

## **CAPÍTOL 4**

**La modelització de la dinàmica de la vegetació en ecosistemes arbustius mediterranis: una aproximació funcional a partir del model de creixement forestal GOTILWA+**

**Abstract** *Mediterranean shrublands dynamics modelling: a functional approach through GOTILWA+ forest model.*

Fire management in the Mediterranean area requires of new methodological tools that link the functional system complexity and their applicability. This paper describes the approach contributed by the shrubland module of GOTILWA+, a functional model that simulates the growth of a shrubland cover from basic processes and that tie model outputs to relevant structural variables in fuel management. The model incorporates GOTILWA+ forest model layouts, which are based on ecosystem water and carbon fluxes. The model conceptual framework description is complemented by sensitivity analysis and a calibration exercise. Even though the model is in an initial stage of development, the GOTILWA+ shrubland module offers an interesting approach for exploring the functioning of shrublands and forest understories and it provides an aid in ecosystem management.

**Resum**

La gestió del foc a l'àrea mediterrània requereix de noves eines metodològiques que abordin la complexitat de funcionament dels sistemes i la seva aplicabilitat. Aquest treball descriu l'aproximació aportada pel mòdul arbustiu de GOTILWA+, un model funcional que simula el creixement d'una coberta arbustiva a partir de processos de base i que vincula les seves sortides a variables estructurals rellevants en la gestió del foc. El model incorpora els plantejaments de base del model forestal GOTILWA+ que es fonamenten en els fluxos d'aigua i carboni en el sistema. La descripció conceptual del model es complementa amb una anàlisi de sensibilitat i un exercici de calibratge. Tot i que es troba en un estadi inicial de desenvolupament, el mòdul arbustiu de GOTILWA+ és una eina interessant en la comprensió del funcionament d'aquests sistemes i en l'ajuda de la seva gestió.

## 1. Introducció

L'estudi de la susceptibilitat de la vegetació al foc ha estat abordada des del camp de la modelització del comportament del foc (Rothermel 1983, Burgan i Rothermel 1984). La necessitat de categoritzar les formacions vegetals, a partir de determinades propietats macroscòpiques relacionades amb la combustibilitat i inflamabilitat de les espècies que les componen, és el fonament dels anomenats models de combustible. L'enfocament més clàssic i conegut d'aquesta aproximació és la proposada pel sistema de simulació nord-americà BEHAVE (Burgan i Rothermel 1984), que engloba en 13 models estàndard les diferents tipologies de vegetació en relació a la seva resposta al foc segons les seves propietats fisiognòmiques. Aquests models s'utilitzen en la l'avaluació del comportament del foc en determinades condicions ambientals.

Les limitacions d'aquestes aproximacions rauen, a més de les dificultats en la seva generalització a tipologies de vegetació totalment diferents d'allà on es van definir, en ser una eina estàtica que no contempla el caràcter canviant de la vegetació. Així, en un context mediterrani, una comunitat pot passar en poc temps d'un model de baix risc a un model associat a una elevada susceptibilitat al foc. Aquest tipus d'informació és cabdal en el disseny d'estratègies de gestió del risc d'incendi a partir del tractament del combustible (van Wagtendonk 1996, Vélez 2000).

L'interès en dotar d'un component dinàmic als models de combustible és present als treballs pioners de Rothermel i Philpot (1973) en el *chaparral* californià. Aquests primers models de dinàmica de combustible, de caràcter empíric, associen canvis en les propietats físiques i químiques de la fitomassa aèria amb les variacions en la inflamabilitat i combustibilitat de la vegetació i, per tant, en el comportament del foc en cas d'incendi.

Durant les darreres dècades s'han anat perfilant tres tendències clares en la metodologia de modelització de les característiques successional del combustible (Reinhardt *et al.* 2001). En primer lloc, els models empírics que es basen en relacions estadístiques (Beukema *et al.* 1999). Normalment,

presenten un disseny senzill i inclouen una mesura de la variabilitat associada. Quan són emprats dins d'un rang determinat, els models empírics solen ser els models de simulació més precisos. El gran desavantatge d'aquest tipus de models és que requereixen d'un elevat nivell de dades prèvies en el seu desenvolupament i, alhora, no són apropiats per extrapolar el seu ús més enllà de les condicions en les quals van ser desenvolupats i tampoc expliquen els mecanismes causals subjacents. Un altre tipus de metodologia correspon als models estocàstics (Schaaf *et al.* 1998), basats en distribucions de probabilitats. Són models de disseny senzill, fet que en facilita el procés de desenvolupament. Tanmateix, presenten l'inconvenient de la complexa interpretació dels resultats, així com la necessitat de simulacions iterades. Finalment, existeixen els models mecanístics o basats en processos (Hauhs 1990, Mohren i Burkhardt 1994, Keane *et al.* 1996), que se sustenten en principis fonamentals. Són models que posen l'èmfasi en el control d'abaix a dalt (*bottom-up*) a través de processos clau ben definits. L'avantatge principal d'aquests models és que els mecanismes causals en determinen el comportament. Gràcies a aquest fet, són idonis per a l'extrapolació, i la interpretació del model pot aportar un coneixement del funcionament de l'ecosistema. Això els fa especialment indicats en l'exploració d'efectes que no poden ser directament mesurats com ara el efectes potencials del canvi climàtic. El seu principal desavantatge és que són models d'elevada complexitat, són molt difícils de desenvolupar i emprar, i la precisió de les seves prediccions sol ser baixa.

Un pas més, doncs, en l'estudi del canvi temporal de la susceptibilitat de la vegetació al foc és la incorporació de fonaments funcionals a la dinàmica del combustible. Quan els models es basen, encara que parcialment, en els mecanismes ecofisiològics implicats en el creixement de la vegetació i l'assignació de la producció, aleshores s'avança en el seu potencial d'aplicabilitat en diferents contextos, se'ls dona solidesa descriptiva i se'ls fa sensibles a les fluctuacions i canvis ambientals (Mohren i Burkhardt 1994). Una via per a donar un caràcter funcional als models de dinàmica de combustible és l'adaptació de models mecanístics preexistents de creixement de la vegetació a les necessitats que requereix la modelització del combustible, especialment, en

la dinàmica del complex arbustiu. Aquest treball pretén ser una nova experiència en aquest procés, una aportació singular en l'intent de dotar d'una eina funcional l'anàlisi de la dinàmica de combustible en vegetació mediterrània. Altres experiències complementàries en l'àmbit mediterrani, tot i que en diferents escales, objectius i requeriments, apunten cap a un mateix sentit (Mauchamp *et al* 1994, Mouillot *et al.* 2001).

El model aquí presentat vol descriure el creixement d'una comunitat arbustiva i, amb aquest, el canvi de les seves propietats estructurals a partir, especialment, de la dinàmica de l'aigua com a factor limitant en els sistemes mediterranis i en les diferents estratègies d'assignació de carboni dins la planta. Per a fer-ho, s'ha adoptat i complementat el model forestal GOTILWA+ (Gracia *et al.* 1999a) incorporant-hi un nou mòdul arbustiu. La concepció de base d'aquest model forestal (que es basa especialment en els condicionaments propis dels ambients mediterranis), la seva contrastada solidesa (Kramer i Mohren 2001, Kramer *et al.* 2002), així com la versatilitat de la seva estructura modular, han estat determinants per a la incorporació dels principis aportats per GOTILWA+ com a fonaments d'un mòdul arbustiu.

El desenvolupament d'aquest nou mòdul, que s'encaixa en la categoria de *models de complexitat intermitja* (Hauhs 1990, Claussen *et al.* 1999), ha estat el resultat d'un compromís i conciliació de dues condicions principals. D'una banda, la voluntat d'incorporar components mecanístics de base, fornits bàsicament pels processos incorporats a GOTILWA+. D'altra banda, la utilització d'un nivell d'agregació de la informació que faciliti la parametrització del model, l'aplicabilitat i el seu ús com a eina de gestió. Aquest plantejament es troba en consonància amb allò que apunten els treballs recents en modelització dels efectes del foc i la gestió de combustible (Reinhardt *et al.* 2001): els models que vulguin esdevenir eines d'ajuda a la gestió hauran de satisfer aquest balanç entre la simplicitat en el requeriment de dades que exigeix el seu ús i, alhora, els requeriments de dades de detall dels models mecanístics de base.

## 2. L'aproximació de GOTILWA+: un model integrat de la dinàmica de l'aigua i el creixement forestal

El model mecanístic de creixement forestal GOTILWA+ (acrònim de *Growth of Trees is Limited by Water*) va ser desenvolupat, inicialment, per a boscos mediterranis però ha esdevingut una eina generalista potencialment aplicable a tot tipus de comunitats forestals mediterrànies i boreals del nord d'Europa. GOTILWA+ simula el creixement del bosc, considerant la dinàmica de l'aigua en el sistema com a factor determinant i principal en el funcionament de les comunitats forestals. L'aigua és, per a bona part dels ecosistemes mediterranis, el principal factor limitant per al creixement de la vegetació (Piñol *et al.* 1991, Rambal 1993, Rodà *et al.* 1999). GOTILWA+ descriu el processos de producció i assignació del carboni i explora com aquests processos són condicionats pel clima, l'estructura del bosc i del rodal, els diferents règims de gestió, les propietats del sòl i el canvi climàtic. Així, el model esdevé molt útil com a eina per a l'avaluació de les respostes de diferents variables forestals (producció, flux i emmagatzematge de carboni) als paràmetres d'entrada del model.

A GOTILWA+ els processos simulats es donen a nivell d'individu. La distribució en classes diamètriques i la densitat poblacional (individus ha<sup>-1</sup>) són emprades en la definició de l'estructura poblacional. Els boscos són monoespecífics i no s'hi contempla la interacció de diferents espècies vegetals creixent alhora. Els arbres que formen part d'una mateixa classe diamètrica se'ls suposa idèntics i, per tant, no es recull la distribució espacial dels individus.

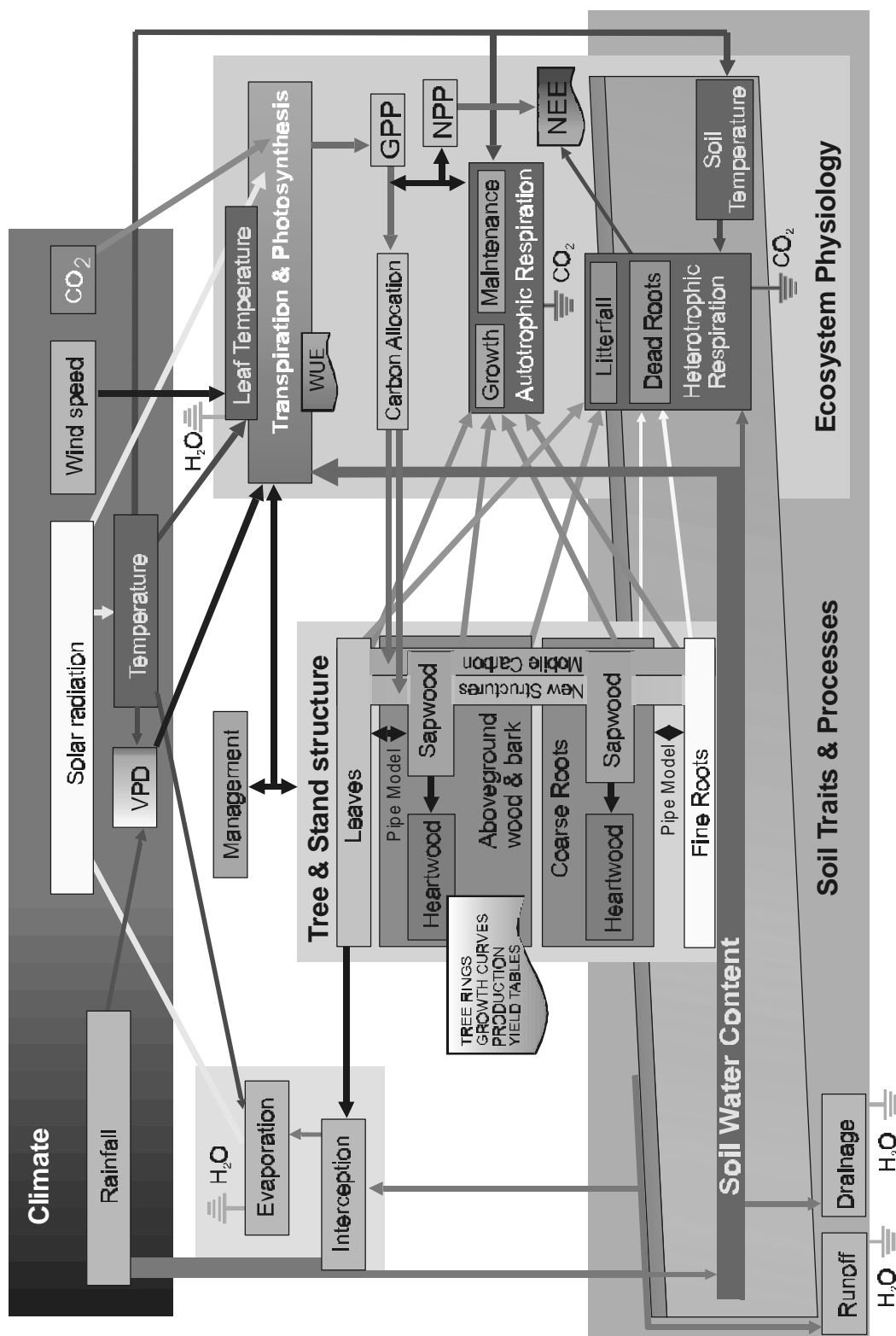
En una simulació estàndard, les dades climàtiques són analitzades diàriament. A partir de la interacció entre la precipitació diària i l'estructura de capçades, el model calcula la intercepció, el trascol i l'escolament cortical. La precipitació efectiva (la diferència entre la precipitació incident i la intercepció) fa augmentar l'aigua disponible en el sòl la qual s'utilitza pels arbres. La proporció d'albeca i duramen, l'àrea foliar de cada arbre i, consegüentment, l'Índex d'Àrea Foliar (LAI) del bosc són altament dependents, en el model, de la disponibilitat d'aigua.

L'evapotranspiració és la pèrdua d'aigua del sòl des del sòl o la superfície de les plantes (evaporació) o a través de de les plantes (transpiració). L'evapotranspiració és funció de la disponibilitat d'aigua i la temperatura. La disponibilitat d'aigua és un factor limitant del creixement i la producció. A mesura que el sòl s'asseca hi ha una reducció de l'aigua absorbida per les plantes: la conductància estomàtica disminueix i hi ha un decreixement en la fotosíntesi i en la transpiració.

La fixació de carboni per part del arbres es calcula a partir del model de fotosíntesi de Farquhar (Farquhar i von Caemmerer 1982). El conjunt de carboni fixat (GPP) permet un increment, primerament, de les reserves de carboni mòbil de la planta. Una fracció d'aquest carboni compensa la respiració de manteniment, mentre que la resta, si és el cas, constitueix la fracció de la producció assignada al creixement.

Amb la formació de nova biomassa hi ha associat un cost metabòlic: la respiració de creixement. L'assignació de la producció neta a GOTILWA+ es troba regulada per la teoria del *pipe model* (Shinozaki 1972), que estableix una relació constant entre l'àrea foliar i l'àrea de secció conductora d'albeca. El balanç entre la producció primària assignada al creixement, la respiració de manteniment i la respiració de creixement dóna lloc a la producció primària neta (NPP) que determina, al seu torn, els processos de formació i abscisió de fulles, la formació d'anells de creixement, la taxa de pas d'albeca a duramen i, en conseqüència, els canvis funcionals i estructurals dins de cada classe diamètrica. Aquests canvis afecten, alhora, els fluxos hidrològics que es donaran i que afecten, novament, tots els processos abans descrits (Figura 1).

GOTILWA+ ha estat validat satisfactòriament contrastant les simulacions amb mesures reals d'experiments, com a les Muntanyes de Prades (Gracia *et al.* 1997, Gracia *et al.* 1999a) i en diferents contextos a nivell europeu on s'ha testat, amb resultats positius, el seu nivell de precisió, la capacitat d'aplicació generalista i el seu nivell de realisme en relació amb el processos de base simulats (Kramer i Mohren 2001, Kramer *et al.* 2002).



**Figura 1.** Esquema general del model forestal GOTILWA+ (versió 31.00a). S'hi mostren els processos principals i les seves interrelacions (Font: cortesia de C.Gracia i col·laboradors).



### 3. Descripció del mòdul arbustiu de GOTILWA+ i conceptes generals

#### 3.1 *Constriccions, escales i característiques globals*

El mòdul arbustiu de GOTILWA+ simula el creixement de la vegetació arbustiva i de les seves característiques estructurals a un nivell agregat de coberta. Aquest nivell d'agregació el fa un model útil i apte per a l'avaluació de la dinàmica de la vegetació a una escala espacialment rellevant. La determinació del risc d'incendi associat a l'estructura de la vegetació i les decisions implicades en la gestió d'aquest tipus de comunitats es duen a terme a aquesta escala.

Es tracta d'un model semimecanístic que integra, fonamentalment, el plantejament aportat pel model forestal GOTILWA+ però adaptant-lo als requeriments de la vegetació arbustiva mediterrània i a la necessitat de satisfer, com ja s'ha esmentat anteriorment, el compromís entre la simplicitat i la base funcional.

En aquest sentit, s'ha perseguit que l'esforç de parametrització del model sigui baix, i per l'altra, que les sortides del model siguin directament interpretables i aplicables per l'usuari. Això ha fet que s'hagi optat, en determinats aspectes, per solucions diferents a les aportades pel model forestal GOTILWA+. Bàsicament, aquestes diferències troben el seu origen en el nivell d'agregació de la informació referent a la vegetació. Si a GOTILWA+ els processos es refereixen a l'individu (controlant les relacions al·lomètriques dels seus components) i aquests s'agrupen en diferents classes diamètriques, al mòdul arbustiu la informació s'integra a nivell de la coberta vegetal.

Les suposicions inicials del model arbustiu de GOTILWA+ són les següents:

- a) El model simula el creixement i desenvolupament d'una formació arbustiva a nivell agregat de coberta, ja sigui aquesta monoespecífica o multiespecífica. Això comporta que en el model no s'hi poden controlar les característiques infracomunitàries a nivell d'individu. Aquest emmarcament agregat es recolza en les les classificacions sobre propietats emergents

dels ecosistemes en relació a la seva resposta a les pertorbacions (Lavorel *et al.* 1997) i en les aportacions sobre els atributs vitals de l'ecosistema (Aronson *et al.* 1993, Aronson i Le Floch 1996), que identifiquen característiques macroscòpiques que estan relacionades, i poden servir com indicadors, amb l'estructura i funció de l'ecosistema. D'aquests atributs vitals de l'ecosistema (VEAs), estructurals i funcionals, s'assenyalen la fitomassa total, la productivitat, la matèria orgànica al sòl i les reserves hídriques del sòl, entre d'altres, com a mesures integrades de l'estat del sistema i de la seva dinàmica.

- b) Pel seu nivell d'agregació, el control dels processos demogràfics poblacionals és fora dels objectius del model.
- c) És un model no espacialment explícit: se suposa que la vegetació, i les seves propietats, es distribueixen de forma homogènia en el territori. En aquesta mateixa simplificació es recolzen la major part de models de comportament del foc i d'avaluació i gestió del risc (van Wagtendonk 1996, Viegas 1997, Sauvagnargues-Lesage *et al.* 2001).
- d) Les comunitats que s'hi simulen es troben constituïdes, en aquesta primera versió del model, per espècies llenyoses perennifòlies i rebrotadores. Aquesta doble característica és, d'altra banda, força comuna entre les espècies arbustives pròpies d'ambients mediterranis (Orshan 1989).
- e) El control i simulació del cicle de nutrients és fora de l'abast actual del model.
- f) Determinats processos incorporats al model, a fi de reduir-ne la complexitat o bé per manca d'informació funcional de base, requereixen de relacions empíriques o semiempíriques. És el cas de les relacions al·lomètriques entre diferents components de la planta, determinades constants d'equilibri imposades al sistema o alguns dels fluxos entre compartiments.
- g) El model permet incorporar pertorbacions genèriques de la vegetació (foc, estassades, etc.) i avaluar-ne els efectes sobre les variables simulades. Pot ser inclòs, d'aquesta manera, en la categoria de models successionalis (Luken 1990).
- h) La finestra temporal dels diferents processos se situa en 1 hora per als processos fisiològics i 1 dia per als processos estructurals. Les sortides del model poden ser agregades diàriament, mensualment o anualment.

- i) L'horitzó temporal de les simulacions és il·limitat, per bé que el model ha estat raonablement calibrat en períodes successional de dues a tres dècades després de la pertorbació. En aquest sentit, els resultats operatius del model se situen entre el període anual i el de dècada. Aquesta escala temporal és útil a l'hora d'avaluar-ne l'aplicabilitat en el camp de la gestió del combustible. L'escala anual és indicada en l'avaluació del risc i l'escala de dècades és apropiada en el planejament de tractaments i intervencions (Reinhardt *et al.* 2001). Tanmateix, el model presenta una potencialitat temporal encara no explorada.

### 3.2 Dades d'entrada

El mòdul arbusti de GOTILWA+ requereix d'un seguit de paràmetres d'entrada bàsics de diferent naturalesa: aquells que fan referència a l'estructura i ecofisiologia de la vegetació, aquells descriptors de les condicions ambientals (dades climatològiques i topogràfiques) i, finalment, aquells relacionats amb els fluxos d'aigua i carboni al sòl. Optativament, el model pot incorporar informació relativa a diferents règims de pertorbació i/o gestió de la comunitat.

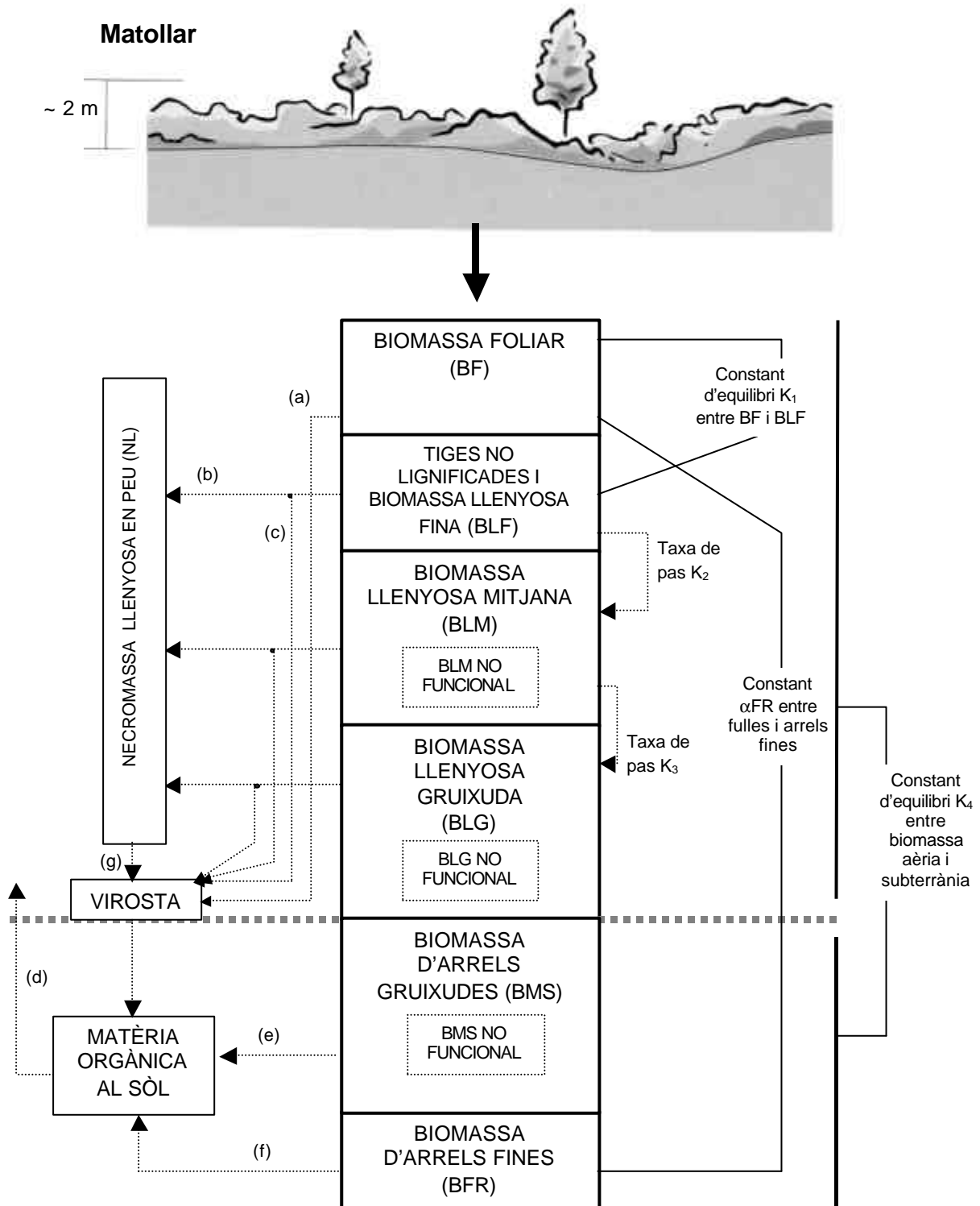
Les dades de biomassa aèria inicial de la comunitat provenen d'informació recollida per l'usuari (Figura 2, Taula 1). A més de les dades de biomassa aèria total, el model requereix que aquesta informació es desglossi en les fraccions vives i mortes, i per a cada categoria, en biomassa foliar i en les diferents fraccions de gruix del material llenyós (fi  $\varnothing < 6$  mm, mitjà  $6 \text{ mm} \geq \varnothing < 25$  mm, gruixut  $25 \text{ mm} \geq \varnothing < 75$  mm). La biomassa subterrània de la comunitat es deriva de les dades de la relació biomassa subterrània/biomassa aèria coneguda per a comunitats i ambients similars ( $K_4$ ). La biomassa d'arrels fines es deriva a partir de la constant  $\alpha_{FR}$  que relaciona la biomassa d'arrels fines i la biomassa foliar (Kummerow i Ellis 1989). A partir d'uns coeficients de base empírica, una part de la biomassa de les fraccions més gruixudes de biomassa aèria i subterrània ( $\varnothing > 6$  mm) s'assignen a biomassa de tipus estructural (biomassa que no respira i que esdevé un compartiment que va augmentant al llarg del temps en funció de l'aigua transpirada, de la pèrdua d'àrea foliar acumulada i de la mortalitat de fraccions llenyoses de la vegetació). La biomassa de cada

fracció en un moment determinat és el resultat del balanç entre fixació de carboni i la respiració (Taula 1). Els paràmetres funcionals (relacionats amb les respostes ecofisiològiques de la coberta) inclouen informació referent a la fotosíntesi i a la conductància estomàtica (Taula 2). Per a cada tipus de coberta aquests paràmetres són derivats, indistintament, de la bibliografia o de mesures de camp. Així, en el cas de cobertes multiespecífiques s'empren mitjanes ponderades (atenent a la seva composició específica de la comunitat) com a valors dels diferents paràmetres d'entrada.

La informació referent al sòl (Taula 3) comprèn els paràmetres relacionats amb les funcions que descriuen els fluxos hidrològics i els fluxos de carboni. El sòl es divideix en el model en dos estrats: la capa orgànica i la mineral amb una taxa de transferència entre ambdues. Hidrològicament, però, el sòl representa un compartiment únic amb unes propietats homogènies que determinen l'aigua emmagatzemada en el sòl.

Les dades climàtiques comprenen els valors diaris de temperatures màximes i mínimes de l'aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), precipitació ( $\text{mm dia}^{-1}$ ), radiació solar ( $\text{MJ dia}^{-1}$ ), velocitat mitjana del vent ( $\text{m s}^{-1}$ ) i el dèficit de pressió de vapor mesurat a l'alba ( $\text{kPa}$ ) (Taula 4).

El model també incorpora un seguit de constants per a definir valors i taxes de base de processos genèrics relativament invariables en un mateix context de simulació (Taula 5). Altres informacions d'entrada que permet el model són el disseny d'un règim de pertorbació i/o gestió per a la comunitat, i la definició d'escenaris alternatius de canvi climàtic manipulant, als fitxers climàtics inicials, la concentració de  $\text{CO}_2$  atmosfèric, les temperatures i els règims i quantitats de precipitació.



**Figura 2.** Diagrama general de l'estructura de la vegetació i de les relacions dels seus components a partir de les dades d'entrada al mòdul arbustiu de GOTILWA+. (Font: l'autor).

*Notes:* (a) La taxa de caiguda de fulles és funció del balanç de carboni a més d'una taxa de caiguda basal. (b) Taxa de pas de biomassa llenyosa a necromassa en peu NL és funció, per a cada fracció, de la disponibilitat d'aigua al sòl i dels seus canvis integrats al llarg del temps. (c) Taxa basal de caiguda directa de biomassa llenyosa a virosta. (d) Alliberament de carboni a l'atmosfera a partir de la respiració del sòl. (e) La mortalitat de les arrels gruixudes és funció del balanç entre la biomassa aèria i subterrània. (f) La mortalitat d'arrels fines pot estar determinada per la temperatura del sòl, el contingut d'aigua al sòl i la durada del període de creixement (fenologia). (g) La caiguda de virosta provinent de la necromassa és funció del temps de residència, per a cada fracció, de la necromassa a la coberta.

