ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

EFECTIVITAT DELS TRACTAMENTS D'ACLARIDA EN LA REDUCCIÓ DEL RISC DE PROPAGACIÓ D'INCENDIS EN REGENERATS DE PI BLANC

Memòria de Tesi Doctoral presentada per
Ruth Domènech Jardí
per obtenir el títol de Doctora per la Universitat Politècnica de Catalunya

Dirigida per Elsa Pastor Ferrer

Barcelona, setembre de 2011
Centre d'Estudis del Risc Tecnològic, Departament d'Enginyeria Química
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona
Universitat Politècnica de Barcelona

ACTA DE QUALIFICACIÓ DE LA TESI DOCTORAL

Reunit el tribunal integrat pels sota signants per jutjar la tesi doctoral:

Títol de la tesi: .....

Autor de la tesi: .....

Acorda atorgar la qualificació de:

- ☐ No apte
- ☐ Aprovat
- ☐ Notable
- ☐ Excel·lent
- ☐ Excel·lent Cum Laude

Barcelona, ……. de/d'…..…….. de .....….

El President

.....
(nom i cognoms)

El Secretari

.....
(nom i cognoms)

El vocal

.....
(nom i cognoms)

El vocal

.....
(nom i cognoms)

El vocal

.....
(nom i cognoms)

Al sud, que tant crema,

crema de colors i d'olors,

crema de caràcters tossuts,

crema de cerç i de fred,

crema i hi ha qui tem la seva llum.

I creix una vegada i altra després del foc,

obstinat i valent.

A tot aquest sud que m'omple el cor

i és el meu nord.

AGRAÏMENTS

No puc fer altra cosa que pensar en aquests darrers quatre anys com en una cursa de muntanya i és que el recorregut i moltes de les sensacions que he viscut són comparables. La tossuderia per acabar, l'esforç en les pujades, la duresa del terreny, els canvis de ritme, competir contra mi mateixa, però també la bellesa del paisatge, els ànims de la gent que m'ha acompanyat i empès en les pujades i l'alegria d'arribar a la meta, mirar enrere i veure el camí recorregut. I tot això no hagués estat possible sense l'ajuda i suport de tot un conjunt de persones. A tots i totes els que d'alguna manera o altra han fet possible que aquesta tesi sigui una realitat, moltes gràcies.

Aquesta tesi s'ha realitzat al CERTEC on sempre he trobat les facilitats i mitjans necessaris per dur-la a terme. Voldria donar les gràcies a l'Elsa, per la seva direcció, dedicació i atenció. I a la resta de companys i professors del CERTEC que m'han ajudat dia a dia en el transcurs d'aquests quatre anys.

Al professor Guillermo Rein de la Universitat d'Edimburg l'hi he d'agrair el seu optimisme, empatia i confiança. I a la resta de companys del Fire Group la seva bona acollida.

Fora de l'àmbit laboral, vull esmentar els amics que han compartit amb mi muntanya i esport, poesia i tertúlies, Vandellòs i Barcelona, i que m'han ajudat a donar l'empenta final a aquesta tesi.

Vull agrair especialment la dedicació i estima de les meues germanes, l'Eva i la Sara, sense elles al meu costat res de tot això hauria estat possible. Els meus pares també han tingut un paper important, ells m'han ensenyat moltes de les coses que mai he trobat als llibres, valors i sabers que m'han fet créixer com a persona. I la iaia, que tot i que cada dia sembla estar més lluny, la sento encara ben a prop.

El Marc ha estat el que més ha patit aquesta tesi, sobretot en l'etapa final. Ell m'ha animat a continuar corrent, tot i els entrebancs, ha estat pacient i prudent, però també decisiu. Gràcies per ser-hi i sobretot per deixar-me ser-hi a mi.

Aquesta tesi es va iniciar al mateix temps que va néixer el meu nebot Adrià, s'ha fet gran mentre ell creixia, i ha arribat a acabar-se gràcies a la motivació que aquesta petita cosa m'ha transmès dia a dia.

1. INTRODUCCIÓ

A Catalunya com en bona part de la Conca Mediterrània, l'acumulació de combustible en els boscos es deu bàsicament a dos esdeveniments que es van donar paral·lelament a partir de la segona meitat del segle passat i que han influenciat fortament en l'estructura actual dels boscos. D'una banda, l'abandonament de les pràctiques agrícoles i, d'altra banda, l'increment de l'eficiència en les tasques d'extinció dels incendis forestals, que han afavorit la continuïtat vertical i horitzontal del combustible i l'augment de la càrrega de les masses forestals. Aquesta situació ha propiciat boscos més vulnerables a la propagació d'incendis i, particularment, l'aparició dels grans incendis forestals. Aquests incendis, de gran virulència i amb un patró de propagació per sobre de la capacitat dels mitjans d'extinció, són els responsables de pràcticament la totalitat de la superfície cremada cada any a Catalunya. Tot i que en els darrers anys els mitjans i tècniques utilitzats en l'extinció d'incendis forestals han millorat i s'han dut a terme més actuacions preventives, les millores assolides continuen essent insuficients per evitar aquests grans incendis forestals.

L'estudi dels incendis forestals és complex per la gran diversitat de fenòmens físics, químics i termodinàmics que intervenen en el seu inici i propagació, així com per la gran variabilitat espacial i temporal de factors que en determinen el comportament, com ara la distribució i tipus de combustible, la topografia i les condicions ambientals en què es desenvolupen els

incendis. Una manera d'abordar l'estudi d'incendis és mitjançant la utilització d'eines de simulació, que descriuen el comportament d'un eventual incendi a partir del coneixement dels factors ambientals, topogràfics i del combustible. Els simuladors porten implementats diversos models matemàtics, els quals estan compostos d'un recull més o menys ampli d'equacions plantejades a partir d'expressions teòriques, observacions experimentals o ambdues. La solució d'aquestes equacions proporciona l'evolució temporal i/o espacial d'una o diverses variables descriptores del comportament de l'incendi, com per exemple la velocitat de propagació, la intensitat lineal del front o el consum de combustible, entre d'altres.

Els simuladors d'incendis forestals permeten anticipar comportaments perillosos en la propagació del foc i, per tant, fan possible racionalitzar i optimitzar esforços en la planificació i ordenació del territori. Són eines de gran utilitat tant en la presa de decisions per la gestió de les emergències com en la planificació de tasques de prevenció com és el cas de la realització de tractaments silvícoles. En aquest cas, la simulació d'incendis forestals permet avaluar l'efectivitat dels tractaments de combustible en la reducció del risc d'incendis forestals, ja que ajuda a detectar aquelles zones on un eventual incendi es propagarà amb més facilitat i intensitat, de manera que es poden planificar les mesures necessàries per reduir-ne el risc potencial d'incendi.

Una altra manera d'abordar l'estudi del comportament dels incendis forestals és mitjançant l'experimentació. L'experimentació del fenomen dels incendis forestals és complex, ja que no es poden reproduir a escala real casos de grans incendis forestals. A més a més, en moltes ocasions l'obtenció de dades a partir de l'incendi real és impracticable degut als riscos inherents als incendis. Per aquesta raó tradicionalment s'han realitzat experiments a laboratori o a camp en unes condicions més o menys controlades (Pérez, 2010).

Existeixen nombrosos treballs realitzats en instal·lacions de laboratori dissenyades específicament per a simular petits fronts d'incendis a laboratori (per exemple Pastor, 2004; Guijarro *et al.*, 1997; Dupuy, 1997; Viegas, 2005; Catchpole *et al.*, 1998). Per bé que les condicions a laboratori són òptimes per obtenir repetibilitat i control en l'experimentació, els experiments realitzats de forma controlada a camp permeten acostar-se d'una forma més detallada al fenomen tot i que no sempre es poden controlar tots els paràmetres i és difícil aconseguir-ne repliques (Van Wagner, 1971). Alguns exemples rellevants de cremes a camp són les realitzades a Austràlia (Gould *et al.*, 2001), Canadà (Alexander *et al.*, 1998) o Portugal (Viegas *et al.*, 2002).

En aquest primer capítol es presenten alguns conceptes bàsics sobre el combustible forestal, i en concret sobre els regenerats de pi blanc, necessaris per la comprensió i desenvolupament de la tesi. A continuació s'analitzen els aspectes més destacats que van caracteritzar el gran incendi forestal de 1994 del Bages-Berguedà, on es localitza l'àrea d'estudi del present treball. En la part final del capítol s'efectuen diferents hipòtesis de treball a partir de les quals se'n deriven els objectius específics d'aquesta tesi.

1.1. Propietats del combustible forestal

Les propietats del combustible tenen una forta influència en el comportament del foc i els conseqüents efectes d'aquest sobre els ecosistemes. El combustible és l'únic factor sobre el qual l'home pot actuar per mitjà de la gestió silvícola dels espais forestals.

La caracterització del combustible contribueix a la predicció de la intensitat, la severitat i els efectes dels incendis forestals. Una manera de descriure el combustible és atenent a les seves propietats extrínseques o intrínseques. Les propietats extrínseques (macroscòpiques) tracten aspectes com la càrrega, la mida i la forma, la compactació, la densitat aparent o la disposició en el terreny dels combustibles forestals, mentre que les propietats intrínseques (microscòpiques) fan referència a la composició química, la densitat i les propietats tèrmiques del combustible. Cal afegir també una propietat inherent al combustible forestal, transitòria i en perpetu equilibri amb el medi ambient, el contingut d'humitat.

Els combustibles forestals es poden classificar en diferents estrats segons la seva disposició vertical sobre el terreny: sòl, superfície i capçades. El foc té un comportament molt diferent en cadascun d'aquests estrats.

Els combustibles del sòl inclouen les arrels, els residus vegetals en descomposició i l'humus. Degut a la compactació d'aquest estrat, la propagació dels incendis es comporta d'una forma molt lenta, predominant els incendis de combustió incandescent.

L'estrat de superfície inclou el combustible en peu (arbres i arbusts petits i herbes) i el dipositat al sotabosc (virosta, restes d'aclarides o troncs caiguts). La majoria d'incendis s'inicien i es propaguen a traves d'aquest estrat.

La definició del combustible de capçada difereix segons l'autor i el tipus d'ecosistema (Fernandes, 2009; Arroyo *et al.*, 2006; Arroyo *et al.*, 2008), però habitualment es considera conformat per les fulles i les branques més primes de les copes dels arbres. En aquest treball

s'ha considerat que formaven part del combustible de capçades els arbres superiors a 1,3 m. Els incendis que propaguen a través d'aquest estrat tenen una intensitat i velocitat molt superior a les altres tipologies d'incendis.

1.1.1. Propietats extrínseques

Càrrega de combustible

La càrrega de combustible correspon a la quantitat de combustible present per unitat de superfície i s'expressa generalment en tones per hectàrea (t ha^{-1}) o kilograms per metre quadrat (kg m^{-2}). La massa de combustible es mesura en base seca ja que d'aquesta manera és possible caracteritzar un combustible independentment del seu estat, sense tenir en compte la seva humitat que varia diàriament i estacional. La càrrega de combustible pren valors molt diferents segons el tipus d'estructura forestal, com ara des d'1 a 5 t ha^{-1} per herbassars i fins a 30 a 200 t ha^{-1} per boscos amb presència de restes (Pyne *et al.*, 1996).

La càrrega de combustible mort de superfície s'acostuma a classificar en combustible d'1h (W_{1h}), de 10h (W_{10h}), de 100h (W_{100h}) o de 1.000h ($W_{1.000h}$) pel que fa al seu temps de resposta (Deeming *et al.*, 1977) per a canvis en la humitat (vegeu apartat 1.2.3). El combustible d'1h correspon a material vegetal de diàmetre inferior a 0,6 cm, el combustible de 10h inclou diàmetres entre 0,6 cm i 2,5 cm, el combustible de 100h diàmetres entre 2,5 cm i 7,6 cm i el de 1.000h diàmetres superiors a 7,6 cm. La càrrega de combustible viu es classifica en herbaci (W_{Lh}) i llenyós (W_{Lw}).

Per les capçades, la càrrega del combustible generalment es calcula a partir de la càrrega de combustible disponible (*ACFL*, t ha^{-1}), que inclou només el combustible fi que és el que crema durant el pas del front de flama en un incendi de capçades (Call i Albini, 1997). Normalment s'assumeix que el combustible disponible de capçades està format pel fullatge i una part del combustible viu i mort de les branques. Alguns autors (Brown i Reinahrdt, 1991; Reinhardt *et al.*, 2006) suggereixen estimar la càrrega de combustible disponible de capçades com la suma de la massa de fullatge i la meitat del combustible de 0-0,6 cm de diàmetre.

Per calcular la càrrega de combustible de capçades és freqüent la utilització d'equacions al·lomètriques (Brown, 1978) que relacionen la massa de combustible amb paràmetres fàcilment mesurables. D'aquests, el diàmetre a l'altura del pit (*DBH*, en cm), generalment mesurat a 1,3 m d'altura, és el més utilitzat.

