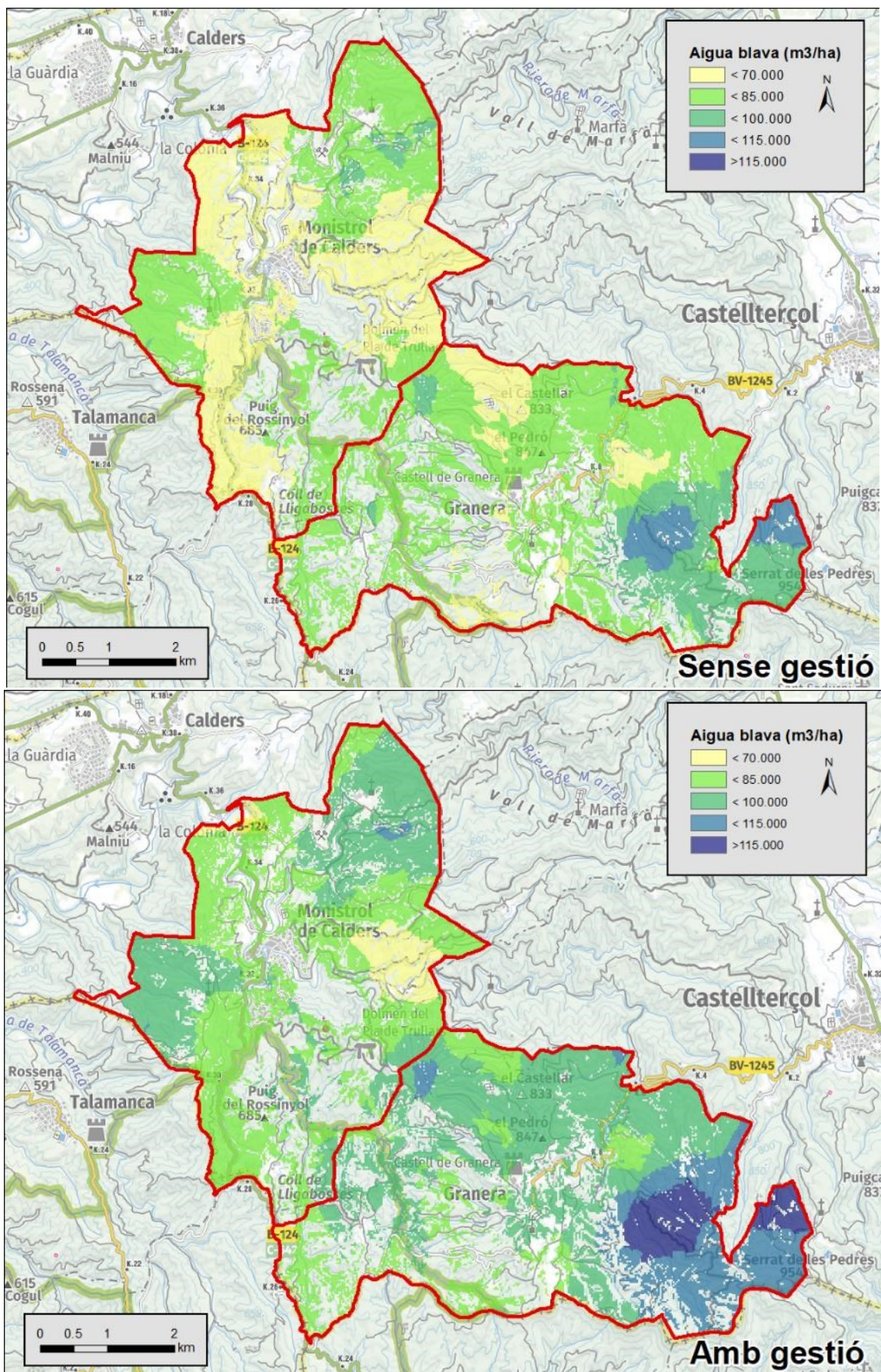


Figura 30. Producció total d'aigua blava dels boscos de Monistrol de Calders i Granera en el període 2020-2045, sota dos escenaris: sense gestió forestal (a dalt), i amb gestió forestal (a sota).