**Taula 1.** Paràmetres i relacions estructurals de la vegetació al mòdul arbustiu de GOTILWA+.

Variables	Símbol	Unitats	Relacions entre variables
<b>BIOMASSA AÈRIA</b>			
Fulles			
Biomassa foliar	BF	g m <sup>-2</sup>	Valor inicial d'entrada
Àrea foliar	AF	m <sup>2</sup>	$AF = BF/LSW$
Carboni mòbil	CMH	g	$CM = BF PC$ $PC = CM/BF$
Màxim carboni mòbil	CMHo	%	Valor inicial d'entrada
Pes específic	LSW	m <sup>2</sup>	$LSW = LSW_0 (1 - (CMH_0 - CMH))$
Màxim pes específic	LSWo	m <sup>2</sup>	Valor inicial d'entrada
Caiguda de fulles sota condicions òptimes	LF	dia <sup>-1</sup>	Valor inicial d'entrada
Relació fullaraca gruixuda/fina	GFLF	-	Valor inicial d'entrada
<b>BIOMASSA DE TIGES I BRANQUES</b>			
Biomassa fina (tiges i branques Ø < 6 mm)	BLF	g m <sup>-2</sup>	Valor inicial d'entrada
Biomassa llenyosa mitjana (6 mm ≥ Ø < 25 mm)	BLM	g m <sup>-2</sup>	Valor inicial d'entrada
Biomassa llenyosa gruixuda (25 mm ≥ Ø < 75 mm)	BLG	g m <sup>-2</sup>	Valor inicial d'entrada
Constant inicial d'equilibri BF/BLF	K <sub>1</sub>	-	$K_1 = BF/BLF$
Taxa de pas de BLF a BLM	K <sub>2</sub>	dia <sup>-1</sup>	Valor inicial d'entrada
Taxa de pas de BLM a BLG	K <sub>3</sub>	dia <sup>-1</sup>	Valor inicial d'entrada
Carboni mòbil	CMM	g	$CM = BMA PBR$
Màxim carboni mòbil	CMMo	%	Valor inicial d'entrada
Fracció d'albeca que respira	FAR	%	Valor inicial d'entrada
<b>BIOMASSA SUBTERRÀNIA</b>			
Arrels gruixudes			
Biomassa	BMS	kg	$BMS/BMA = k_4$
Carboni mòbil	CMM	kg	
Màxim carboni mòbil	CMMo	%	
Arrels fines			
Biomassa	BRF	g m <sup>-2</sup>	$BRF = aFR BLF$
Mortalitat d'arrels fines sota condicions òptimes	MFR	dia <sup>-1</sup>	Valor inicial d'entrada
<b>COBERTA</b>			
Biomassa aèria total	BMA	g m <sup>-2</sup>	$BMA = BF + BLF + BLM + BLG$
Necromassa fina dreta	NF	g m <sup>-2</sup>	Valor inicial d'entrada
Necromassa mitjana dreta	NM	g m <sup>-2</sup>	Valor inicial d'entrada
Necromassa gruixuda dreta	NG	g m <sup>-2</sup>	Valor inicial d'entrada
Temps de residència a la coberta de necromassa fina	TRF	dia	Valor inicial d'entrada
Temps de residència a la coberta de necrom. mitjana	TRM	dia	Valor inicial d'entrada
Temps de residència a la coberta de necrom. gruixuda	TRG	dia	Valor inicial d'entrada
Relació BMS/BMA	K <sub>4</sub>	-	Valor inicial d'entrada

**Taula 2.** Paràmetres de fotosíntesi foliar i conductància estomàtica.

Paràmetres	Símbol	Unitats
<b>FOTOSÍNTESI FOLIAR</b>		
Taxa màxima de carboxilació	$V_c$ max a 25°C	$\mu\text{mols m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Energia d'activació de $V_c$ max	$E_a$	$\text{J mol}^{-1}$
Pressió parcial intercel·lular de $\text{CO}_2$	C	ppmv
Taxa màxima d'oxigenació	$V_o$ max a 25°C	$\mu\text{mols m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Energia d'activació de $V_o$ max	$E_a$	$\text{J mol}^{-1}$
Pressió parcial intercel·lular d' $\text{O}_2$	C	ppmv
Taxa potencial de transport electrònic	J max at 25°C	$\mu\text{mols m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Energia d'activació de J max	$E_a$	$\text{J mol}^{-1}$
Paràmetre de curvatura de J max	$E_d$	$\text{J mol}^{-1}$
Paràmetre de la temp. de resposta de transport electrònic	S	$\text{J mol}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$
Curvatura de resposta del transport electrònic a la irradiància	$\psi$	An/PPFD
Constant de Michaelis-Menten de Rubisco pel $\text{CO}_2$	$K_c$ a 25°C	Pa
Energia d'activació de $K_c$ max	$E_a$	$\text{J mol}^{-1}$
Pressió parcial intercel·lular de $\text{CO}_2$	C	ppmv
Constant de Michaelis-Menten de Rubisco per l' $\text{O}_2$	$K_o$ a 25°C	Pa
Energia d'activació de $K_o$ max	$E_a$	$\text{J mol}^{-1}$
Pressió parcial intercel·lular d' $\text{O}_2$	C	ppmv
Taxa de respiració fosca	$R_d$ a 25°C	$\mu\text{mols m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Factor de l'efecte temperatura	$Q_{10}$ a 25°C	--
<b>CONDUCTÀNCIA ESTOMÀTICA</b>		
Conductància residual (cuticular)		$\mu\text{mols m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Constant de Leuning	g1	--
Factor de resposta de $g_s$ vers VPD	gsDO	kPa
Contingut d'aigua al sòl al qual $g_s=0$	Sgso	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$
Contingut d'aigua al sòl al qual $g_s=g_{s\text{max}}$	Sgsmax	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$
Dimensió característica foliar	D	m
Àrea foliar total/Àrea projectada		--
Paràmetre X (distribució el·lipsoidal)	X	$\text{v h}^{-1}$
Fulla hipoestomàtica/Amfiestomàtica		boleana

**Taula 3.** Components de la conductivitat hidràulica del sòl i de la dinàmica del carboni al sòl.

Paràmetre	Símbol	Unitats
<b>FLUXOS DE CARBONI AL SÒL</b>		
C orgànic al sòl en horitzons orgànics		g cm <sup>-2</sup>
C orgànic al sòl en horitzons minerals		% de pes sec
Densitat aparent		g cm <sup>-3</sup>
Taxa de descomposició de MO als horitzons orgànics	k(LF)	dia <sup>-1</sup>
Taxa de descomposició de MO als horitzons minerals	k(AB)	dia <sup>-1</sup>
Factor de l'efecte de la temperatura del sòl	Q <sub>10</sub>	-
Taxa de transferència dels horitz. orgànics als minerals	t <sub>o→m</sub>	-
Descriptors de l'efecte de l'aigua al sòl sobre la descomposició de la MO (figura 5)	W <sub>min</sub>	mm
	W <sub>max</sub>	mm
<b>CONDUCTIVITAT HIDRÀULICA DEL SÒL</b>		
Gradient hidràulic	wg	m/m
Conductivitat hidràulica del sòl	wc	m dia <sup>-1</sup>
Fondària mitjana del sòl	sd	m
Aigua mínima utilitzable	uW <sub>min</sub>	mm m <sup>-1</sup>
Volum de pedres	sv	%

**Taula 4.** Variables climàtiques

Variables	Símbol	Unitats
Radiació solar	Q	MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>
Temperatura màxima diària	Max T	°C
Temperatura mínima diària	Min T	°C
Precipitació	P	mm dia <sup>-1</sup>
Velocitat mitjana del vent	WS	m s <sup>-1</sup>
Concentració atmosfèrica de CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	ppm
Dèficit de pressió de vapor a l'alba	VPD	kPa

**Taula 5.** Constants usades per GOTILWA+

Fracció de PAR de la radiació global	0.42
Relació $\mu\text{E watt}^{-1}$ a la radiació global	4.60
Concentració base de CO <sub>2</sub> , en ppm	360
Equivalència energètica de la matèria orgànica, en cal g <sup>-1</sup>	4700
Relació de matèria orgànica a carboni	2.10
Contingut en g de N per 100 g de pes sec de fulles	1.20
Taxa de respiració de comp. estructurals de fulles, en cal g <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	33.30
Taxa de respiració de components no estructurals, en cal g <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	55.50
Taxa de respiració de comp. vius de la fusta, en cal g <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	35.0
Grams de teixit formats per 1 g de carbohidrats	0.68



### 3.3 Variables de sortida

Les sortides del model estan directament relacionades amb la seva aplicació. Així, especialment rellevants són les variables descriptives de l'evolució de l'estructura de la vegetació en les seves fraccions al llarg dels anys simulats (Taula 6). El model també permet comparar i relacionar la informació estructural amb l'ambiental a partir d'un seguit de variables de control. Formen part d'aquest apartat les variables de tipus climatològic i hidrològic. Finalment, hi ha una tercera categoria de variables de sortida que fan referència als processos ecofisiològics de base, relacionats amb la fotosíntesi i la producció.

**Taula 6.** Variables de sortida de tipus estructural del mòdul arbustiu de GOTILWA+

Variables	Símbol	Unitats
Índex d'Àrea Foliar	LAI	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>
Biomassa foliar	BF	t ha <sup>-1</sup>
Biomassa aèria total	BMA	t ha <sup>-1</sup>
Biomassa subterrània total	BMS	t ha <sup>-1</sup>
Biomassa de tiges no lignificades i llenyosa fina	BLF	t ha <sup>-1</sup>
Biomassa llenyosa mitjana	BLM	t ha <sup>-1</sup>
Biomassa llenyosa gruixuda	BLG	t ha <sup>-1</sup>
Fracció de BLM estructural (duramen)	BLME	t ha <sup>-1</sup>
Fracció de BLG estructural (duramen)	BLGE	t ha <sup>-1</sup>
Necromassa fina en peu	NF	t ha <sup>-1</sup>
Necromassa llenyosa mitjana en peu	NLM	t ha <sup>-1</sup>
Necromassa llenyosa gruixuda en peu	NLG	t ha <sup>-1</sup>
Virosta a la capa superficial del sòl	LFSOM	t ha <sup>-1</sup>
Combustible fi (BF+BLF+NF)	CF	t ha <sup>-1</sup>
Combustible fi viu (BF+BLF)	CFV	t ha <sup>-1</sup>

## 4. Processos funcionals principals simulats pel mòdul arbustiu de GOTILWA+

El mòdul arbustiu de GOTILWA+ interpreta la vegetació com una coberta amb unes característiques funcionals macroscòpiques determinades per l'estructura i la composició de la comunitat que, internament, pot ser assumida com a un únic individu d'una dimensió espacial determinada i homogènia. La quantitat de radiació solar absorbida és el factor crític en la determinació de la productivitat de la vegetació. En el model se suposa que la disponibilitat d'aigua és el major

factor limitant d'aquesta activitat fotosintètica a través de la regulació estomàtica, i desenvolupa un paper clau en la comprensió del processos a nivell de coberta. Aquests processos són descrits a continuació i els principals paràmetres i equacions utilitzats són recollits l'Annex 1.

#### **4.1 El tractament de les variables ambientals**

El clima determina tots els mecanismes fisiològics de la vegetació i condiciona els processos del sòl. Quan les dades diàries no són disponibles, el model disposa d'un generador estadístic de dades climatològiques a partir de sèries mensuals o de sèries diàries curtes o incompletes (Gracia *et al* 1999b).

La fotosíntesi i altres processos fisiològics són simulats horàriament, per tant, el model estima, a partir dels valors diaris d'entrada, les dades horàries de radiació, temperatura de l'aire, precipitació i evapotranspiració. La generació d'aquests valors horaris es duu terme a partir d'un mòdul climatològic desenvolupat per a GOTILWA+ (Gracia *et al.* 1999b) que inclou les equacions de correcció de la radiació incident per a una hora i una latitud donades, l'equació empírica sinusoidal d'ajustament de la temperatura en funció de l'hora d'insolació, la distribució aleatòria de la quantitat de pluja diària en hores, el càlcul del dèficit de pressió de vapor horari (VPD) que, juntament amb el valor de la radiació incident, permet el càlcul de l'evapotranspiració segons l'equació de Penman i Monteith (Monteith 1965) acoblada a l'atmosfera (Jarvis i Mcnaughton 1986) (Eq.(1) Annex 1).

#### **4.2 La intercepció i extinció de la llum**

La intercepció i extinció de la llum solar es defineixen a partir de les propietats i característiques de la coberta. El mòdul arbustiu de GOTILWA+ empra l'índex d'àrea foliar (LAI) i l'angle foliar com a principals descriptors de l'estructura de la coberta. La intensitat de la llum decreix exponencialment en incrementar el gruix de la coberta. Aquesta funció es caracteritza per un coeficient d'extinció. El model adopta el mètode proposat per Campbell (1986) per al càlcul del coeficient d'extinció (Eq.(2) Annex 1), on s'utilitza una distribució el·lipsoïdal de l'angle foliar.

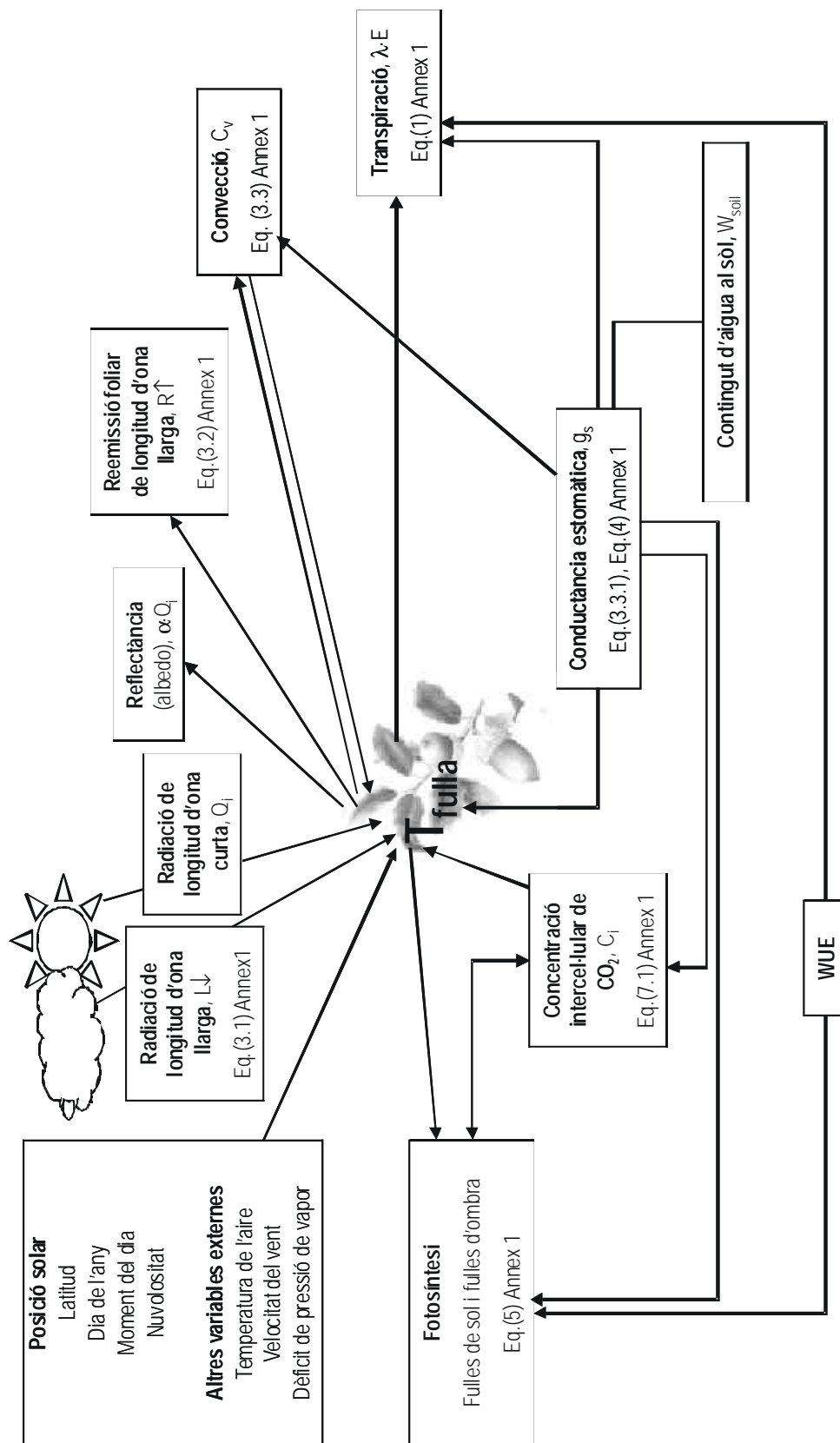
A partir d'aquí, la coberta es divideix en dues fraccions, la fracció de sol i la d'ombra i se'n calcula la proporció del LAI de sol, la radiació dispersa ( $Q_{\text{scat}}$ ), la radiació incident a les fulles de sol ( $Q_{\text{sun}}$ ) i la de les fulles d'ombra ( $Q_{\text{shade}}$ ). De  $Q_{\text{sun}}$  i  $Q_{\text{shade}}$  se'n deriva la densitat mitjana del flux fotosintètic de fotons per a les fulles de sol i d'ombra, prenent en consideració que el 42% de la radiació global és radiació fotosintèticament activa (PAR) (Packham *et al.* 1992).

### **4.3 Balanç energètic foliar**

La fotosíntesi només és capaç d'emprar una fracció molt petita de tota l'energia solar que arriba a la coberta. La major part d'aquesta energia, en forma de calor, té l'efecte d'incrementar la temperatura foliar. La temperatura foliar controla tots els processos fisiològics que es donen a les fulles. El mòdul arbustiu de GOTILWA+ utilitza l'aproximació de Gates (1962, 1980), per la qual s'accepta que hi ha un balanç energètic a nivell foliar. Això significa que, per una determinada temperatura foliar, les entrades d'energia han de ser iguals a les pèrdues (Eq.(3) Annex 1). El balanç d'energia de la fulla s'acobla al procés de fotosíntesi i de la conductància estomàtica a través de la temperatura foliar (Figura 3).

### **4.4 Conductància**

Per a incorporar-se a la fulla, el  $\text{CO}_2$  s'ha de difondre a través de la capa límit i a través dels estomes. La restricció dels estomes a la difusió al vapor d'aigua i al  $\text{CO}_2$  s'anomena resistència estomàtica i desenvolupa un paper bàsic en el control de les taxes de transpiració i fotosíntesi. Els estomes disposen de mecanismes fisiològics de control que optimitzen el guany de carboni respecte a les pèrdues d'aigua. L'invers de la resistència estomàtica s'anomena conductància estomàtica. El model empra la versió de Leuning (1995) del model semiempíric proposat per Ball *et al.* (1987). A GOTILWA+ i al seu mòdul arbustiu, el valor final de la conductància estomàtica (segons l'equació de Leuning) es troba modificada per un factor lligat a la quantitat relativa d'aigua al sòl i que reforça la dependència d'aquest paràmetre als nivells d'estrès hídric de la vegetació (Eqs.(4) Annex 1).



**Figura 3.** Esquema del balanç energètic foliar al mòdul arbustiu de GOTILWA+ i la seva relació amb la transpiració, la fotosíntesi i la conductància estomàtica.

#### **4.5 Fotosíntesi**

La fixació de carboni està controlada per la temperatura i la radiació i limitada per la disponibilitat d'aigua i nutrients. Al mòdul arbustiú de GOTILWA+, les taxes d'assimilació fotosintètica són estimades a partir del model bioquímic de fotosíntesi, per a plantes de metabolisme C3, de Farquhar i von Caemmerer (1982). En aquest model es calculen dues taxes diferents d'assimilació de CO<sub>2</sub>: la taxa d'assimilació A<sub>c</sub>, limitada per l'activitat de RUBISCO (a partir de l'eficiència en la carboxilació), i la taxa d'assimilació A<sub>j</sub> limitada pel transport fotosintètic d'electrons (Eq.(5), Eq.(6), Eq.(7) Annex 1). La quantitat total de carboni fixat per la vegetació durant el procés de fotosíntesi és la producció primària bruta (GPP, g C m<sup>-2</sup><sub>fulla</sub> dia<sup>-1</sup>) i es calcula com la suma de la taxa d'assimilació neta de carboni per unitat d'àrea i la respiració fosca. La respiració fosca és el procés que continua a la mitocondria durant les hores de llum i representa una pèrdua important de carboni per a les plantes. És una taxa altament dependent de la temperatura (Eq.(8) Annex 1).

#### **4.6 Respiració autotròfica**

Les plantes necessiten utilitzar el carboni i l'energia obtinguts a la fotosíntesi en el manteniment de la funció dels seus teixits (fulles, tiges, branques, arrels i estructures reproductives) i també en la síntesi de nous components. La respiració autotròfica, doncs, es compon de diferents parts: la respiració de manteniment i la respiració de creixement.

Així, una part de la producció primària bruta (GPP) és emprada per a compensar el cost respiratori de tots els teixits vius i la producció primària restant (fotosíntesi neta), si n'hi ha, s'utilitza en la formació de nova biomassa, fet que implica un cost respiratori de creixement. En aquests processos respiratoris, el carboni prèviament fixat a la fotosíntesi, retorna a l'atmosfera en forma de CO<sub>2</sub>.

Pel que fa a la respiració de manteniment, aquesta es calcula per a cada tipus de teixit. La respiració de qualsevol component de la planta depèn de la temperatura a partir de la funció de Q<sub>10</sub>. La taxa final de respiració depèn de la fracció de carboni mòbil present a les fulles i de la seva proporció en

components estructurals i no estructurals, que presenten taxes diferents de respiració (Gracia *et al.* 1999a) (Eq.(9), Eq.(10) Annex 1).

De la mateixa manera, els teixits llenyosos vius depenen del valor de  $Q_{10}$  i la taxa de respiració de base que és estimada com  $35 \text{ cal g}^{-1} \text{ PS any}^{-1}$  (a  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Gracia *et al.* 1999a). La fracció de xilema viu és una fracció constant de l'albeca.

La respiració d'arrels fines es calcula a partir del valor de  $Q_{10}$  i tenint en compte que el 10% del carboni de les arrels fines forma part de components estructurals i el 90% restant és a components no estructurals (Gracia *et al.* 1999a, Canadell *et al.* 1999, López 1999) (Eq.(11) Annex 1).

Pel que fa a la respiració de creixement (de síntesi), se suposa que degut al transport de carboni entre òrgans i a través de membranes cel·lulars, la formació de nova biomassa a les plantes té un cost respiratori. De mitjana, 1 g de carbohidrats dóna 0,68 g de nous teixits i la diferència és consumida durant el procés de respiració de creixement (Gracia *et al.* 1999b).

#### **4.7 Producció primària neta (NPP) i assignació de carboni**

Se sap que la quantitat i proporció de carboni assignada als diferents teixits i òrgans de la planta varia en funció de l'espècie, de l'estadi de creixement, de l'estació i de les característiques ambientals (Lacointe 2000). Al mòdul arbustiu de GOTILWA+, el balanç entre la respiració de manteniment, la fotosíntesi neta i el cost metabòlic associat a la formació de nous teixits, determina la producció primària neta (NPP): el reompliment dels reservoris de carboni mòbil, la formació de noves fulles i la seva renovació, el creixement de la resta de fraccions llenyoses i, per tant, els canvis en l'estructura de la vegetació. Aquests canvis afecten, al seu torn, els fluxos hidrològics de manera que s'estableix un procés de retroalimentació (Sala i Tenhunen 1994).

La producció primària neta (NPP) s'assigna a les diferents parts de la planta a partir d'un seguit de regles de prioritització que es basen en un model de tipus semijeràrquic (Lacointe 2000). La planta empra una fracció d'aquesta NPP per

a formar noves fulles i noves arrels fines, de cara a compensar la seva renovació. La resta de NPP s'assigna als *pools* de carboni mòbil a les fulles i als teixits llenyosos. Si la NPP supera la capacitat d'emmagatzematge de carboni, aleshores s'empra en la formació de nous teixits, seguint aquestes prioritats i regles en l'assignació:

- a) La biomassa foliar és proporcional a la biomassa de tiges en un valor constant ( $K$ ). Canvis en la biomassa de tiges es tradueixen en canvis en la biomassa de fulles i viceversa.
- b) La biomassa d'arrels fines també es proporcional a la biomassa de fulles en un valor constant ( $\alpha FR$ ). Canvis en la biomassa de fulles també es tradueixen en canvis en la biomassa d'arrels fines.
- c) Si el carboni fixat (GPP) excedeix el cost respiratori dels teixits vius, aquesta diferència és emprada en incrementar el carboni mòbil emmagatzemat, en primer lloc, el de les fulles i, després, el dels teixits llenyosos. La resta de carboni, si n'hi ha, és emprat en la renovació de biomassa i la síntesi de nous teixits.
- d) El repartiment d'aquesta nova biomassa sintetitzada es fa proporcional a la biomassa de cada fracció i mantenint equilibrada, en primer lloc la relació entre biomassa aèria i subterrània ( $K_4$ ) i la relació entre la biomassa de fulles i tiges ( $K_1$ ).
- e) Periòdicament, amb el creixement dels compartiments llenyosos gruixuts ( $\varnothing > 6$  mm), una fracció de la biomassa llenyosa que respira d'aquestes fraccions esdevé biomassa estructural a partir d'uns coeficients dependents de la pèrdua d'àrea foliar acumulada i de la transpiració. Se suposa, doncs, que les fraccions llenyoses fines estan formades totalment per teixits vius (albeca), mentre que en els components llenyosos gruixuts s'hi troba una fracció de teixits estructurals que no respira (duramen). Així, en períodes en els quals hi hagut una pèrdua d'àrea foliar respecte a la situació d'equilibri (fixada per  $K_1$ ), hi ha un pas proporcional de biomassa llenyosa viva (que respira) a estructural, seguint l'aproximació aportada per la teoria del *pipe model* respecte l'albeca i el duramen (Shinozaki 1964, Lacoïnte 2000). L'absència de relacions dimensionals diamètriques entre components de la

vegetació (al·lometries) ens condueix a l'establiment, tot i assumint-ne les limitacions, d'equilibris massics.

- f) Durant els períodes en els quals la GPP no compensa la respiració de manteniment, el carboni mòbil emmagatzemat en les fulles i als teixits llenyosos de les branques és emprat per a compensar la respiració dels teixits vius, mentre que el carboni emmagatzemat en les arrels gruixudes és usat en la compensació de la respiració de les arrels fines.
- g) Si el carboni mòbil emmagatzemat no compensa el cost respiratori, la caiguda de fulles redueix la quantitat de teixit foliar, i així, redueix respiració fins que ambdós valors, respiració i disponibilitat de carboni es compensen l'un amb l'altre.
- h) Si aquest punt de compensació no pot ser assolit, fins i tot quan totes les fulles han caigut, el metabolisme es desajusta i part de la vegetació mor (la proporció necessària per reduir la respiració i reequilibrar de nou la disponibilitat de carboni mòbil amb el cost respiratori). Cal fer èmfasi, doncs, en què el control, en el model, de la mortalitat episòdica d'una fracció de la biomassa aèria (no pas de la mortalitat basal, de caire aleatori) ve determinada per l'esgotament del carboni mòbil de reserva i no pas directament, com es podria derivar d'un model basat en el flux de l'aigua en el sistema, per processos físics relacionats amb el dèficit hídric (cavitació de vasos). La recerca en els mecanismes implicats en aquest darrer procés es troba en un estadi incipient (Martínez-Vilalta 2001) i caldrà anar incorporant progressivament aquests avenços als models mecanístics preexistents. Tanmateix, és plausible suposar que el llindar temporal de mortalitat determinat per l'embolisme dels vasos és coincident amb l'assolit per l'esgotament dels reservoris de carboni mòbil. D'altra banda, el desajustament en el carboni disponible deriva, tal i com es dedueix de l'estructura del model, de la manca de disponibilitat d'aigua suficient per mantenir l'estructura de la vegetació.

#### **4.8 Processos hidrològics i humitat al sòl**

L'estructura de la coberta determina els fluxos d'aigua en el sistema, quina quantitat de precipitació és interceptada, i d'aquí evaporada, i quanta arriba al sòl (precipitació efectiva). La intercepció s'estima, per a cada episodi de pluja,



a partir de l'índex d'àrea foliar (LAI) i la intensitat de la pluja. L'escolament superficial s'estima a partir de la precipitació i la capacitat de saturació (*Water Filled Porosity WFP*), que mesura com de saturat es troba el sòl (Eq.(12) Annex 1). A la Figura 4 s'hi mostra un diagrama dels principals processos hidrològics a nivell de coberta que incorpora el model.

La precipitació efectiva és aquella que arriba finalment al sòl. El contingut d'aigua al sòl és una mesura de la quantitat d'aigua emmagatzemada al sòl en un moment determinat. Pot ser expressada com a contingut màssic ( $W$ ,  $\text{kg}_{\text{aigua}}/\text{kg}_{\text{sòl}}$ ) o volumètric ( $\theta$ ,  $\text{m}^3_{\text{aigua}}/\text{m}^3_{\text{sòl}}$ ). Per a estimar el contingut d'humitat al sòl, el model emprava un seguit de característiques edàfiques: la densitat de partícules del sòl ( $D_p$ ,  $\text{Pes}_{\text{sòlids}}/\text{Volum}_{\text{sòlids}}$ ), que se suposa força constant per a la majoria de sòls minerals ( $2650 \text{ kg m}^{-3}$ ) (Porta *et al.* 1993) i que es corregeix en funció de la matèria orgànica present; la densitat aparent del sòl sec ( $D_b$ ,  $\text{Pes}_{\text{sec sòl}}/\text{Volum}_{\text{sòl (porus+sòlids)}}$ ), que es calcula a partir de l'aproximació de Honeysett i Ratkowsky (1989); la porositat ( $P$ ) que s'estima a partir dels valors de la densitat de partícules i la densitat aparent; la capacitat de saturació (*Water-Filled Porosity*,  $WFP$ ); i la capacitat retenció d'aigua disponible (*Water-Holding Capacity*,  $WHC$ ) que expressen, de diferents maneres, la disponibilitat d'aigua útil per a les plantes (Porta *et al.* 1993) (Eq.(13) Annex 1). A partir d'aquí, es calcula la humitat del sòl ( $M$ ) com a percentatge de la capacitat de saturació ( $WFP$ ) (Eq.(14) Annex 1).

#### **4.9 La descomposició de matèria orgànica al sòl**

La matèria orgànica incorporada al sòl procedeix de dues fonts diferents: la virosta provinent de la biomassa o necromassa aèria (fulles, branques i tiges no lignificades) i la virosta subterrània (arrels fines i gruixudes).