Mida i forma del combustible

La mida i forma dels combustibles vegetals s'expressa sovint en termes de la relació entre la seva àrea superficial i el seu volum (σ, m^{-1}). Com més petit sigui el combustible més gran serà aquesta relació. Mesurar la mida i la forma dels combustibles vegetals és difícil degut a la seva gran varietat. En general per combustibles que poden assimilar-se a un cilindre, la relació àrea superficial-volum pot determinar-se amb l'equació [1.1]:

$$\sigma = \frac{4}{d} \qquad \text{Eq. 1.1}$$

On, σ és la relació àrea superficial-volum [m^{-1}] i d el diàmetre [m].

Per exemple, assumint una geometria cilíndrica de les partícules de combustible per a un branquilló de 0,6 cm de diàmetre la relació àrea superficial-volum és de 667 m^{-1} mentre que per a un tronc de 15 cm de diàmetre és de 27 m^{-1}. La mida de les partícules té una gran influència en la propagació d'un incendi, les partícules petites tenen una superfície gran comparada amb el seu volum, de manera que s'assequen més ràpidament i també són més fàcils i ràpides de cremar.

Compacitat i densitat aparent del combustible

La compacitat és una mesura de l'espai existent entre la vegetació. Com menys espai hi hagi major serà la compactació, i en general, més difícil serà la propagació. Contràriament, si la vegetació està menys compactada l'aire penetrarà còmodament en el combustible i facilitarà la combustió.

La compacitat s'acostuma a expressar en termes de densitat aparent (ρ_b, kg m^{-3}), que és la massa seca de material vegetal dividida pel volum que ocupa en una determinada disposició. La densitat aparent és sempre menor que la densitat del material, ja que aquesta darrera no considera l'aire, mentre que en la densitat aparent part del volum està ocupat per l'aire. Per aquesta raó la densitat aparent és un bon indicador de la porositat. Per a les capçades es defineix la densitat aparent del combustible disponible (*ACBD*, kg m^{-3}) a partir de la càrrega disponible del combustible de les capçades i el volum d'aquestes assumint-ne també una geometria coneguda, com ara un con. Un altre paràmetre que dóna idea de la compacitat del combustible és la cobertura, ja sigui de superfície (*CS*, %) o de capçades (*CC*, %), definida com el percentatge de terreny cobert per un estrat determinat.

Disposició del combustible

La forma com el combustible es distribueix té una gran influència en el comportament de l'incendi. En general es poden distingir dues disposicions diferents segons la orientació, la disposició horitzontal i la vertical. L'herba, els arbusts i els arbres tenen una disposició vertical sobre el terreny, mentre que les branques, les fulles mortes o els troncs morts caiguts, en general tenen uns disposició horitzontal.

La disposició horitzontal facilita la propagació d'un incendi. En àrees esclarissades la propagació serà més difícil que en àrees on el combustible es reparteix d'una forma continua i uniforme. La disposició vertical determina l'estrat que es veurà involucrat en l'incendi. Quan hi ha continuïtat vertical l'incendi pot fàcilment arribar a les capçades.

Els paràmetres que s'acostumen a utilitzar per determinar la disposició del combustible són molt variats. La distància mitjana entre els arbres (*TD,* m) i l'amplada de les capçades (*CW,* m) donen una idea de la continuïtat horitzontal de l'estrat de capçades. D'altra banda, també s'utilitza l'altura de les capçades (*CH,* m) que correspon a la diferència entre l'altura de l'arbre (*SH,* m) i l'altura de la base de la capçada (*CBH,* m) definida com la distància des de la superfície del terreny fins a la base de l'estrat de capçada. Correspon a l'altura més baixa per sobre del terreny en la qual hi ha suficient combustible de capçada per propagar el foc verticalment a través de la capçada (Scott i Reinhardt, 2007). Sovint també és útil conèixer la ràtio de capçada (*CR,* %), que és la proporció entre l'altura de la capçada i l'altura vertical total de l'arbre. La distància entre estrats (*FSG*, m), és a dir, la diferència entre la base de les capçades arbòries i l'altura mitjana de l'estrat de superfície (D_s, m), que pot estar composat per virosta, estrat herbaci i estrat arbustiu, dóna també informació de la continuïtat vertical. Com més gran sigui aquesta diferència més difícil li serà al foc arribar a les capçades.

1.1.2. Propietats intrínseques

Les propietats intrínseques són aquelles característiques microscòpiques dels combustibles forestals que afecten el comportament del foc, específicament pel que fa a la reacció de combustió. En termes generals es classifiquen en tres categories: composició química, densitat i propietats tèrmiques.

Composició química

Els teixits vegetals estan constituïts majoritàriament per molècules orgàniques de cadena llarga (polímers) amb un contingut aproximat del 50 % de carboni, 44 % d'oxigen i 5 % d'hidrogen (% en massa) (Arnaldos *et al.*, 2004). Les molècules quantitativament més importants són la cel·lulosa, l'hemicel·lulosa i la lignina, però les plantes tenen també altres compostos que, tot i no tenir tanta presència, tenen un paper rellevant en la inflamabilitat dels vegetals, com els terpens i les resines o els minerals.

Els terpens són substancies oloroses amb un punt d'ebullició baix que volatilitzen fàcilment. El seu contingut en les fulles i tiges varia entre el 0-2 %, tot i que en algunes espècies pot arribar al 6 %. Les resines són compostos poc volàtils formats per àcids grassos, àcids resínics i fitosterols. Els terpens i les resines considerades conjuntament alliberen gairebé el doble d'energia durant la reacció de combustió que la cel·lulosa. Això fa augmentar l'energia alliberada en incendis amb combustibles rics en aquests compostos.

Els minerals són compostos minoritaris dels vegetals però poden influir en el procés de combustió. La fusta conté generalment menys del 2 % de cendres, mentre que les fulles poden tenir entre el 5 i 10 % (excepte en arbusts de zones àrides i salines que pot arribar a 40 %). Els minerals actuen de catalitzadors en la piròlisi de la cel·lulosa afavorint la formació de carbó en detriment dels compostos volàtils inflamables. Els vegetals rics en minerals cremen amb més dificultat i formen flames més petites que els que són pobres en minerals.

Densitat

La densitat (ρ, kg m^{-3}) dels combustibles vegetals, definida com massa per unitat de volum, varia en funció de la humitat. El contingut d'aigua de les plantes és variable i afecta tant a la massa com al volum. Per aquesta raó la densitat s'expressa sempre en base seca. La densitat considerant el combustible sec varia d'una espècie a una altra i generalment els valors es situen entre 320 i 720 kg m^{-3} (Arnaldos *et al.*, 2004).

Propietats tèrmiques

Les propietats tèrmiques més importants dels combustibles forestals són la conductivitat tèrmica, la calor específica i la calor de combustió.

La conductivitat tèrmica (k, W m^{-1} K^{-1}) és una mesura de la capacitat de conducció de calor del material vegetal. Existeixen diferents factors que poden afectar aquesta propietat com per exemple la densitat, la humitat, la direcció del flux de calor (longitudinal, radial o tangencial respecte el creixement dels anells en el tronc dels arbres), les irregularitats (com els nusos que presenta la fusta) i la temperatura. En general augmenta amb la densitat, la humitat i la temperatura.

La calor específica (C_p, kJ kg^{-1} K^{-1}), també anomenada capacitat calorífica, és la quantitat d'energia necessària per incrementar la temperatura d'una unitat de massa (kg) en un grau. En la fusta depèn bàsicament de la temperatura i de la humitat, essent pràcticament independent de la densitat i de l'espècie.

La calor de combustió (kJ kg^{-1}) és la quantitat d'energia alliberada durant la reacció de combustió, per unitat de massa. Aquesta energia varia d'una espècie a una altra, d'una part de la planta a una altra i també en funció de la humitat. Sovint, la calor de combustió s'acostuma a donar en termes de poder calorífic inferior (*PCI*, kJ kg^{-1}) que quantifica el balanç net d'energia disponible per a la propagació del foc, després que part d'aquesta energia hagi estat emprada per a l'evaporació de la humitat del combustible.

1.1.3. Contingut d'humitat del combustible

El coneixement del contingut d'humitat del combustible és un factor clau en la propagació dels incendis forestals, ja que part de l'energia alliberada durant la combustió és emprada per evaporar l'aigua de la vegetació adjacent a la que s'està cremant. Si aquesta energia no és suficient per evaporar l'aigua, no es produirà la ignició i per tant, el procés de combustió s'aturarà. Així i tot, el contingut d'humitat del combustible pot considerar-se una propietat més del combustible, però s'ha preferit dedicar-li un apartat propi atès el seu paper fonamental en el comportament del foc.

El contingut d'humitat del combustible (M, %) es defineix com la massa d'aigua per unitat de combustible totalment sec. Depèn bàsicament de les condicions ambientals, del tipus de combustible i del seu estat (viu o mort). En general, els combustibles morts tenen valors d'humitat inferiors a 30 % (llindar considerat com a humitat d'extinció) (Albini, 1976). D'altra banda, els combustibles vius poden tenir humitats des de 30 % al 300 %.

Humitat dels combustibles morts

La humitat dels combustibles morts depèn fonamentalment dels següents factors meteorològics: pluja, vent, temperatura i humitat de l'aire.

En el cas de la pluja, la fusta per exemple absorbeix aigua mentre la seva superfície estigui mullada, per tant, la seva humitat depèn bàsicament de la durada de la pluja. En canvi, la humitat dels combustibles dipositats en capes sobre el sòl com ara les fulles o l'humus depèn sobretot de la quantitat d'aigua caiguda ja que el sòl reté la major part d'aquesta aigua que pot anar difonent lentament cap al combustible encara que hagi parat de ploure.

El vent contribueix a l'assecament dels combustibles, arrossegant el vapor d'aigua que s'estigui alliberant. L'efecte del vent acostuma a ser més important en partícules de diàmetres petits (major σ) que en combustibles de diàmetres grans.

La dependència que presenta la humitat respecte les condicions ambientals provoca que el contingut d'humitat sigui un paràmetre difícil de determinar degut a la gran variabilitat temporal de la temperatura i la humitat relativa de l'atmosfera. Quan un combustible s'exposa a l'aire a una temperatura i humitat determinades, aquest combustible perdrà o guanyarà aigua fins que s'estableixin les condicions d'equilibri, pel que fa a la humitat entre la vegetació i l'aire. Les condicions ambientals varien al llarg del dia i per tant l'equilibri a assolir també. Això fa que en general el combustible es trobi en un estat transitori permanent, buscant una situació d'equilibri que va canviant.

La manera com un combustible forestal mort reacciona davant els canvis meteorològics buscant la humitat d'equilibri depèn de les característiques del combustible, la posició respecte el sòl i la topografia del terreny on es trobi. En funció d'aquests factors el temps que tardarà a assolir la humitat d'equilibri variarà. Per facilitar el càlcul d'aquest interval s'utilitza el concepte de temps de resposta (Fosberg, 1970) que correspon al temps que tarda un combustible mort en equilibrar el seu contingut en aigua amb la humitat relativa ambiental. Concretament és el temps que tarda un combustible mort en una ambient de 26,7 °C i una humitat relativa de 20 % en assolir el 63 % de la diferència entre la humitat inicial i la humitat d'equilibri en les condicions ambientals fixades (Schroeder i Buck, 1970). El temps de resposta és una característica del combustible que depèn bàsicament del seu diàmetre.

Tal i com s'ha comentat prèviament, una manera generalitzada de fer una distribució diametral dels combustibles és segons la seva mida, atenent al temps de resposta (1h, 10h,

100h, 1.000h). Genèricament, els combustibles d'1h i 10h estan disponibles per la combustió en condicions extremes mentre que els combustibles de 100h i 1.000h necessiten d'un període previ de sequera acumulada.

Finalment pel que fa a la temperatura, cal mencionar que la temperatura de l'aire afecta tant la seva humitat com la seva pressió de vapor i, per tant, afecta la humitat d'equilibri. Per la seva banda, la temperatura del combustible depèn de l'hora del dia, de l'angle dels sol i del nivell d'insolació i la temperatura de l'aire, entre d'altres. Com més elevada és la temperatura del combustible menor la humitat relativa de l'aire que l'envolta i, per tant, menor la humitat d'equilibri, fet que alhora afavoreix l'assecament del combustible.

Humitat dels combustibles vius

La humitat dels combustibles vius depèn de forma important del seu cicle vegetatiu, que varia d'una espècie a una altra i en totes elles depèn de la variabilitat estacional. També depèn de si el combustible viu és herbaci o llenyós. Així mateix, el contingut en humitat de les fulles té un influència marcada en el comportament dels incendis de capçades. Per exemple, el fullatge tendre en l'inici del seu creixement té valors d'humitat al voltant del 300 %, quan el creixement s'ha completat i aquest fullatge és madur la humitat es aproximadament del 100 %. Finalment, quan les fulles canvien de color i comencen a caure el seu valor d'humitat es situa prop del 50 % (Rothermel, 1983).

1.2. Descripció dels regenerats de pi blanc

El pi blanc (*Pinus halepensis*) cobreix al voltant de 2,5 milions d'hectàrees de la conca mediterrània i és especialment abundant a la seva part occidental (Quézel, 2000). A Catalunya és també el tipus de bosc amb un major nombre d'hectàrees (239.092 ha) i es pot trobar des d'arran del mar fins a prop dels 1.000 m, si bé és molt més abundant entre els 200 i els 600 m. A les comarques de la Catalunya central (Anoia, Bages, Berguedà) hi ha 48.634 ha de boscos de pi blanc (Burriel *et al.*, 2000).