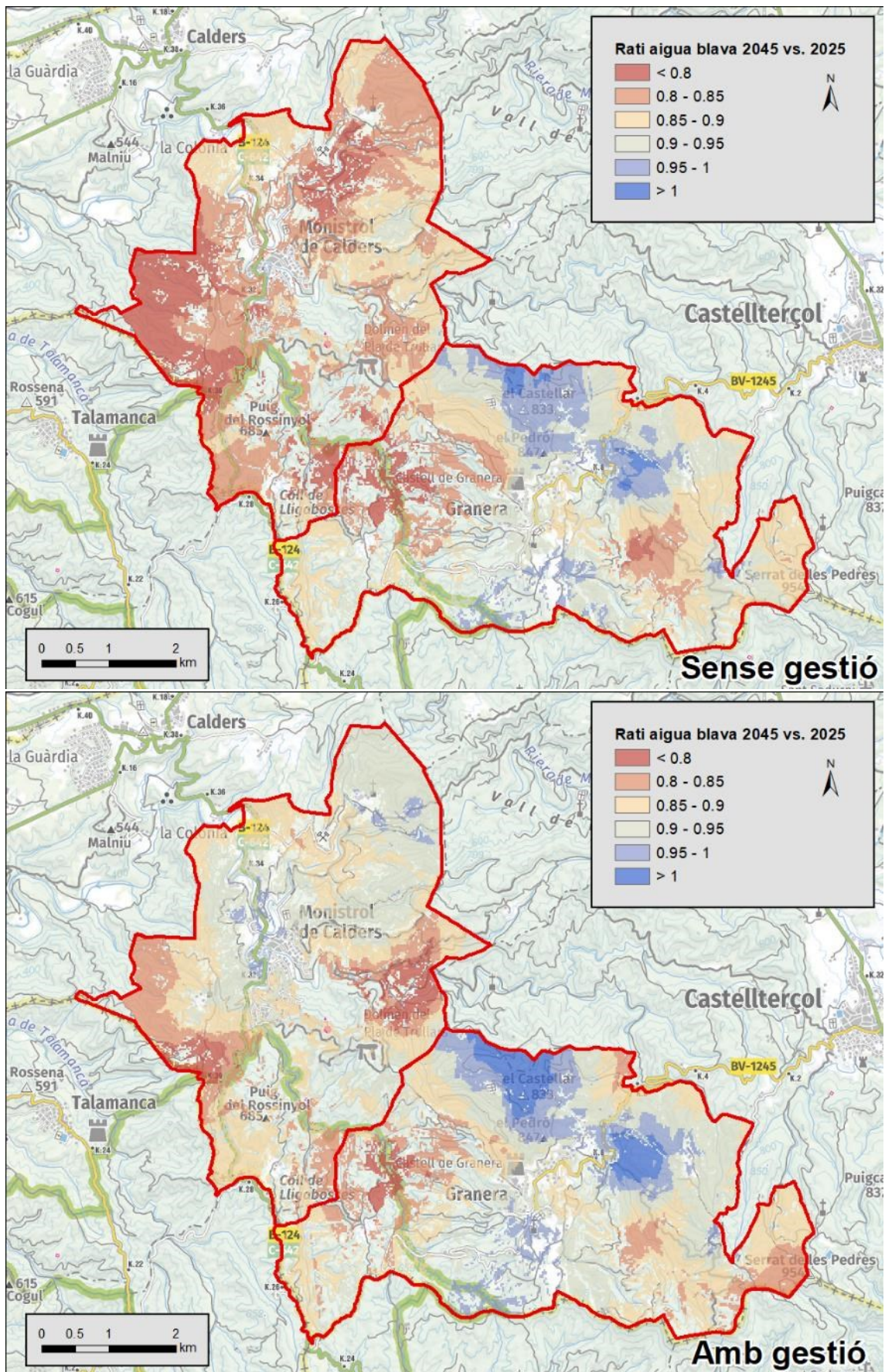


Figura 31. Producció total d'aigua blava dels boscos de Monistrol de Calders i Granera en el període 2020-2045, sota dos escenaris: sense gestió forestal (a dalt), i amb gestió forestal (a sota).