Al mòdul arbusti de GOTILWA+, el sòl es divideix en dues capes, l'orgànica i la mineral, entre les quals s'estableix una taxa de transferència de matèria orgànica. Per a determinar la quantitat de matèria orgànica al sòl es prenen en consideració les entrades de matèria orgànica provinents de la virosta a l'estrat orgànic i les entrades a l'estrat mineral, provinents de la mortalitat de les arrels i de l'estrat superior (Figura 5).

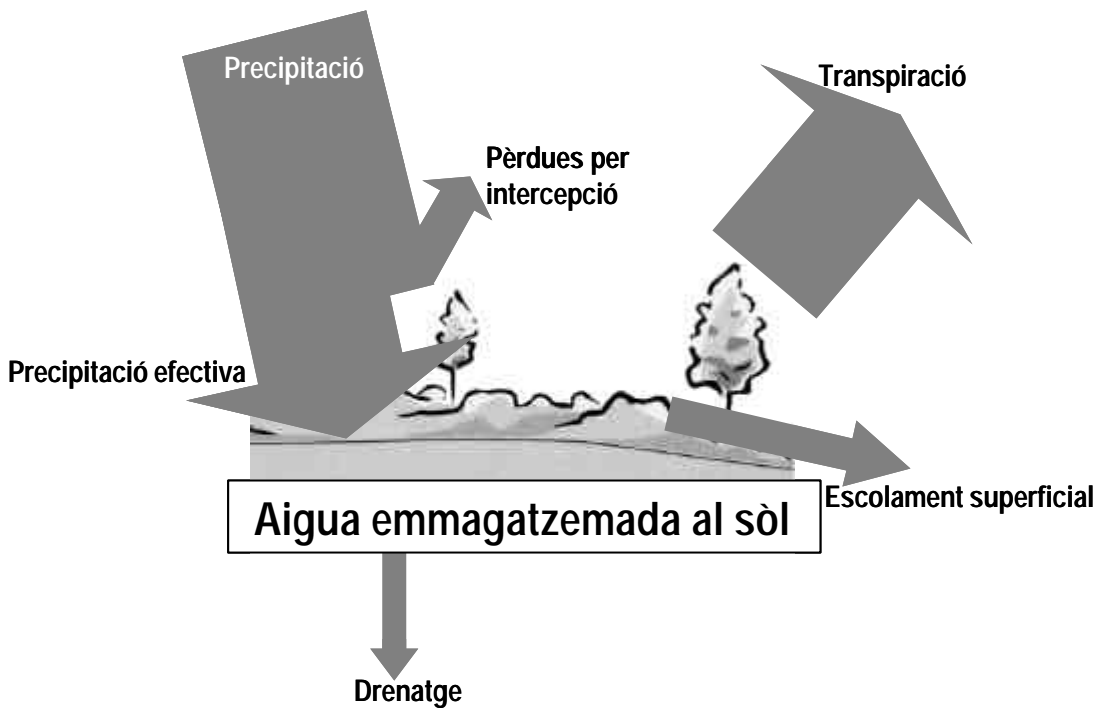


Figura 4. Principals fluxos d'aigua incorporats al mòdul arbustiu de GOTILWA+.

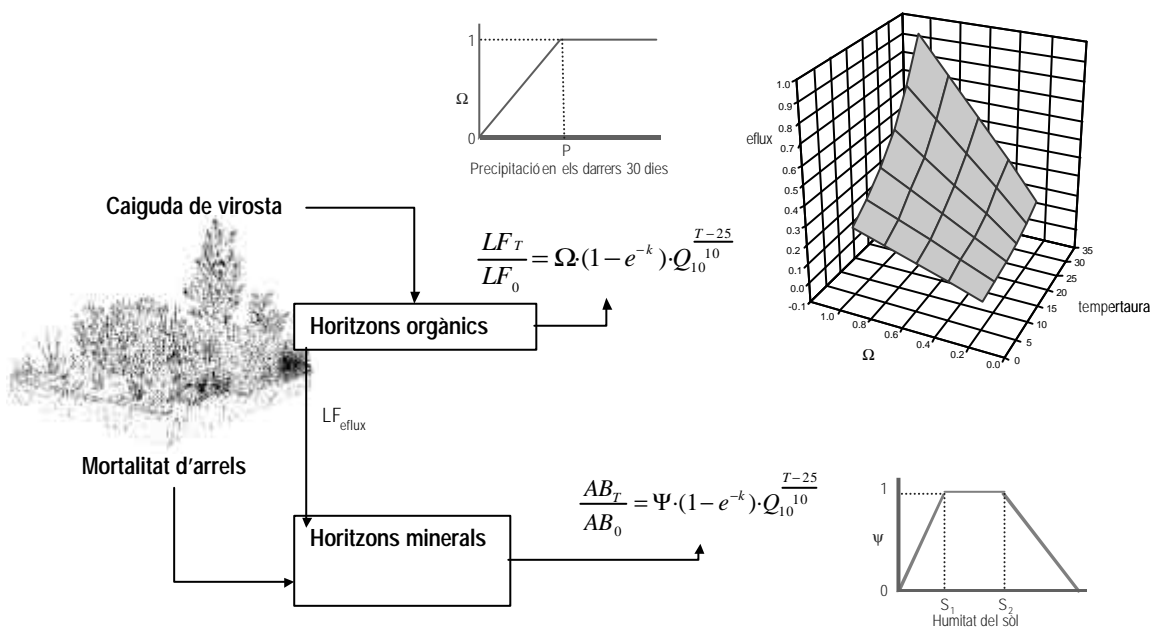


Figura 5. Diagrama de la dinàmica de la matèria orgànica al sòl en el mòdul arbustiu de GOTILWA+. El sòl es divideix en dos compartiments: els horitzons orgànics (LF) i els minerals (AB). La descomposició de la matèria orgànica es descriu per una funció exponencial negativa (model d'Olson, 1963) depenent de la temperatura i d'un factor depenent de la precipitació acumulada en el mes previ (horitzons orgànics) i de la humitat del sòl (horitzons minerals). La tendència de  $\Omega$  se suposa linealment creixent fins a una precipitació P determinada on es fa asimptòtica al valor màxim.  $\Psi$  pren el valor màxim entre dos límits  $S_1$  i  $S_2$  d'humitat del sòl.

La transferència de matèria orgànica entre ambdós compartiments és funció d'una taxa de pas i de la quantitat de matèria orgànica descomposta a l'horitzó orgànic. El patró de descomposició de la matèria orgànica segueix el model exponencial negatiu d'Olson (1963). Cadascuna de les capes té una taxa diferent de descomposició que és funció de la temperatura de sòl ( $Q_{10}$ ) i d'un factor que és funció, per als horitzons orgànics, de la precipitació acumulada en els darrers trenta dies ( $\Omega$ ) i, per als horitzons minerals, de la humitat del sòl ( $\Psi$ ). L'estimació de la temperatura del sòl es calcula a partir de la temperatura de l'aire emprant una mitjana mòbil d'11 dies (figura 5; Eq.(15), Eq.(16) Annex 1). El model calcula la quantitat de matèria orgànica descomposta i, alhora, les quantitats de carboni alliberades altre cop a l'atmosfera per la respiració heterotròfica com a flux de  $CO_2$  i les quantitats romanents al sòl.

#### ***4.10 La mortalitat de la biomassa aèria i la caiguda de virosta de la coberta***

La caiguda de fulles es troba condicionada al balanç de carboni. Durant els períodes desfavorables en els quals la producció primària bruta i el carboni mòbil emmagatzemat no poden compensar el cost respiratori, la vegetació perd una fracció suplementària de biomassa foliar i, si es dóna el cas, d'una fracció de la seva biomassa aèria. Aquesta fracció és la necessària per tornar a equilibrar la respiració amb la GPP i el carboni mòbil. A més, existeix una mortalitat basal de fulles, que és funció de la temperatura ( $Q_{10}$ ). La retranslocació del carboni mòbil de les fulles cap a les tiges no lignificades i branques adjacents és prioritària a l'abscissió. La quantitat de carboni retranslocada depèn de la quantitat de carboni mòbil emmagatzemat a les fulles. El pes específic foliar (LSW) de les fulles caigudes decreix en consonància amb aquesta translocació (Sabaté 1993).

L'aportació de material llenyós a la virosta es produeix per dues vies, l'una és una taxa proporcional a la caiguda basal de fulles i es troba constituïda per material viu que, aleatòriament, es desprèn de la planta i cau a terra. La segona, es relaciona amb el temps mig de residència de la necromassa a la coberta (que és un paràmetre d'entrada diferent per a cada fracció de diàmetre) i que es troba constituïda per material prèviament mort i romanent a la coberta.

El pas de material viu a necromassa dreta (en peu a la coberta) es duu a terme a partir d'unes taxes depenents de la disponibilitat d'aigua al sòl i dels seus canvis integrats al llarg del temps.

#### **4.11 La mortalitat de les arrels fines**

Les arrels fines són aquella fracció de la biomassa subterrània de diàmetre inferior a 2,5 mm. Constitueixen un component molt dinàmic del sistema (Hendrick i Pregitzer 1992, López 1999). El coneixement d'aquesta dinàmica encara és força incomplet, malgrat que se sap que les arrels fines representen una important proporció de la producció global de la vegetació i que desenvolupen un paper important en la transferència de matèria orgànica al sòl.

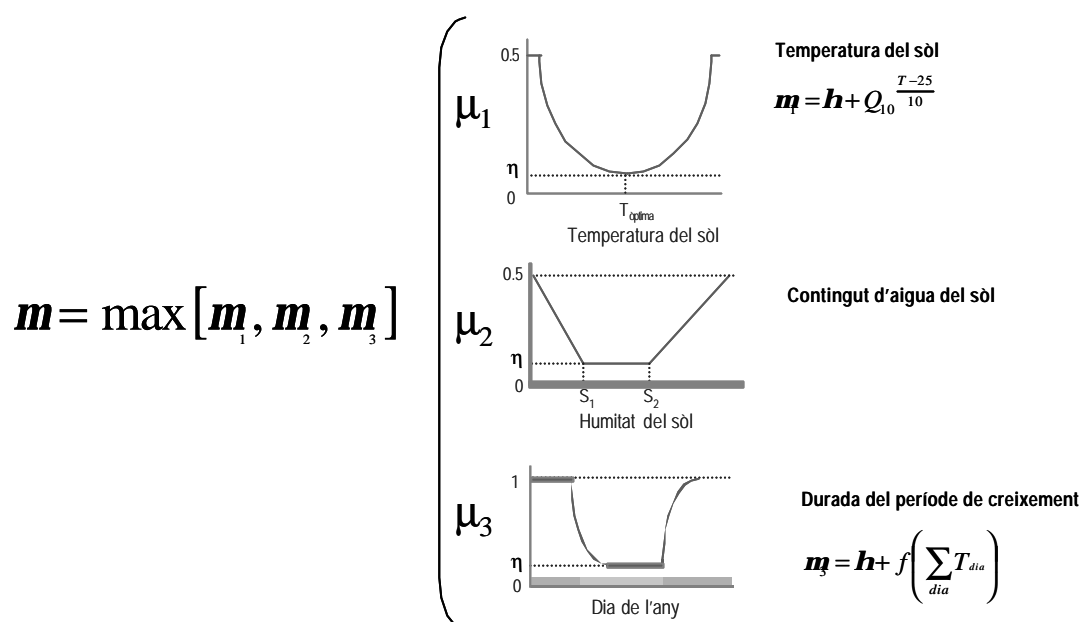
Al mòdul arbustiu de GOTILWA+ s'aplica una taxa basal de mortalitat d'arrels fines ( $\eta$ ), que es pot veure augmentada per tres factors diferents: la temperatura del sòl, el contingut d'aigua al sòl i la durada del període de creixement (fenologia). El factor més restrictiu dels tres esmentats determina la taxa global de mortalitat ( $\mu$ ) (Figura 6).

La nova quantitat de biomassa d'arrels fines es calcula després d'aplicar-ne la mortalitat (Eq.(17) Annex 1).

#### **4.12 Fenologia**

La fenologia, l'activitat estacional de la vegetació depenent dels factors ambientals, és la resultant de la combinació de dos components. El primer és l'estat de desenvolupament anual, el qual és modulad a partir de l'efecte en la fluctuació estacional de les temperatures. El model modula la capacitat fotosintètica estacional incorporant l'aproximació de Pelkonen i Hari (1980) que introdueix un factor (comprès entre 0 i 1 depenent del l'estat de desenvolupament anual) que modifica els valors de  $V_{\text{cmax}}$  i  $J_{\text{max}}$  a les equacions de Farquhar (Leinonen 1997). El segon component actua sota condicions de sequera: quan la disponibilitat hídrica és baixa (que sovint coincideix amb temperatures elevades) la conductància estomàtica es redueix d'acord amb l'equació de Leuning i, consegüentment, l'intercanvi gasós. En aquest punt, quan la respiració foliar és més elevada que la fotosíntesi i el carboni mòbil es

troba esgotat, una fracció de fulles cau fins que es torna a equilibrar el balanç de carboni. Les espècies perennifòlies produeixen noves fulles quan la fotosíntesi ha recarregat el carboni mòbil emprat en el manteniment de la biomassa durant els períodes desfavorables.



**Figura 6.** Factors que determinen la mortalitat de les arrels fines al mòdul arbustiu de GOTILWA+. D'aquests, el model pren el valor més restrictiu induït bé per la temperatura del sòl ( $\mu_1$ ), bé pel contingut d'aigua al sòl ( $\mu_2$ ) o bé per la fenologia ( $\mu_3$ ).

## 5. Calibratge i anàlisi de sensibilitat

Un cop definida l'estructura del model i revisat el seu ajustament als objectius originals del procés, es plantegen les dues darreres fases del desenvolupament del model: el calibratge i l'anàlisi de sensibilitat (Jeffers 1991).

### 5.1 Calibratge i parametrització inicial

Amb el propòsit de calibrar el model durant el procés de desenvolupament, s'han emprat les dades successional de biomassa aèria en brolles mediterrànies d'una cronosequència de 3, 10 i 17 anys d'edat regenerativa (capítol 3; Pla i Rodà 1999) en diferents localitats del Baix Camp (UTM (325000, 4550000)). Aquests treballs de base han permès parametritzar

inicialment el model i comparar els resultats provisionals de les simulacions amb les dades observades.

Les brolles mediterrànies utilitzades en el calibratge constitueixen matollars termòfils perennifolis integrats bàsicament per petits arbusts, majoritàriament esclerofil·les. Són comunitats diverses sovint dominades per romaní (*Rosmarinus officinalis*) bruc d'hivern (*Erica multiflora*) i garric (*Quercus coccifera*). S'ha emprat el terme genèric de *brolla* per a designar aquestes formacions per bé que, en determinats casos estudiats (estadis madurs de la successió), hom podria designar-les indistintament com a *garrigues* (matollars dominats per garric) (Pla i Rodà 1999). Per a la parametrització inicial de les fitomasses aèries de la vegetació s'han emprat les dades referents a la brolla de 3 anys d'edat regenerativa.

En aquest primer calibratge del model, la major part dels valors dels paràmetres funcionals i ecofisiològics han estat aproximats a partir de revisions bibliogràfiques dels trets funcionals de diferents comunitats i espècies mediterrànies que s'ajusten al caràcter perennifoli i esclerofil·le (Taula 7).

Els paràmetres i coeficients que no han estat trobats directament a la literatura o en dades conegudes, s'han aproximat o generat a partir d'un judici expert fonamentat en l'anàlisi de sensibilitat i en consideracions teòriques.

En general, s'ha optat per seleccionar o aproximar els valors mitjos representatius que correspondrien a una coberta dominada principalment per *Quercus coccifera* en sòls calcaris primis.

Alguns paràmetres que s'han aproximat, ja sigui a partir de la literatura o d'un judici expert, s'han hagut d'ajustar en el procés de calibratge del model i s'ha testat el seu pes en les respostes del model en l'anàlisi de sensibilitat. Així, els resultats de l'anàlisi de sensibilitat han permès ajustar aquests valors i detectar en quins paràmetres s'han de centrar els esforços de precisió en la seva inicialització.

**Taula 7.** Variables estructurals i de descripció del sòl utilitzades o aproximades en les simulacions de calibratge per a les brolles del Baix Camp amb el mòdul arbustiu de GOTILWA+.

Paràmetres	Unitats	Valor	Referències i/o tipus d'aproximació
<b>ESTRUCTURA DE LA COMUNITAT</b>			
Biomassa subterrània/aèria	kg kg <sup>-1</sup>	2	Rapp i Loissant (1981), Cañellas i San Miguel (2000)
αFR (pes d'arrels fines/pes de fulles)	g g <sup>-1</sup>	0,1	Teoria (Kummerow i Ellis 1989) i <i>calibratge</i>
Pes específic foliar	mg cm <sup>-2</sup>	19,2	Specht (1988)
Maxim carboni mòbil a les fulles	%	0,4	Aproximat a partir de literatura d'altres espècies esclerofil·les (Mooney 1977, Romane i Terradas 1992, Albeza <i>et al.</i> 1995 Rodà <i>et al.</i> 1999) i <i>calibratge</i>
Maxim carboni mòbil en fusta	%	0,4	Aproximat a partir de literatura d'altres espècies esclerofil·les (Mooney 1977, Romane i Terradas 1992, Albeza <i>et al.</i> 1995 Rodà <i>et al.</i> 1999) i <i>calibratge</i>
Fracció d'albeca que respira	%	0,08	Aproximat a partir de literatura d'altres espècies esclerofil·les (Romane i Terradas 1992, Albeza <i>et al.</i> 1995, Rodà <i>et al.</i> 1999) i <i>calibratge</i>
Caiguda de fulles (base)	dia <sup>-1</sup>	0,002	Aproximat a partir de Rapp i Loissant (1981) i altres espècies esclerofil·les (Mooney 1977, Romane i Terradas 1992, Albeza <i>et al.</i> 1995 Rodà <i>et al.</i> 1999)
Mortalitat d'arrels fines (base)	dia <sup>-1</sup>	0,008	Aproximat a partir de literatura d'altres espècies esclerofil·les (Romane i Terradas 1992, Albeza <i>et al.</i> 1995, Rodà <i>et al.</i> 1999)
Fullaraca gruixuda/fina	g g <sup>-1</sup>	3,6·10 <sup>-5</sup>	Aproximat a partir de literatura d'altres espècies esclerofil·les (Romane i Terradas 1992, Albeza <i>et al.</i> 1995, Rodà <i>et al.</i> 1999)
Densitat de la fusta	g cm <sup>-3</sup>	0,93	Aproximat a partir de literatura d'altres espècies esclerofil·les (Romane i Terradas 1992, Albeza <i>et al.</i> 1995, Rodà <i>et al.</i> 1999)
MO inicial en horitzons orgànics	g cm <sup>-2</sup>	100	Aproximat a partir de Rapp i Loissant (1981) i Serrasolsas <i>et al.</i> (1989)
MO inicial en horitzons minerals	% pes sec	2,5	Aproximat a partir de Rapp i Loissant (1981) i altres espècies esclerofil·les (Mooney 1977, Romane i Terradas 1992, Albeza <i>et al.</i> 1995 Rodà <i>et al.</i> 1999)
Temps de residència a la coberta de necromassa fina	dia	100	Aproximat a partir de Rapp i Loissant (1981) i judici expert
Temps de residència a la coberta de necromassa mitjana	dia	300	Aproximat a partir de Rapp i Loissant (1981) i judici expert
Temps de residència a la coberta de necromassa gruixuda	dia	1000	Aproximat a partir de Rapp i Loissant (1981) i judici expert
Taxa de pas de BLF a BLM	dia <sup>-1</sup>	0,03	<i>Calibratge</i>
Taxa de pas de BLM a BLG	dia <sup>-1</sup>	0	Mesurament de camp (Pla i Rodà 1999)

Taula 7 Continuació

Paràmetres	Unitats	Valor	Referències i/o tipus d'aproximació
<b>FLUXOS DE CARBONI DEL SÒL</b>			
Densitat aparent	g cm <sup>-3</sup>	1,55	Mesures de camp (Pla, <i>no publicat</i> )
Taxa de descomposició de la MO en els horitzons orgànics	dia <sup>-1</sup>	0,004	Aproximat a partir de Rapp i Loissant (1981), Serrasolsas <i>et al.</i> (1989) i altres espècies esclerofil·les (Mooney 1977, Romane i Terradas 1992, Albeza <i>et al.</i> 1995, Rodà <i>et al.</i> 1999)
Taxa de descomposició de la MO en els horitzons minerals	dia <sup>-1</sup>	7·10 <sup>-4</sup>	Aproximat a partir de Rapp i Loissant (1981) i altres espècies esclerofil·les (Mooney 1977, Romane i Terradas 1992, Albeza <i>et al.</i> 1995, Rodà <i>et al.</i> 1999)
Valor de Q <sub>10</sub> de la descomposició de la matèria orgànica	---	1,7	Aproximat a partir de literatura d'altres espècies esclerofil·les (Romane i Terradas 1992, Albeza <i>et al.</i> 1995, Rodà <i>et al.</i> 1999)
Taxa de transferència dels horitz. orgànics als minerals (t <sub>o m</sub> )	---	300	Aproximat a partir de literatura d'altres espècies esclerofil·les (Romane i Terradas 1992, Albeza <i>et al.</i> 1995, Rodà <i>et al.</i> 1999)
W min	mm	5	Aproximat a partir de Gracia <i>et al.</i> (1999b)
W màx	mm	105	Aproximat a partir de Gracia <i>et al.</i> (1999b)
<b>CONDUCTIVITAT HIDRÀULICA DEL SÒL</b>			
Gradient hidràulic	m m <sup>-1</sup>	0,51	Mesuraments de camp (Pla, <i>no publicat</i> )
Conductivitat hidràulica del sòl	m dia <sup>-1</sup>	13	Aproximat a partir de Gracia <i>et al.</i> (1999b)
Profunditat mitjana del sòl	m	0,3	Mesuraments de camp (Pla, <i>no publicat</i> )
Límit d'aigua en el sòl utilitzable per les plantes	mm m <sup>-1</sup>	1	Aproximat a partir de Gracia <i>et al.</i> (1999b)
Pedregositat (volum)	%	25	Mesuraments de camp (Pla, <i>no publicat</i> )

Les dades referents a l'estructura del sòl han estat derivades i aproximades a partir d'observacions de camp i de revisions bibliogràfiques d'estudis de condicions edàfiques similars o comparables (Taula 7). La litologia de les zones és formada per calcàries i dolomies del triàsic i juràssic (IGME 1980, 1981). Els sòls són prims per l'efecte de l'erosió i del poc desenvolupament.

Les dades climatològiques han estat generades aleatòriament a partir del mòdul *Weather Generator* de GOTILWA+ (Gracia *et al.* 1999b) a partir d'una sèrie diària continuada de 1984-1994 de l'estació meteorològica de l'Institut Nacional de Meteorologia situada a la Central Nuclear Vandellós (UTM (321000, 4536000), Altitud: 20 m). Aquest mòdul climatològic de GOTILWA+ permet generar sèries de diferent durada amb el mateix patró estadístic que les dades originals observades (*capítol 5*).



## 5.2 Anàlisi de sensibilitat

L'anàlisi de sensibilitat és un mètode per a testar el funcionament d'un model de simulació (Aber i Melillo 1981). S'altera un o més paràmetres específics d'entrada (sovint en un percentatge del seu valor original) i s'avalua la resposta en les prediccions del model (Jørgensen 1988). S'han seleccionat 7 paràmetres d'entrada que, entre tots els que requereix el model, són de difícil parametrització o bé podrien ser factors clau en els processos descrits.

Els paràmetres seleccionats són: (1) la relació biomassa aèria/biomassa subterrània; (2) la relació d'arrels fines i fulles  $\alpha_{FR}$ ; (3) la fracció d'albeca que respira; (4) el carboni mòbil en fulles; (5) el carboni mòbil en fusta; (6) la taxa de pas de la biomassa llenyosa fina a mitjana; i (7) la taxa de pas de la biomassa llenyosa mitjana a la gruixuda. Aquests paràmetres han estat variats cadascun d'ells en  $\pm 10\%$  i  $\pm 25\%$  respecte el valor de referència. S'han avaluat les diferents sortides del model, per bé que s'ha centrat l'interès en la resposta de la fitomassa aèria total, com a variable integradora.

S'ha fet córrer el model aplicant, consecutivament, un dels ajustos sobre un dels paràmetres seleccionats. La sensibilitat del model s'ha avaluat a partir de 2 índexs (Taula 8).  $S_1$  dona informació del grau de variació de la variable als ajustos en un paràmetre d'entrada, comparant el valor de sortida de la variable en la simulació ajustada respecte el valor de sortida de la mateixa variable en la simulació de referència.  $S_2$  aporta la mateixa informació però pondera, a més, aquest grau de variació en funció de la distància entre el valor del paràmetre d'entrada ajustat i el valor del mateix paràmetre en la simulació de referència. Els dos índexs aporten, així, una informació complementària de la sensibilitat del model. L'anàlisi s'efectua en base a una simulació de 20 anys, per a la qual s'han promitjat els resultats en els primers 5 anys i en els darrers 5 anys de la simulació. Els índexs de sensibilitat s'han aplicat per a cadascun d'aquests dos promitjos quinquennals.

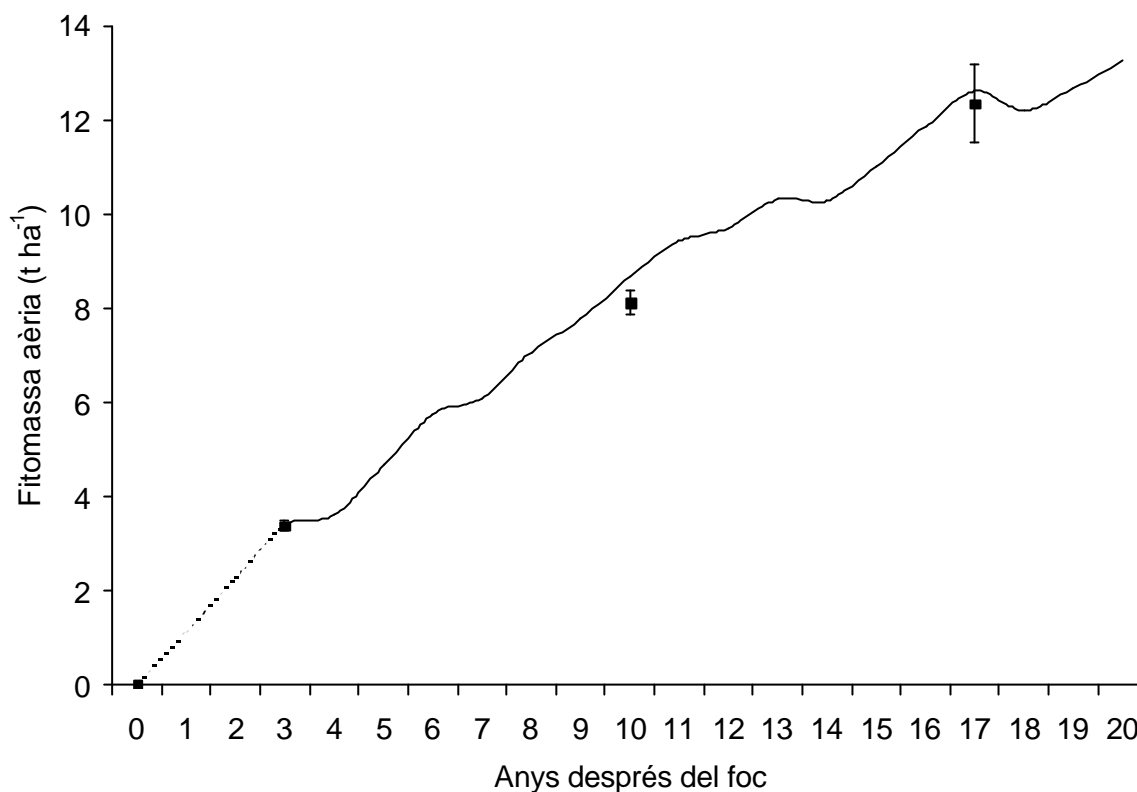
**Taula 8.** Índexs de sensibilitat emprats en l'anàlisi de GOTILWA+

Equació	Notes
$S_1 = \frac{O_1}{O_0}$	<p><math>O_1</math> és el valor de la variable de sortida d'una simulació ajustada.</p> <p><math>O_0</math> és el valor de la variable de sortida de la simulació de referència</p>
$S_2 = \frac{(O_1 - O_0) /  O_0 }{ (P_1 - P_0) / P_0 }$	<p><math>P_1</math> és el valor del paràmetre d'entrada ajustat</p> <p><math>P_0</math> és el valor del paràmetre d'entrada de referència</p>

### 5.3 Resultats

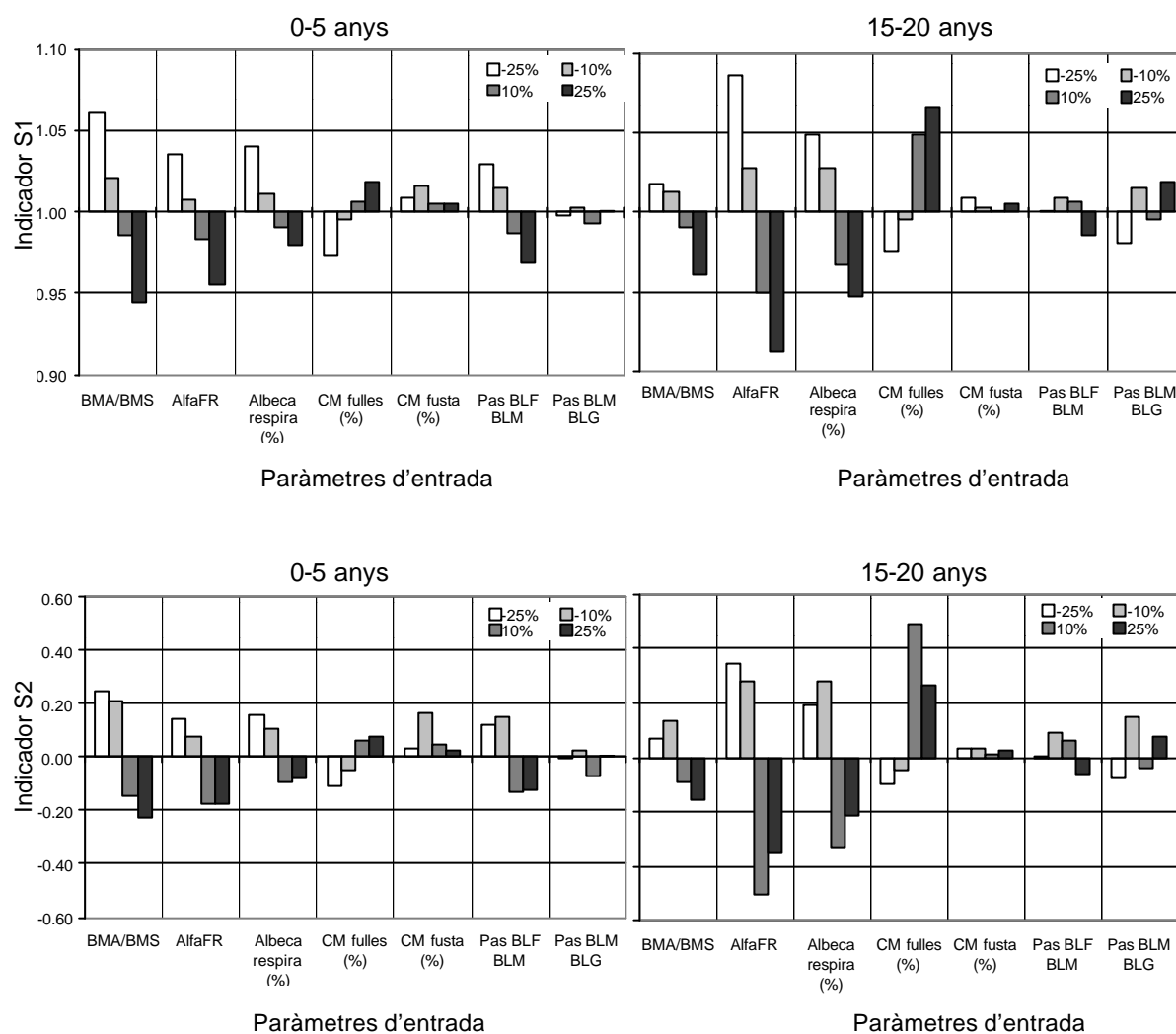
El calibratge ha permès ajustar els paràmetres del model que no han estat obtinguts de la bibliografia o d'observacions de camp a fi que les seves prediccions s'ajustin a les dades reals (Figura 7). Aquests ajustos inicials han estat verificats a partir de l'avaluació de la sensibilitat del model a les variacions en els paràmetres seleccionats. Els resultats de l'anàlisi de sensibilitat sobre la fitomassa aèria es mostren a la Figura 8.