El pi blanc forma comunitats on coexisteixen altres especies arbòries com l'alzina (*Quercus ilex*) o el roure (*Quercus humilis*), amb un estrat superficial molt dens format típicament per llentiscle (*Pistacea lentiscus*), argelaga (*Ulex parviflorus*), garric (*Quercus coccifera*), romaní (*Rosmarinus officinalis*), brucs (*Erica* spp.) o estepes (*Cistus* spp.), entre altres (Eugenio *et al.*, 2006). Aquestes comunitats són molt inflamables, contenen càrregues de combustible molt

elevades i presenten continuïtat vertical en el llit de combustible, per això poden sofrir incendis particularment intensos.

El pi blanc és una espècie heliòfila i xeròfila i té una capacitat de dispersió de les llavors pel vent important. Aquestes característiques fan que pugui viure en ambients força secs, i sobretot, que els pugui colonitzar (Hanley i Fenner, 1997; Richardson i Rundel, 1998). Com espècie típicament colonitzadora té un important creixement vertical en la seva joventut fins als 10 o 20 anys. Aquest creixement disminueix paulatinament fins als 70 o 80 anys quan finalment s'estanca (Papió, 1994). Creix sobre una àmplia varietat de terrenys, preferentment sobre substrats bàsics, i sobreviu en terrenys molt pobres. És l'espècie de pi que tolera concentracions més altes de llims, característica que explica la seva presència en sòls degradats, rocosos i de poca profunditat (Llobet, 2008). S'expandeix amb facilitat per les superfícies no arbrades i freqüentment colonitza conreus abandonats (Rigolot, 2004), és per això que té una important funció protectora i ecològica.

Els boscos mediterranis de pi blanc són el clàssic exemple de vegetació que està molt ben adaptada al foc, davant el qual mostra una considerable capacitat de persistència (Trabaud, 2000). Aquesta capacitat s'atribueix a la combinació de diferents estratègies ecològiques i reproductives, entre les que destaquen la seva elevada precocitat reproductiva i una abundant producció de llavors, part de les que queden emmagatzemades i retingudes en pinyes serotonines les quals s'obren per efecte de la temperatura (Daskalakou i Thanos, 1996). Aquestes estratègies són efectives si el temps transcorregut entre dos incendis és major que el període necessari per a produir un banc de llavors suficientment gran, estimat entre 10-15 anys (Pausas *et al.*, 2004; Cabanillas, 2010) i si es donen condicions climàtiques favorables els anys posteriors a l'incendi. Tanmateix cal esmentar altres característiques que en determinades circumstàncies fan que el pi blanc sigui vulnerable davant els incendis forestals d'alta intensitat i provoquen una elevada mortalitat d'arbres (Agee, 2000), com per exemple l'elevat contingut de resines i olis essencials, extremadament inflamables (Vélez, 2000).

Les masses boscoses originades després dels incendis forestals s'anomenen típicament regenerats. En el procés d'autosuccessió del pi blanc que esdevé després d'un incendi forestal es poden distingir genèricament diferents etapes segons l'estat de desenvolupament dels arbres (Farriol i Mascort, 2010) que poden tenir una durada diferent segons els nutrients dels que es disposi, la quantitat d'aigua, l'orientació del terreny o l'existència de pertorbacions, entre d'altres.

1. Etapa seminal (entre 0-30 cm d'alçària). Immediatament després de l'incendi sovint hi ha un elevat contingut de cendres al sòl, fet que aprofiten les espècies més oportunistes per créixer, sobretot les herbàcies (Naveh, 1990). Paulatinament aquestes van essent substituïdes per espècies de sotabosc típiques de l'escenari previ a l'incendi, que es regeneren entre el segon i tercer any després del foc, ja sigui a través de llavors o rebrotant. Després de l'incendi, les llavors del pi blanc es troben disperses pel terreny, germinen i comencen a aparèixer els primers peus.

2. Etapa de plançoneda (entre 30-130 cm d'alçària, en el cas del pi blanc pot assolir alçàries superiors). El pi creix juntament amb altres espècies arbustives, de manera que el conjunt es pot considerar com una brolla arbrada. Les espècies arbustives preparen el terreny perquè puguin créixer altres espècies, com per exemple l'argelaga que fixa nutrients al sòl. Els troncs dels pins són molt prims i concentren la major part de la biomassa a les capçades.

   Les plançonedes de pi blanc es caracteritzen per ser associacions amb una elevada densitat de peus d'arbres de la mateixa edat, monoespecífiques, compactes i intransitables (Figura 1.1). Creixen en poca alçada, comparat amb un bosc madur, a causa de la gran competència entre peus. Són estructures que deixen penetrar poca llum de manera que sovint les branques inferiors dels pins acostumen a estar seques o mortes.

3. Etapa de plançoneda grossa. Un cop el pi blanc disposa de prou nutrients creix en altura. Continua la competència intraespecífica entre els peus del pi blanc.

4. Etapa de perxada (fins a un diàmetre de 20 cm). Els troncs es fan gruixuts, bona part de la biomassa de la massa forestal ha passat a formar part dels troncs dels arbres. Les capçades no experimenten un increment important de biomassa. Cada cop hi ha menys arbust.

5. Etapa de fustal (diàmetre superior a 20 cm). Els troncs continuen creixent en amplada. Aquesta és l'etapa final de la successió del pi blanc, amb densitats de peus molt inferiors a les etapes seminals, plançoneda i plançoneda grossa. La distància entre la superfície i la capçada dels arbres és gran, els arbres són alts i el sotabosc és poc dens.

Sota els pins pot existir una gran varietat de sotabosc (brolles, prats secs, joncedes, garrigues o bardisses) i també roures i alzines joves els quals, segons alguns autors si es deixa progressar el procés de successió, a la llarga constituiran alzinars i rouredes que substituiran les pinedes denses de pins joves (Prévosto, 2011; Barbéro *et al.*, 2000; Zavala *et al.*, 2000).

Tanmateix, el pi blanc per si mateix també pot formar un bosc ben estructurat si les condicions post incendi són favorables.

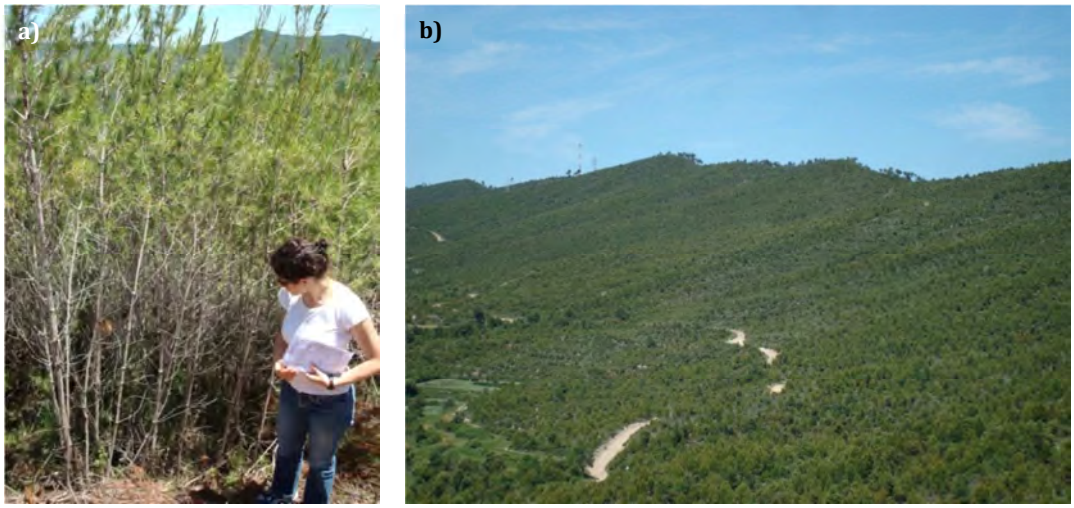

Figura 1.1. Regenerat de l'incendi de 1994 de la Catalunya central. a) Detall d'un regenerat de pi blanc en estat de plançoneda. b) Vista panoràmica d'una zona coberta per regenerats.

Llobet (2008) classificà els regenerats de pi blanc de la Catalunya central en funció de si estaven formats únicament per pi blanc o bé es trobaven presents altres espècies arbòries. Gairebé el 50 % dels regenerats corresponien a masses monoespecífiques de pi blanc amb densitat superiors a 2.000 peus ha^{-1}. Espelta (2004) menciona densitats de regenerats després de l'incendi de la Catalunya central de l'any 1994 de fins a 80.000 peus ha^{-1}.

Tot i els beneficis inqüestionables de la ràpida colonització del pi blanc després d'un incendi, les elevades densitats de la nova massa boscosa impliquen un estancament en el desenvolupament de la massa i fan també que sigui molt vulnerable a un nou incendi, degut a la continuïtat vertical i horitzontal del combustible. També cal considerar el fet que si el període de retorn de l'incendi és massa curt, els peus joves no tenen temps per desenvolupar pinyes madures que assegurin la seva supervivència. A més, la reiteració dels incendis pot conduir a una simplificació de l'estructura d'aquestes comunitats i inclús a comprometre la continuïtat d'aquesta espècie (Tsitsoni, 1997).

1.2.1. Gestió forestal dels regenerats de pi blanc

Davant aquest escenari sorgeix la necessitat de realitzar tractaments d'aclarida per reduir la densitat dels regenerats de pi blanc, concretament en l'etapa de plançoneda. Aquests

tractaments pretenen disminuir el risc d'ocurrència i propagació d'incendis forestals i també millorar l'estructura i potencial de desenvolupament de les masses boscoses i estimular la capacitat reproductiva dels pins i alhora disminuir la competència entre els arbres (Verkaik *et al.*, 2004; González-Ochoa *et al.*, 2004; Lindner *et al.*, 2008).

La gestió forestal en masses boscoses de pi blanc és una pràctica poc freqüent degut al poc valor econòmic de la seva fusta (Prévosto *et al.*, 2011a). A més, tradicionalment la gestió forestal aplicada al pi blanc ha seleccionat els arbres més grans, per tant els que havien superat el procés de selecció favorablement deixant els peus que tenien menys possibilitats de sobreviure. Aquesta selecció ha afavorit l'existència de boscos amb una qualitat baixa.

La gestió forestal dels regenerats de pi blanc no respon a un tipus concret de tècnica silvícola sinó que en cada cas cal definir i modificar la intensitat de les actuacions en base a la resposta de la massa i a la consecució dels objectius (Alejano *et al.*, 2000; Elizondo, 2006) recull diversos models de gestió per al pi blanc. L'aclarida consisteix en la reducció del nombre d'arbres i és el tipus de gestió forestal més freqüentment aplicat a les masses boscoses de pi blanc, i tot i que els models difereixen en la freqüència d'aclarida, coincideixen en realitzar una primera aclarida en la fase de plançoneda del pi blanc.

De las Heras *et al.* (2004) recomanen aplicar als regenerats post-incendi tractaments d'aclarides i poda fins a densitats de 1.600 peus ha^{-1} per mantenir la productivitat d'aquestes masses, valors semblants proposen els diferents models d'aclarida recollits per Elizondo (2006), mentre que Serrada (2003) apunta que 2.000-2.500 peus és una densitat suficient per la regeneració natural del pi blanc. Segons De las Heras *et al.* (2007) les aclarides s'haurien de realitzar entre 4-6 anys després de l'incendi.

La gestió forestal en masses de pi blanc també pot anar encaminada a canviar el tipus de bosc de pi blanc per un bosc mixt amb diferents espècies arbòries, amb l'objectiu d'obtenir una estructura forestal més diversa i més resistent als incendis i a les plagues (Pausas *et al.*, 2004; Vallejo *et al.*, 2006; Prévosto *et al.*, 2011b).

L'efectivitat de diferents tractaments sobre el pi blanc ha estat estudiada principalment a nivell de les característiques estructurals i reproductives, i de la diversitat o la composició d'espècies (Verkaik i Espelta, 2004; De Las Heras *et al.*, 2004; De Las Heras *et al.*, 2007, Torras i Saura; 2008, Moya *et al.*, 2009), però no s'ha donat tanta importància en l'avaluació de l'efectivitat d'aquests tractaments pel que fa a la reducció del risc d'incendis i a la seva evolució al llarg del temps.

1.3. L'incendi forestal de la Catalunya central de l'any 1994

L'incendi forestal de la Catalunya central de l'any 1994 va afectar les comarques del Bages i Berguedà i part del Solsonès. La seva durada, extensió i sobretot virulència van suposar un abans i un després pel que fa a la gestió d'incendis forestals a Catalunya, tant en prevenció com en extinció.

És aquest l'incendi més extens ocorregut fins a dia d'avui al país, amb 45.000 ha cremades i resultant de dos incendis que van començar separats (un a Sant Mateu de Bages, al Bages, i l'altre a Gargallà, al Berguedà) i es van ajuntar posteriorment. L'incendi es va iniciar el dia 4 de juliol del 1994 i va cremar activament durant 4 dies, tot i que es va tardar 11 dies a extingir-lo per complet. Primer va cremar amb vent de ponent, després el tercer dia va girar cap al nord amb una entrada d'una ona de calor de sud.