L'efecte combinat de clima i vegetació en la variabilitat en la provisió d'aigua blava es fa palesa amb les grans diferències que es poden observar als dos municipis. Les majors produccions d'aigua blava es donen a Granera, sobre tot a la zona de la Serra de Puigdomènec i el Serrat de les Pedres. D'acord a les simulacions, la gestió forestal permetria augmentar la producció total d'aigua blava a tot arreu dins dels municipis, però les zones amb major provisió d'aigua no canviarien (Figura 30). En canvi, tot i que la gestió pot atenuar les reduccions en aigua blava degudes al canvi del clima, no arriba a revertir aquest efecte, i la major part de les àrees analitzades continuen produint menor quantitat d'aigua blava en el període 2040-2050 que en el 2020-2030, independentment de si se realitza gestió o no (Figura 31). Això no vol dir, però, que la gestió no tingui cap efecte, ja que els ratis entre ambdós períodes són en general més propers a 1 per a l'escenari on es realitza gestió forestal.

Com hem indicat anteriorment, una manera de reduir el pes de la variabilitat climàtica és treballar amb valors d'aigua blava relatius a la precipitació. En el cas de les simulacions a futur, això ens permet veure de manera més clara el paper de la gestió forestal. Observem com les dos corbes van pràcticament paral·leles, el qual indica que el paper de la gestió sobre la eficiència en la producció d'aigua blava és relativament constant (Figura 32). La excepció, però, són els anys extrems, tant per molt plujosos com per molt secs. En aquests casos, les diferències entre els escenaris es tornen molt més reduïdes. En el cas dels anys plujosos, l'excès d'aigua disponible fa que disminueixi l'evapotranspiració, i un percentatge molt important de la precipitació – sovint més d'un 50% - acaba arribant a les rieres i aqüífers. En el cas dels anys secs el procés és el contrari, i l'alta demanda per part de la vegetació fa que només una proporció molt petita de la precipitació que cau quedi sense aprofitar per les plantes.