Pel que fa a l'índex de sensibilitat  $S_1$ , els valors més grans d'1 corresponen a relacions positives entre els canvis en els paràmetres d'entrada i la resposta del model. Per als dos períodes d'agregació, els resultats indiquen que cap variació en els valors inicials es tradueix en canvis en la resposta dels paràmetres seleccionats més gran del  $\pm 10\%$  respecte els resultats de la simulació de referència, encara que es variï n els esmentats paràmetres fins un  $\pm 25\%$ . Tot i així, cal destacar que els valors dels índexs de sensibilitat són més elevats en els promitjos dels darrers 5 anys de simulació, on pesa molt menys la inèrcia de la parametrització inicial i es posa de relleu el pes acumulat de cadascun dels paràmetres en el model. L'índex  $S_2$  ens informa més estrictament de la sensibilitat diferencial dels paràmetres analitzats. Pondera la sensibilitat de les sortides del model a les distàncies inicials en els valors d'entrada.



**Figura 7.** Resultats del calibratge del mòdul arbustiu de GOTILWA+ (línia contínua) amb les dades observades (punts) en una cronoseqüència de brolles mediterrànies al sud de Catalunya (Pla i Rodà 1999)

L'índex pren valors positius quan existeix una relació positiva entre els canvis en els valors d'entrada i la resposta del model. Els resultats, per a aquest índex, ens corroboren els obtinguts per a l'índex  $S_1$ , tot i que amb alguns matisos. Per al període d'agregació d'1 a 5 anys, els valors de l'índex són baixos i sense fluctuacions notables entre paràmetres i, dins d'aquests, en les respostes als diferents percentatges de canvi en els valors inicials. (gairebé tots els valors s'ubiquen dins del rang entre 0,2 i -0,2). Per al període d'agregació de 15-20 anys, els paràmetres de la relació entre arrels fines i fulles ( $\alpha_{FR}$ ), l'albeca que respira i el percentatge de carboni mòbil de les fulles presenten unes majors respostes a les variacions inicials i, complementàriament, diferents a les expressades pel valors  $S_1$ . A tall d'exemple, el percentatge de carboni mòbil de les fulles, en aquest període, és més sensible a un canvi d'un primer +10% inicial que no pas, diferencialment, al canvi d'un 25%.



**Figura 8.** Resultats de l'anàlisi de sensibilitat del mòdul arbustiu de GOTILWA+ avaluada sobre la variable fitomassa aèria. A les gràfiques superiors s'hi mostren els resultats per a l'índex S1 per a les dades agregades del període d'1 a 5 anys (esquerra) i per al període de 15 a 20 anys de la simulació (dreta). A les gràfiques inferior s'hi mostren els resultats de l'índex S2 per als mateixos períodes.

#### 5.4 Discussió

Els resultats presentats han permès verificar l'estructura i coherència interna del model. El procés de calibratge i l'anàlisi de sensibilitat han posat de relleu, per una banda, la solidesa del model al rang de fluctuacions analitzades i, per l'altra, la fiabilitat en l'ajustament de la combinació de valors inicials dels paràmetres utilitzats. En general, els resultats reforcen l'aplicabilitat del model i la seva validesa conceptual.

L'anàlisi de sensibilitat avalua la criticalitat de determinats paràmetres, i els processos que representen en el model. Defineix quins paràmetres de base (i

de difícil inicialització per manca d'informació prèvia) requereixen d'una major precisió en l'estimació dels seus valors. En general, el model es mostra força robust a les variacions dels valors inicials perquè, en cap cas, els canvis inicials de fins un  $\pm 25\%$  en els valors d'entrada es tradueixen en variacions de la fitomassa aèria simulada més grans d'un  $\pm 10\%$  respecte el valor de referència. Els canvis en la relació de la biomassa aèria/biomassa subterrània, seguida de la relació entre la biomassa foliar i la d'arrels fines ( $\alpha_{FR}$ ) i la fracció d'albeca que respira, afecten principalment els resultats promitjats ens els primers anys de simulació. Al final de la simulació (quan s'accentuen els pesos dels diferents paràmetres en el model) s'observa una major sensibilitat als canvis inicials d' $\alpha_{FR}$ , de la fracció d'albeca que respira i del carboni de reserva en fulles. En tots dos períodes promitjats, el model es mostra fortament insensible a variacions en el carboni mòbil en fusta, la taxa de pas de biomassa llenyosa fina (BLF) a biomassa llenyosa mitjana (BLM) i la taxa de pas d'aquesta a biomassa llenyosa gruixuda (BLG).

## 6. Conclusions

Els models de simulació són simplificacions de la realitat i es basen en nombroses suposicions i, molt sovint, els seus resultats es posen en qüestió. Els models poden servir com a una font d'informació per a la presa de decisions, tanmateix, la seva utilitat primària és guanyar en comprensió dels sistemes complexos. Modelitzar el funcionament d'un sistema complex com una coberta vegetal arbustiva, a partir d'un elevat nombre de paràmetres i processos, ha estat l'objectiu d'aquest treball. La precisió de les dades disponibles i els mitjans per a testar-les han exigit un compromís entre la simplificació i el realisme que s'ha mirat d'aconseguir en el modul arbustiu de GOTILWA+. Les simulacions han permès observar que, malgrat les simplificacions i suposicions introduïdes en el model, i gràcies al seu plantejament conceptual (la disponibilitat d'aigua és el major factor limitant en ecosistemes arbustius mediterranis), el model és capaç de descriure la dinàmica de diferents paràmetres estructurals d'una manera satisfactòria.

Per a completar el procés de desenvolupament del model, aquest ha de ser validat en diferents contextos comparant els resultats de les simulacions amb conjunts de dades independents sobre la dinàmica sucesional de fitomassa aèria en diferents comunitats arbustives.

Aquest procés de modelització, del qual aquí se'n presenten les etapes principals i uns resultats inicials de calibratge i anàlisi de sensibilitat, es troba en una situació òptima per a consolidar-se com a una eina en l'avaluació de la dinàmica del combustible en ecosistemes mediterranis i, per tant, una interessant eina d'ajuda en la gestió preventiva del risc d'incendi.

## Referències

Aber JD, Melillo JM. (1981) Terrestrial Ecosystems. Saunders College Publishing. Filadèlfia.

Albeza E, Sabaté S, Escarré A, Gracia CA. (1995) A long-term thinning experiment on a *Quercus ilex* L. forest: changes in leaf characteristics and dynamics in response to different treatment intensities. A: Jenkins A, Ferrier RC, Kirby C. (Eds.) Ecosystem manipulation experiments. Ecosystems Research Report 20, Commission of the European Communities. Pp. 200-208.

Aronson J, Floret C, Le Floch E, Ovalle C, Pontanier R. (1993) Restoration and Rehabilitation of Degraded Ecosystems in Arid and Semi-Arid Lands. I. A View from the South. *Restoration Ecology* 1: 168-187.

Aronson J, Le Floch E. (1996) Vital Landscape Attributes: Missing Tools for Restoration Ecology. *Restoration Ecology* 4: 377-387.

Ball JT, Woodrow IE, Berry JA. (1987) A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. A: Bingsins IJ. (Ed.) Progress in photosynthesis research. Vol IV (5). Dordrecht. Pp. 221-224

Beukema SJ, Reinhardt E, Greenough J, Kurz WA, Crookston N, Robinson D. (1999) Fire and fuels extension to the forest vegetation simulator: model description. Working draft on file at the Intermountain Fire Sciences Laboratory, Missoula. <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/4155/ffe-fvs.html>

Burgan RE, Rothermel RC. (1984) BEHAVE: Fire behaviour prediction and fuel modeling system. FUEL subsystem. General Technical Report INT-167. Ogden, UT. USDA. Forest Service. Intermountain Research Station.

Campbell GS. (1986) Extinction coefficients for radiation in plan canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*. 36: 317-321.

Canadell J, Djema A, López B, Lloret F, Sabaté S, Siscart D, Gracia CA. (1999) Structure and Dynamics of the Root System. A: Rodà F, Retana J, Bellot J, Gracia CA. (Eds.) *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. Springer. Berlin. Pp. 163-178.

Cañellas I, San Miguel A. (2000) Biomass of root and shoot systems of *Quercus coccifera* shrublands in Eastern Spain. *Annals of Forest Science* 57: 803-810.

Claussen M, Cramer W, Schellnhuber HJ. (1999) Earth-system models of intermediate complexity. Introductory remarks. IGBP-GAIN. Newsletter 1-8.

Farquhar GD, von Caemmerer S (1982) Modeling of photosynthetic response to environment. A: Lange OL, Nobel PS, Osmond CB, Ziegler H. (Eds.) *Encyclopaedia of plant physiology, Vol 12B. Physiological Plant Ecology II, Water relations and carbon assimilation*. Springer. Berlin. Pp. 549-587.

Gates DM. (1962) *Energy Exchange in the Biosphere*. Harper and Row. Nova York.

Gates DM. (1980) *Biophysical Ecology*. Springer Verlag. Nova York.

Gracia CA, Sabaté S, Tello E. (1997) Modelling the responses to climate change of a Mediterranean forest managed at different thinning intensities: Effects on growth and water fluxes. Mohren GMJ, Kramer K, Sabaté S. (Eds.) *Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems. Forestry Sciences. Vol 52*. Kluwer Publishers. Dordrecht. Pp. 243-252



Gracia CA, Tello E, Sabaté S, Bellot J. (1999a) GOTILWA: An Integrated Model of Water Dynamics and Forest Growth. Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests. A: Rodà F, Retana J, Bellot J, Gracia CA. (Eds.) Ecology of Mediterranean evergreen oak forests. Springer. Berlin. Pp. 163-178.

Gracia CA, Sabaté S, Sánchez A. (1999b) GOTILWA+. An integrated model of forest growth. Model documentation and User's Guide. <http://www.creaf.uab.es/gotilwa+>

Hauhs M. (1990) Ecosystem modelling: science or technology? Journal of Hydrology 116: 25-33.

Hendrick RL, Pregitzer KS. (1992) The demography of fine roots in a northern hardwood forest. Ecology 73: 1094-1104.

Honeysett JL, Ratkowsky DA. (1989) The use of ignition loss to estimate bulk density of forest soils. Journal of Soil Science 40: 299-308.

IGME (1980) Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. Full 472 (Reus). Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.

IGME (1981) Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. Full 498 (Hospitalet de l'Infant). Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.

Jarvis PG, Mcnaughton KG. (1986) Stomatal Control of Transpiration: Scaling Up from Leaf to Region. Advances in Ecological Research 15: 1-49.

Jeffers JNR. (1991) Modelos en ecología. Oikos-tau. Barcelona.

Jørgensen SE. (1988) Fundamentals of Ecological Modelling. Elsevier. Amsterdam.

Keane RE, Morgan P, Running SW. (1996) FIRE-BGC: A Mechanistic Ecological Process Model for Simulating Fire Succession on Coniferous Forest Landscapes of the Northern Rocky Mountains. Intermountain Research Estation. USDA Forest Service.

Kramer K, Mohren GMJ. (2001) Long-term effects of climate change on carbon budgets of forests in Europe. ALTErrA, Green World Research. Report 194. Wageningen.

Kramer K, Leinonen I, Bartelink HH, Berbigier P, Borghetti M, Bernhofer Ch, Cienciala E, Dolman AJ, Froer O, Gracia CA, Granier A, Grünwald T, Hari P, Jans W, Kellomäki S, Loustau D, Magnani F, Matteucci G, Mohren GMJ, Moors E, Nissinen A, Peltola H, Sabaté S, Sánchez A, Sontag M, Valentini R, Vesala T. (2002) Evaluation of 6 process-based forest growth models using eddy-covariance measurements of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes at six forest sites in Europe. *Global Change Biology* 8: 1-18.

Kummerow J, Ellis BA. (1989) Structure and function in chaparral shrubs. A: Keeley SC. (Ed.) *The California chaparral. Paradigms reexamined.* Sciences Series. Natural History Museum of Los Angeles 34: 141-150.

Lacointe A. (2000) Carbon allocation among tree organs: A review of basic processes and representation in functional-structural tree models. *Annals of Forest Science* 57: 521-523.

Lavorel S, McIntyre S, Landsberg J, Forbes TDA. (1997) Plant functional classifications: from general functional groups to specific groups of response to disturbance. *Trends in Ecology and Evolution* 12: 474-478.

Leinonen I. (1997) Frost hardiness and annual development of forest trees under changing climate. Tesi doctoral. Research Notes, Faculty of Forestry. University of Joensuu.

Leuning R. (1995) A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C3 plants. *Plant Cell and Environment* 18: 339-355.

López B (1999) The fine roots system of a Mediterranean holm oak forest: general aspects and effects of thinning. *Tesi doctoral. Universitat de Barcelona. Barcelona.*

Luken JO. (1990) *Directing Ecological Succession.* Chapman & Hall. Nova York.

Martínez-Vilalta J. (2001) Constraints on water transport posed by xylem embolism: implications for drought and frost resistance in woody plants. *Tesi doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona. Bellaterra (Barcelona).*

Mauchamp A, Rambal S, Lepart J. (1994) Simulating the dynamics of a vegetation mosaic: a spatialized functional model. *Ecological Modelling* 71: 107-130.

Mohren GMJ, Burkhardt HE. (1994) Contrasts between biologically-based process models and management-oriented growth and yield models. *Forest Ecology and Management* 69: 1-5.

Monteith JL. (1965) Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 19: 205-234.

Mooney HA. (1977) The carbon cycle in Mediterranean-climate evergreen scrub communities. A: Mooney HA, Conrad CE (Eds.) *Proceedings of the symposium on the environmental consequences of fire and fuel management in Mediterranean ecosystems.* Gen. Tech. Rep. WO-3. USDA Forest Service. Washington. Pp. 107-115.

Mouillot F, Rambal S, Lavorel S. (2001) A generic process-based Simulator for mediterranean landscApes (SIERRA): design and validation exercises. *Forest Ecology and Management* 147: 75-97

Olson JS. (1963) Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* 44: 322-331.

Orshan G. (1989) *Plant Pheno-morphical Studies in Mediterranean Type Ecosystems*. Kluwer Academic Publishers. Londres.

Packham JR, Harding DJL, Hilton GM, Stuttard RA. (1992) *Functional ecology of woodlands and forests*. Chapman & Hall. Londres.

Pelkonen P, Hari P (1980) The dependence of the spring time recovery of CO<sub>2</sub> uptake in Scots pine on temperature and internal factors. *Flora* 169: 389-404.

Piñol J, Lledó MJ, Escarré A. (1991) Hydrological balance of two Mediterranean forested catchments (Prades, northeast Spain). *Hydrological Sciences Journal* 36: 95-107

Pla E, Rodà F. (1999) Aproximació a la dinàmica successional de combustible en brolles mediterrànies. *Orsis* 14: 79-103.

Porta J, López-Acevedo M, Roquero C. (1993) *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa. Madrid.

Rambal S. (1993) The differential role of mechanisms for drought resistance in a Mediterranean evergreen shrub: a simulation approach. *Plant, Cell and Environment* 16: 35-44.

Rapp M, Loissant P. (1981) Some aspects of mineral cycling in the *garrigue* of Southern France. A: Di Castri F, Goodall DW, Specht RL. (Eds.) *Mediterranean-type shrublands*. Elsevier Scientific Publishing Company. Nova York. Pp. 289-301.

Reinhardt ED, Keane RE, Brown JK. (2001) Modeling fire effects. *International Journal of Wildland Fire* 10: 373-380.

Rodà F, Retana J, Bellot J, Gracia CA. (Eds.) (1999) Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests. Ecological Studies 137 Analysis and Synthesis. Springer. Berlin.

Romane F, Terradas J. (Eds.) (1992) *Quercus ilex* L. ecosystems: function, dynamics and management. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.

Rothermel RC. (1983) How to predict the spread and intensity of forest and range fires. USDA Forest Service. Intermountain Research Station. General Technical Report INT-143. Odgen, UT.

Rothermel RC, Philpot CW. (1973) Predicting changes in chaparral flammability. Journal of Forestry 71: 640-643.

Sabaté S. (1993) Canopy structure and nutrient content in a *Quercus ilex* L. forest of Prades Mountains: Effects of natural and experimental manipulation of growth conditions. Tesi doctoral. Universitat de Barcelona. Barcelona

Sala A, Tenhunen JD. (1994) Site-specific water relations and stomatal response of *Quercus ilex* in a Mediterranean watershed. Tree Physiology 14: 601-617.

Sauvagnargues-Lesage S, Dusserre G, Robert F, Dray G, Pearson DW. (2001) Experimental validation in Mediterranean shrub fuels of seven wildland fire rate of spread models. International Journal of Wildland Fire 10: 15-22.

Schaaf MD, Wiitala M, Carlton D, Snell K, Ottmar R. (1998) Modeling the tradeoffs between prescribed fire and wildfire emissions in forest and range land ecosystems. Viegas DX (Ed.) Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Forest Fire Research. Coimbra. Pp. 1673-1685.

Serrasolsas I, Ferran A, Vallejo VR. (1989) Reconstrucción de los horizontes orgánicos tras el incendio en la garriga del macizo del Garraf (Barcelona). Options Méditerranéennes. Série Séminaires 3: 107-110.

Shinozaki K, Yoda K, Hozumi K, Kira T. (1964) A quantitative analysis of plant form- pipe model theory. I. Basic analyses. *Japanese Journal of Ecology*. 14: 97-105.

Specht RL. (Ed.) (1988) *Mediterranean-type Ecosystems. A data source book*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.

van Wagendonk JW. (1996) Use of a Deterministic Fire Growth Model to Test Fuel Treatments. A: Sierra Nevada Ecosystem Project (SNEP). Status of the Sierra Nevada. Vol. II. Assessments and scientific Basis for Management Options. Wildland Resources Center Report No. 37. University of California, Davis. Pp. 1155-1164.

Vélez R. (2000) (Ed.) *La defensa contra los incendios forestales. Fundamentos y experiencias*. McGraw-Hill. Madrid.

Viegas DX. (1997) Modeling surface-fire behaviour. A: Balabanis P, Eftichidis G, Fantechi R. (Eds.) *Forest fire risk and management. Proceedings of the European School of Climatology and Natural Hazards course*. European Commission Report. Pp. 65-79.

## **CAPÍTOL 5**

### **Exercicis de validació del mòdul arbustiu de GOTILWA+ en ecosistemes mediterranis**

**Abstract** *Successional fuel dynamics in Mediterranean shrublands: validation of the GOTILWA+ shrubland module.*

The shrubland module of the forest model GOTILWA+ simulates the shrubland biomass growth from the water dynamics and system carbon fluxes. The module has been developed, evaluated and calibrated satisfactorily. This paper presents the results of different simulation and validation exercises using field data from studies in garrigues dominated by *Quercus coccifera* (kermes oak) in Catalonia and southern France. The model is able to reproduce realistically the successional dynamics of plant biomass according to the model purposes (mechanistic based framework and output applicability) and considering the level of assumed simplifications.

## Resum

El mòdul arbustiu del model forestal GOTILWA+ permet la simulació del creixement d'una coberta arbustiva a partir de la dinàmica de l'aigua i els fluxos de carboni del sistema. El mòdul ha estat desenvolupat, avaluat i calibrat satisfactòriament. En aquest treball es recullen els resultats de diferents exercicis de simulació i validació del model a partir de dades d'estudis de camp en garrigues a Catalunya i al Baix Lenguadoc. El model reproduïx de forma realista la dinàmica successional de la biomassa vegetal, segons els objectius del model (base mecànística i aplicabilitat de les sortides) i atenent al nivell de simplificacions assumides.



## 1. Introducció

El foc és una de les principals perturbacions als ecosistemes mediterranis (Naveh 1974, Trabaud i Galtié 1996). La predicció del règim de focs ha esdevingut una de les principals prioritats científiques i de gestió, de cara a establir criteris en les intervencions preventives i a l'hora d'assignar recursos públics escassos (Lagarde 1994). La preocupació actual als països de la riba nord de la conca mediterrània se centra en el control de la fenomenologia dels grans incendis i de l'elevada recurrència del foc en determinades àrees (Moreno 1998, Díaz-Delgado i Pons 2001). La necessitat de dotar d'eines operacionals que ajudin a la presa de decisions en el camp de la gestió és evident. Aquestes eines hauran d'estar vinculades a la sensibilitat de cada comunitat al foc i a la seva capacitat regenerativa (Lagarde 1994, Caraglio *et al.* 1996).

Una d'aquestes eines són els models de dinàmica de combustible, que són models de creixement de la vegetació que posen un especial èmfasi en la dinàmica de les propietats estructurals de la vegetació en relació al risc d'incendi i generen unes sortides acoblables a models de comportament del foc (Raison *et al.* 1983, Bilgili i Methven 1994, Keane *et al.* 1996).

Els models de dinàmica de combustible són útils a l'hora d'avaluar l'efectivitat de diferents opcions de gestió del combustible (van Wagtendonk 1996). Les polítiques preventives en força països de l'àrea mediterrània europea (Rodà 1998, Peix 1999, Vélez 2000) posen l'atenció en la creació de discontinuïtats en les masses forestals. La gestió territorial requereix, però, d'una necessària innovació metodològica i de l'ampliació del coneixement de base dels sistemes afectats. La comprensió de la resposta de les comunitats forestals mediterrànies als diferents règims de gestió i perturbació es troba encara, al nostre país, en un estadi inicial (Terradas 1996).

El mòdul arbustiu del model forestal GOTILWA+ (Gracia *et al.* 1999) ha estat desenvolupat amb aquesta finalitat. Permet la simulació del creixement d'una coberta arbustiva a partir de la dinàmica de l'aigua i els fluxos de carboni del

sistema. Es tracta d'un model semimecanístic, fonamentat principalment en processos ecofisiològics de base. El model es nodreix d'un seguit de paràmetres d'entrada de caràcter climatològic, de l'estructura i funcionament de la coberta, i de les característiques hidrològiques i funcionals del sòl (referents a la conductivitat hidràulica i als fluxos de carboni del sòl).

El mòdul arbustiu de GOTILWA+ ha estat calibrat satisfactòriament i ha estat sotmès a una anàlisi de sensibilitat per a testar la seva robustesa (*capítol 4*). A fi de completar el desenvolupament del model i verificar-ne la seva aplicabilitat i nivell de realisme, en el present treball s'exposen dues experiències de validació del model en comunitats similars però en diferents contextos a partir de dades reals recollides per altres autors en cronoseqüències de vegetació arbustiva a la riba nord de la conca mediterrània.

## 2. Mètodes

El desenvolupament d'un model conclou amb la seva validació (Jørgensen 1988). Consisteix en provar el model formalment a partir de l'observació directa de dades reals. En aquest sentit, s'ha utilitzat el mòdul arbustiu de GOTILWA+ per a fer prediccions sobre el comportament de la vegetació arbustiva mediterrània sota determinades circumstàncies ambientals. Aquestes prediccions han de ser provades, ja sigui a partir d'experimentació directa o bé a partir de referències de dades ja recollides. Aquests conjunts de dades no han d'haver intervingut en el procés de calibratge del model (Jeffers 1991).

Així doncs, s'han recopilat dades en comunitats similars a les que han estat emprades en el calibratge del model (*capítols 3 i 4*; Pla i Rodà 1999) en dos indrets contrastats (taula 2): (1) els estudis de garrigues al Baix Lenguadoc, als voltants de Montpeller, (Long *et al.* 1967, Trabaud 1980, Godron *et al.* 1981, Rapp i Lossaint 1981, Specht 1981, Trabaud 1982, Malanson i Trabaud 1988, Rambal 1988, Trabaud 1991, Papió 1994) i (2) els estudis de garrigues al Garraf, serralada litoral al sud de Barcelona, (Sala 1986, Sabaté 1986, Papió 1994). Aquestes àrees d'estudi, de caràcter típicament mediterrani, es troben ubicades en serralades properes al litoral, damunt de calcàries dures. Al Garraf,

la precipitació anual mitjana es troba compresa entre els 500-550 mm, i la temperatura anual mitjana se situa al voltant dels 16,8 °C. Les àrees d'estudi del Baix Llenguadoc presenten un clima més humit (900-1000 mm de precipitació mitjana anual) i més fred (de 13 a 15 °C de temperatura mitjana anual). Es pot trobar una descripció detallada de les àrees escollides a Papió (1994) per al Garraf, i a Floret *et al.* (1989) per als indrets del Baix Llenguadoc. La vegetació a les dues àrees d'estudi és la garriga (matollar dominat pel garric *Quercus coccifera*). Per a l'abast i objectius del present treball, les diferències principals entre ambdues àrees d'estudi, se centren en les condicions ambientals i la hidrologia del sòl. La informació continguda en aquests treballs ha permès inicialitzar de nou el model amb les dades requerides sobre les biomasses d'entrada de la comunitat.

Les dades inicials de biomasses han correspost a les recollides en el primer o primers anys d'edat regenerativa de les cronoseqüències estudiades (Taula 1). En cas de disposar de dues dades per a una mateixa edat, s'ha utilitzat la mitjana aritmètica d'ambdós valors. Aquestes comunitats presenten, sovint condicionades pel règim històric de pertorbacions, una relació biomassa subterrània/biomassa aèria notablement elevada. Per a les dues formacions estudiades s'ha pres una relació biomassa subterrània/biomassa aèria de 2, valor mig en consonància amb els descrits per a comunitats mediterrànies similars a la conca mediterrània (Rapp i Loissant 1981, Cañellas i San Miguel 2000).

Aquesta informació estructural s'ha complementat amb la climatologia (dades diàries de precipitació, temperatura, radiació, dèficit de pressió de vapor i velocitat del vent) i la hidrologia del sòl (profunditats i pedregositats mitjanes del sòl) de cada indret.

L'absència d'informació de l'ecofisiologia de la coberta diferenciada per a les dues zones d'estudi ha motivat que s'adoptés el compendi de dades recollides per al calibratge previ en matollars mediterranis calcícoles dominats per *Quercus coccifera* (capítol 4). El nivell de simplificació que aquesta adopció comporta és, tanmateix, assumible en el nostre context si comparem el nivell

de detall que es deriva del caràcter avaluatiu de l'exercici de validació amb l'esforç intensiu que requereix la recollida d'informació de base d'aquest tipus.

En ambdues zones, damunt del substrat calcari, s'hi han desenvolupat sòls rogencs de tipus fersialític. La majoria de característiques edàfiques dels sòls utilitzats s'han considerat relativament similars. Tanmateix, els sòls de les garrigues estudiades al Baix Lenguadoc presenten una pedregositat més elevada (75%) ja que les roques es troben més fragmentades que no pas al Garraf (pedregositat 25%) (Papió 1994). La gruixària del sòl també ha estat diferent: per a les simulacions del Garraf, amb sòls poc evolucionats, s'han pres gruixos mitjans de 0,3 m de profunditat (Papió 1994), mentre que al Baix Lenguadoc s'han considerat gruixos més elevats (2 m) (Mouillot *et al.* 2001). El rang d'alçades on s'ubiquen les àrees estudiades es troba entre els 120 i els 470 m sobre el nivell del mar.