Cal mencionar també que aquest incendi s'emmarca dins de l'anomenada 'tempesta de foc' del 4 de juliol de 1994, que va provocar simultàniament diferents grans incendis forestals al llarg del litoral mediterrani des de Gibraltar a Marsella (Terrades, 1996) i que va ser el l'incendi més gran a Europa des de que es tenen dades, per davant dels focs de Portugal 2003 i de Grècia 2007.

Abans de l'incendi, l'àrea estava coberta principalment per boscos (71 %), amb algunes zones de conreus (27 %) i poques pastures i zones arbustives (2 %), i no havia cremat en els darrers 70 anys. Les tres principals espècies arbòries abans de l'incendi eren del gènere *Pinus* (90 % de l'àrea forestal), el *Pinus nigra* i *P. halepensis* al sud de l'àrea cremada i *P. sylvestris* al nord-est. La resta d'espècies arbòries presents eren Q*uercus ilex* i *Q. cerrioides*. *Q. ilex* era més abundant que *Q. cerrioides* en boscos de *P. halepensis* (7 % i 1 %, respectivament, d'arbres adults), mentre que les dues espècies presentaven una abundància semblant en els boscos de *P. nigra* (3 % d'arbres adults) i *P. sylvestris* (4 % d'arbres adults) (Habrouk, 2001).

La majoria d'arbres d'aquestes espècies van ser totalment cremades per l'incendi, però molts arbres de Q*. ilex* i *Q. Cerrioides* van rebrotar vigorosament després del foc. D'altra banda el pi blanc es va regenerar paulatinament en les àrees cremades, en canvi els altres tipus de pins presents abans de l'incendi no es van regenerar tan fàcilment ja que són espècies que no presenten els avantatges reproductius del pi blanc com per exemple les pinyes serotonines.

1.4. Hipòtesis de treball

Actualment no es coneix amb exactitud el grau d'efectivitat dels diferents tractaments de combustible per reduir el risc d'incendi. Els tractaments de combustible provoquen la modificació de l'estructura de les masses forestals i per tant de certs paràmetres bàsics del combustible que condicionaran el comportament d'un eventual incendi. Un fet clau alhora d'avaluar aquests tractaments és la gestió de les restes originades. Tot i que les restes de l'aclarida es poden anar descomponent amb el temps, és previsible que en les primeres etapes d'aquest procés el bosc tingui un elevat risc de propagació del foc, degut a una major càrrega de combustible disponible.

La nova configuració del bosc després de l'aplicació d'un tractament de combustible no serà estable en el temps, de manera que la resposta en front d'un incendi d'una massa forestal tractada variarà al llarg del temps i segons el tractament aplicat. La Figura 1.2. pretén mostrar en un sistema de coordenades una eventual evolució teòrica temporal d'un indicador genèric de risc de propagació d'incendi en una massa forestal aclarida sense tractament de restes.

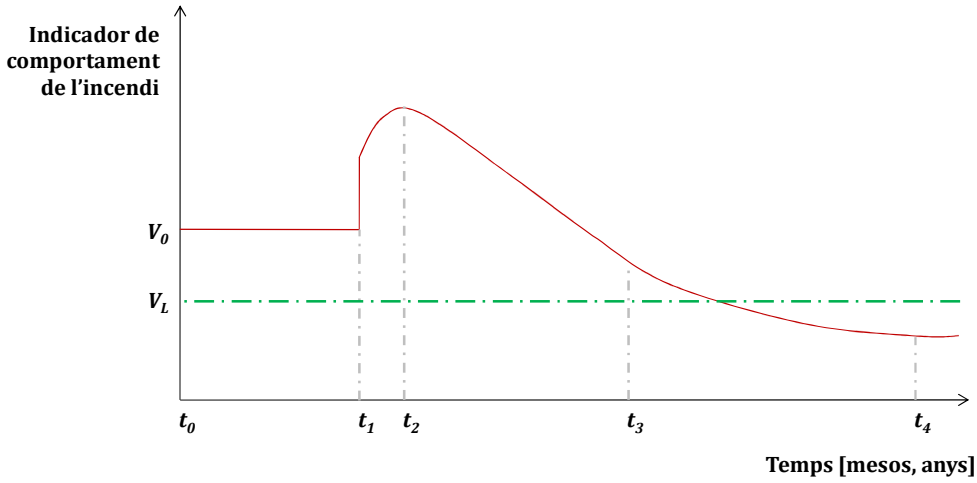

Figura 1.2. Tendència que dibuixa un indicador del risc del risc de propagació d'un incendi en una massa aclarida de regenerat sense gestió de les restes originades amb l'aclarida.

En l'eix d'abscisses d'aquesta figura s'hi representa el temps (que pot tenir unitats de mesos o anys) i en l'eix d'ordenades s'hi pot representar qualsevol variable indicadora del comportament d'incendis forestals (en la figura s'utilitza la notació d'una variable fictícia V).

Per exemple, uns bons indicadors són la potència calorífica despresa en el front d'incendi, la velocitat de propagació, la magnitud de les flames, etc. De la gràfica precedent, se n'observen diferents períodes, il·lustrats en la Figura 1.3:

- t_0: En aquest període la massa forestal encara no està tractada i la variable descriptora de la propagació de l'incendi té un valor inicial determinat, V_0. Aquest valor és superior al valor desitjable (V_L) per sota el qual l'incendi és fàcilment extingible.

- t_1: Correspon al moment en què s'efectua l'aclarida. En aquest període la variable presenta una discontinuïtat i adquireix un valor superior a V_0. Just acabada l'aclarida, es pressuposa un augment de la càrrega de combustible disponible, la qual cosa implicarà un comportament de l'incendi més sever que en el cas anterior.

- t_2: En aquest període és on es poden observar els valors més elevats de les variables descriptores del comportament dels incendis. Quan les restes del tractament d'aclarida dipositades a terra s'han assecat i han assolit al cap d'un temps després de la tala un grau de compactació òptim per a la propagació, la quantitat de combustible disponible per a l'avanç de l'incendi és màxima i així mateix ho és la virulència de l'incendi que hi pot ocórrer.

- t_3: A mesura que passa el temps, les restes es van compactant i degradant i l'escenari que es representa és el d'una massa forestal que té implícita una severitat d'incendi menor a la que tenia abans de ser tractada.

- t_4: El bosc està en unes condicions òptimes pel que fa al comportament d'un eventual incendi. Si aquest ocorre, serà molt menys sever o perillós que en cap de les situacions anteriors descrites i podrà ser extingit (V_L). S'ha assolit el valor desitjat de les variables descriptores del comportament de l'incendi.

En realitat, per una mateixa estructura forestal existeix una família de corbes com la que s'ha descrit en la figura precedent, és a dir, poden esdevenir-se diferents tendències, ja que aquesta evolució depèn fortament de la meteorologia, l'època de l'any en que s'efectua la tala i les condicions orogràfiques del territori. D'altra banda, cada variable descriptora del comportament de l'incendi presentarà també la seva evolució particular.

Tal i com s'ha mencionat, els simuladors poden aportar informació molt valuosa en l'estudi de l'efectivitat dels tractaments de combustible en la reducció del risc de propagació d'incendi. Amb tot, per tal que els simuladors existents puguin ser extrapolats als

ecosistemes mediterranis i utilitzats per realitzar prediccions acurades, cal adaptar-los a les característiques del paisatge típicament mediterrani. Tanmateix, tot i els esforços en recerca realitzats en el camp de la modelització i simulació d'incendis forestals en els darrers anys, els simuladors emprats en l'actualitat encara no s'ajusten prou a la realitat. A la Conca Mediterrània, els principals simuladors utilitzats pels serveis d'extinció contenen models amb un elevat grau d'empirisme procedents dels EUA i la seva implementació presenta certes dificultats degut a la falta d'una caracterització pròpia i adequada del combustible. En el cas de l'avaluació de l'efectivitat dels tractaments de combustible, el seu estudi tampoc és senzill ja que existeixen diferents tipus de tractaments, la caracterització del combustible abans i després del tractament és complexa i a més els tractaments presenten diferent evolució en el temps i en l'espai.

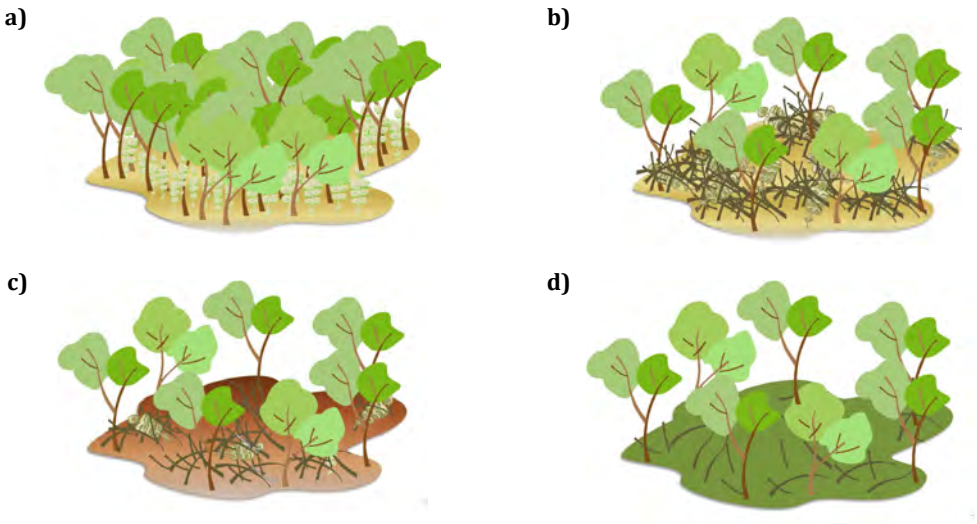

Figura 1.3. Estructura de la massa forestal a a) t_0, b) t_2, c) t_3 i d) t_4.

Aquesta tesi s'emmarca en la línia de treball de la modelització de combustibles i simulació d'incendis forestals a la Mediterrània, i concretament en l'aplicació d'eines d'ajuda a la presa de decisions per avaluar el grau d'efectivitat de tractaments de combustible en la reducció del risc de propagació d'incendi forestal.

1.5. Objectius

L'objectiu general d'aquesta tesi és avaluar quantitativament l'efectivitat dels tractaments de combustible per a la reducció del risc de propagació d'incendis forestals en determinades

masses forestals presents típicament a la Mediterrània. Concretament es pretén conèixer les característiques de l'incendi que pot ocórrer en restes vegetals originades en les aclarides de masses regenerades després d'incendis en boscos de pi blanc i com evolucionen les característiques de combustibilitat de les restes de tallada després del tractament.

L'estudi es realitza en parcel·les experimentals afectades pel gran incendi forestal de la Catalunya central l'any 1994 on des de fa 10 anys la Diputació de Barcelona hi està realitzant un programa d'aclarides en masses de pi blanc. El present treball pretén contribuir a aportar coneixement per tal de millorar la gestió d'incendis en regenerats de pi blanc.

Per tal d'assolir aquest objectiu és necessari conèixer les característiques del combustible i els escenaris meteorològics que propicien les situacions de grans incendis en aquest tipus d'estructura i en concret a la Catalunya central, així com també estudiar el comportament del foc. Això fa que els objectius específics siguin tres:

1. Caracterització del combustible involucrat en aquest tipus d'incendi.
2. Caracterització de les condicions ambientals i la seva influència sobre el combustible
3. Caracterització física i geomètrica de l'incendi.

Pel què fa a la caracterització del combustible dels regenerats de pi blanc crescuts després de l'incendi de 1994, cal determinar les seves propietats extrínseques més importants que afecten a la intensitat i velocitat de propagació de l'incendi tals com: càrrega, mida, forma, densitat aparent, disposició, continuïtat, etc. També cal estudiar algunes de les propietats intrínseques com la calor alliberada en la reacció de combustió. Tots aquests paràmetres han de ser estudiats en funció del temps que fa que s'ha aplicat el tractament d'aclarida.

Quant a la caracterització de les condicions ambientals, cal determinar diferents paràmetres ambientals (temperatura de l'aire, direcció i velocitat del vent, humitat relativa, etc.) característics de la Catalunya central in situ. També cal recopilar les dades meteorològiques dels darrers anys per tal de disposar d'una descripció acurada de les condicions ambientals locals.

Finalment, per la caracterització física i geomètrica de l'incendi que pot ocórrer en àrees de regenerat de la Catalunya central en les quals s'ha aplicat un tractament d'aclarida dipositant les restes al mateix lloc del tractament, cal aplicar tant tècniques de simulació, com tècniques experimentals. La simulació compren l'estudi i anàlisi dels tractaments d'aclarida amb

diferents models de propagació d'incendi, tants físics com empírics, que han de permetre comparar el comportament d'incendis forestals que eventualment puguin ocórrer en les zones tractades i en zones en les que no s'ha aplicat cap tractament i que parteix de l'incendi de 1994. Pel que fa a l'experimentació, aquesta ha de servir per validar els resultats obtinguts en la fase de simulació.

2. ANTECEDENTS

Els programes de simulació han estat àmpliament utilitzats en l'estudi del comportament dels incendis forestals i concretament en l'avaluació de l'efectivitat dels programes de gestió forestal.