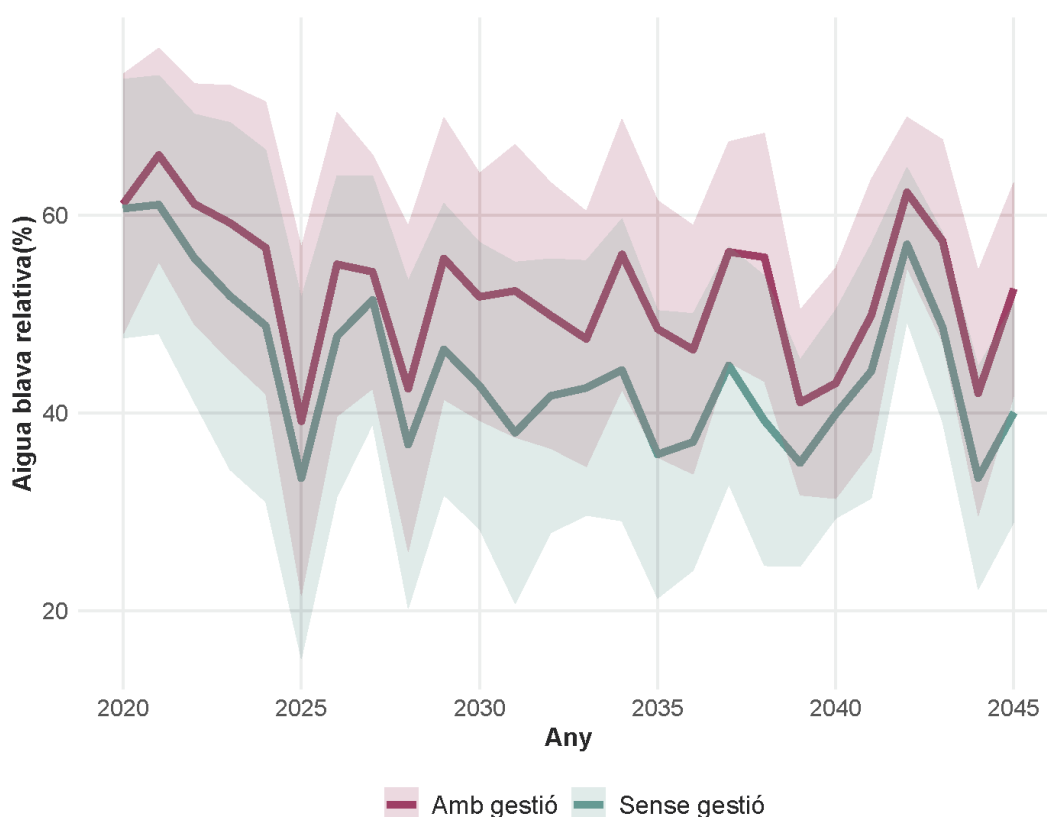


Figura 32. Variació de la provisió d'aigua blava relativa a la precipitació entre 2020 i 2045 als boscos de Monistrol de Calders i Granera, segons les simulacions desenvolupades amb el software medfate sota dos escenaris de gestió. La línia gruixuda representa el valor mitjà per les 300 parcel·les analitzades, mentre que l'àrea ombrejada recull la variabilitat entre parcel·les.

### Canvis en el grau d'estrès hídric de la vegetació (2020 – 2045)

Les simulacions realitzades també permeten avaluar el grau d'estrès hídric que està patint la vegetació, que es determina a partir del nombre de dies anuals amb un nivell d'estrès elevat (amb elevada probabilitat de mortalitat per cavitació). Aquest càlcul s'ha pogut realitzar per les principals espècies a l'àmbit d'estudi, i per un escenari sense gestió forestal i un altre amb gestió. Veiem que el nombre de dies amb estrès important no és massa elevat, però puja de manera dràstica en alguns anys determinats.

Les prediccions realitzades mostren un empitjorament de la situació, ja que alguns anys se superen els 30 dies d'estrès hídric per les espècies més sensibles (pi roig, alzina), el qual suposaria episodis de mortalitat molt generalitzats (Figura 33). Així mateix, espècies que fins ara no havien patit sequeres dràstiques, com el pi blanc o el pi pinyer, podrien començar a patir-les cap a meitat de segle.