**Taula 1.** Biomassa aèria i foliar, necromassa i LAI observades en garrigues de referència i resultats de les simulacions

	Biomassa foliar (t ha <sup>-1</sup> )	Biomassa aèria total (viva i morta) (t ha <sup>-1</sup> )	Necromassa (t ha <sup>-1</sup> )	LAI (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	Anys d'edat regenerativa
<b>GARRAF</b>					
<i>Observat</i>					
Sala, Sabaté (1986)		1,68			1
Papió (1994)	1,14	2,17			1
Papió (1994)	2,82	5,43			2
Sala, Sabaté (1986)		2,84			3
Papió (1994)	2,90	7,07			3
Sala, Sabaté (1986)		8,63			5
Papió (1994)	2,04	5,39	0,1		5
Sala, Sabaté (1986)		6,46			7
Sala, Sabaté (1986)		10,83		2,38	13
Papió (1994)	2,55	16,70	3,0		-16
<b>Simulat 15-20 anys<sup>a</sup></b>	2,35 (0,13)	14,38 (0,97)	2,15 (0,15)	1,30 (0,07)	15-20
<b>BAIX LENGUADOC</b>					
<i>Observat</i>					
Malanson i Trabaud (1988)	3,00	6,96		1,8	3
Long <i>et al.</i> (1967)	1,55	5,35			6
Malanson i Trabaud (1988)	4,60	17,71		3,2	9
Rapp i Lossaint (1981)	4,00	23,50			17
Trabaud (1980)		28,50			28
Trabaud (1991)		27,02			30
Trabaud (1991)		32,8			36
Rambal (1988, 1993)				2,5	37
<b>Simulat 30-40 anys<sup>a</sup></b>	6,35 (0,73)	26,87 (0,51)	3,49 (0,39)	3,80 (0,18)	30-40

<sup>a</sup>Corresponen als promitjos dels resultats en el períodes assenyalat. En parèntesi s'hi mostren les desviacions estàndard per als períodes avaluats.

Les dades climatològiques s'han obtingut a partir de diferents sèries de les estacions meteorològiques de Vilanova i la Geltrú (UTM 392000, 4562000) pel Garraf i Puéchabon (UTM 546980, 4842500) pel Baix Lluçanès. A partir d'aquests registres diaris disponibles s'han generat, amb el mòdul climatològic de GOTILWA+ (Gracia *et al.* 2002), sèries diàries de 50 anys de durada respectivament. Aquest mòdul climatològic de GOTILWA+ permet generar sèries de diferent durada amb el mateix patró estadístic que les dades originals observades. Per a reproduir el patró estadístic de cadascuna de les variables es genera la sèrie de 50 anys de dades diàries de manera que els valors mensuals de cadascuna de les variables tenen la mateixa mitjana i desviació estàndard que els valors observats i, a més, la seqüència dels valors diaris s'ajusta a una matriu de probabilitat markoviana que s'elabora a partir de la sèrie original (Gracia *et al.* 1999). Per a cadascuna de les variables analitzades i per a cada mes de l'any, es calcula una matriu com la de la Taula 2.

**Taula 2.** Matriu markoviana utilitzada en el generador de clima del model GOTILWA+.

	$X_d < m$	$X_d = m$
$X_{d+1} < m$	$p_1$	$p_2$
$X_{d+1} = m$	$p_3$	$p_4$

Els quatre valors de la matriu representen les probabilitats que el valor de la variable  $x$  en el dia  $d+1$  sigui inferior al valor mig de la variable quan el dia anterior  $d$  també va ser inferior a la mitjana ( $p_1$ ), o el seu homòleg si el dia anterior la variable va presentar un valor igual o superior a la mitjana mensual ( $p_2$ ). Anàlogament es calculen els valors  $p_3$  i  $p_4$  que corresponen al cas que la variable presenti en el dia  $d+1$  un valor igual o superior al valor mig mensual

quan el dia anterior va presentar, respectivament, un valor inferior o bé igual o superior a la mitjana. En resum, la matriu comptabilitza la probabilitat estadística que després d'un dia, per exemple, més fred que la temperatura mitjana mensual se'n doni un altre de més fred o alternativament un dia més càlid.

La durada de les simulacions ha estat condicionada per la disponibilitat de dades reals per a la seva validació. Així, la durada per a la simulació del Garraf ha estat de l'any 1 a l'any 20 després del foc i la simulació del Baix Lluçanoves ha estat de l'any 1 a l'any 40.

### 3. Resultats

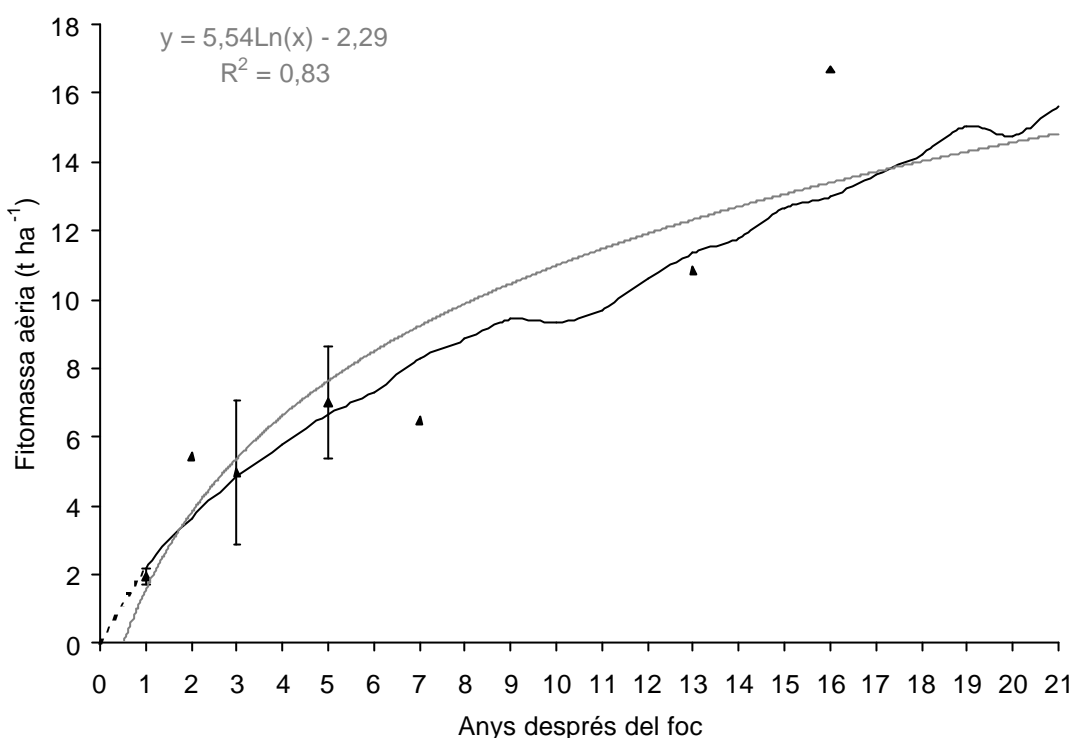
La capacitat del model de reproduir els fluxos de carboni i d'aigua en el sistema s'ha validat principalment comparant les dades de biomassa de les simulacions (expressada en pes sec (PS) per unitat de superfície) amb aquelles recollides als estudis citats (Taula 2). Podem contrastar el grau d'ajustament als valors observats en els diferents paràmetres per part de les mitjanes integrades per als darrers 10 anys de simulació. Els resultats han de ser llegits de forma genèrica i dins d'un marge ample d'ajustament. Cal tenir present que la sèrie de dades climatològiques diàries subministrada no es correspon al registre real per als anys observats. S'ha de recordar, doncs, que les dades meteorològiques emprades a la simulació són una sèrie creada estadísticament per a reproduir les condicions del clima local.

Les tendències successionalis a les formacions simulades, pel que fa a l'acumulació de biomassa aèria, al Garraf i al Baix Lluçanoves per a un període de 20 i 40 anys després del foc respectivament, es recullen a les figures 1 i 2. A cada figura s'hi han representat, a més, els valors reals observats per a cada àrea d'estudi i per a les edats regeneratives indicades. Alhora, s'hi ha sobreposat la corba de tendència estadística resultant de la regressió de les dades observades. Per a les dues simulacions, les corbes representades s'ajusten, com és habitual, a una tendència logarítmica amb un creixement elevat en els primers anys després de la pertorbació i una estabilització

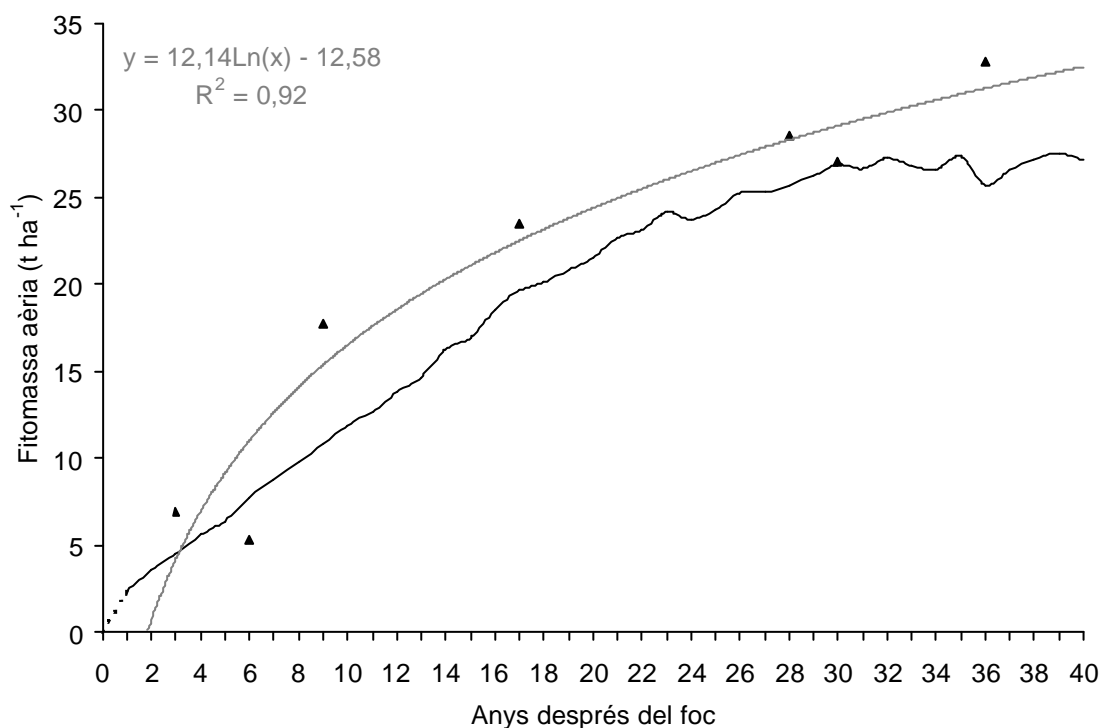
progressiva amb la maduresa de la comunitat. Les dues formacions presenten un comportament asimptòtic a partir dels 20 anys després del foc, entre les 20-30 t ha<sup>-1</sup> en el cas de les garrigues del Baix Lenguadoc i, entre les 15-20 t/ha en el cas de les garrigues del Garraf. A les figures 3 i 4 s'hi pot comparar el grau d'ajustament entre els valors mesurats i els observats per als dos indrets estudiats.

Les productivitats de les comunitats simulades s'ajusten notablement a les dades recollides i compilades per Papió (1994) per al Garraf i el Baix Lenguadoc (figura 5). Les comunitats estudiades presenten un creixement elevat els tres primers anys després del foc (entorn les 2 t ha<sup>-1</sup>any<sup>-1</sup>). Sovint, aquest increment de biomassa (llenyosa i foliar) supera el doble d'allò que creix la comunitat a partir del 4t o 5è any després de la pertorbació. L'increment de biomassa aèria s'estabilitza al voltant d'1 a 0,5 t ha<sup>-1</sup>any<sup>-1</sup> en garrigues madures.

D'altres paràmetres associats a l'increment de biomassa i, més estrictament relacionats amb la dinàmica foliar, són l'evolució del quocient fulles/fusta i el quocient fulles/biomassa total, que mostren una disminució amb l'edat regenerativa de la comunitat (figura 6). A Sala *et al.* (1987) el quocient fulles/biomassa aèria total presenta una tendència lineal negativa (fig. 6b). A Papió (1994), la relació fulles/biomassa llenyosa presenta una tendència exponencial negativa (fig. 6a). Els resultats de les simulacions s'ajusten a aquests patrons, en els quals la proporció de fulles respecte a la resta de components de biomassa és màxima en els primers anys de la successió.

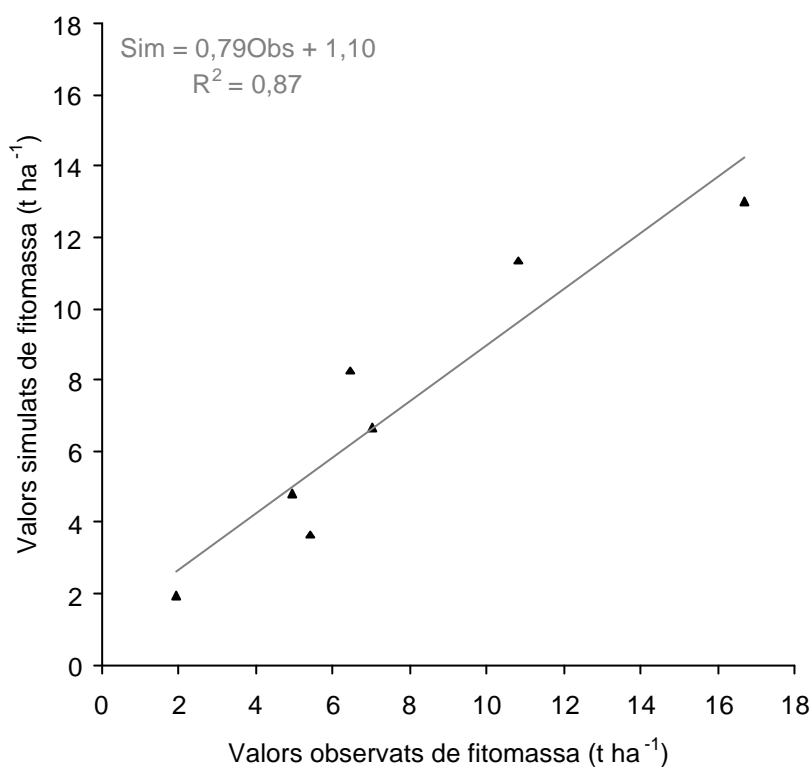


**Figura 1.** Acumulació de fitomassa aèria total (pes de sec de materials vius i morts) a les garrigues del Garraf. En traç gruixut s'hi mostren els resultats de la simulació. En triangles s'hi mostren les dades observades en cronoseqüències per Sala *et al.* (1987) i Papió (1994). Als punts que són la mitjana aritmètica de dues dades s'hi mostra la barra d'error estàndard. En traç fi (i en l'equació de la cantonada esquerra del gràfic) s'hi mostren els resultats de la regressió logarítmica de les dades observades.

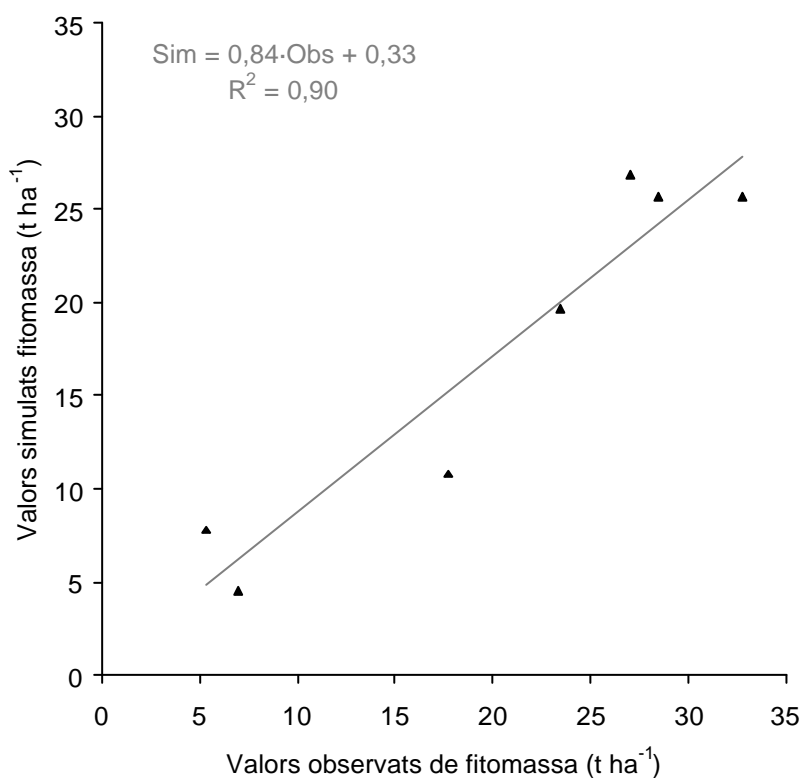


**Figura 2.** Acumulació de fitomassa aèria total (pes de sec de materials vius i morts) a les garrigues del Baix Lenguadoc. En línia contínua s'hi mostren els resultats de la simulació. En triangles s'hi mostren les dades observades en cronoseqüències per Long *et al.* (1967), Trabaud (1980), Rapp i Lossaint (1981), Malanson i Trabaud (1988) i Trabaud (1991), i en traç fi (i en l'equació de la cantonada esquerra del gràfic) s'hi mostren els resultats de la regressió logarítmica de les dades observades.

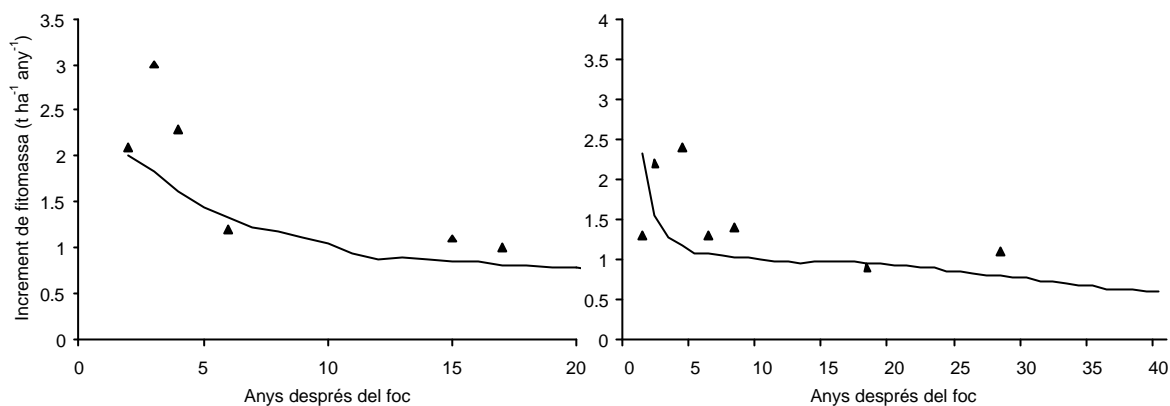




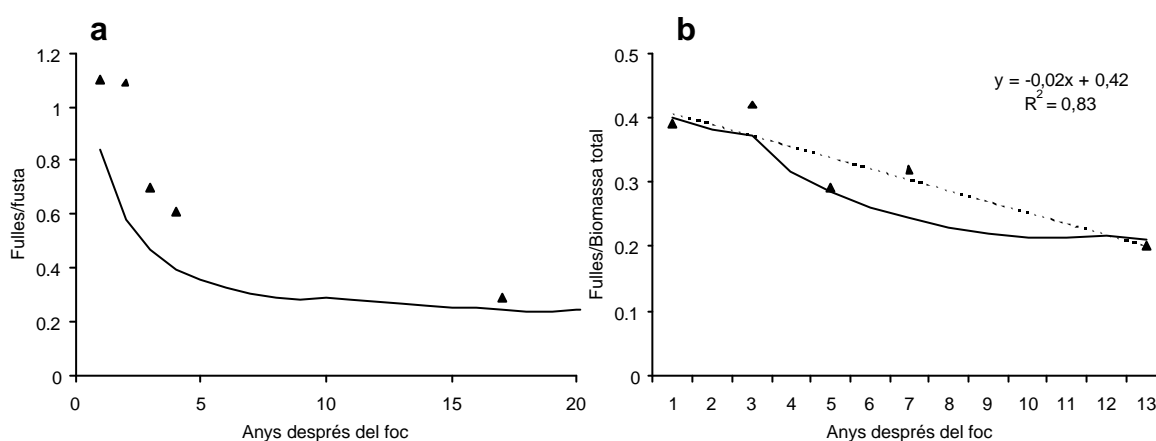
**Figura 3.** Comparació entre les dades de fitomassa aèria mesurades al Garraf i els valors simulats per al mateix indret pel mòdul arbustiu de GOTILWA+. S'hi inclou l'ajustament lineal entre les dues sèries de dades.



**Figura 4.** Comparació entre les dades de fitomassa aèria mesurades al Baix Lluenguadoc i els valors simulats per al mateix indret pel mòdul arbustiu de GOTILWA+. S'hi inclou l'ajustament lineal entre les dues sèries de dades.



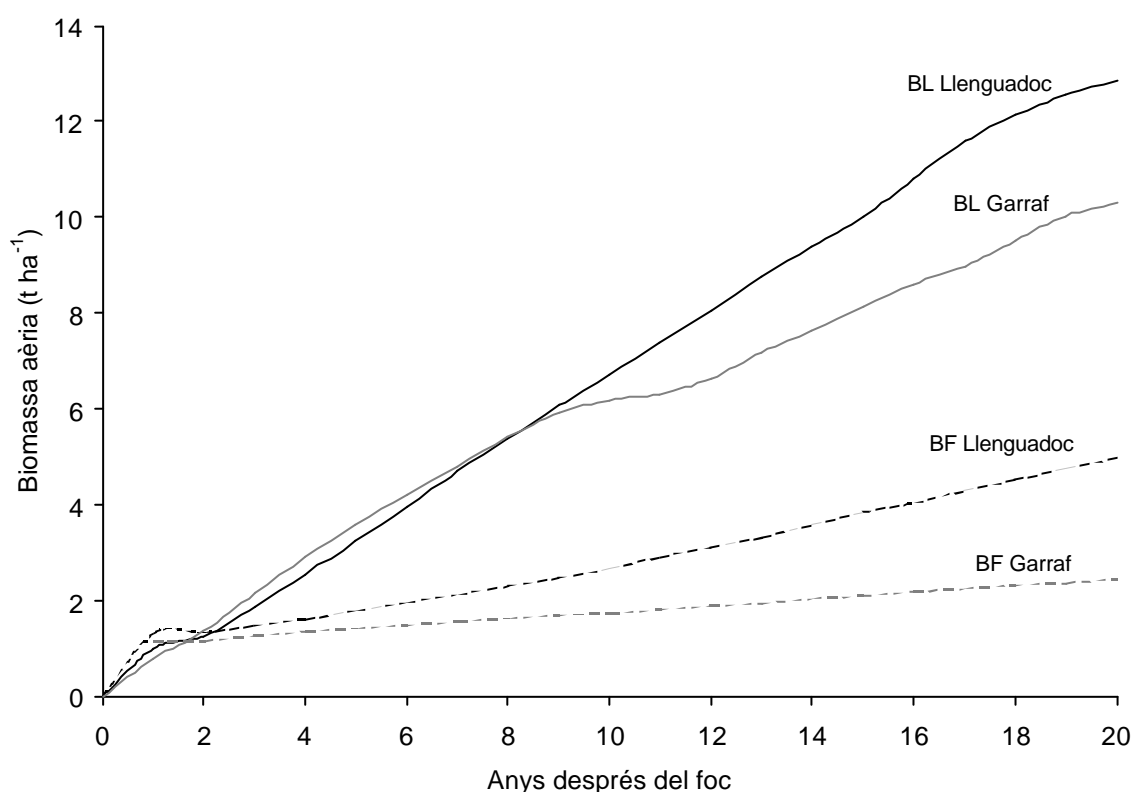
**Figura 5.** Increment de fitomassa aèria total a les garrigues del Garraf (esquerra) i Baix Lluçanoves (dreta). En línia contínua s'hi mostren els resultats de la simulació. En triangles s'hi mostren les dades recollides per Papió (1994) en estudis als mateixos indrets.



**Figura 6.** Evolució al llarg de la successió de la relació de la biomassa foliar/biomassa llenyosa (esquerra, **a**) i la biomassa foliar/biomassa aèria total (dreta, **b**) per a garrigues del Garraf. En línia contínua s'hi mostren els resultats de la simulació. A l'esquerra, en triangles, s'hi mostren les dades recollides per Papió (1994). A la dreta, en triangles, s'hi mostren les dades de Sala *et al.* (1987), en línia discontinua (i en l'equació de la cantonada dreta del gràfic) s'hi mostren els resultats de la regressió lineal de les dades observades.

Mentre la fitomassa llenyosa simulada (figura 7) presenta una tendència creixent al llarg de les edats avaluades, la biomassa foliar presenta una dinàmica pròpia caracteritzada per un creixement inicial elevat i una estabilització posterior. Aquesta tendència successional de la fracció foliar es relaciona, a nivell estructural i funcional, amb els processos ecofisiològics implicats en la producció de fulles i en l'evolució de l'índex d'àrea foliar (LAI). Val a dir, que els valors de les fraccions llenyosa i foliar al final de la simulació

del Garraf són força comparables amb els observats per Papió en una garriga del mateix massís on trobà, en comunitats d'aproximadament 16 anys d'edat regenerativa, una biomassa foliar de  $2,55 \text{ t ha}^{-1}$  i una biomassa llenyosa d' $11,15 \text{ t ha}^{-1}$  (Papió 1994). La producció de fulles presenta els valors màxims a les fases inicials de la successió i la seva limitació es dona ja en estadis primerencs de la successió, condicionada per les constriccions ambientals i l'accés als recursos. La biomassa aèria total de la comunitat s'estabilitza en estadis posteriors, fet que es tradueix en un decreixement del quocient entre la biomassa foliar i la biomassa aèria total (o llenyosa) amb l'edat regenerativa. Les garrigues estudiades presenten una evolució d'aquesta relació de 0,4 en els estadis inicials a 0,2 en estadis madurs (figura 6b), valors comuns als recollits també als *chaparrals* californians (Gray i Schlesinger 1981).

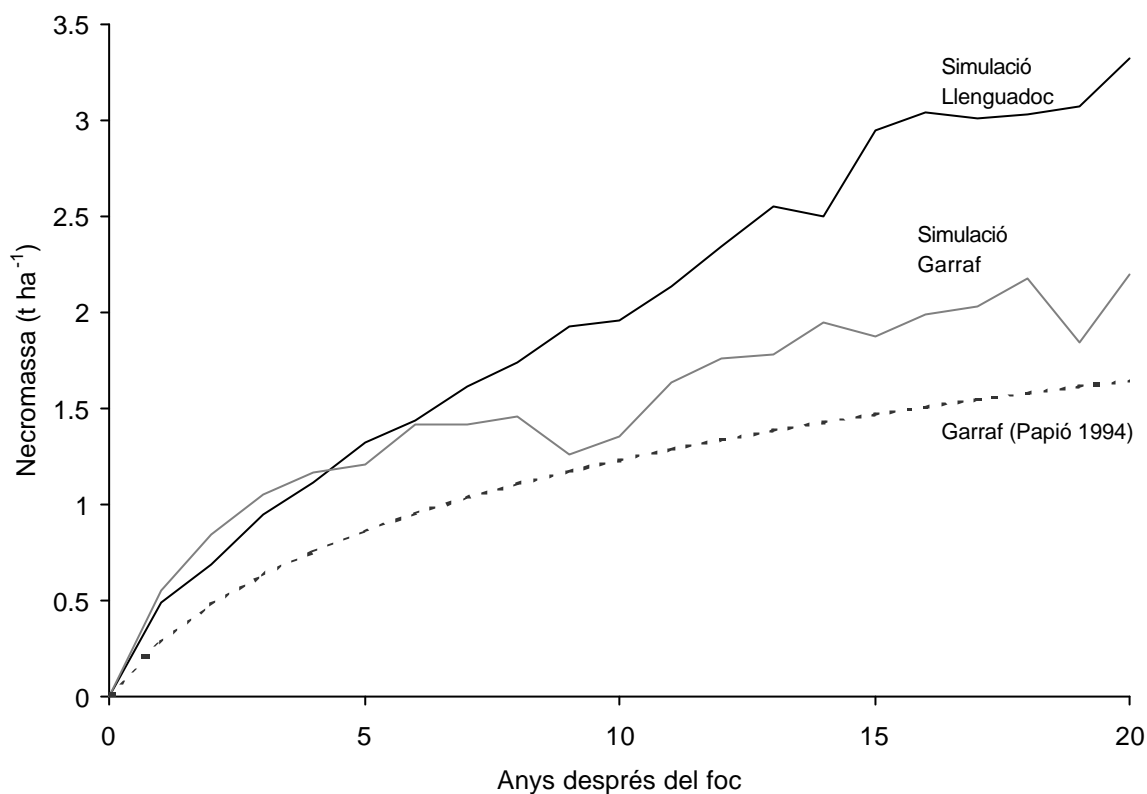


**Figura 7.** Acumulació de fitomassa aèria llenyosa (BL) i foliar (BF) per a les garrigues del Baix Lluçanoves i del Garraf segons els resultats de les simulacions.