En aquest capítol es fa, d'una banda, un repàs als diferents models matemàtics utilitzats en la simulació d'incendis forestals. A continuació s'ha inclòs una revisió bibliogràfica en la que es recullen estudis que han avaluat l'efectivitat dels tractaments de combustible de forma observacional o bé utilitzant eines de simulació. En aquest darrer cas s'estudia en profunditat la manera com s'han realitzat les simulacions, es contrasten els resultats obtinguts amb diferents treballs i es discuteix la seva utilització.

2.1. Modelització i simulació d'incendis forestals

La simulació d'incendis forestals es basa en models matemàtics que descriuen en major o menor nivell de detall certs aspectes relacionats amb el comportament del foc. Aquests models esdevenen útils per a les agències forestals quan es presenten en forma de sistema de suport a la presa de decisions. Els models s'utilitzen per diverses raons, genèricament per predir el comportament d'un incendi i en particular per tasques més especifiques com per exemple fer inferències respecte a determinats paràmetres d'interès, per determinar els potencials efectes de les actuacions de gestió forestal o per analitzar teories i hipòtesis que no es poden avaluar mitjançant treballs experimentals.

Els models matemàtics desenvolupats per a la simulació d'incendis forestals es classifiquen genèricament en models físics, quasifísics, empírics i quasiempírics (Sullivan, 2009).

Els models físics i quasifísics es basen en les lleis que governen la dinàmica de fluids, la combustió i la transferència de calor. Els models físics tenen en compte tant la física com la química de la propagació del foc. Estudien el comportament dels incendis en base a la resolució de les equacions de conservació de la massa, la quantitat de moviment i l'energia, i intenten explicar els fenòmens físics i químics involucrats en els incendis forestals (piròlisis, combustió, turbulència, radiació, etc.). Els models quasifísics representen només la física del fenomen i es basen genèricament en una única equació deduïda del balanç d'energia global.

Els models empírics, d'altra banda, s'obtenen a partir d'estudis experimentals o incendis històrics i els mecanismes físics i químics no es tenen en compte. Els models quasiempírics contenen expressions teòriques generals i senzilles i es completen a partir de l'experimentació. Tot i que, igual com en els models quasifísics, es basen en el principi de la conservació de l'energia, aquests no distingeixen els mecanismes de transferència de calor implicats en la propagació del foc.

Els models físics i quasifísics són els més complexos pel que fa a la seva formulació, disseny, utilització pràctica i capacitat de còmput necessària, però tenen l'avantatge que es poden extrapolar a un rang molt ampli d'escenaris, és a dir, es poden aplicar per a simular múltiples situacions meteorològiques, topogràfiques i de combustible. A dia d'avui, no existeix encara cap eina disponible a nivell operacional (utilitzable per agències públiques forestals) que hagi estat implementada amb models teòrics, ja que aquesta tecnologia està encara en fase experimental i de desenvolupament. No obstant, la seva aplicació a nivell de recerca és força

estesa arreu de la comunitat científica (sobretot als EUA i al sud d'Europa) i està donant resultats molt positius i engrescadors pel que fa a la seva fiabilitat i precisió (Morvan *et al.*, 2006).

Els models quasiempírics no són tan versàtils com els físics i quasifísics, ja que tot i que han estat desenvolupats partint de principis físics teòrics, moltes de les expressions matemàtiques que contenen han estat extretes a partir de treball experimental, bé al laboratori o a camp. Per tant, la validesa d'aquesta tipologia de models queda restringida a situacions idèntiques o molt similars a les experimentals. Això òbviament també és aplicable als models totalment empírics. Tanmateix, les eines informàtiques que deriven de la implementació de models empírics o quasiempírics, inclouen una matemàtica més senzilla amb la qual cosa la capacitat de càlcul requerida és molt menor. Aquestes eines acostumen a ser molt més fàcils d'utilitzar i han estat dissenyades amb interfícies més intuïtives i amigables, per això moltes d'elles estan essent emprades habitualment en agències de planificació forestal i prevenció i extinció d'incendis d'arreu del món. Per a poder ser utilitzats a nivell operacional, però, aquests models requereixen estudis previs de validació per als diferents ecosistemes on s'han d'aplicar. Aquest és especialment el cas de les eines de simulació basades en el model quasiempíric de Rothermel (1972) que han estat desenvolupades als EUA a partir de dades experimentals de laboratori o de camp en forests típicament americans.

Els models físics, quasifísics, empírics i quasiempírics són doncs la base de diferents programes de simulació que descriuen el comportament d'un incendi, amb més o menys detall, a través de representacions gràfiques o bé, en els cas dels més desenvolupats, a partir de la visualització de les variables descriptores dels incendis sobre bases cartogràfiques. Entre totes les eines que ha desenvolupat la comunitat científica ja des dels anys 70 a la Taula 2.1 es recopilen alguns dels models més emprats per a l'estudi del comportament d'incendis i que poden ser d'interès per l'estudi de l'efectivitat dels tractaments de combustible per reduir el risc d'incendi.

Els simuladors BEHAVEPLUS (versió actualitzada de l'eina BEHAVE), NEXUS, FARSITE i FLAMMAP són tots eines de la mateixa família (la col·loquialment anomenada família 'Behave'). Porten incorporat el mateix model bàsic de propagació quasiempíric (Rothermel, 1972) i han estat desenvolupats per la mateixa agència forestal (*United States Department of Agriculture, USDA*). En difereixen la seva complexitat d'ús, la resolució espacial i temporal que poden oferir i el cost computacional i d'informació inicial que requereixen. Tots simulen bàsicament incendis de superfície i donen informació sobre l'activitat de capçades, tot i que

NEXUS porta incorporada l'aplicació més desenvolupada de totes per valorar quantitativament la transició a incendi de capçades (Van Wagner, 1977) i donat aquest cas, calcular-ne el seu comportament (Rothermel, 1991). FARSITE i FLAMMAP es caracteritzen per portar incorporada una base d'informació georeferenciada (GIS) que permet fer simulacions en escenaris topogràfics reals. Cal assenyalar que les eines 'Behave' són les més populars entre les agències forestals d'arreu del món i les que tenen un grau d'aplicabilitat operacional més alt. A més, han estat utilitzades intensament per la comunitat científica per realitzar estudis sobre l'eficàcia de tractaments silvícoles, com els recopilats a Cruz i Alexander (2010).

Taula 2.1. Simuladors d'incendis forestals.

Nom identificador	Origen	Referència	Tipus de model
BEHAVEPLUS	USDA (EUA)	Andrews (1986), Rothermel (1972)	Quasiempíric
NEXUS	USDA (EUA)	Andrews (1986), Rothermel (1972)	Quasiempíric
FARSITE	USDA (EUA)	Finney (1998), Rothermel (1972)	Quasiempíric
FLAMMAP	USDA (EUA)	Finney (1998), Rothermel (1972)	Quasiempíric
FMAPLUS	FPS (EUA)	Carlton (2004)	Quasiempíric
FVS-FFE	USDA (EUA)	Stage (1973), Wykoff *et al.* (1982)	Quasiempíric
CFIS	ADAI i FERIC (Portugal i Canadà)	Alexander *et al.* (2006)	Quasiempíric
FIRESTAR	UM (França)	Morvan i Dupuy (2004)	Físic
WFDS	NIST (EUA)	McGrattan (2008a), Mell *et al.* (2007a)	Físic
FIRETEC	LANL (EUA)	Linn *(*1997)	Físic
UDC	UdC (França)	Santoni (1998)	Quasifísic
MK5	CSIRO (Austràlia)	McArthur (1967)	Empíric
FERN	UTAD (Portugal)	Fernandes *et al.* (2002)	Empíric
CFBP	FCFDG (Canadà)	Taylor *et al.* (1997)	Empíric

USDA: United States Department of Agriculture. FPS: Fire Program Solutions. ADAI: Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial. FERIC: Forest Engineering Research Institute of Canada. UM: Université de la Méditerranée. NIST: National Institute of Standards and Technology. LANL: Los Alamos National Laboratory. UdC: Università di Corsica Pasquale Paoli. CSIRO: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. UTAD: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. FCFDG:Forestry Canada Fire Danger Group.

FMAPLUS (*Fuel Management Analyst Plus*) i FVS-FFE (*Forest Vegetation System-Fire and Fuels Extension*) tenen per objectiu principal caracteritzar el combustible vegetal i porten incorporades extensions basades en el model de Rothermel (1972) que permeten avaluar el potencial comportament d'un incendi i diferents índexs d'incendis de capçada. El primer és un software designat principalment per caracteritzar el combustible de restes vegetals i per determinar la càrrega de combustible de capçades. Permet obtenir dades sobre el comportament d'incendis de superfície i de capçades. El FVS (*Forest Vegetation Simulator*) és

una eina que permet modelitzar la dinàmica de poblacions forestals al llarg del temps i els efectes provocats per diferents pertorbacions. El foc és una d'aquestes pertorbacions i els seus efectes es modelitzen a través de l'extensió FFE (*Fire and Fuels Extension*) amb la qual és possible avaluar l'efectivitat de tractaments de combustible a curt i llarg termini.

L'eina CFIS (*Crown Fire Initiation and Spread*) és un simulador desenvolupat específicament per a avaluar l'activitat de capçades, tant pel que fa a la possibilitat d'inici (transició superfície-capçades) com a la propagació de l'incendi un cop ha assolit l'estrat arbori. Utilitza un mètode computacional i teòric diferent a les eines de la família 'Behave' que es basa en el model d'inici d'incendi de capçades de Cruz *et al.* (2004) i el model de propagació per les capçades de Cruz *et al.* (2005). CFIS es pot utilitzar tant per la predicció del comportament del foc com per analitzar l'efectivitat del tractament de combustible en el comportament d'un eventual incendi.

FIRESTAR és un simulador 2D que es basa en un model físic complet que desenvolupa la formulació dels balanços de matèria, quantitat de moviment i energia que governen el comportament del sistema, composat pel combustible i la fase gasosa que l'envolta (Grishin, 1997; Morvan i Dupuy, 2001). En aquest enfocament s'hi contempla una descripció molt acurada de l'estructura heterogènia del combustible, el càlcul de totes les reaccions químiques que contribueixen a la degradació de la vegetació (piròlisi), els processos de combustió en la fase gasosa i en la superfície sòlida i la interacció entre els fluxos generats pel mateix incendi i els fluxos d'aire atmosfèrics. Pel seu funcionament es requereix l'ús d'un supercomputador, però d'altra banda la precisió que ofereix és molt elevada. La caracterització del combustible que es necessita per fer córrer aquest simulador és molt detallada, amb la qual cosa l'esforç de mostreig a camp es veu incrementat. És una eina de nova generació que encara no està disponible a nivell operacional; tot just s'està utilitzant en un nombre molt reduït de centres d'investigació.

WFDS (*Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator*) és una extensió del programa FDS, desenvolupat pel NIST (*National Institute of Standards and Technology*) inicialment pensat per aplicacions d'incendis urbans, que en la seva versió WFDS inclou combustibles vegetals. També sorgeix de la implementació de models físics, però aquests tenen més simplificacions que el model implementat a FIRESTAR. És un model 3D creat per predir el comportament d'incendis forestals i particularment pensat per a zones periurbanes. Per treballar amb aquest simulador igual com amb el simulador anterior es necessita un esforç de còmput considerable. No obstant, WFDS no requereix d'un supercomputador sinó que pot funcionar mitjançant l'ús de diversos ordinadors connectats en xarxa. Actualment s'està emprant per

estudiar amb tot detall els fenòmens físics i químics que intervenen en la propagació dels incendis i presenta bones perspectives per ser utilitzat en l'avaluació de l'efectivitat de tractaments silvícoles en la reducció del perill de propagació (Mell *et al.*, 2009).

FIRETEC és un model 3D desenvolupat pel LANL (*Los Alamos National Laboratory*, EUA) amb una formulació més complexa que WFDS i FIRESTAR i creat inicialment per millorar els coneixements del comportament dels incendis forestals i la seva relació amb el combustible, la topografia i les condicions ambientals. El model descriu el comportament dels gasos i dels combustibles sòlids presents en un incendi forestal. FIRETEC representa l'essència de la combinació de molts fenòmens que es donen a una escala petita, com per exemple la transferència de calor per convecció entre sòlids i gasos, però sense resoldre cada procés en tot el detall (Linn i Harlow, 1998; Linn *et al.*, 2002). A més, FIRETEC inclou el model HIGRAD (Reisner *et al.*, 2002) que permet modelitzar en detall la dinàmica de fluids atmosfèrics i determinar les interaccions entre els incendis i l'atmosfera. Per treballar amb aquest simulador es necessita un esforç computacional que únicament pot ser subministrat per un supercomputador. Tot i que aquest model no està disponible pels mitjans operacionals, el tractament complert que fa dels processos físics fa que sigui molt apropiat per a determinats usos de recerca, i especialment per estudiar la dinàmica del foc.

El model UDC desenvolupat per Santoni (1998) és un model quasifísic de propagació del foc a través d'un llit de combustible en 2D el qual assumeix la radiació com el principal mecanisme de transferència de calor. Aquest model s'ha desenvolupat com una simplificació dels models físics amb l'objectiu d'obtenir un model que permeti descriure acuradament els fenòmens físics implicats en el comportament d'un incendi i a la vegada sigui prou ràpid per ser utilitzat en temps real. El model a dia d'avui té un interès únicament acadèmic, ja que requereix d'una capacitat computacional elevada i presenta encara limitacions a l'hora de representar els diferents tipus de combustibles, no obstant hi ha expectatives per a què en un futur pròxim sigui la base d'un model funcional a nivell operatiu.