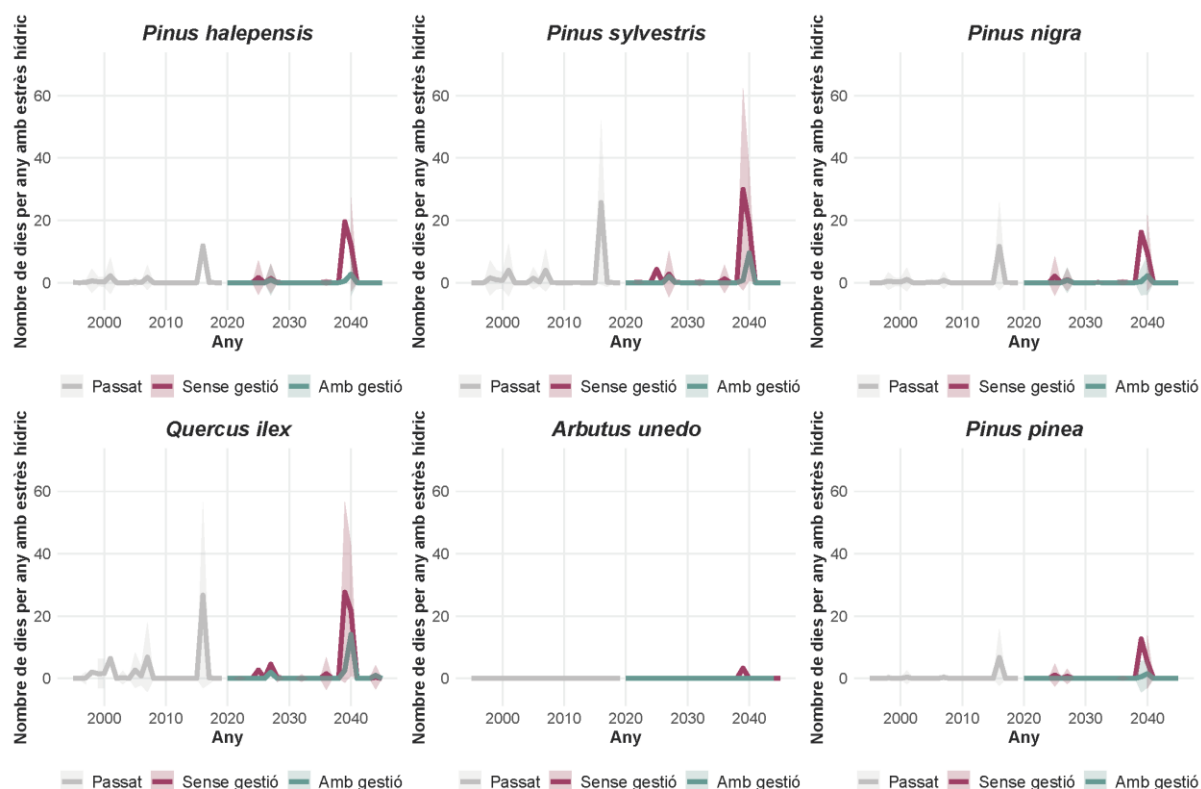


Figura 33. Nombre de dies anuals amb estrès hídric per algunes de les principals espècies presents als municipis de Monistrol de Calders i Granera.

Per una altra banda, aquesta figura ja permet apreciar l'efecte de la gestió forestal sobre l'estrès hídric, ja que aconsegueix reduir-lo a pràcticament 0 pel pi pinyer o la pinassa, o reduir-lo de manera important en el cas del pi roig o el pi blanc.

Aquesta informació també pot representar-se de manera espacial, si se selecciona per cada parcel·la l'espècie amb més sensibilitat a l'estrès d'entre les presents. D'aquesta manera podem identificar les àrees més vulnerables a l'estrès hídric, i finalment avaluar la reducció del risc de mortalitats massives degudes a l'estrès que pot provocar la gestió forestal.

S'observen grans diferències en la distribució espacials de l'estrès per sequera. Mentre que les zones nord i oest del municipi de Monistrol de Calders, i l'est de Granera presenten valors molt baixos, de menys de 5 dies d'estrès per any, hi ha àrees amb valors molt elevats, molt per sobre del que seria recomanable (Figura 34).