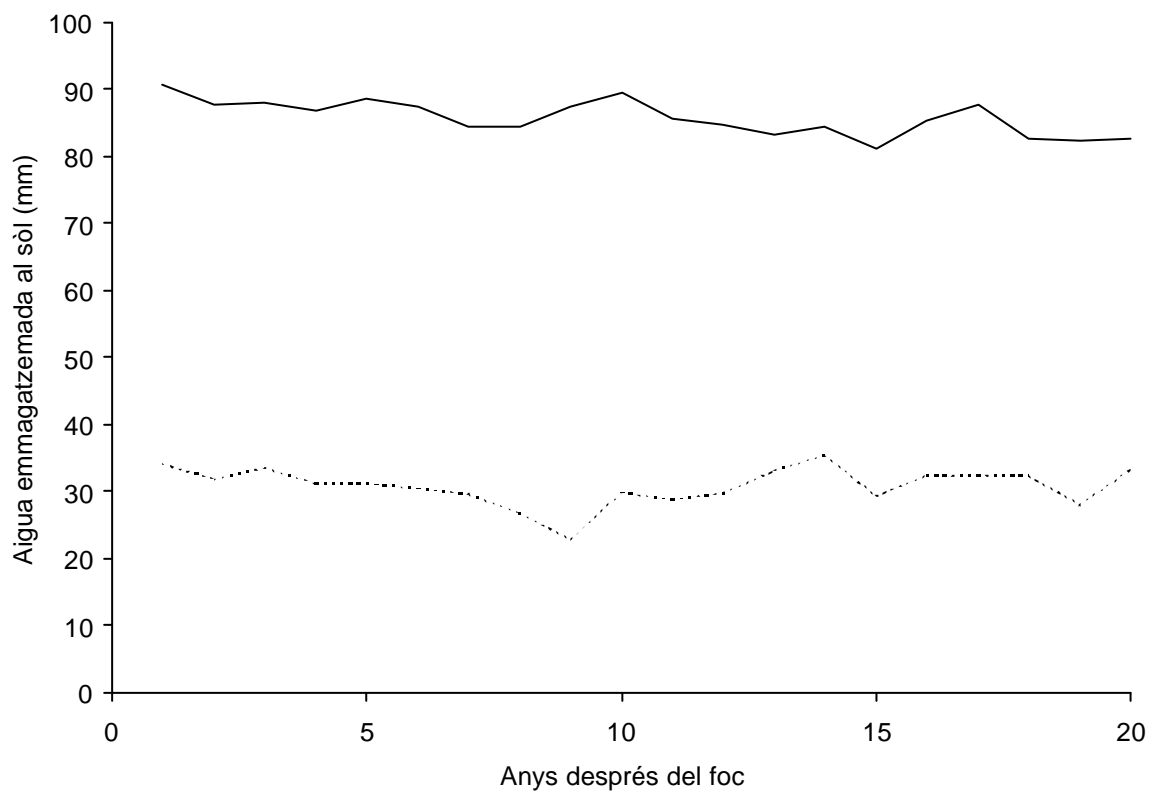
Cal observar, però, que paràmetres associats a la biomassa foliar com el LAI presenten una elevada variabilitat espacial i temporal, associada a les condicions microclimàtiques i microtopogràfiques (Sala 1986, Rambal 1993), que en fan difícil la comparabilitat ja dins d'una mateixa cronoseqüència. Aquesta dificultat també es fa present a l'hora de comparar els resultats de les simulacions amb les dades observades a diferents estudis de camp (taula 1).

La necromassa (material mort en peu) segueix un patró fortament relacionat amb la dinàmica de la biomassa aèria (figura 8). La vegetació en aquests períodes inicials està pràcticament desproveïda de material mort del tipus estructural (si menystenim les restes de l'incendi anterior que restin drets), que serà força important en els períodes posteriors de la successió tal i com mostra l'evolució d'aquesta fracció en les simulacions.

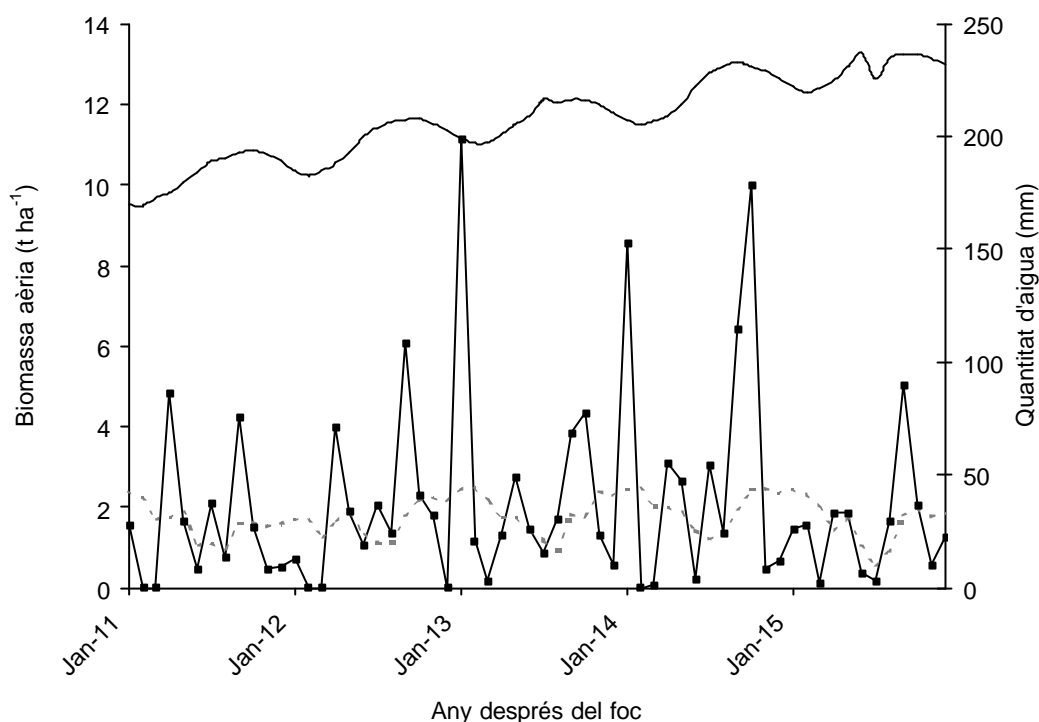
Pel que fa a la disponibilitat d'aigua al sòl, la figura 9 mostra les tendències interanuals a les dues àrees simulades. Pel que fa als resultats de Montpeller, aquests s'han pogut comparar amb les dades de Mouillot *et al.* (2001) que estableix, en comunitats forestals d'aquesta zona, un rang intraanual de contingut d'aigua al sòl comprès entre els 40 i els 170 mm. Pel que fa al Garraf, les dades es troben en el rang d'allò mesurat en diferents treballs experimentals a l'àrea d'estudi (Marc Estiarte, comunicació personal) i amb una mitjana anual de 30,6 mm per a tota la simulació. Aquest valor és molt proper als 32 mm, contingut d'aigua al sòl mig simulat a Catalunya per a l'any 2000 (Gracia *et al.* 2002). La relació estacional entre el creixement de la vegetació i la disponibilitat d'aigua al sòl, i d'aquesta amb la precipitació, es pot analitzar a la figura 10. S'hi observa el patró intranual de productivitat típicament mediterrani (amb unes fases de creixement marcadament ubicats a la primavera, una estabilització estival i un decreixement hivernal) condicionat bàsicament per les fluctuacions en la disponibilitat d'aigua i per la temperatura.



**Figura 8.** Acumulació de necromassa al Baix Lenguadoc i al Garraf segons els resultats de la simulació. En línia discontinua s'hi mostra la regressió que obtingué Papió (1994) per a les dades recollides al Garraf.

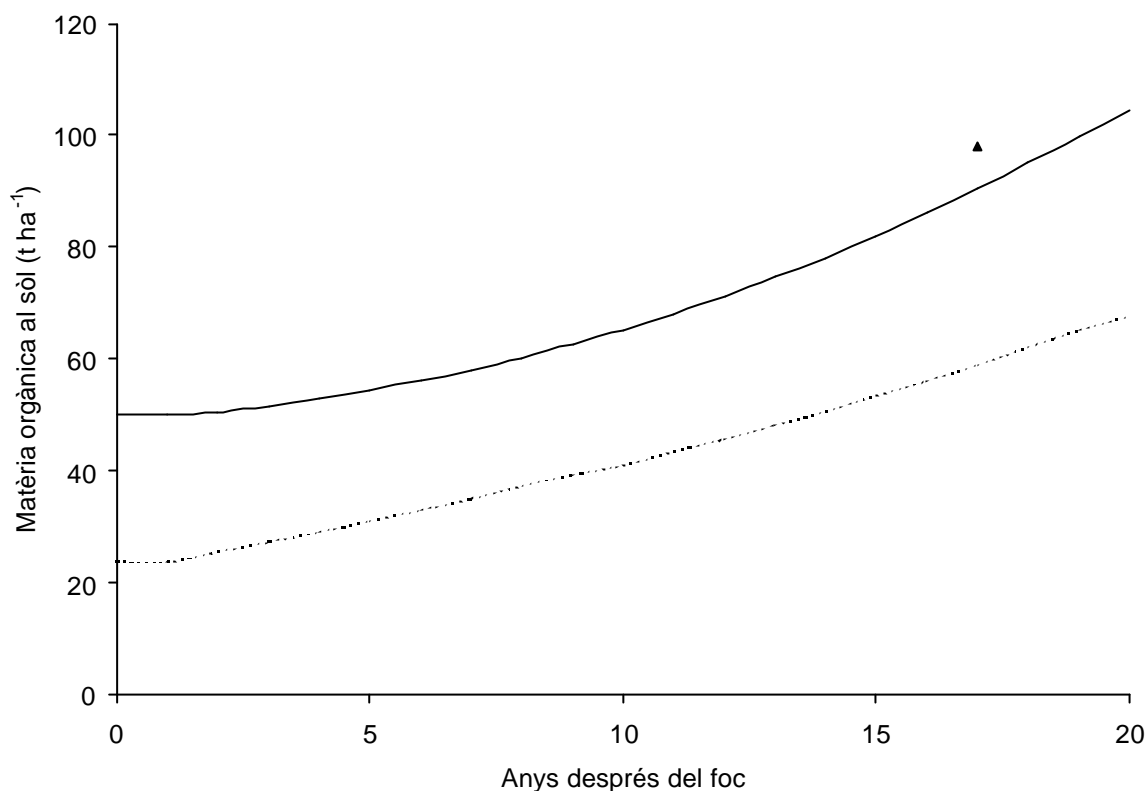


**Figura 9.** Quantitat mitjana anual d'aigua emmagatzemada al sòl per a les simulacions del Baix Lenguadoc (línia contínua) i al Garraf (línia discontinua).

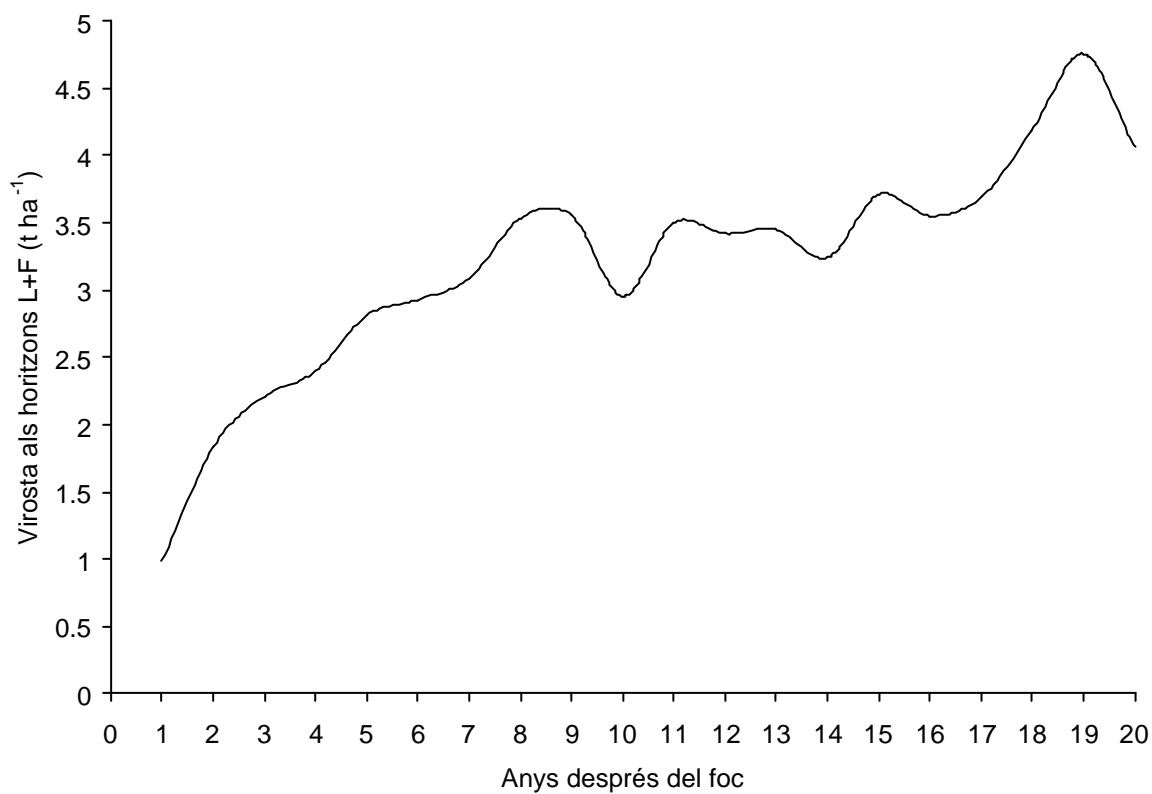


**Figura 10.** Evolució de les mitjanes mensuals de biomassa aèria total (línia de traç gruixut) i la precipitació (línia de traç fi amb punts) i l'aigua emmagatzemada al sòl (línia grisa discontinua) per a la simulació del Garraf, del gener de l'11è any de simulació al desembre del 15è.

La figura 11 mostra les diferències en el contingut de matèria orgànica del sòl per als dos sistemes simulats. Aquests resultats, per a la simulació de Montpeller i per bé que puntualment, han trobat la seva concordança amb les dades recollides per Rapp i Loissant (1981) que troben en garrigues de 17 anys d'edat regenerativa valors compresos entre les 82 i les 114 t ha<sup>-1</sup> de matèria orgànica al sòl. A la figura 12 s'hi mostra l'evolució del contingut de virosta als horitzons orgànics simulada pel model a la garriga del Garraf. Aquest resultat es troba en acord amb les mesures fetes per Serrasolsas *et al.* (1989) també en una garriga al Garraf on trobaren que la comunitat estableix el contingut de virosta al sòl cap als 15 anys d'edat regenerativa al voltant de les 5 t ha<sup>-1</sup>.



**Figura 11.** Acumulació de matèria orgànica al sòl per a les simulacions del Baix Lluçanès (línia contínua) i al Garraf (línia discontinua). En un triangle s'hi mostren les dades recollides per Rapp i Loissant (1981) en una garriga del Baix Lluçanès.



**Figura 12.** Acumulació de virosta als horitzons orgànics per a la simulació del Garraf.

#### 4. Discussió

Aquest treball descriu els resultats de validació del mòdul arbustiu de GOTILWA+, un model funcional específic per a la vegetació arbustiva i amb una clara orientació a la gestió preventiva del risc d'incendi. Malgrat que el model no és un model biogeoquímic, la dinàmica del sistema ve determinada pels processos ecofisiològics relacionats amb el cicle del carboni i de l'aigua. Tot i les simplificacions adoptades, el model és capaç d'ajustar-se raonablement bé als fluxos principals de carboni en el sistema. En aquest sentit, el model és sensible a la relació entre la disponibilitat d'aigua, el creixement de la vegetació (especialment condicionat i regulat pel compartiment de biomassa foliar) i la incorporació i descomposició de la matèria orgànica al sòl. El balanç entre mortalitat de fraccions de la vegetació (abscisió, senescència, mortalitat per condicions extremes) i increment de biomassa és el que ens explica, instantàniament, les diferències de biomassa al llarg de la successió.

Les sortides del model posen l'accent especialment en l'evolució successional de la fitomassa aèria, dels seus compartiments i d'altres paràmetres associats. La comparació de les tendències d'acumulació de fitomassa aèria simulades respecte les observades (figures 1-2), mostra unes lleugeres discrepàncies per les quals els valors de la simulació són, generalment, inferiors als valors observats. Val a dir que aquestes diferències observat-simulat pel que fa a les fitomasses aèries (figures 3-4) es poden deure als diferents criteris de mostreig en la recollida de dades dels treballs experimentals de base respecte als utilitzats en el calibratge del model (*capítol 3*). La majoria dels treballs que recullen dades d'acumulació de fitomassa en cronoseqüències es basen en la recollida de biomassa aèria de quadrats de mostreig de determinada superfície. D'una banda, el criteri de selecció dels quadrats (si es troben centrats en individus, si exclouen o no clarianes) i, d'altra banda, la mida dels quadrats o superfícies de mostreig són aspectes metodològics rellevants si es considera l'heterogeneïtat espacial de la comunitat. Així, alguns dels treballs emprats en la validació (especialment, aquells amb un èmfasi individual més elevat i una mida del quadrat de mostreig més petita) poden estar



sobreestimant la fitomassa aèria (viva i morta per unitat de superfície) en indrets de recobriment inferior al 100% (capítol 2).

La fitomassa aèria ens indica la quantitat màxima de combustible que podria consumir-se en un foc de màxima intensitat (càrrega de combustible potencial). La quantitat de combustible determina o influeix bona part de les propietats de comportament del foc: la taxa de propagació, l'alçada de la flama o la potència del front entre d'altres (Chandler *et al.* 1983). En formacions arbustives com el *chaparral* californià, se sol predir un augment de la intensitat i propagació del foc en comunitats de 10 a 20 anys d'edat (Rothermel i Philpot 1973). Aquest augment ve determinat per la presència de material mort en prou proporció com per poder dessecar els material vius i implicar-los en la combustió. La proporció de material morts varia segons l'edat, l'espècie, l'esdeveniment de períodes crítics i la competència entre individus i dintre dels mateixos individus. L'evolució del compartiment de matèria orgànica del sòl ens expressa el balanç entre la incorporació de nova matèria orgànica morta (provinent de la virosta i de la mortalitat d'arrels) i la seva descomposició, regulada per factors climàtics i edàfics. En aquest sentit, els resultats de la validació per a les dues àrees d'estudi simulades s'ajusten raonablement a aquestes observacions.

Les garrigues comparades en aquest experiment de validació eren idèntiques, en la simulació, pel que fa als paràmetres ecofisiològics i funcionals incorporats. Els valors d'aquests paràmetres han estat derivats de la literatura o de treballs previs i, genèricament, descriurien i caracteritzarien una comunitat hipotètica d'un matollar perennifoli i esclerofil·le proper a la garriga. El grau de precisió en la determinació del valor d'aquests paràmetres no és tan interessant en aquesta discussió com l'anàlisi de la resposta de la vegetació a aquells paràmetres que sí que han estat diferents entre les dues àrees d'estudi. Així, les principals diferències en les respostes recollides als resultats per a les dues garrigues han estat determinades, principalment, per la interacció dels paràmetres ambientals: climatològics i hidrogeològics, a més de la inercialització de la biomassa aèria pròpia per a cada indret. L'evolució del LAI al llarg de totes dues simulacions és la traducció més evident d'aquesta dependència de la vegetació (que recull plenament el mòdul arbustiu de GOTILWA+) a la

disponibilitat d'aigua i que ve conduïda per l'evapotranspiració. Aquest gran acoblament entre les condicions hídriques locals i l'estat puntual de la vegetació fa d'aquest model una eina interessant per a determinar episodis d'elevada inflamabilitat de la vegetació (Viegas *et al.* 1998).

Pel que fa als objectius inicials del model i a la seva clara vocació aplicada, el model permet la predicció de la tendència de components rellevants de la combustibilitat de la comunitat, com ara la dinàmica de la necromassa a la coberta (i amb ella, la relació mort-viu), l'evolució de les fraccions de combustible fi (mort i viu) i d'altres paràmetres estructurals relacionats amb la susceptibilitat de la vegetació al foc. En aquest sentit, les sortides del model poden ser directament acoblables a models de comportament del foc

## 5. Conclusions

Com a darrera fase en el procés de modelització, es pot concloure que el mòdul arbustiu de GOTILWA+ respon satisfactòriament als objectius plantejats a l'inici del seu desenvolupament. El model reproduïx de forma realista la dinàmica successional de la fitomassa aèria, segons els objectius previs del model i atenent al nivell de simplificacions assumides.

La validació del model planteja un seguit de potencialitats en la seva aplicabilitat futura i un seguit de reptes per a garantir la seva progressiva robustesa i un major grau de realisme. El model, més enllà del seu valor científic de comprensió i determinació dels processos principals que s'hi descriuen, sembla capaç d'esdevenir una eina d'ajuda a la gestió preventiva del risc d'incendi en comunitats arbustives susceptibles al foc. Les seves sortides són fàcilment interpretables i acoblables a models de propagació del foc (Burgan i Rothermel 1984). Alhora, la seva sensibilitat als factors ambientals, el fa útil com a eina exploratòria en els possibles escenaris climatològics futurs condicionats pel canvi climàtic.

Els reptes que planteja aquesta primera fase de validació són també notables. En primer lloc, caldrà avançar en la generalització d'aplicabilitat del model a

diferents comunitats arbustives (per ara constreta a formacions perennifòlies i rebrotadores). Dins d'aquesta aposta, també serà important resoldre satisfactòriament l'encaix del mòdul arbustiu de GOTILWA+ amb la resta de components del model forestal, de manera que es permeti la simulació simultània de diversos estrats (arbori i herbaci) a més de l'arbustiu. En segon lloc, s'haurà d'avançar en l'avaluació de la resposta de la vegetació a diferents règims de pertorbació, incorporant-hi la recurrència i els diferents nivells d'intensitat. L'estat de desenvolupament del model permet assumir aquests plantejaments amb confiança i solidesa.

## Referències

Bilgili E, Methven IR. (1994) A Dynamic Fuel Model for Use in Managed Even-aged Stands. *International Journal on Wildland Fire* 4: 177-185.

Burgan RE, Rothermel RC. (1984). BEHAVE: Fire behaviour prediction and fuel modeling system. FUEL subsystem. General Technical Report INT-167. Odgen, UT. USDA Forest Service. Intermountain Research Station.

Cañellas I, San Miguel A. (2000). Biomass of root and shoot systems of *Quercus coccifera* shrublands in Eastern Spain. *Annals of Forest Science* 57: 803-810.

Caraglio PY, Lagarde I, Blaise F. (1996). Modélisation des peuplements combustibles: une nouvelle approche dans la prévention des incendies. *Forêt Méditerranéenne* 17 (4): 324-327.

Chandler C, Cheney P, Thomas P, Trabaud L, Williams D. (1983). Fire in Forestry. *Forest Fire Behaviour and Effects*. Vol I. John Wiley & Sons. Nova York.

Díaz-Delgado R, Pons X. (2001) Spatial patterns of forest fires in Catalonia (NE of Spain) along the period 1975-1995. Analysis of vegetation recovery after fire. *Forest Ecology and Management* 147: 67-74.

Floret CH, Galan MJ, Le Floch E, Leprince F, Romane F. (1989). A: Orshan G (Ed.) *Plant Pheno-morphological Studies in Mediterranean Type Ecosystems*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. Pàg. 9-97.

Godron M, Guillermin JL, Poissonet J, Poissonet P, Thiault M, Trabaud, L. Dynamics and management of vegetation. A: Di Castri F, Goodall DW, Specht RL. (Eds.) *Mediterranean-type shrublands*. Elsevier Scientific Publishing Company. Nova York. Pàg. 317-344..

Gracia CA, Tello E, Sabaté S, Bellot J. (1999) GOTILWA: An Integrated Model of Water Dynamics and Forest Growth. Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests. A: Rodà F., Retana J., Bellot J. and Gracia C.A. (Eds.). Ecological Studies 137. Springer. Berlin. Pàg. 163-178.

Gracia CA, Sabaté S, Sánchez A. (2002). El cambio climático y la reducción de la reserva de agua en el bosque mediterráneo. Ecosistemas 2002/2 (URL: <http://www.aeet/ecosistemas/022/investigacion4.htm>)

Gray JT, Schlesinger WH. (1981). Nutrient cycling in Mediterranean Type Ecosystems. A: Miller PC. (Ed). Resource Use by Chaparral and Matorral. Springer-Verlag. Nova York.

Jeffers JNR. (1991). Modelos en ecología. Oikos-tau. Barcelona.

Jørgensen SE. (1988). Fundamentals of Ecological Modelling. Elsevier. Amsterdam.

Keane RE, Ryan KC, Running SW. (1996). Simulating effects of fire on northern Rocky Mountain landscapes with the ecological process model FIRE-BGC. Tree Physiology 6: 319-331.

Lagarde I. (1994). Fuel modelling: a new approach. A: Viegas DX (Ed.) Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Forest Fire Research. Coimbra. Pàg. 387-398.

Long G, Fay F, Thiault M, Trabaud L. (1967) Essais de détermination expérimentale de la productivité d'une garrigue de *Quercus coccifera*. Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologiques. Document 39. Montpellier.

Malanson GP, Trabaud L. (1988) Vigour of post-fire resprouting of *Quercus coccifera* L. Journal of Ecology 76: 351-365.

Moreno JM. (Ed.) (1998) Large forest fires. Backhuys Publishers. Leiden.

Mouillot F, Rambal S, Lavorel S. (2001). A generic process-based Simulator for mediterranean landscApes (SIERRA): design and validation exercises. *Forest Ecology and Management* 147: 75-97

Naveh Z. (1974). The role of fire in the Mediterranean region. A: Kozlowski TT, Ahlgren CE (Eds.) *Fire in Ecosystems*. Academic Press. Nova York. Pàg. 401-434.

Papió C. (1994). *Ecologia del foc i regeneració en garrigues i pinedes mediterrànies*. Institut d'Estudis Catalans. Barcelona.

Peix J. (1999) *Foc Verd II. Programa de Gestió del Risc d'Incendi Forestal*. Generalitat de Catalunya. Barcelona.

Pla E, Rodà F. (1999). Aproximació a la dinàmica successional de combustible en brolles mediterrànies. *Orsis* 14: 79-103.

Pyne SJ. (1984). *Introduction to wildland fire management in the United States*. Wiley. Nova York.

Raison RJ, Woods PV, Khanna PK. (1983) Dynamics of fine fuels in recurrently burnt eucalypt forest. *Australian Forestry* 46 (4): 294-302

Rambal S. (1988) A simulation model for predicting water balance and canopy water potential of *Quercus coccifera* garrigue after fire. *Ecologia Mediterranea* 14: 95-99.

Rambal S. (1993). The differential role of mechanisms for drought resistance in a Mediterranean evergreen shrub: a simulation approach. *Plant, Cell and Environment* 16: 35-44.

Rapp M, Loissant P. (1981). Some aspects of mineral cycling in the *garrigue* of Southern France. A: Di Castri F., Goodall D.W., Specht R.L. (Eds.) Mediterranean-type shrublands. Elsevier Scientific Publishing Company. Nova York. Pàg. 289-301.

Rodà F. (1998). La Mediterrània. Ecologia del paisatge. Medi Ambient. Tecnologia i Cultura 21: 41-44.

Rothermel RC, Philpot CW. (1973). Predicting changes in chaparral flammability. Journal of Forestry 71: 640-643.

Sabaté S. (1986). Evolució de l'estructura horitzontal i ocupació de l'espai de la garriga després del foc. Tesi de Llicenciatura. Universitat de Barcelona.

Sala A. (1986). Evolució de l'estructura vertical de la garriga després del foc: índex foliar i gradients morfològics. Tesi de Llicenciatura. Universitat de Barcelona.

Sala A, Sabaté S, Gracia CA. (1987). Structure and organisation of a *Quercus coccifera* garrigue after fire. Ecologia Mediterranea 13: 99-110.

Serrasolsas I, Ferran A, Vallejo VR. (1989). Reconstrucció de los horizontes orgánicos tras el incendio en la garriga del macizo del Garraf (Barcelona). Options Méditerranéennes. Série Séminaires 3: 107-110.

Specht RL. (1981). Primary production in Mediterranean-climate ecosystems regenerating after fire. A: Di Castri F, Goodall DW, Specht RL. (Eds.) Mediterranean-type shrublands. Elsevier. Amsterdam.

Terradas J. (Ed.) (1996). Ecologia del foc. Proa. Barcelona.

Trabaud L. (1980) Impact biologique et écologique des feux de végétation sur l'organisation, la structure et l'évolution de la végétation de la zone de garrigues du Bas Languedoc. Thèse d'État. Univ. Sci. et Tech. Languedoc. Montpellier.

Trabaud L. (1982). Effects of past and present fire on the vegetation of the French Mediterranean region. A: Conrad CE, Oechel WC (Eds.). Dynamics Management of Mediterranean Type Ecosystems. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. USDA Forest Service. Pàg. 450-457

Trabaud L. (1991) Fire regimes and phytomass growth dynamics in a *Quercus coccifera* garrigue. Journal of Vegetation Science 2: 307-314.

Trabaud L, Galtié JF. (1996) Effects of fire frequency on plant communities and landscape pattern in the massif des Aspres. Landscape Ecology, 11: 215-224

Vélez R. (Ed.). (2000) La defensa contra los incendios forestales. Fundamentos y experiencias. McGraw-Hill. Madrid.

van Wagtendonk JW. (1996) Use of a Deterministic Fire Growth Model to Test Fuel Treatments. A: Sierra Nevada Ecosystem Project (SNEP). Status of the Sierra Nevada. Vol. II. Assessments and scientific Basis for Management Options. Wildland Resources Center Report No. 37. University of California, Davis. Pp. 1155-1164.

Viegas DX, Piñol J, Viegas MT, Ogaya R. (1998). Moisture content of living forest fuels and their relationship with meteorological indices in the Iberian Peninsula. A: Viegas DX (Ed.) Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Forest Fire Research. Coimbra..



## **CAPÍTOL 6**

**Efectes del canvi climàtic en ecosistemes  
arbustius mediterranis: una aplicació del  
mòdul arbustiu de GOTILWA+**

**Abstract** *Climatic change and Mediterranean shrublands: an application of the GOTILWA+ shrubland module.*

Most atmospheric Global Circulation Models GCMs predict a temperature increase and a precipitation decrease in the Mediterranean area during this century, though predictions of future precipitation regimes are uncertain. Mediterranean ecosystems would be seriously affected by these changes at functional, structural and distributional levels. Shrubland ecosystems are significant components of the Mediterranean landscapes. A set of simulation experiments with the GOTILWA+ shrubland module were designed to evaluate ecosystem responses to different GCMs climate change scenarios derived from the last IPCC emission scenarios. Results predict a decrease in soil water availability and an increase in fine fuel growth and standing necromass. These structural changes would affect the future disturbance regime.