Com a eines amb base empírica es poden assenyalar les eines MK5, FERN i CFBP. L'eina MK5 ha estat desenvolupada mitjançant una metodologia totalment empírica en base a incendis experimentals en boscos australians. Nogensmenys, és l'eina més simple de totes i de menor esforç pel que fa a la modelització del combustible i ha demostrat molt bons resultats tant a nivell de recerca com a nivell operacional a Austràlia. D'altra banda, el model de Fernandes *et al.* (2002) ha estat desenvolupat en base a cremes experimentals realitzades a baixa-moderada intensitat en forests de pi pinastre (*Pinus pinaster*)a Portugal. El model ha estat

desenvolupat amb l'objectiu d'ésser una eina de suport per a la planificació de cremes prescrites.

Finalment, l'eina canadenca CFBP (*Canadian Fire Behaviour Prediction system*) prediu el comportament d'incendis de superfície i de capçada per 16 tipus diferents de combustibles canadencs. Es basa en unes 500 observacions d'experiments, cremes prescrites i incendis forestals a Canadà recopilades durant 20 anys. Els paràmetres d'entrada del model són sis índexs que es calculen a partir de la temperatura, humitat relativa, precipitació i velocitat del vent. A partir d'aquesta eina s'ha desenvolupat recentment el sistema quasiempíric PROMETHEUS que incorpora com a millora una base d'informació georeferenciada (GIS) (Tymstra *et al.*, 2009).

2.2. Estudi bibliogràfic sobre l'avaluació de l'efectivitat dels tractaments de combustible en la reducció del risc de propagació d'incendi

Els tractaments de combustible modifiquen la composició de les espècies, l'estructura, la disponibilitat, la distribució i la humitat del combustible i el comportament dels vents de superfície. Els objectius d'aquests tractaments inclouen la redistribució del creixement anual dels arbres, la regulació de les espècies d'arbres existents, la producció forestal, la millora de l'ecosistema, especialment en termes d'hàbitat de fauna salvatge, i la reducció de la vulnerabilitat davant l'incendi forestal (Graham *et al.*, 1999).

En els casos en què els tractaments de combustible s'utilitzen per modificar el comportament dels incendis forestals, genèricament el que es pretén és reduir la càrrega de combustible per tal que en el cas que tingui lloc un incendi forestal aquest es propagui més lentament i amb menys intensitat, tingui menys severitat i sigui més fàcil de controlar. Per tal d'assolir aquest objectiu i a la vegada assegurar una bona resiliència dels boscos enfront els incendis forestals, els tractaments de combustible han de considerar un o més dels següents quatre principis bàsics (Agee i Skinner, 2005): la reducció de la quantitat de combustible de superfície, l'increment de la distància entre la superfície i les capçades, la reducció de la densitat de les capçades i la preservació dels arbres grans de les espècies més resistents, que són els que tenen unes capçades més elevades respecte la superfície i una escorça més gruixuda.

Els tractaments de combustible per reduir el risc d'incendis més utilitzats són les cremes prescrites, les aclarides de combustible o una combinació d'ambdós, tot i que sovint també s'usen herbicides o la pastura amb animals per eliminar específicament un determinat tipus de combustible o bé es realitzen tallafocs, és a dir, franges de diferent amplada en les quals s'ha eliminat totalment el combustible.

Les cremes prescrites utilitzen el foc de baixa intensitat i sota condicions controlades per a reduir la quantitat de combustible forestal. Els tractaments d'aclarida consisteixen en l'eliminació d'arbres per tal de disminuir la densitat arbòria i la competència entre els arbres d'una mateixa població forestal. Els tractaments d'aclarida poden efectuar-se manualment o mecànica i segons l'objectiu que es busqui poden classificar-se en aclarides baixes, altes o selectives (Graham *et al.*, 1999).

Les aclarides baixes eliminen els arbres joves per tal d'afavorir els arbres de diàmetres grans i espècies de creixement lent i obtenir una estructura forestal madura. Aquest tipus d'aclarida minimitza la mortalitat causada per la competència entre diferents espècies arbòries i pels incendis de superfície i concentra el creixement potencial de la població en els arbres dominants.

Les aclarides altes consisteixen en eliminar els arbres de diàmetres més grans per construir una estructura forestal amb més espais que permeti créixer als arbres més joves, afavorint així les espècies de creixement ràpid, s'obtenen estructures irregulars com en el cas dels boscos madurs d'alzines. En aquest cas es redueix considerablement la continuïtat horitzontal de les capçades dels arbres més grans i per tant la mortalitat causada pels incendis de capçades.

Les aclarides selectives poden tenir diferents objectius; estar dirigides a seleccionar la composició i estructura final de la massa forestal, disminuir la densitat dels arbres d'una determinada espècie, afavorir una estructura forestal amb capçades en diferents estrats, entre d'altres. En la Figura 2.1 s'esquematitzen els diferents tipus d'aclarides exposats.

Les restes originades amb les aclarides poden dipositar-se en el mateix lloc del tractament de diferent forma: talment com s'han originat, repartides de manera uniforme o agrupades formant piles, i a més, en els tres casos, poden ser trossejades. Una altra opció és retirar totes les restes o bé eliminar-les in situ mitjançant cremes prescrites.

Conèixer l'efectivitat d'aquests tractaments és fonamental per tal d'escollir les millors alternatives i alhora establir prioritats per a la gestió de les masses forestals. Tanmateix, la seva avaluació presenta certes dificultats degut a la varietat de factors que hi intervenen.

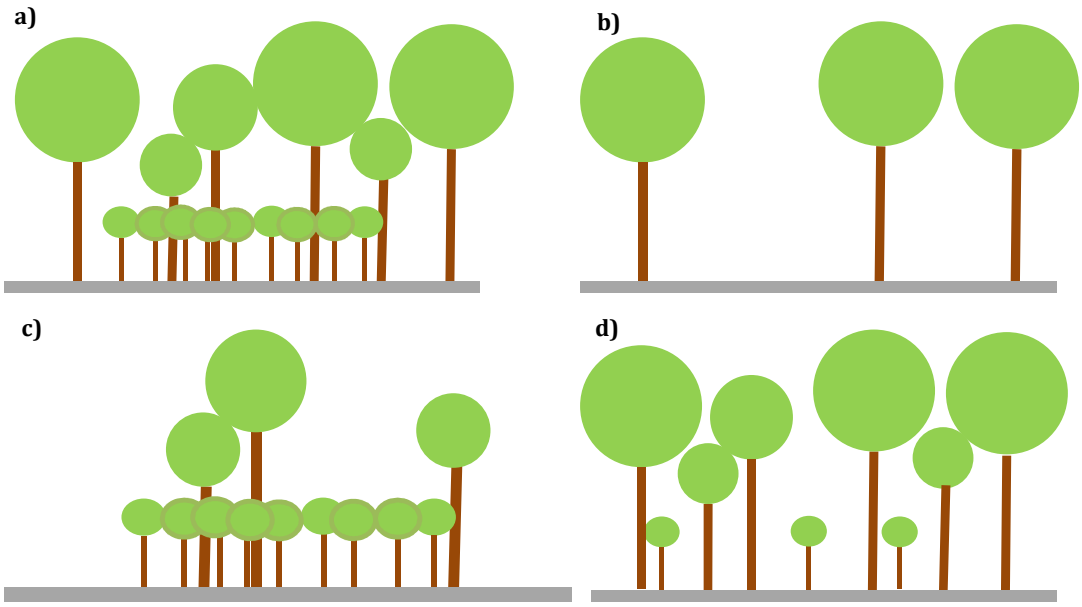

Figura 2.1. Tipus de tractaments d'aclarida. a) Sense cap tractament. b) Aclarida dels arbres joves (aclarida baixa). c) Aclarida dels arbres madurs (aclarida alta). d) Aclarida selectiva per obtenir un tipus d'estructura forestal determinada, en aquest cas amb diferents estrats de combustible de capçada.

L'efectivitat dels tractaments de combustible en la reducció del risc de propagació d'incendi es va començar a estudiar sistemàticament a finals dels anys noranta als EUA amb diferents enfocaments. Aquests estudis avaluen l'efectivitat dels tractaments atenent al comportament del foc o la seva severitat i es poden classificar en tres categories; experimentals, observacionals i de modelització (Roccaforte *et al.*, 2008). Els primers avaluen el comportament del foc efectuant incendis a propòsit i analitzant els efectes durant i després del foc. Aquest tipus d'estudis són força anecdòtics i la majoria avaluen incendis d'intensitats relativament baixes (Covignton *et al.*, 1997). No obstant, els enfocaments més utilitzats han estat els observacionals basats en l'anàlisi dels efectes d'incendis forestals passats (e.g. Cram *et al.*, 2006; Martinson i Omi, 2008), i els de modelització, que utilitzen eines de simulació per predir el comportament del foc (e.g. Van Wagtendonk, 1996; Stephens *et al.*, 2009). Cal esmentar que existeixen també treballs experimentals a camp sense foc que utilitzen variables referents a l'estructura de la vegetació (com per exemple la càrrega de

combustible, l'altura o el diàmetre dels arbres) per avaluar l'efectivitat dels tractaments però que en cap cas determinen el comportament del foc (Reiner *et al.*, 2009).

A continuació es detallen els principals treballs observacionals i de simulació, realitzats en aquest camp en els darrers anys, fent especial esment als diferents tipus de tractaments de combustible utilitzats i als resultats obtinguts sobre la seva efectivitat, així com als mètodes i eines emprades per avaluar els tractaments i els avantatges i inconvenients que presenten aquests. Existeixen diversos treballs que valoren els efectes ecològics dels tractaments de combustible (Scherl, 2005; Oliveras i Bell, 2008) però aquesta anàlisi queda fora dels objectius d'aquest treball.

2.2.1. Treballs observacionals

Els treballs observacionals permeten una avaluació directa de l'efectivitat dels tractaments, no obstant són costosos i difícils de dur a terme en zones extenses i per períodes de temps llargs. Aquest tipus de treballs es caracteritzen per l'estudi de zones afectades per incendis forestals a les que prèviament s'havia aplicat algun tipus de tractament al combustible. La dificultat alhora d'abordar aquests estudis rau en què el disseny experimental s'ha de realitzar a partir d'observacions a posteriori de l'incendi i per tant a partir de la situació actual cal cercar informació prèvia a l'incendi. En els treballs observacionals es comparen zones tractades amb les no tractades avaluant diferents variables que permeten inferir en la severitat de l'incendi. En la Taula 2.2 s'hi recopilen les variables més significatives.

Són relativament pocs els treballs realitzats amb l'enfocament observacional (Taula 2.3). Un primer exemple és el descrit a Pollet i Omi (2002) on es determinà la severitat de quatre incendis forestals ocorreguts en zones boscoses de coníferes de Washington, Califòrnia, Arizona i Montana, respectivament. Les quatre àrees tenien diferents característiques topogràfiques i el perímetre dels incendis variava entre 1.500-19.000 ha. Anteriorment a aquests incendis (entre 1 i 11 anys abans), s'havien aplicat tractaments d'aclarida als boscos de les àrees de Washington, Califòrnia i Arizona mentre que a Montana es van aplicar cremes prescrites. Les restes originades amb l'aclarida es retiraren o es cremaren. Per cada incendi es cercaren zones no tractades adjacents a les que havien estat tractades, amb característiques topogràfiques semblants. Les masses boscoses tractades presentaven un índex de dany de les capçades inferior respecte el de les no tractades en els quatre incendis considerats. Comparativament pels quatre incendis, els tractaments d'aclarida reduïen més la severitat del foc (entre 30 i 50 %) que les cremes prescrites (18 %).

Taula 2.2. Principals variables descriptores utilitzades en els treballs observacionals per avaluar la seva severitat dels incendis forestals.

Variable	Descripció
Fracció de capçada socarrimada (*CSP*) [%] (*Crown scorch percentage*)	Percentatge de la capçada afectada pel foc, tant la que s'ha consumit totalment com la que s'ha vist afectada parcialment, que es pot observar pel color socarrimat que presenta. La fracció de capçada socarrimada s'estima visualment.
Fracció de capçada consumida (*CCP*) [%] (*Crown consumed percentage*)	Percentatge de capçada que s'ha consumit com a conseqüència del foc. La fracció de capçada consumida s'estima visualment.
Altura de capçada socarrimada (*CSH*) [m] (*Height of crown scorch*)	Altura fins a la branca socarrimada més alta.
Altura de capçada consumida (*CCH*) [m] (*Height of crown consumed*)	Altura fins a la branca socarrimada més alta en la qual no hi ha acícules.
Altura de socarrimat dels troncs (*BSH*) [m] (*Height of bole scorch)*	Altura del tronc fins on són visibles els efectes del foc.
Mortalitat d'arbres (M_a) [%] (*Tree mortality*)	Percentatge d'arbres morts.
Índex de dany a les capçades (*CDR*) [n.a.] (*Crown damage rating/Fire severity rating*)	Estimació visual de l'estat de les capçades posteriorment a un incendi. Mitjançant un rang de 1 a 5 es determina l'efecte del foc sobre les capçades (Omi i Kalabokidis, 1991).
Índex de dany a la superfície (*SDR*) [n.a.] (*Surface damage rating*)	Estimació visual de l'estat del combustible de superfície posteriorment a un incendi. Mitjançant un rang de 1 a 4 es determina l'efecte del foc sobre el combustible de superfície (Ryan i Noste, 1985).

n.a.: no aplica.