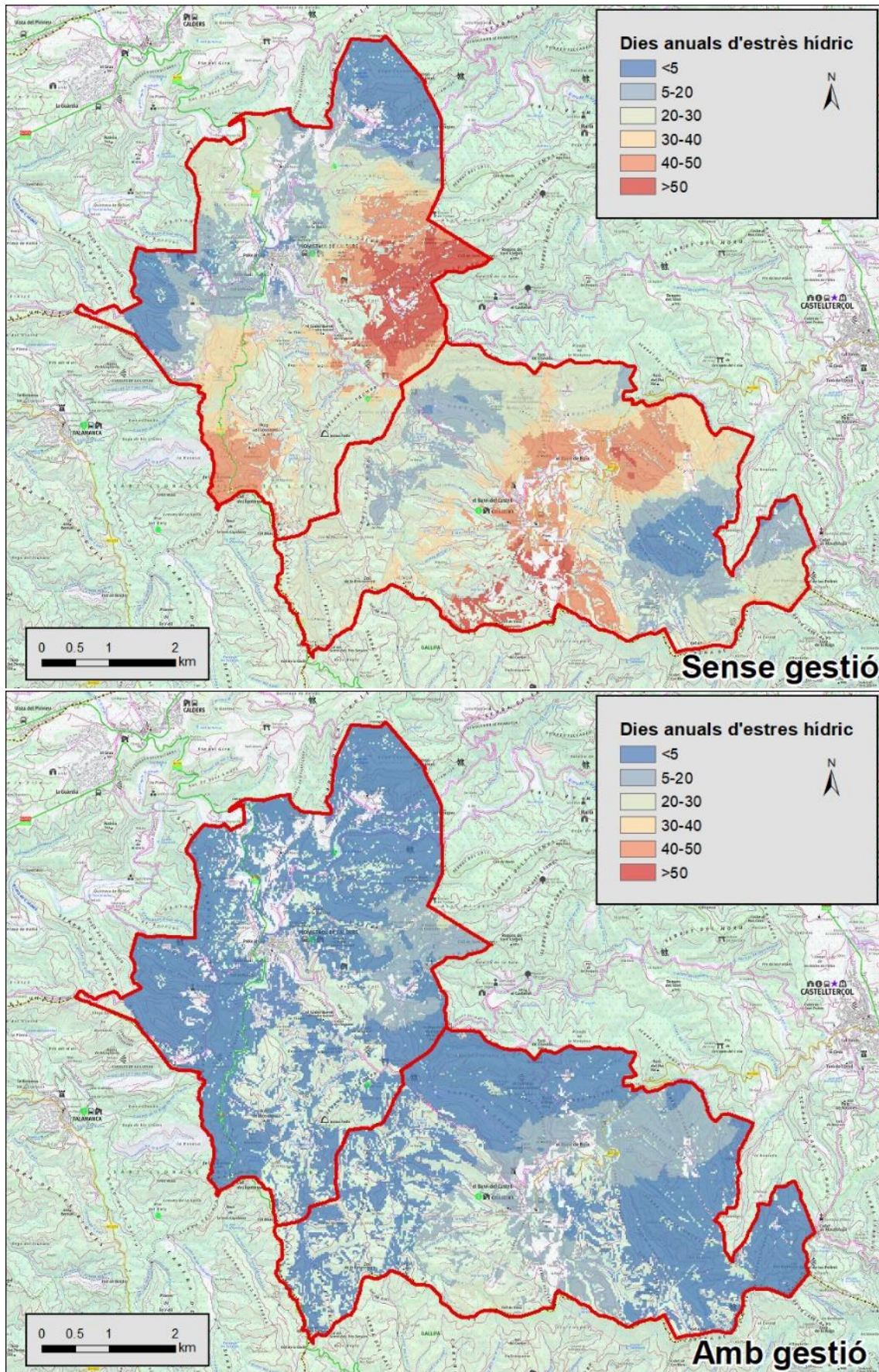


Figura 34. Nombre de dies anuals amb estrès hídric sever als boscos de Monistrol de Calders i Granera cap a finals del període simulat (2045-2050), en un escenari sense gestió forestal (a dalt) i amb gestió forestal (a sota).

En canvi, els nivells d'estrès hídric a l'escenari amb gestió forestal resulten molt més homogenis, sense grans diferències territorials, i amb valors en tot cas baixos o moderats, sempre per sota dels 20 dies per any (Figura 34). Aquest fet posa de relleu el gran paper que pot jugar la gestió en l'adaptació de les masses boscoses mediterrànies al canvi climàtic, ajudant a evitar que els nivells d'estrès hídric suposin episodis de mortalitat massiva o de decaïment generalitzat de les espècies més vulnerables.