## Resum

La major part dels models de circulació atmosfèrica GCMs prediuen un augment de la temperatura i una disminució de la precipitació a l'àrea mediterrània en aquest segle, tot i la incertesa en la predicció del règim futur de precipitacions. Els ecosistemes mediterranis es poden veure seriosament afectats per aquests canvis pel que fa al seu funcionament, estructura i distribució. A l'àrea mediterrània, els ecosistemes arbustius presenten un especial interès perquè han protagonitzat una notable expansió en les darreres dècades a causa del creixent impacte del foc i dels canvis d'usos del sòl. A fi d'avaluar les respostes d'aquests ecosistemes a diferents escenaris de canvi climàtic s'han dissenyat un seguit d'experiments de simulació amb el mòdul arbustiu de GOTILWA+. El model s'ha fet córrer sota diferents escenaris de GCMs generats a partir de les darreres prediccions d'emissions de l'IPCC. Els resultats apunten cap a una disminució de la disponibilitat d'aigua al sòl i a un creixement notable de la necromassa i el combustible fi en aquest tipus de comunitats. Aquestes tendències, en cas de confirmar-se, podrien tenir uns efectes evidents en el règim de pertorbacions.

## 1. Introducció

Els models climàtics més recents prediuen que el clima de la regió mediterrània esdevindrà, al llarg d'aquest segle, més càlid que l'actual i, probablement, més àrid (Watson *et al.* 1998, McCarthy *et al.* 2001). L'àrea mediterrània, en ser una zona de transició biogeogràfica, és un dels biomes més sensibles als canvis en els patrons i règims climatològics presents i futurs (Lavorel *et al.* 1998).

Els estudis observacionals de les tendències en la temperatura mitjana mundial corroboren les prediccions a escala global i regional (Kattenberg *et al.* 1996), tot i la manca de concordança amb les prediccions en el règim de precipitacions. Piñol *et al.* (1998) ja han confirmat una tendència creixent de la temperatura mitjana en el darrer segle (1910-1994) en un seguiment de les dades meteorològiques de l'estació de Roquetes al sud de Catalunya i, tot i que les precipitacions anuals no han variat significativament, s'ha registrat un augment de l'oscil·lació tèrmica diària i una disminució significativa de la humitat relativa mínima diària.

Els models de circulació global (GCMs) prediuen un augment global en les quantitats de precipitació anual, tot i una disminució a la conca mediterrània, i canvis en la seva distribució estacional, per bé que el nivell de confiança en aquests resultat és baix a escales regionals i locals. En general, i considerant els diferents resultats aportats pels GCMs a partir dels darrers escenaris d'emissions atmosfèriques, les tendències climàtiques més recents predites per al sud d'Europa apunten un augment de la temperatura entre 0,1 i 0,4 °C per dècada i una disminució de la precipitació d'1% per dècada (McCarthy *et al.* 2001). Pel que fa a l'estacionalitat, en conjunt, es preveu una disminució de les precipitacions a l'època estival i un augment de la freqüència i intensitat dels episodis de sequera extrema (Houghton *et al.* 1996, Watson *et al.* 1998, McCarthy *et al.* 2001).

Els canvis atmosfèrics (augment de la concentració de CO<sub>2</sub>) i climàtics (augment de la temperatura i disminució de les precipitacions) poden influir, a llarg termini, en el creixement, el funcionament, l'estructura i la composició dels

ecosistemes forestals mediterranis (Pereira i Chaves 1995, Lloret i Siscart 1995, Martínez-Vilalta 2001, Peñuelas *et al.* 2001, Peñuelas *et al.* 2002). La disponibilitat decreixent d'aigua i l'increment en la demanda evaporativa en aquestes zones podria comportar canvis dràstics en l'estructura de les comunitats en ser l'aigua el principal factor limitant per al creixement de les plantes a l'àrea mediterrània (di Castri i Mooney 1973, Palutikof *et al.* 1994). Entre d'altres efectes ecològics, aquestes tendències climàtiques es correlacionen significativament amb l'augment dels índexs de risc d'incendi forestal per als períodes estivals, així com amb el nombre i l'àrea dels incendis (Rambal i Hoff 1998, Piñol *et al.* 1998, Watson *et al.* 1998, McCarthy *et al.* 2001).

La resposta dels ecosistemes mediterranis al canvi global és, actualment, l'objecte d'estudi a diferents escales de nombrosos grups de recerca (Terradas 2001). Els efectes a nivell de coberta de la coocurrència d'elevat CO<sub>2</sub>, altes temperatures i disminució de la precipitació encara no estan prou clars (Pereira i Chaves 1995). Tot i l'elevada incertesa, nombrosos autors assenyalen que, en absència d'altres factors limitants, l'enriquiment amb CO<sub>2</sub> en ambients mediterranis condueix a un augment en la productivitat i, per tant, a una creixent taxa d'acumulació de combustible i a canvis en la inflamabilitat de la vegetació (Oechel *et al.* 1995, Strain i Thomas 1995). La gestió dels ecosistemes mediterranis sota el canvi climàtic presenta nous requeriments, especialment, l'ús d'eines predictives (Lavorel *et al.* 1998).

En el present treball s'utilitza el mòdul arbustiu del model forestal GOTILWA+ (Gracia *et al.* 1999) per a explorar la resposta successional de la biomassa d'una comunitat arbustiva típicament mediterrània a diferents escenaris de canvi climàtic. Per a fer-ho, s'han dissenyat diferents experiments de simulació i s'han avaluat els resultats. L'objectiu principal del treball és aplicar el mòdul arbustiu de GOTILWA+ com a eina predictiva i prospectiva dels efectes sobre l'estructura i funcionament de les comunitats arbustives mediterrànies a diferents tendències climàtiques, amb una especial atenció als canvis relacionats amb la inflamabilitat i combustibilitat de la vegetació.

## 2. Mètodes

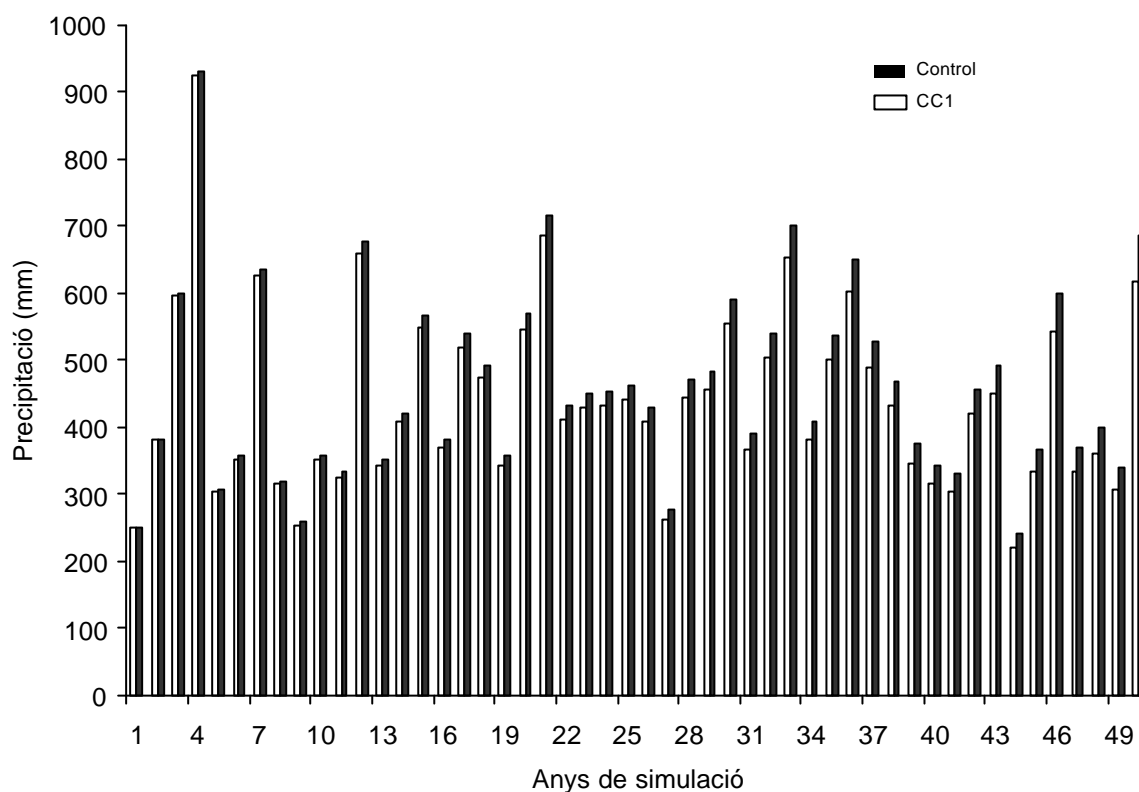
S'han dissenyat dos experiments de simulació. El primer ha estat una aproximació a la sensibilitat del model al canvi climàtic. Aprofitant les potencialitats de GOTILWA+ a l'hora de modificar i definir nous escenaris climàtics, s'ha avaluat la resposta del model a partir d'un escenari prospectiu. En aquest escenari (CC1), inspirat en algunes prediccions (Rotmans *et al.* 1994, Gracia *et al.* 1999, Watson *et al.* 1998), se suposa un increment lineal de la temperatura (+3 °C), de la concentració de CO<sub>2</sub> atmosfèric (1% anual) i un decreixement de la precipitació (10%) al llarg dels propers 50 anys (2000-2050). L'escenari CC1 s'ha comparat amb els resultats del model en un escenari Control. L'escenari Control utilitza una sèrie climatològica que s'ajusta a les condicions del clima present, pel que fa a la concentració atmosfèrica de CO<sub>2</sub>, el règim de precipitacions i el patró anual de temperatures (vegeu *capítol 5*). Tant l'escenari de clima present, com el CC1, s'han generat a partir d'una sèrie de dades climatològiques derivades de l'estació meteorològica de Prades (Gracia *et al.* 1999). L'estació meteorològica de Prades (UTM (332000, 4575000) Altitud: 800 m) es troba a 25 km al nord de Mont-roig del Camp (Baix Camp), localitat on s'ubiquen la major part de les brolles estudiades que han fornint d'informació de base per la parametrització inicial de les simulacions (Pla i Rodà 1999, *Capítol 3*). La mitjana anual de precipitació se situa a la vora dels 500 mm i la temperatura mitjana anual a 14,7 °C. A la figura 1 s'hi pot observar el patró interanual de precipitació i comparar l'escenari CC1 amb el Control.

El segon experiment ha consistit en emprar les recents prediccions de dos GCMs per al segle 21 a l'àrea mediterrània europea (Carter *et al.* 2000) a partir dels escenaris d'emissions atmosfèriques (Special Report on Emissions Scenarios, SRES) definits pel Panell Intergovernamental de Canvi Climàtic (Nakicenovic *et al.* 2000, McCarthy *et al.* 2001). Concretament, s'han utilitzat els patrons regionals provinents dels models ECHAM4 del Centre Europeu d'Hamburg (Roeckner *et al.* 1996) i el HadCM2 del Centre de Hadley (Johns *et al.* 1997). Ambdós són models d'acoblament atmosfera-oceà. Les principals diferències en les seves prediccions rauen (a més de les que es poden atribuir a les diferències intrínseques en l'estructura dels models) en què ECHAM4 no

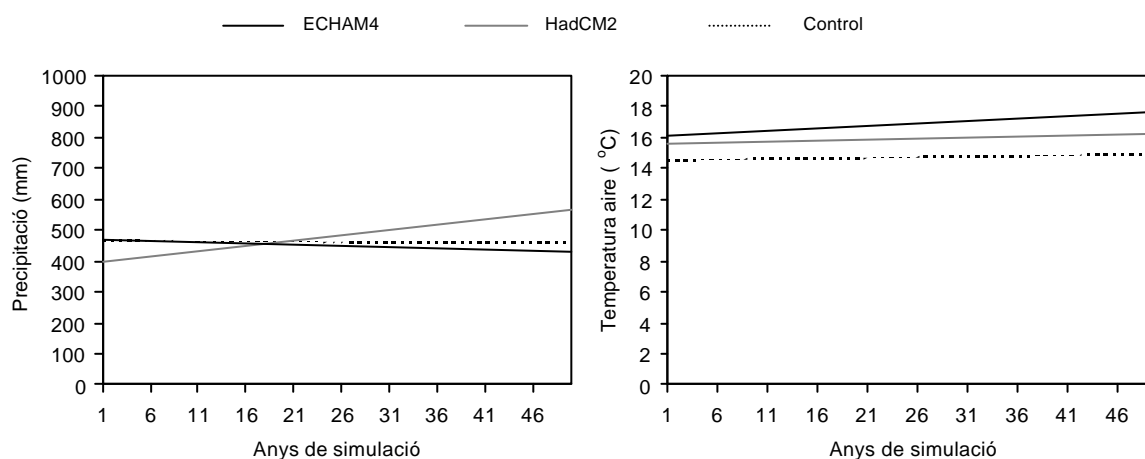
inclou els efectes refredants dels aerosols de sulfat. Així, les temperatures predites per ECHAM4 són, d'entrada, superiors a les calculades amb el model HadCM2. En efecte, les mitjanes entre les diferents sèries modificades en relació amb la sèrie control mostren quines són les tendències derivades dels GCMs emprats i, alhora, mostren les discrepàncies entre ells: mentre que HadCM2 presenta un augment de la temperatura mitjana, en els 50 anys simulats, d'1,23 °C respecte el clima present de referència, ECHAM4 augmenta en 2,2 °C. Pel que fa a la precipitació anual, les diferències són més evidents: HadCM2 incorpora un augment d'un 4% de mitjana, mentre ECHAM4 incorpora una disminució de la precipitació mitjana d'un 2% respecte el clima de referència. Aquesta elevada variabilitat en les tendències, assignables a les diferències pròpies de cada model, exigeixen l'ús de múltiples GCMs per a la definició d'escenaris climàtics futurs (Watson *et al.* 1998, McCarthy *et al.* 2001).

Els dos models de circulació global, així com les dades de referència de base del clima present, s'han aplicat a una sèrie de dades climatològiques provinents de l'estació meteorològica de Prades (Gracia *et al.* 1999). Les sèries de dades d'aquesta estació utilitzades en les simulacions, modificades segons ECHAM4 i HadCM2 o bé Control, s'han generat al Potsdam-Institute for Climate Impact Research d'Alemanya (M. Ehard i T. Eggers, comunicació personal), en el marc del projecte LTEEF-II (*Long Term Effects of Climate Change on European Forests: Impact and Consequences for Carbon Budgets*). A la figura 2 s'hi poden observar les diferències en la tendència del patró de precipitació i temperatura respectivament al llarg dels anys de simulació. L'inici de les sèries generades se situa, per a ECHAM4, a l'any 1930 i, per a HadCM2, a l'any 1830 i, ambdues, es projecten cap a l'any 2100. Pel que fa a l'inici de la simulació s'ha situat l'any 2000 i s'ha finalitzat l'any 2050. Cal destacar que les discrepàncies de partença a l'inici de la simulació en la precipitació i la temperatura entre els diferents escenaris de canvi climàtic i el Control es deuen a dos factors: d'una banda, el procediment de generació aleatòria de les sèries climàtiques les fa independents per a cada GCM utilitzat i per al Control, tot i que es basen en la mateixa sèrie inicial de dades reals. D'altra banda, el fet

que l'origen de la sèrie es remunti de diferents dècades a ençà condiona el fet que, a l'any 1 de la simulació, hagin divergit les sèries emprades.



**Figura 1.** Precipitació anual per a l'escenari CC1 (barres en blanc) i per a l'escenari Control (barres en negre) per als 50 anys de simulació.



**Figura 2.** Tendències lineals de l'evolució de precipitació anual (esquerra) i la temperatura mitjana anual (dreta) per a les dades segons els escenaris generats per HadCM2 (línia contínua de traç fi), ECHAM4 (línia contínua de traç gruixut) i Control (línia discontinua).

L'ús d'aquestes sèries generades queda constret, doncs, a la comparació de tendències generals i n'exclou la utilització per a la comparació de patrons intranuals i/o interanuals de les sèries entre si i amb la Control. En aquest sentit, i a fi de recollir diferències atribuïbles a les diferències en les tendències generals de canvi climàtic que representen les sèries, els resultats per a les diferents variables de sortida s'han agregat emprant la mitjana dels valors dels 5 darrers anys de simulació.

L'elecció de l'estació meteorològica de Prades, emplaçada en un context fisiogràfic i climatològic relativament diferent al de les brolles litorals simulades, ha vingut condicionat per constriccions externes a l'experiment (la disponibilitat de les sèries generades en el projecte LTEEF-II). Tanmateix, atenent als objectius de l'experiment, aquesta aproximació és prou versemblant, sempre i quan es contemplin en la interpretació dels resultats els possibles biaixos que aquest fet pugui aportar, especialment pel que fa a les diferències en les temperatures mitjanes. L'anàlisi comparada de les sèries de 20 anys generades per a l'estació de Vandellòs (*capítol 3*) amb les generades per a Prades assenyala diferències significatives en les temperatures mitjanes anuals de 3,5 °C, mentre no s'observen diferències estadísticament significatives per a la mitjana de la precipitació anual per als anys de les sèries.

Com s'ha esmentat, el model ha simulat l'evolució de les diferents variables de sortida des del clima present (2000) fins als propers 50 anys (2050). La concentració de CO<sub>2</sub> ha incrementat, en les diferents simulacions sota canvi climàtic i per aquest període, segons els escenaris mitjans d'emissions predits per l'IPCC per a la primera meitat del segle XXI (Nakiæenoviæ *et al.* 2000).

En tots els casos descrits en aquest treball, les dades per a la inicialització de l'estructura i el funcionament de la comunitat simulada provenen d'una brolla de 3 anys d'edat regenerativa al Baix Camp (Pla i Rodà (1999), *capítols 3 i 4*, Taula 1).



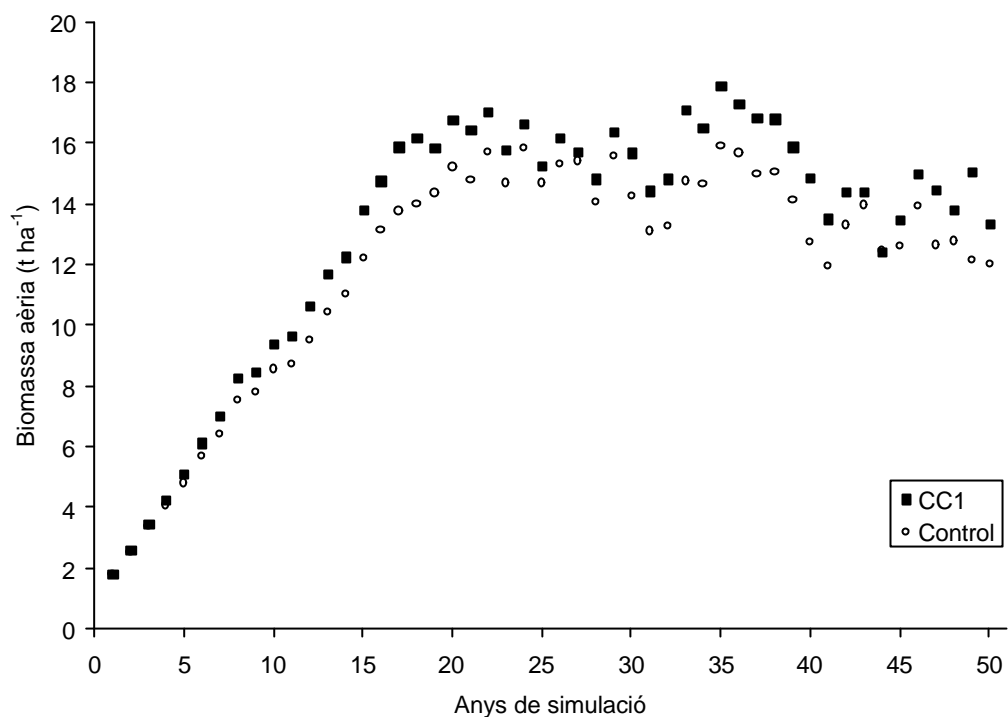
**Taula 1.** Variables estructurals i de descripció del sòl utilitzades en la caracterització de les brolles del Baix Camp (Pla i Rodà 1999) per a les simulacions de GOTILWA+. Les dades han estat obtingudes de la bibliografia, el judici expert i el calibratge del mòdul arbustiu (*capítol 4*).

Paràmetres	Unitats	Valor
<b>ESTRUCTURA DE LA COMUNITAT</b>		
Biomassa subterrània/aèria	kg kg <sup>-1</sup>	2
αFR (pes d'arrels fines/pes de fulles)	g g <sup>-1</sup>	0,1
Pes específic foliar	mg cm <sup>-2</sup>	19,2
Màxim Carboni mòbil a les fulles	%	0,4
Màxim Carboni mòbil en fusta	%	0,4
Fracció d'albeca que respira	%	0,08
Caiguda de fulles (base)	dia <sup>-1</sup>	0,002
Mortalitat d'arrels fines (base)	dia <sup>-1</sup>	0,008
Fullaraca gruixuda /fina	g g <sup>-1</sup>	3,6·10 <sup>-5</sup>
Densitat de la fusta	g cm <sup>-3</sup>	0,93
MO inicial en horitzons orgànics	g cm <sup>-2</sup>	500
MO inicial en horitzons minerals	% pes sec	2,5
Temps de residència a la coberta de necromassa fina	dia	100
Temps de residència a la coberta de necromassa mitjana	dia	300
Temps de residència a la coberta de necromassa gruixuda	dia	1000
Taxa de pas de BLF a BLM	dia <sup>-1</sup>	0,03
Taxa de pas de BLM a BLG	dia <sup>-1</sup>	0
<b>FLUXOS DE CARBONI DEL SÒL</b>		
Densitat aparent	g cm <sup>-3</sup>	1,55
Taxa de descomposició de la MO en els horitzons orgànics (LF)	dia <sup>-1</sup>	0,004
Taxa de descomposició de la MO en els horitzons minerals (AB)	dia <sup>-1</sup>	0,00007
Valor de Q <sub>10</sub> de la descomposició de la matèria orgànica	---	1,7
Taxa de transferència dels horitzons LF als AB (t <sub>o m</sub> )	---	300
W min	mm	5
W màx	mm	105
Gradient hidràulic	m m <sup>-1</sup>	0,51
Conductivitat hidràulica del sòl	m dia <sup>-1</sup>	13
<b>CONDUCTIVITAT HIDRÀULICA DEL SÒL</b>		
Profunditat mitjana del sòl	m	0,3
Límit d'aigua en el sòl utilitzable per les plantes	mm m <sup>-1</sup>	1
Pedregositat (volum)	%	45

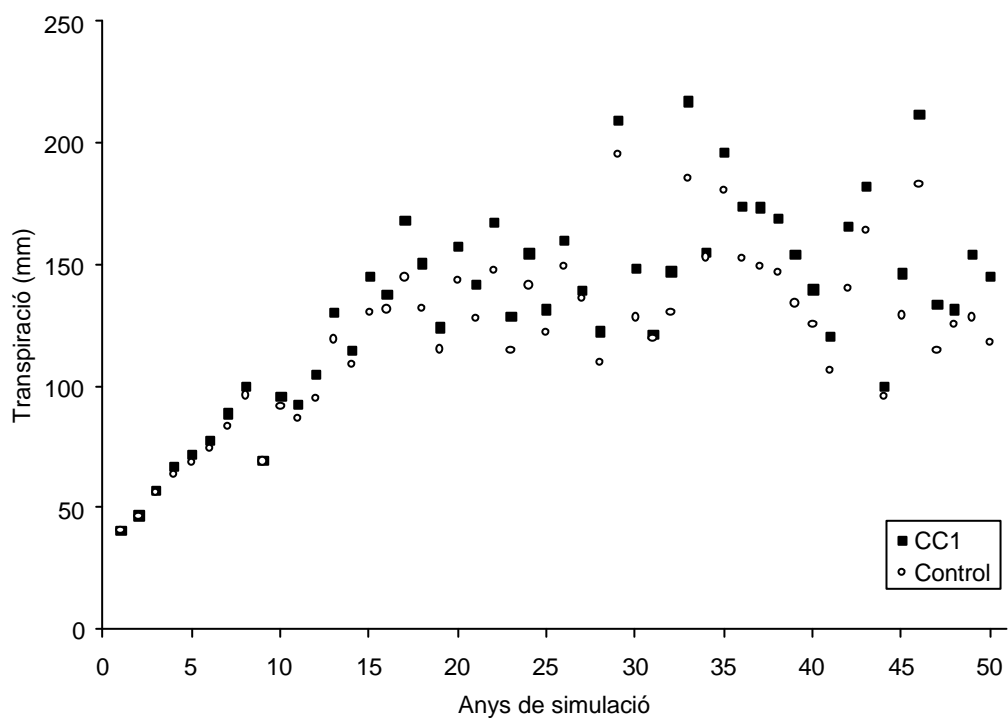
### 3. Resultats i discussió

En l'escenari CC1, els resultats pel que fa a l'evolució de la biomassa aèria es recullen a la figura 3. S'hi poden observar, d'entrada, els efectes fertilitzants de l'exposició a una creixent concentració de CO<sub>2</sub> per part de la vegetació (Harley PC 1995, Strain i Thomas 1995): la brolla sota l'escenari CC1 ha crescut, al final de la simulació, un 11% més que la brolla sota condicions com les del clima present. Aquest augment del creixement de la vegetació, juntament amb un increment de la demanda evaporativa, es tradueix en l'augment de la transpiració, malgrat la disminució de la precipitació anual (figura 4).

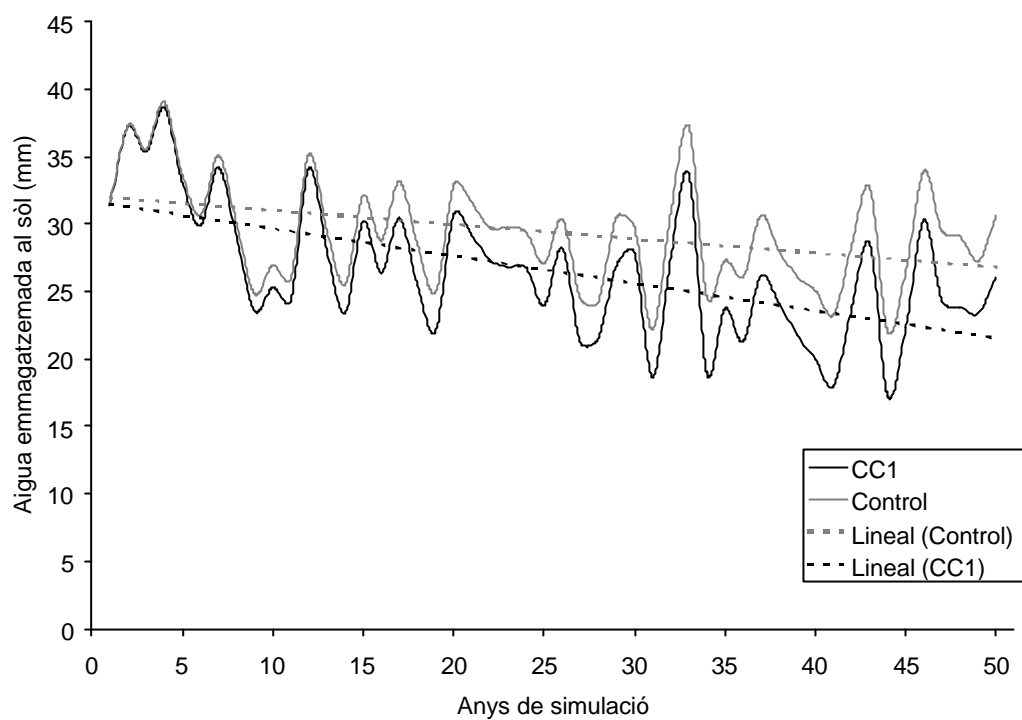
Aquest ús creixent dels recursos hídrics del sòl, en fa minvar el contingut d'aigua emmagatzemada que ha disminuït un 20% (avaluat sobre les regressions de les tendències lineals de les mitjanes anuals) al final de la simulació (malgrat només haver disminuït un 10% la precipitació mitjana), tal i com s'observa a la figura 5. Tot i l'elevada incertesa en els efectes de la coocurrència de l'adobat carbònic i les altes temperatures en ecosistemes mediterranis (Strain i Thomas 1995, McCarthy *et al.* 2001), sembla plausible esperar aquesta accentuada disminució de la disponibilitat d'aigua en el sòl com un corol·lari directe del creixement de la demanda evaporativa associada a la major acumulació de biomassa, a l'augment de l'índex d'àrea foliar (LAI) (figura 6) i a les altes temperatures (Rambal 1993, Oechel *et al.* 1995). Si considerem, com ja s'ha esmentat a la introducció, que les temperatures de la sèrie utilitzada (Prades) són significativament inferiors a les de la zona d'estudi (Mont-roig del Camp), les tendències abans esmentades serien majors en aquestes comunitats del que suggereixen aquests resultats. Aquesta tendència també s'ha predit, aplicant criteris similars de canvi climatològic, per als boscos de Catalunya, agreujada per l'elevada despesa hídrica de les formacions arbrades (Gracia *et al.* 2002). Les conseqüències en el paisatge mediterrani poden esdevenir molt importants, ja que s'hi preveuen canvis estructurals i funcionals, substitucions d'espècies i de comunitats (Moreno i Oechel 1995, Martínez-Vilalta 2001). En aquest cas, l'avenç de comunitats arbustives resistents a l'eixut estival en pot ser una conseqüència a llarg termini.