Aquesta òptica retrospectiva també la utilitzaren Skinner *et al.* (2004) que avaluaren la severitat d'un incendi forestal que va cremar zones tractades de boscos mixtos de coníferes de Califòrnia a partir principalment del càlcul del percentatge de mortalitat. Abans de l'incendi es van aplicar dos tractaments d'aclarida, un que eliminà els arbres més joves i el combustible d'escala (definit com aquell combustible que es troba entre el combustible de superfície i el de capçades) i l'altre que eliminà els arbres adults i alhora els més joves per tal d'aconseguir una estructura intermèdia. Pel que fa a la gestió de les restes en la majoria de parcel·les els tractaments foren seguits de cremes prescrites menys en un cas, que corresponia a un tractament d'aclarida d'arbres adults i joves, on les restes s'escamparen en el mateix lloc on es generaren. En els casos en què no s'aplicà cap tractament, la mortalitat fou superior al 90 %. En els tractaments d'aclarida que no utilitzaren les cremes per eliminar les restes la mortalitat fou del 40-60 % mentre que quan aquests tractaments d'aclarida eren seguits de cremes la mortalitat era negligible. Skinner *et al.* (2004), van concloure que el

tractament que eliminava els arbres joves i el combustible d'escala era més efectiu que el que afavoria una estructura intermèdia.

Taula 2.3. Principals treballs observacionals realitzats per avaluar l'efectivitat de tractaments silvícoles en la reducció del risc de propagació d'incendi.

Treball	Actuació forestal (tractament de les restes)	Any del tractament	Incendi (any)	Combustible (lloc)	Variables descriptores de la severitat de l'incendi
Pollet i Omi (2002)	Crema prescrita	1989	Webb fire (1994)	Bosc de coníferes (Montana, EUA)	*CSP, CDR*
	Aclarida (Cr)	1970 i 1983	Tyee fire (1994)	Bosc de coníferes (Washington, EUA)	
	Aclarida (Re)	1989 i 1990	Cottonwood fire (1994)	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	
	Aclarida (Cr)	1970 i 1995	Hochderffer fire (1996)	Bosc de coníferes (Arizona, EUA)	
Skinner *et al.* (2004)	Aclarida (Es, Cr)	1996-2002	Cone fire (2002)	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	*M_a, CSH, BSH*
Raymond i Peterson (2005)	Aclarida (Nt, Cr)	1996 2001	Biscuit fire (2002)	Bosc de coníferes (Oregon, EUA)	*CSP, CSH, M*
Cram *et al.* (2006)	Aclarida (Es, Ap-Cr)	1999	Rodeo-Chediski fire (2002)	Bosc de coníferes (Arizona, EUA)	*BSH, CSH, CSP, CDR, SDR*
	Aclarida (Cr)	1998	Borrego fire (2002)	Bosc de coníferes (New Mexico, EUA)	
	Aclarida (Cr)	1994	Oso fire (1998)		
Strom i Fulé (2007)	Aclarida	1990-1999	Rodeo-Chediski fire (2002)	Bosc de coníferes (Arizona, EUA)	*BSH, M_a*
Martinson i Omi (2008)	Crema prescrita	1988, 1998 i 1992	Fontainebleau fire (1999)	Bosc de coníferes (Mississipi, EUA)	*CSH, CSP, CDR, SDR*
Safford *et al.* (2009)	Aclarida (Nt, Cr)	1996-2006	Angora fire (2007)	Bosc de coníferes (Califòrnia i Nevada, EUA)	*BSH, CSH, CCH CSP, CCP*

Nt: restes dipositades en el mateix lloc que s'han generat. Es: repartides uniformement pel terreny. Ap: apilades. Re: retirades . Cr: cremades. Ap-Cr: restes apilades i a continuació cremades.

Per la seva banda, Raymond i Peterson (2005) avaluaren la severitat d'un incendi ocorregut l'any 2002 a la costa d'Oregon que cremà zones que havien estat tractades prèviament mitjançant aclarides, en alguns casos seguides de cremes. La mortalitat dels arbres fou alta en les zones aclarides (80-100 %), moderada en les no tractades (53-54 %) i menys severa en les zones que havien estat aclarides i després cremades.

Cram *et al.* (2006) van examinar la severitat de tres incendis forestals que van afectar boscos de coníferes en els quals s'havien aplicat tractaments d'aclarida prèviament als incendis (entre 2 i 4 anys abans, segons l'incendi). Les restes de l'aclarida originades es tractaren de diferent forma en cadascuna de les zones. Així, en dos zones, les restes s'eliminaren

mitjançant cremes, mentre que en la tercera zona les restes es van apilar i posteriorment cremar o bé es van escampar uniformement pel mateix terreny. En aquest treball, per determinar la severitat del foc es va fer servir, entre d'altres variables, l'altura de socarrimat dels troncs, el percentatge de capçada socarrimada, el percentatge de capçada consumida, l'índex de dany de les capçades i l'índex de dany a la superfície. Per totes les variables, les zones tractades presentaven valors inferiors a les no tractades, i les zones on s'aplicaren aclarides seguides de cremes presentaren uns valors inferiors als de les que no s'eliminaren les restes.

Strom i Fulé (2007) estudiaren el cas de l'incendi de Rodeo-Chediski ocorregut l'any 2002. Les zones tractades mitjançant aclarides presentaren una altura de socarrimat dels troncs i un percentatge de mortalitat d'arbres inferior al de les no tractades. En aquest treball, tot i que els autors esmenten que les restes originades en el tractament d'aclarida van ser tractades de diferent manera, en els resultats no s'exposen les diferències en els tractaments pel que fa a la gestió de les restes.

Martinson i Omi (2008) avaluaren la severitat de l'incendi de Fontainebleau (1999) que va transcórrer en una zona on prèviament s'havien realitzat cremes prescrites repetidament els anys 1988, 1992 i 1998. Variables com l'altura de capçada socarrimada, percentatge de capçada socarrimada, índex de dany a les capçades o índex de dany a la superfície van fer suggerir als autors que els tractaments aplicats anteriorment a l'incendi van complir de forma excel·lent l'objectiu de disminuir la severitat de l'incendi.

Finalment, Safford *et al.* (2009) realitzaren un extens treball sobre la severitat d'un incendi que ocorregué en una àrea que prèviament havia estat estudiada i que per tant es disposava de molta informació sobre l'estructura forestal anterior a l'incendi. Estudiaren l'altura i percentatge d'escorça i de capçada socarrimada o consumida i la mortalitat d'arbres. En general, la severitat de l'incendi fou inferior a les zones tractades que a les no tractades. Les zones tractades on les restes havien estat cremades presentaven una severitat davant l'incendi inferior a les zones tractades en les que les restes havien estat dipositades en el mateix lloc del tractament.

Com a compendi dels treballs recopilats cal assenyalar que en general en els treballs observacionals els tractaments més efectius han resultat ser aquells que eliminen el combustible de superfície i d'escala, tals com les cremes prescrites i les aclarides seguides de cremes (Skinner *et al.*, 2004; Raymond i Peterson, 2005; Cram *et al.*, 2006; Safford *et al.*, 2009). En els treballs on s'han avaluat els tractaments d'aclarida sense eliminació de les

restes s'han obtingut diferents resultats. Skinner *et al.* (2004) i Cram *et al.* (2006) observaren que la severitat dels incendis en les zones tractades sense eliminació de les restes fou inferior que en les zones no tractades. Per contra, Raymond i Peterson (2005) detecten una severitat superior en les zones tractades sense eliminació de les restes que en les zones no tractades.

En els treballs que s'ha avaluat un únic tractament, ja sigui el tractament d'aclarida (Strom i Fulé, 2007) o bé les cremes prescrites (Martinson i Omi, 2008), s'observa l'efectivitat d'aquests tractaments en la reducció de la severitat de l'incendi. En l'únic treball on s'ha comparat conjuntament l'efectivitat de les cremes prescrites i de les aclarides amb gestió de les restes (Pollet i Omi, 2002), els resultats apunten que les aclarides són més efectives en la reducció de la severitat de l'incendi, tot i que cal destacar que en aquest treball es comparen zones tractades afectades per diferents incendis, amb diferents intensitats de tractaments i amb distintes característiques topogràfiques i que per tant els resultats no poden ser concloents ni extrapolables.

En la majoria de treballs observacionals recopilats, els tractaments de combustible es van aplicar entre 0-5 anys abans de l'incendi, i en alguns casos 11 anys abans. Tot i que el temps transcorregut després de l'aplicació del tractament és un factor crucial que cal considerar quan s'avalua l'efectivitat dels tractaments, no ha estat tingut en consideració en cap dels estudis observacionals recopilats. Aquest fet probablement es deu a la impossibilitat de predir l'ocurrència dels incendis.

2.2.2. Treballs de simulació

En la gran majoria de treballs publicats sobre l'efectivitat dels tractaments de combustible en la reducció del risc d'incendi s'han fet servir simulacions per predir el comportament del foc. A diferència de l'enfocament observacional, aquestes són eines més ràpides i barates que permeten avaluar els tractaments de combustible en l'espai i el temps. Com a comparativa dels dos enfocaments, cal dir que l'observacional necessita òbviament que per ventura hi hagi un incendi, per tant s'hi duu a terme una anàlisi a posteriori i no a priori i això fa que estigui limitat per l'existència de dades prèvies a l'incendi. Tanmateix, cal ressaltar que les eines de simulació estan sotmeses a la capacitat del model que incorporen per descriure de forma acurada el comportament de l'incendi.

En les simulacions, a partir de la caracterització del combustible i del coneixement de determinats factors ambientals i topogràfics, s'obté informació sobre diverses variables

descriptores del comportament d'un eventual incendi. Aquestes variables poden agrupar-se en variables descriptores de l'incendi de superfície o de l'incendi de capçades (Taula 2.4). En la Taula 2.5 es recopilen els treballs de simulació que amb més nivell de detall han avaluat l'efectivitat dels tractaments de combustible. Molts dels treballs de simulació s'han centrat en la utilització de les cremes prescrites i el disseny experimental a seguir per aplicar aquesta tècnica ha estat àmpliament estudiat (Fernandes i Botelho, 2003), mentre que els treballs que fan referència a les aclarides han estat menys freqüents.

Taula 2.4. Principals variables descriptores del comportament dels incendis forestals utilitzades en els estudis d'efectivitat dels tractaments de combustible.

Variable	Descripció	Simuladors
Incendi de superfície		
Velocitat de propagació del front (*R*) [m min^{-1}]	Espai recorregut pel front per unitat de temps.	BEHAVE, NEXUS, FARSITE, FMAPLUS, CFIS
Intensitat lineal del front (*I*) [kJ m^{-1} s^{-1}]	Potència calorífica que s'allibera en l'incendi per unitat de longitud del front.	BEHAVE, FARSITE, FLAMMAP, FMAPLUS
Flux de calor de l'incendi (*Q*) [kJ m^{-2}]	Calor emès per àrea cremada.	BEHAVE, NEXUS, FARSITE
Longitud de la flama (*L*) [m]	Distància existent entre l'extrem de la flama i el punt mitjà de la seva amplada.	BEHAVE, NEXUS, FARSITE, FLAMMAP, FMAPLUS
Àrea cremada (*A*) [ha]	Superfície cremada per l'incendi.	BEHAVE, FARSITE, FLAMMAP
Perímetre de l'incendi (*P*) [m]	Contorn de l'incendi.	BEHAVE
Índex de vulnerabilitat (*FSI*) [n.a.]	Indicador de la probabilitat emprant 5 categories (molt baixa, baixa, moderada, alta o molt alta) que una zona es cremi. Es calcula a partir de variables descriptores del comportament del foc i variables meteorològiques.	PROMETHEUS
Incendi de capçades		
Índex de torxa (*TI*) [km h^{-1}]	Velocitat del vent a partir de la qual es pot iniciar un incendi de capçades.	NEXUS, FMAPLUS, FVS-FFE
Índex de capçades (*CI*) [km h^{-1}]	Velocitat del vent a partir de la qual es pot donar un incendi de capçades actiu.	NEXUS, FMAPLUS, FVS-FFE
Aparició de focus secundaris (*AFS*) [n.a.]	Indicador d'ocurrència de focus secundaris.	FARSITE, FLAMMAP
Ocurrència d'incendis de capçades passius (*OIP*) [n.a.]	Indicador de si té lloc un incendi de capçades passiu.	FARSITE, FLAMMAP, CFIS
Ocurrència d'incendis de capçades actius (*OIC*) [n.a.]	Indicador de si té lloc un incendi de capçades actiu.	FARSITE, FLAMMAP, CFIS

n.a.: no aplica.

Taula 2.5. Principals treballs realitzats amb simuladors quasiempírics per avaluar l'efectivitat de tractaments silvícoles en la reducció del risc d'incendi.