*Figura 35. Riera de Sant Joan al seu pas pel Molí d'en Sala al març de 2022 (Monistrol de Calders).*



## 6. Conclusions

A partir de les anàlisis efectuades i les simulacions fetes, podem extreure algunes conclusions generals sobre la dinàmica forestal, el usos del sòl i la provisió d'aigua per part dels boscos de Monistrol de Calders i Granera per a les properes dècades:

- Els incendis de 2003 van provocar un canvi sobtat del tipus de vegetació, transformant-se grans superfícies de zones boscoses en matollars i herbassars. Una part d'aquests canvis ja s'ha revertit, amb una certa recuperació del bosc entre 2005 i 2019, i és d'esperar que aquesta recuperació continuï, tot i que a un ritme molt lent.
- Els canvis de vegetació associats als incendis de 2003 sí van provocar canvis importants en els serveis que proveeixen els boscos de Monistrol de Calders i Granera. S'observen davallades en el creixement de la vegetació i el segrest de carboni, però augments en la provisió d'aigua blava degut al menor consum per part de la vegetació.
- Pel que fa a la relació de la quantitat d'aigua observable a les fonts, rieres i altres punts habituals d'aigua en superfície amb el bosc és més complexa del que l'abast del present estudi pot analitzar. La infiltració de l'aigua al sòl i la posterior emergència i l'aigua d'escorrentia té variabilitats temporals i espacials influenciades per l'edafologia i geologia de la zona. Els sistemes d'abastament per al consum humà de la zona d'estudi poden no ser sensibles en escala temporal i/o espacial als canvis de precipitació documentats en aquest estudi.
- En tot cas, els canvis en la quantitat d'aigua disponible segons observacions empíriques des de l'ocurrència dels incendis de 2003 no es veuen reflectits amb un patró comparable en els resultats del present estudi. De fet, els canvis en la precipitació i l'aigua blava ja comencen a ser significatius des d'anys anteriors als incendis.
- L'anàlisi de les dades climàtiques passades i futures mostren una pujada important de les temperatures, sobre tot les d'estiu, i una major irregularitat de la precipitació. Aquests canvis comencen a fer-se evidents a partir de l'any 2000, com en altres indrets mediterranis, sense que es pugui atribuir una causalitat a l'incendi de 2003.
- La pujada de temperatures prevista (2.5°C més a finals de segle) i la irregularitat de les precipitacions provocarà una major freqüència d'estius secs o molt secs. Dels canvis de variables climàtiques també es pot interpretar altres canvis en factors meteorològics per l'alta interrelació, com ara en els vents dominants i a microescala, la humitat ambiental o la radiació directa. Tots aquests factors poden tenir influència sobre l'aigua blava disponible.
- Es preveu una disminució progressiva de l'aigua blava aportada pels boscos, com a conseqüència tant dels canvis climàtics com de l'elevat consum d'aigua que suposa tenir boscos amb altes densitats de vegetació.
- Els canvis en l'estructura del bosc en absència de gestió (principalment densificació amb incorporació d'arbres petits) i el clima comportaran un increment molt important de l'estrès hídric i els episodis de decaïment per part de les espècies més sensibles. A finals de segle fins i tot les espècies més resistents poden tenir problemes.
- Els boscos tenen un paper cabdal en els processos hidrològics en relació als serveis ecosistèmics que proveeixen. Regulen l'escorrentia i la infiltració (en cabdal punta i en quantitat total), determinen el microclima (humitat ambiental, circulació de vents) i aporten aigua a l'atmosfera amb la evapotranspiració. A canvi, generen biomassa que pot ser aprofitada com a matèria primera i conformen una estructura que acull biodiversitat i genera un entorn i un paisatge amb valor social.