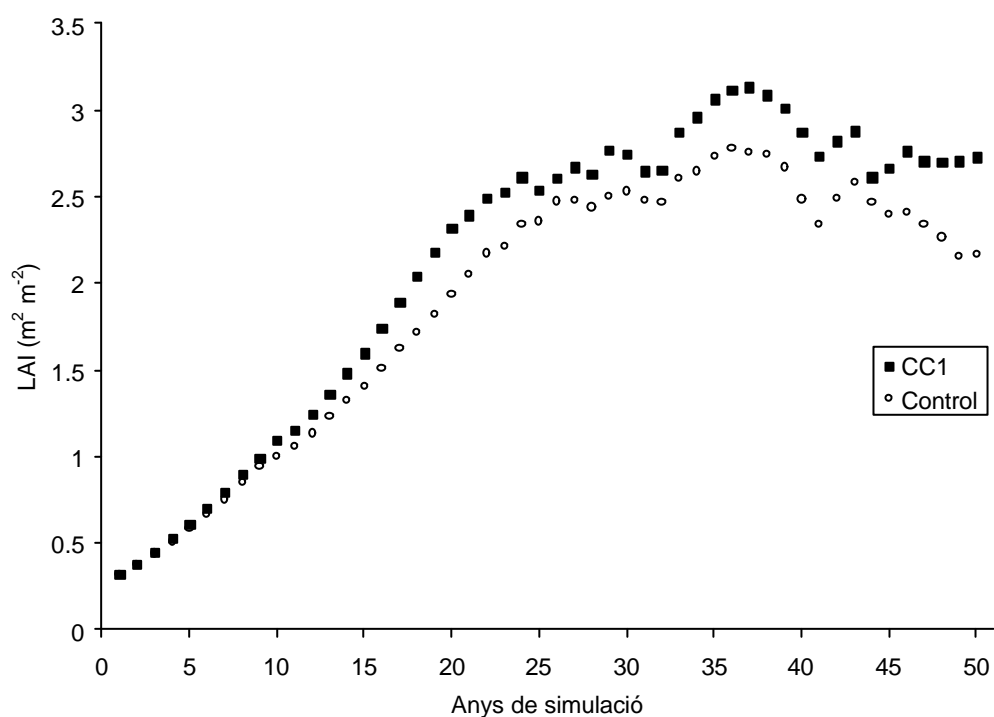
**Figura 3.** Acumulació de biomassa aèria total per a l'escenari CC1 (quadrats negres) i per al Control (cercles buits).



**Figura 4.** Evolució de la transpiració anual per a l'escenari CC1 (quadrats negres) i per al Control (cercles buits).



**Figura 5.** Evolució de la quantitat mitjana anual d'aigua emmagatzemada al sòl per a l'escenari CC1 (corba negra) i per al Control (corba grisa). Les rectes representen les regressions lineals de les dades.

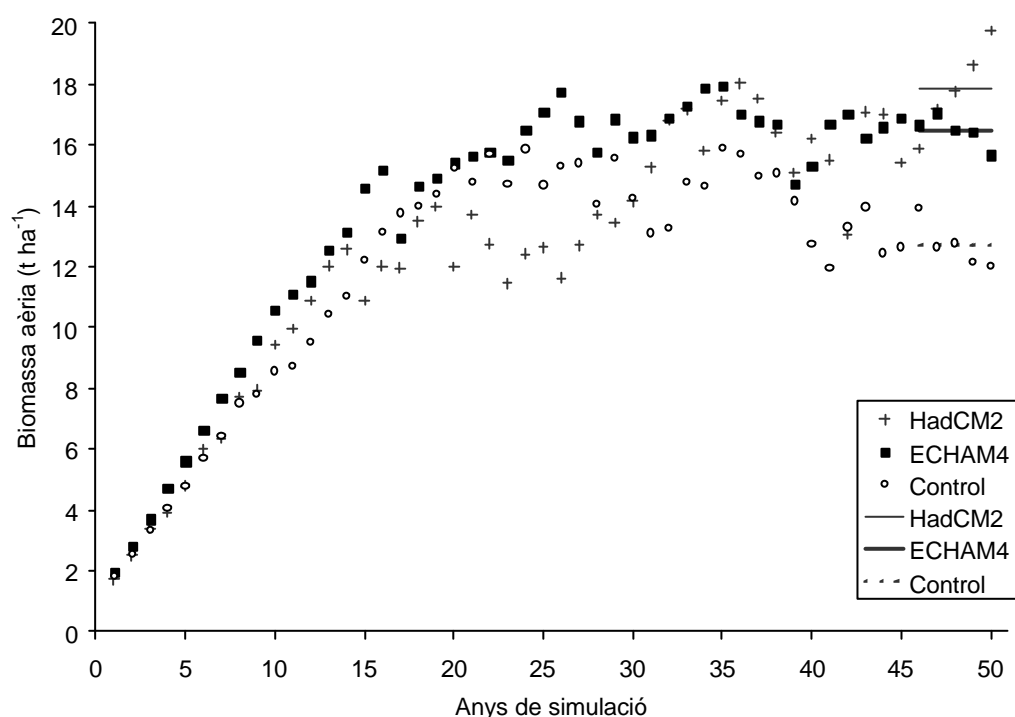


**Figura 6.** Evolució de l'Índex d'Àrea Foliar (LAI) al llarg de la successió per a l'escenari CC1 (quadrats negres) i per al Control (cercles buits).

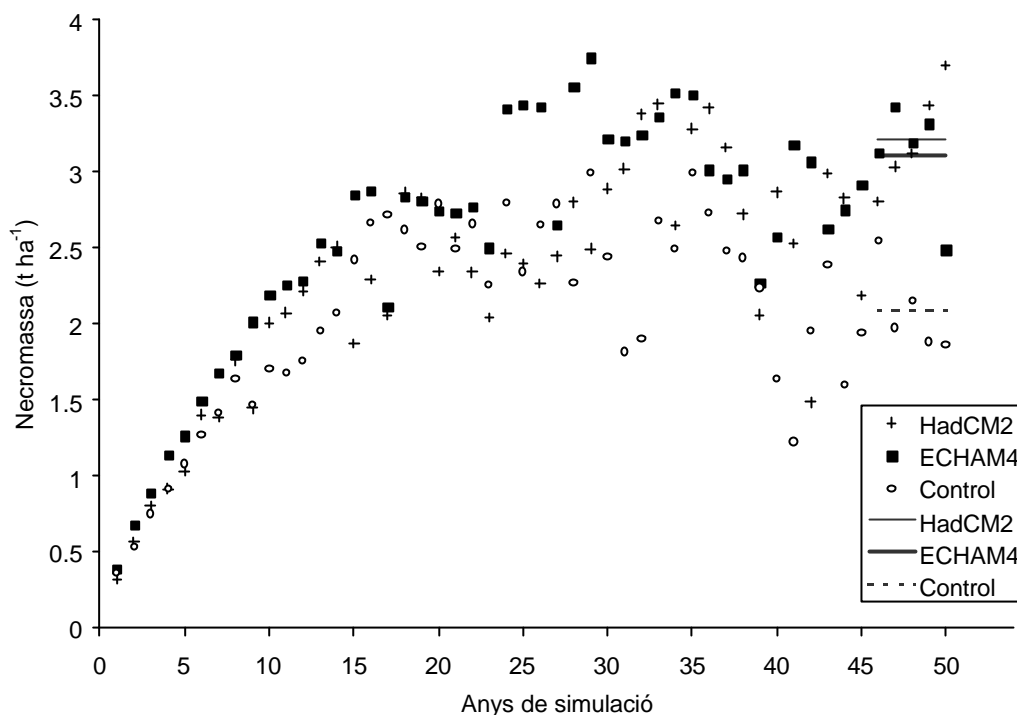
En el segon experiment, l'anàlisi dels resultats de les brolles sota els escenaris dels GCMs també aporta consideracions interessants. A la figura 7 veiem les evolucions simultànies de l'acumulació de biomassa al llarg de la successió per als dos escenaris descrits i per al del clima present. La biomassa acumulada és significativament més alta en les brolles on s'hi prediuen augments de concentració de CO<sub>2</sub> i temperatures més elevades que no pas a la brolla sota condicions control (calculats a partir del promig dels darrers 5 anys de simulació, aquests increments són d'un 40% per a HadCM2 i un 29% per a ECHAM4). En l'escenari ECHAM4, l'efecte de la minsa disminució de la precipitació queda absolutament diluït en relació amb l'augment dels altres paràmetres ambientals. Anteriorment ja s'ha comentat l'elevada incertesa de les prediccions actuals dels GCMs pel que fa al règim de precipitacions futur a la conca mediterrània.

Tanmateix, cal considerar que, tot i presentar una biomassa aèria més elevada, la fracció que diferencialment augmenta més en les simulacions sota escenaris de canvi climàtic és la necromassa (figura 8): un 54% més respecte la del Control en la simulació de HadCM2 i un 48% en la brolla ECHAM4 (percentatges avaluats a partir dels promitjos en els darrers 5 anys de simulació). Així, una conseqüència d'aquest creixement de la vegetació lligades als canvis funcionals de la vegetació (augment de la demanda evaporativa, augment de la transpiració, reducció de la disponibilitat d'aigua en períodes crítics) és la incorporació progressiva de material mort en peu a la coberta i l'augment de la caiguda de virosta (un 47% (HadCM2) i un 52% (ECHAM4) produït per la reducció de la vida mitjana de les fulles (-5% a HadCM2 i -14% a ECHAM4), resultats no mostrats). Cal esmentar, a més, els efectes que sobre la respiració total (autotròfica i heterotròfica) poden comportar aquests canvis en la dinàmica en la producció i descomposició de la virosta, així com l'augment global de la temperatura. A tall d'exemple, per als boscos de Catalunya s'ha predit un augment del 70% de la respiració total de l'ecosistema sota escenaris de canvi climàtic (Gracia *et al.* 2002), fet que qüestiona la capacitat de segrest de carboni futura de molts boscos sota les condicions predites (Terradas 2001). Tanmateix, la discussió sobre aquests efectes queda fora de l'abast d'aquest article.

L'increment, doncs, del material mort en l'estructura del sistema (necromassa en peu) té unes conseqüències directes sobre el risc d'incendi (la relació mort/viu és de 0,19 a la brolla Control i de 0,24 a ECHAM4, segons la mitjana dels darrers 5 anys de simulació). Lligat a aquest increment de la necromassa en peu, es prediu un creixement de les categories de materials fins (de  $\varnothing < 6$  mm) en els escenaris de canvi climàtic (figura 9). Aquesta tendència estaria amb consonància amb les hipòtesis d'alguns autors (Strain i Thomas 1995) que prediuen comunitats més ramificades com a conseqüència de les necessitats de sosteniment d'una major àrea foliar sota escenaris de major concentració de  $\text{CO}_2$ . Aquest creixement del material fi, que s'estima en un 48% per a HadCM2 i un 28% per a ECHAM4 per als dos escenaris descrits, té unes conseqüències directes en la inflamabilitat i combustibilitat de la vegetació (Bond i van Wilgen 1996).

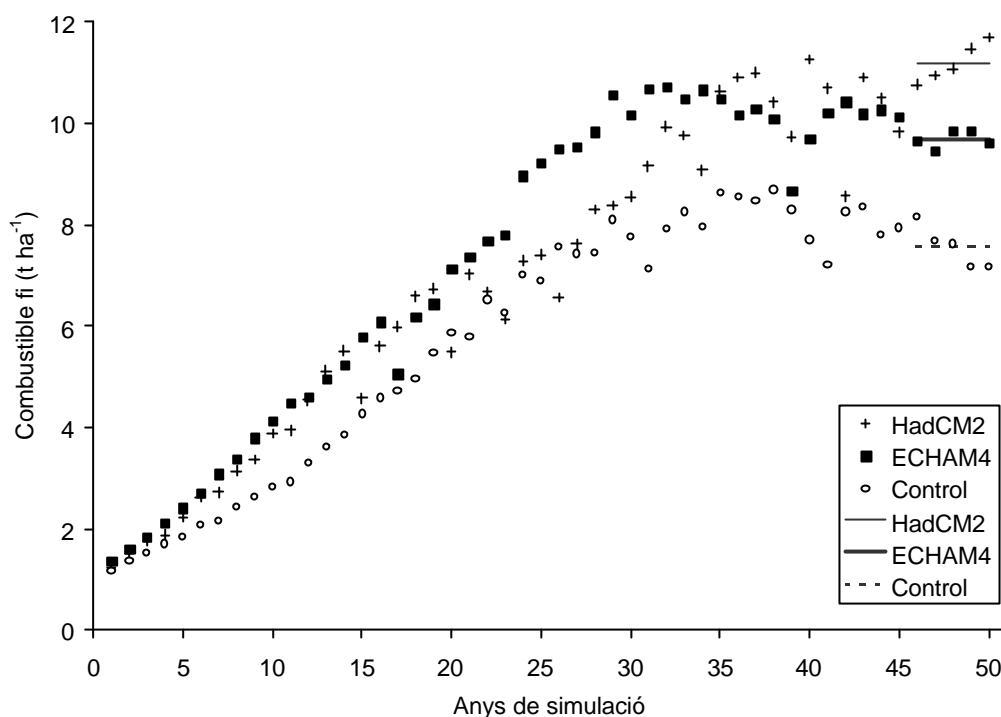


**Figura 7.** Acumulació de biomassa aèria total per als escenaris HadCM2 (creus), ECHAM4 (quadrats negres) i per al Control (cercles buits). En segments de diferent gruix s'hi mostra el promig dels valors dels darrers 5 anys de simulació per a cada sèrie (traç fi per a HadCM2, traç gruixut per a ECHAM4, i traç discontinu per a Control).



**Figura 8.** Acumulació de necromassa en peu per als escenaris HadCM2 (creus), ECHAM4 (quadrats negres) i per al Control (cercles buits). En segments de diferent gruix s'hi mostra el promig dels valors dels darrers 5 anys de simulació per a cada sèrie (traç fi per a HadCM2, traç gruixut per a ECHAM4, i traç discontinu per a Control).

Així, segons les prediccions del model, els efectes dels canvis descrits comportarien un augment dràstic del risc d'incendi, en el sentit que s'avançarien successionalment les estructures d'elevat risc i podria créixer notablement la virulència del foc. A tall d'exemple, estructures d'elevat risc en aquest tipus de comunitats (normalment descrites als 7-10 anys d'edat regenerativa (*capítol 2*)) podrien veure reduït el temps en assolir-se de l'ordre de 2 a 4 anys segons el nou escenari climàtic, com es pot observar a la figura 9: en les simulacions sota canvi climàtic, formacions de 5-6 anys d'edat regenerativa, disposen d'una quantitat de combustible fi similar al de la vegetació control als 10 anys. Aquest fet podria influir directament en el règim, freqüència i comportament dels incendis en aquest tipus de sistemes si, a més, el vinculem a l'augment dels períodes de risc meteorològic (Oechel *et al.* 1995, Piñol *et al.* 1998).



**Figura 9.** Acumulació de combustible fi (biomassa foliar+biomassa de tiges no lignificades+biomassa llenyosa fina+necromassa fina, de  $\varnothing < 6$  mm) per als escenaris HadCM2 (creus), ECHAM4 (quadrats negres) i per al Control (cercles buits). En segments de diferent gruix s'hi mostra el promig dels valors dels darrers 5 anys de simulació per a cada sèrie (traç fi per a HadCM2, traç gruixut per a ECHAM4, i traç discontinu per a Control).

#### 4. Conclusions

Els resultats aportats en aquest treball exploren els efectes que el canvi climàtic pot comportar per als ecosistemes arbustius mediterranis en termes de biomassa acumulada, fraccionament d'aquesta i risc d'incendi. L'elevada variabilitat en les prediccions sobre la precipitació dels GCMs ha motivat la definició d'un escenari exploratori CC1 en el qual s'han controlat les taxes de canvi futures en els diferents paràmetres climatològics (a més de la precipitació, la temperatura i la concentració de  $\text{CO}_2$ ). Així, en un escenari mig pel que fa a l'evolució de les precipitacions vindria a ser CC1 (Carter *et al.* 2000), s'observen efectes sobre la disponibilitat d'aigua al sòl, que decreix notablement respecte la simulació Control. Aquests efectes, a més, es troben condicionats per un seguit de canvis en els fluxos d'aigua i carboni del sistema produïts per la variació climàtica (augment de  $\text{CO}_2$  i augment de la



temperatura). L'efecte fertilitzant de l'augment del CO<sub>2</sub> i el creixement de la vegetació en són un exemple. Tanmateix, tot i que els resultats d'aquests exercicis corroboren els efectes estimulants en el creixement de la vegetació de l'adobat carbònic en absència de factors limitants, una disminució creixent de la disponibilitat d'aigua en el sòl com la predita en escenaris de canvi climàtic podria comprometre progressivament el creixement i supervivència dels individus d'espècies amb majors requeriments hídrics (Pereira i Chaves 1995).

Però, potser allò més significatiu dels resultats presentats i que es troben en relació amb els objectius inicials en el desenvolupament del mòdul arbustiu de GOTILWA+, són els efectes que el canvi climàtic produeix sobre l'estructura de la vegetació i, per tant, sobre la seva vulnerabilitat al foc. Els resultats apunten que les condicions climàtiques futures condueixen les nostres formacions vegetals arbustives cap a proporcions més elevades de necromassa en peu respecte la biomassa aèria total que, alhora, és més elevada i conté més material fi viu i mort. Aquests fets, si els lliguem amb la resta d'interaccions implicades (augment d'episodis de sequera, disminució de la disponibilitat hídrica, augment de temperatura mitjana) poden condicionar canvis en la freqüència dels incendis (en el sentit d'augmentar-ne la reiteració) i augmentar la virulència (en intensitat) de focs en aquestes comunitats.

Amb aquest exercici de simulació s'han aplicat les potencialitats del mòdul arbustiu de GOTILWA+ com a eina predictiva en la gestió del risc en escenaris canviants.

## Referències

Bond WJ, van Wilgen BW. (1996). *Fire and Plants*. Chapman & Hall. Londres.

Carter TR, Hulme M, Crossley JF, Malyshev S, New MG, Schlesinger ME, Tuomenvirta H. (2000). *Climate Change in the 21st Century. Interim characterizations based on the new IPCC Emissions Scenarios*. Finnish Environment Institute. Helsinki.

di Castri FD, Mooney HA. (Eds.) (1973) *Mediterranean Type Ecosystems: Structure and Function*. Springer-Verlag. Berlin.

Gracia CA, Sabaté S, Sánchez A. (2002). El cambio climático y la reducción de la reserva de agua en el bosque mediterráneo. *Ecosistemas* 2002/2 (URL: <http://www.aeet/ecosistemas/022/investigacion4.htm>)

Gracia CA, Tello E, Sabaté S, Bellot J. (1999). GOTILWA: An integrated model of water dynamics and forest growth. A: Rodà F, Gracia CA, Retana J, Bellot J. (Eds.). *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests*. Springer. Berlin. Pàg. 163-180.

Harley PC. (1995). Modeling Leaf Level Effects of Elevated CO<sub>2</sub> on Mediterranean Sclerophylls. A: Moreno JM, Oechel WC (Eds.) *Global Change and Mediterranean-Type Ecosystems*. Springer. Nova York. Pàg. 35-57.

Houghton JT, Filho LGM, Callander BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell K. (1996) *Climate change 1995. The Science of Climate Change*. IPCC. Cambridge University Press. Cambridge.

Johns TC, Carnell RE, Crossley JF, Gregory JM, Mitchell JFB, Senior CA, Tett SFB, Wood RA. (1997) The Second Hadley Centre coupled ocean-atmosphere GCM: Model description, spinup and validation. *Climate Dynamics* 13: 103-134

Kattenberg A, Giorgi F, Grassl H, Meehl GA, Mitchell JFB, Stouffer RJ, Tokioka T, Weaver AJ, Wigley TML (1996). Climate models - projections of future climate. A: Houghton JT, Filho LGM, Callander BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell K. (Eds.) *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge. Pp. 285-357.

Lavorel S, Canadell J, Rambal S, Terradas J. (1998). Mediterranean terrestrial ecosystems: research priorities on global change effects. *Global Ecology and Biogeography* 7: 157-166.

Lloret F, Siscart D. (1995) Los efectos demográficos de la sequía en poblaciones de encina. *Cuadernos de Sociedad Española de Ciencias Forestales* 2: 77-81.

McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS. (Eds.) (2001) *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge.

Martínez-Vilalta J. (2001). Constraints on water transport posed by xylem embolism: implications for drought and frost resistance in woody plants. *Tesi doctoral*. Universitat Autònoma de Barcelona. Bellaterra.

Moreno JM, Oechel WC. (Eds.) (1995). *Global Change and Mediterranean-Type Ecosystems*. Springer. Nova York.

Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, de Vries HJM, Fenhann J, Gaffin S, Gregory K, Grubler A, Jung TY, Kram T, La Rovere EL, Michaelis L, Mori S, Morita T, Papper W, Pitcher H, Price L, Riahi K, Roehrl A, Rogner H-H, Sankovski A, Schlesinger M, Shukla P, Smith S, Swart R, van Rooijen S, Victor N, Dadi Z, (2000). *Special Report on Emissions Scenarios*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. Cambridge.

Oechel WC, Hastings SJ, Vourlitis GL, Jenkins MA, Hinkson (1995). Direct Effects of Elevated CO<sub>2</sub> in Chaparral and Mediterranean-Type Ecosystems. A: Moreno JM, Oechel WC (Eds.) *Global Change and Mediterranean-Type Ecosystems*. Springer. Nova York.

Palutikof JP, Goodess CM, Guo X. (1994) Climate change, potential evapotranspiration and moisture availability in the Mediterranean basin. *International Journal of Climatology* 14: 853-869.

Peñuelas J, Filella I, Comas P. (2002). Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Global Change Biology* 8: 531-544.

Peñuelas J, Lloret F, Montoya R. (2001) Severe drought effects on Mediterranean woody flora in Spain. *Forest Science* 47: 214-218.

Pereira JS, Chaves MM. (1995). Plant responses to drought under climate change in Mediterranean-type ecosystems. A: Moreno JM, Oechel WC (Eds.) *Global Change and Mediterranean-Type Ecosystems*. Ecol. Studies Vol. 117, Springer-Verlag. Nova York. Pàg. 140-160.

Piñol J, Terradas J, Lloret F. (1998). Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in Coastal Eastern Spain. *Climatic change* 38: 345-357.

Pla E, Rodà F. (1999). Aproximació a la dinàmica successional de combustible en brolles mediterrànies. *Orsis* 14: 79-103.

Rambal S. (1993). The differential role of mechanisms for drought resistance in a Mediterranean evergreen shrub: a simulation approach. *Plant, Cell and Environment* 16: 35-44.

Rambal S, Hoff C. (1998) Mediterranean ecosystems and fire: the threats of global change. A: Moreno JM. (Ed.) *Large Forest Fires*. Backhuys. Leiden. Pp. 187-213.

Roeckner E, Arpe K, Bengtsson L, Christoph M, Claussen M, Dümenil L, Esch M, Giorgetta M, Schlese U, Schulzweida U. (1996). The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate. MPI Report No. 218, Max-Planck-Institut für Meteorologie. Hamburg.

Rotmans J, van Asselt MBA, de Bruin AJ, den Elzen MGJ, de Greef J, Hilderink H, Hoekstra AY, Janssen MA, Koster HW, Martens P, Niessen LW, de Vries HJM. (1994). Global change and sustainable development: a modelling perspective for the next decade. GLOBO report series núm. 4, RIVM Report núm. 461502004. Bilthoven.

Strain BR, Thomas RB. (1995) Anticipated effects of elevated CO<sub>2</sub> and climate change on plants from Mediterranean-type ecosystems utilizing results of studies in other ecosystems. A: Moreno JM, Oechel WC (Eds). Global Change and Mediterranean-Type Ecosystems. Springer. Nova York. Pàg. 121-139.

Terradas J. (2001). Ecología de la vegetación. Ediciones Omega. Barcelona.

Watson RT, Zinyowera MC, Moss RH, Dokken DJ. (Eds.) (1998) IPCC Special Report on The Regional Impacts of Climate Change. An Assessment of Vulnerability. IPCC. Cambridge University Press. Cambridge.

**CAPÍTOL 7**  
**Conclusions**

## Conclusions

*Capítol 2.* Dinàmica successional de combustible en ecosistemes arbustius mediterranis i la seva relació amb el risc d'incendi.

- Un indret cremat pot tenir un elevat risc d'incendi en un temps relativament curt, però molt variable, després del foc.
- En casos típics dels Països Catalans, aquest temps és de 5-10 anys per molts matollars, i d'1-2 anys pels herbassars densos.
- La dinàmica regenerativa ve determinada pel règim de precipitacions de la zona, per la composició específica de la vegetació i de la seva estratègia regenerativa i de creixement, per les condicions edàfiques, per les condicions fisiogràfiques, pel règim de pertorbacions (freqüència estacionalitat i intensitat), i per les condicions climatològiques, i els usos del sòl posteriors a la pertorbació.
- La informació sobre la dinàmica de combustible és útil per a dissenyar intervencions oportunes en aquelles zones d'especial interès per a la gestió del combustible.
- El fet que el risc d'un nou incendi sigui sovint substancial al cap de pocs anys, i que moltes actuacions preventives siguin molt més senzilles i econòmiques en llocs recent cremats, fan plantejar la necessitat d'actuacions preventives poc després de l'incendi.
- S'ha de considerar el paper que poden tenir zones cremades fa pocs anys, i actualment en fase arbustiva o d'herbassar, en propagar el foc cap a zones arbrades.
- Cal disposar d'informació quantitativa i territorialitzada sobre el temps que triga la vegetació després del foc en assolir graus elevats de risc i, per tant, calen els estudis de base pertinents. Aquests estudis, units als coneixements ja existents sobre els canvis successional de la vegetació mediterrània, permetrien avançar en el camp de la modelització de la dinàmica de la vegetació i del combustible i, per tant, l'optimització de la gestió del risc.

*Capítol 3.* Aproximació a la dinàmica successional de combustible en brolles mediterrànies.

- Les brolles litorals calcícoles estudiades al Baix Camp presenten una baixa productivitat. El patró successional d'acumulació de combustible es caracteritza, com s'ha descrit a bastament en altres formacions arbustives, per un període inicial d'increment més elevat i una estabilització posterior.
- No s'observen diferències significatives entre les càrregues de combustible de vessants obacs i solells.
- La biomassa foliar s'estabilitza en estadis inicials de la successió i s'observa una tendència creixent de la fracció viva llenyosa.
- La necromassa presenta una tendència creixent en les seves fraccions.
- La biomassa de l'estrat herbaci roman força estable al llarg de la successió.
- El nombre d'espècies rellevants a l'hora d'avaluar l'acumulació de biomassa augmenta amb la maduresa de la comunitat.
- Es constata la dominància del garric en les etapes madures de la brolla.
- El risc d'incendi és més elevat en la etapa més madura de la brolla durant períodes d'eixut perllongat. Un incendi, en condicions d'eixut estival, de la brolla de 17 anys simulat amb BEHAVE presentaria una elevada virulència que en dificultaria el seu control i l'atac en el seu front no seria possible.

*Capítol 4.* La modelització de la dinàmica de la vegetació en ecosistemes arbustius mediterranis: una aproximació funcional a partir del model de creixement forestal GOTILWA+.

- S'ha desenvolupat un model semimecanístic que permet la simulació del creixement d'una coberta arbustiva i, amb aquest, el canvi de les seves propietats estructurals a partir, especialment, de la dinàmica de l'aigua i les diferents estratègies d'assignació del carboni en el sistema. El model



s'inspira en la filosofia plantejada per GOTILWA+ en ecosistemes forestals.

- Les simulacions amb el mòdul arbustiu de GOTILWA+ han permès concloure que, malgrat les simplificacions i suposicions introduïdes en el model i gràcies al seu plantejament conceptual, el model és capaç de descriure la dinàmica de diferents paràmetres estructurals d'una manera satisfactòria.
- El model té la potencialitat d'esdevenir una eina en l'avaluació de la dinàmica del combustible en ecosistemes mediterranis i, per tant, un instrument d'ajuda en la gestió preventiva del risc d'incendi.

*Capítol 5.* Exercicis de validació del mòdul arbustiu de GOTILWA+ en ecosistemes mediterranis.

- El model reproduïx de forma realista la dinàmica successional de la fitomassa aèria, segons els objectius previs del model i atenent al nivell de simplificacions assumides.
- La validació del model planteja un seguit de reptes per a garantir la seva progressiva robustesa i un major grau de realisme, especialment, l'aprofundiment en aquells processos encara no prou ben definits o coneguts.
- Les seves sortides són fàcilment interpretables i acoblables a models de propagació del foc.
- Alhora, la seva sensibilitat als factors ambientals, el fa útil com a eina exploratòria en els possibles escenaris climatològics futurs condicionats pel canvi climàtic.
- Caldrà avançar en la generalització d'aplicabilitat del model a diferents comunitats arbustives (per ara constreta a formacions perennifòlies i rebrotadores). En aquesta línia, també serà important validar satisfactòriament l'encaix del mòdul arbustiu de GOTILWA+ amb la resta de components del model forestal.

- S'haurà d'avançar en l'avaluació de la resposta de la vegetació a diferents règims de pertorbació, incorporant-hi la recurrència i els diferents nivells d'intensitat.

*Capítol 6. Efectes del canvi climàtic en ecosistemes arbustius mediterranis: una aplicació del mòdul arbusti de GOTILWA+.*

- En un escenari mig pel que fa a l'evolució de les precipitacions, s'observen efectes sobre la disponibilitat d'aigua al sòl, que decreix notablement respecte la simulació Control.
- Aquests efectes, a més, es troben condicionats per un seguit de canvis en els fluxos d'aigua i carboni del sistema produïts per la variació climàtica (augment de CO<sub>2</sub> i augment de la temperatura). L'efecte fertilitzant de l'augment del CO<sub>2</sub> i el creixement de la vegetació en són un exemple.
- Una disminució creixent de la disponibilitat d'aigua en el sòl com la predita en escenaris de canvi climàtic podria comprometre progressivament el creixement i supervivència dels individus d'espècies amb majors requeriments hídrics.
- Les condicions climàtiques futures condueixen les formacions arbustives simulades cap a proporcions més elevades de necromassa en peu respecte la biomassa aèria total que, alhora, és més elevada. També augmenta la quantitat de material fi (viu i mort) present a la coberta.
- Aquests fets, si els lliguem amb la resta d'interaccions implicades (augment d'episodis de sequera, disminució de la disponibilitat hídrica, augment de temperatura mitjana) poden condicionar canvis en la freqüència dels incendis (en el sentit d'augmentar-ne la reiteració) i augmentar la virulència (en intensitat) de focs en aquestes comunitats.