- En un escenari sense gestió forestal cal esperar un augment important de la densificació del bosc, fomentant-se en línies generals boscos molt densos amb arbres de petita mida, amb un increment sostingut de l'àrea basal. La gestió forestal té la capacitat de controlar aquesta tendència, mantenint els valors d'àrea basal més estables, i concentrant el volum de fusta en un menor nombre de peus.
- El paper de la gestió forestal com a eina per reduir l'estrès de la vegetació és molt clar, permetent eliminar pràcticament el risc de danys importants per les espècies més resistents (pi blanc) o reduint-lo considerablement per les més sensibles (pi roig). Cal destacar que més del 70% de la superfície forestal disposa d'un IOF vigent.
- La gestió forestal té la capacitat d'incrementar el volum d'aigua aportat a les rieres i aqüífers per part dels boscos. En anys normals, es pot esperar que els boscos gestionats aportin fins un 25% més d'aigua blava. En canvi, aquesta capacitat desapareix en els anys climàticament extrems, tant per excés com per dèficit de pluja.
- Estudis futurs poden encaminar-se a determinar el tipus de gestió més adient segons els objectius a assolir. Es recomana aplicar l'enfocament de la silvicultura ecohidrològica, que promou una gestió forestal optimitzada per complir amb objectius multifuncionals ponderats entre ells, el conegut com C.A.F.E. (fixació de Carboni, producció d'Aigua, prevenció del Foc i millora de l'Eco-resiliència). D'aquesta manera es podria garantir (o optimitzar) la provisió dels serveis ecosistèmics que ens ofereixen els boscos.

## 7. Agraïments

Els autors d'aquest estudi volen agrair a Dr. Miquel de Cáceres (CREAF) tot el suport i l'ajuda per la posada a punt del model *medfate* i la realització de les simulacions futures. A més, també agraeixen la dedicació del Laboratori de Planificació Forestal i Anàlisi del Paisatge de la Universitat de Lleida a l'hora de dur a terme les simulacions i interpretar els resultats.

## 8. Bibliografia

Ameztegui, A., Cabon, A., De Cáceres, M., Coll, L. 2017. Managing stand density to enhance the adaptability of Scots pine stands to climate change: A modelling approach. *Ecol Model* 356, 141–150.

CREAF. 2010. Mapa de cobertes del sòl de Catalunya v3 (2005-2007). Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals. Departament de Medi Ambient i Habitatge.

CREAF. 2013. Mapa de cobertes del sòl de Catalunya v4 (2009). Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals. Departament de Medi Ambient i Habitatge.

De Cáceres, M., Martínez-Vilalta, J., Coll, L., Llorens, P., Casals, P., Poyatos, R., Pausas, JG, Brotons, L. 2015. Coupling a water balance model with forest inventory data to predict drought stress: the role of forest structural changes vs. climate changes. *Agricultural and Forest Meteorology* 213:77–90.

De Cáceres, M., Martin-StPaul, N., Turco, M., Cabon, A., Granda, V. 2018. Estimating daily meteorological data and downscaling climate models over landscapes. *Environmental Modelling & Software* 108:186–196.

De Cáceres, M., Mencuccini, M., Martin-StPaul, N., Limousin, JM., Coll, L., Poyatos, R., Cabon, A., Granda, V., Forner, A., Valladares, F., Martínez-Vilalta, J. 2021. Unravelling the effect of species mixing on water use and drought stress in holm oak forests: a modelling approach. *Agricultural and Forest Meteorology*: 296.

De Miguel, S., Bonet, JA., Pukkala, T., Martínez de Aragón, J. 2014. Impact of forest management intensity on landscape-level mushroom productivity: A regional model-based scenario analysis, *Forest Ecology and Management*, 330, 218-227.

DGDRPF. 2016. Mapa Forestal de España. Escala 1:25.000. Catalunya. Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.

Granda, V., De Cáceres, M., Ameztegui, A. 2021. meteospain: Access to Spanish Meteorological Stations Services. Disponible a <https://emf-creaf.github.io/meteospain/>, <https://github.com/emf-creaf/meteospain>

Hengl, T., Mendes De Jesus, J., Heuvelink, GBM. 2017. SoilGrids250m: Global Gridded Soil Information Based on Machine Learning. *PLoS One* 12:e0169748.

ICGC. 2018. Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya (MCSC) v1.0. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.

ICGC. 2018. Usos i cobertes del sòl de Catalunya 1997. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.

Roces-Díaz, JV., Vayreda, J., De Cáceres, M., García-Valdés, R., Banqué-Casanovas, M., Morán-Ordóñez, A., Martínez-Vilalta, J. 2021. Temporal changes in Mediterranean forest ecosystem services are driven by stand development, rather than by climate-related disturbances. *Forest Ecology and Management*, 480, 118623