Treball	Actuació forestal (tractament de les restes)	Combustible (lloc)	Simulador	Paràmetres de simulació		Variables descriptores del comportament de l'incendi
				Caracterització del combustible	Condicions ambientals (percentils)	
Van Wagtendonk (1996)	Crema prescrita Aclarida (Re, Es, Ap i Cr, Cr)	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	FARSITE	Models de combustible propis	Escenaris moderat i extrem (P75, P95)	*R, I, Q, L, A, AFS, OIP, OIC*
Kalabokidis i Omi (1998)	Aclarida (Nt, Re, Es, Ap-Cr)	Bosc de coníferes (Colorado, EUA)	BEHAVE	Models de combustible propis	s.e.	*R, I, Q, L, A, P*
Scott (1998a)	Crema prescrita Aclarida (Nt, Re Ap i Cr)	s.e.	FVS-FFE	Models de combustible estàndards	s.e.	*TI, CI*
Scott (1998b)	Crema prescrita Aclarida (Nt, Ap i Cr)	Bosc de coníferes (Montana, EUA)	FVS-FFE	s.e.	s.e.	*TI, CI*
Stephens (1998)	Crema prescrita Aclarida (Es, Ap i Cr, Cr)	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	FARSITE	Models de combustible estàndards i propis	Escenaris moderat i extrem (P75, P95)	*R, I, Q, A, AFS, OIP, OIC*
Fulé *et al.* (2001a)	Aclarida (Cr)	Bosc de coníferes (Arizona, EUA	NEXUS	Models de combustible propis	Escenaris alt i extrem (P90, P97)	*R, Q, L, TI, CI,*
Fulé *et al.* (2001b)	Aclarida (Es-Cr)	Bosc de coníferes (Arizona, EUA	NEXUS	s.e.	Escenaris alt i extrem (P90, P97)	*R, Q, L, TI, CI*
Brose i Wade (2002)	Crema prescrita, Aclarida, Herbicides	Sotabosc d'un bosc de coníferes (Florida, EUA)	BEHAVE	Models de combustible propis	s.e.	*R, L*

Taula 2.5. Principals treballs realitzats amb simuladors quasiempírics per avaluar l'efectivitat de tractaments silvícoles en la reducció del risc d'incendi (continuació).

Treball	Actuació forestal (tractament de les restes)	Combustible (lloc)	Simulador	Paràmetres de simulació		Variables descriptores del comportament de l'incendi
				Caracterització del combustible	Condicions ambientals (percentils)	
Fulé *et al.* (2002)	Crema prescrita Aclarida (Cr)	Bosc de coníferes (Arizona, EUA	NEXUS	Models de combustible propis	Escenaris alt i extrem (P90, P97)	*R, Q, L, TI, CI*
Fiedler i Keegan (2003)	Aclarida (Es-Cr, Ap-Cr)	Bosc de coníferes (New Mexico, EUA)	FVS-FFE	s.e.	Condicions extremes	*CI*
Fieldler *et al.* (2004)	Aclarida	Bosc de coníferes (Montana, EUA)	FVS-FFE	s.e.	s.e.	*CI*
Stratton (2004)	Aclarida (Ap-Cr)	Bosc de coníferes (Utah, EUA)	FARSITE i FLAMMAP	Models de combustible estàndards i propis	Escenaris moderat, alt i extrem (P75, P85, P95)	*I, L, A, AFS, OIP, OIC*
Stephens i Moghaddas (2005a)	Crema prescrita Aclarida (Tr-Es, Cr)	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	FMAPLUS	s.e.	Escenaris moderat, alt i extrem (P80, P90, P97,5)	*R, I, L,TI, CI*
Stephens Moghaddas (2005b)	Aclarida (Es, Tr-Es)	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	FMAPLUS	s.e.	Escenaris moderat, alt i extrem (P80, P90, P97,5)	*R, I, TI, CI*
Scott (2006)	Aclarida (Nt)	Bosc de coníferes (Montana, EUA)	CFIS, NEXUS i FLAMMAP	Models de combustible estàndards	s.e.	*R, TI, CI, OIP, OIC*
Vaillant *et al.* (2006)	Crema prescrita	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	FMAPLUS	Models de combustible estàndards	Escenaris moderat, alt i extrem (P80, P90, P97,5)	*R, I, L, TI, CI*
Ager *et al.* (2007)	Aclarida (Re, Cr)	Bosc de coníferes (Oregon, EUA)	FVS-FFE	s.e.	Escenari extrem (P97)	*CI*

Taula 2.5. Principals treballs realitzats amb simuladors quasiempírics per avaluar l'efectivitat de tractaments silvícoles en la reducció del risc d'incendi (continuació).

Treball	Actuació forestal (tractament de les restes)	Combustible (lloc)	Simulador	Paràmetres de simulació		Variables descriptores del comportament de l'incendi
				Caracterització del combustible	Condicions ambientals (percentils)	
Duguy *et al.* (2007)	Aclarida Tallafoc	Bosc mediterrani de pi blanc (València)	FARSITE	Models de combustible estàndards	s.e.	*R, I, A*
Manson *et al.* (2007)	Aclarida (Ap-Es)	Bosc de coníferes (New Mexico, EUA)	NEXUS	Models de combustible propis	s.e.	*TI, CI*
Schmidt *et al.* (2008)	Crema prescrita Aclarida (Nt, Cr)	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	NEXUS, BEHAVE-PLUS, FARSITE	Models de combustible estàndards	Escenaris moderat, alt i extrem (P80, P90, P97,5)	*R, L, Q, A, TI, CI*
Beverly *et al.* (2009)	Crema prescrita	Bosc de coníferes (Alberta, Canadà)	PROME-THEUS	Models de combustible estàndards	s.e.	*FSI*
Kobziar *et al.* (2009)	Crema prescrita Aclarida (Nt, Cr)	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	FMAPLUS	s.e.	Escenaris alt i extrem (P90, P97,5)	*R, L,*
Stephens *et al.* (2009)	Crema prescrita Aclarida (Nt, Cr)	Bosc de coníferes (costa oest dels EUA)	FMAPLUS	Models de combustible estàndards	Escenaris moderat, alt i extrem (P80, P90, P97,5)	*TI, CI*
Vaillant *et al.* (2009)	Crema prescrita	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	FMAPLUS	Models de combustible estàndards	Escenaris alt i extrem (P90, P97,5)	*I, TI, CI*

Nt: restes dipositades en el mateix lloc que s'han generat. Es: repartides uniformement pel terreny. Ap: apilades. Tr: triturades. Re: retirades . Cr: cremades. Ap-Cr: restes apilades i a continuació cremades. s.e.: sense especificar.

Incidència en l'ús dels simuladors

La gran part dels simuladors utilitzats per avaluar l'efectivitat dels tractaments recopilats en la bibliografia són quasiempírics i porten incorporat el mateix model bàsic de propagació (Rothermel, 1972). La utilització d'eines basades en models empírics com CFIS i PROMETHEUS és més aviat anecdòtica, mentre que les eines físiques s'han començat a utilitzar més recentment per avaluar l'efectivitat dels tractaments (Winterkamp *et al.*, 2009).

Dins dels simuladors de la família 'Behave', l'eina NEXUS (Scott, 1999) ha estat la més extensament utilitzada ja que és la que permet obtenir informació més detallada sobre el comportament dels incendis de capçada. Així, Fulé *et al.* (2001a, 2001b, 2002) determinen variables descriptores del comportament d'incendis forestals com la velocitat de propagació (*R*), la intensitat lineal (*I*) i la longitud de la flama (*L*) i afegeixen variables descriptores dels incendis de capçades com l'índex de torxa (*TI*) i l'índex de capçades (*CI*). Manson *et al.* (2007) per avaluar l'efectivitat de tractaments d'aclarida van estudiar únicament variables referents a l'incendi de capçades com *TI* o *CI*.

FARSITE (Finney, 1998) ha estat també molt utilitzat principalment per caracteritzar els incendis de superfície, és el cas de Van Wagtendonk (1996) i Stephens (1998) que utilitzaren aquest simulador per avaluar l'efectivitat de diferents tractaments i estudiaren variables com la intensitat lineal del front, l'àrea cremada, l'aparició de focus secundaris o l'ocurrència d'incendi de capçades passius i actius, entre d'altres. També Duguy *et al.* (2007) van emprar el mateix simulador en un dels pocs treballs realitzats sobre aquesta temàtica a la Mediterrània i calcularen la velocitat de propagació, la intensitat lineal del front i l'àrea cremada en diferents tractaments d'aclarida de matollar i pi blanc. En d'altres dels treballs recopilats s'utilitza l'eina BEHAVE com és el cas de Kalabokidis i Omi (1998) i Brose i Wade (2002) que avaluaren l'efectivitat de diversos tractaments mitjançant diferents descriptors del comportament de l'incendi de superfície com la velocitat de propagació i la longitud de la flama, en aquests dos treballs s'analitzen els tractaments sense tenir en compte la ubicació en l'espai dels mateixos. Finalment, l'eina FLAMMAP (Finney, 2006) ha estat l'eina del conjunt de la família 'Behave' que menys s'ha fet servir per avaluar l'efectivitat de tractaments de combustible, i ens els casos que s'ha utilitzat ha estat en combinació amb d'altres simuladors (Stratton, 2004; Scott, 2006).

D'altra banda, la utilització dels simuladors FMAPLUS (Carlton, 2004) o FVS-FFE (Reinhardt i Crookston, 2003) ha permès obtenir descripcions del comportament de l'incendi força detallades ja que incorporen la mateixa metodologia per descriure els incendis de capçades

que NEXUS i també d'altres aplicacions per descriure en detall el combustible de restes (FMAPLUS) o avaluar l'efectivitat dels tractaments (FVS-FFE). Stephens i Moghaddas (2005a, 2005b) i Stephens *et al.* (2009) utilitzaren FMAPLUS per avaluar l'efectivitat de les cremes prescrites i de diferents tractaments d'aclarida en boscos de coníferes. Els dos primers treballs esmentats determinaren tant variables descriptores del comportament d'incendis de superfície com de capçades, mentre que en el darrer es van calcular únicament les referents als incendis de capçades. Fiedler (2004), Fiedler i Keegan (2003) i Ager *et al.* (2007) van fer servir FVS-FFE per avaluar l'efectivitat dels tractaments d'aclarida i van determinar únicament el *CI*. Scott (1998a, 1998b) calcularen també el *TI* per avaluar l'efectivitat de cremes prescrites i aclarides.

Pel que fa a l'eina PROMETHEUS (Tymstra *et al.*, 2009), tot i que encara està en procés desenvolupament i no ha estat molt utilitzada per avaluar l'efectivitat dels tractaments de combustible, Beverly *et al.* (2009) l'utilitzaren per avaluar l'efectivitat de les cremes prescrites mitjançant el càlcul de l'índex de vulnerabilitat que es determina a partir de variables descriptores del comportament del foc i variables meteorològiques.

Alguns dels treballs recopilats utilitzen més d'un simulador per avaluar l'efectivitat dels tractaments, ja sigui amb l'objectiu de comparar els resultats obtinguts amb diferents simuladors o bé per complementar els resultats obtinguts. És el cas d'Scott (2006) que va utilitzar CFIS (Cruz *et al.,* 2005), NEXUS i FLAMMAP i comparà els resultats obtinguts amb aquests tres simuladors determinant la *R* i l'ocurrència d'incendis de capçades actius i passius. Els resultats mostraren diferències considerables amb les variables esmentades obtingudes amb cadascun dels simuladors, essent CFIS el simulador amb el que s'obtenien valors més elevats de les variables, seguit per NEXUS i a continuació per FLAMMAP.

D'altra banda, Schmidt *et al.* (2008) avaluaren l'efectivitat de diferents tractaments de combustible combinant diverses de les eines esmentades: FVS-FFE per calcular paràmetres referents al combustible de capçada (com la densitat de les capçades, l'altura des de la superfície a les capçades o la seva cobertura); BEHAVEPLUS i NEXUS per determinar el comportament de l'incendi de superfície i de capçada, respectivament; i FARSITE per avaluar l'efectivitat dels tractaments segons la seva distribució en el territori. La utilització de diferents eines va permetre als autors d'aquest darrer treball calcular múltiples descriptors del comportament de l'incendi com la *R*, la longitud de la flama, la intensitat lineal de l'incendi, l'àrea cremada, *TI* o *CI*. La mateixa estratègia seguí Stratton (2004) amb FARSITE i FLAMMAP determinant variables com la intensitat lineal del front, la longitud de la flama o

l'àrea cremada. L'autor subratlla la necessitat d'incorporar diverses eines per avaluar l'efectivitat dels tractaments de combustible.

Es pot concloure que NEXUS és el simulador més utilitzat (Figura 2.2) ja que del conjunt de la família 'Behave' és el que permet fer una anàlisi més detallada dels incendis de capçades. Altres eines força utilitzades són les que incorporen altres sistemes addicionals que permeten complementar i millorar la informació obtinguda, com per exemple visualitzar els efectes sobre una base cartogràfica (FARSITE), avaluar la variabilitat del combustible al llarg del temps (FVS-FFE) o millorar la caracterització del combustible generat en els tractaments com són les restes (FLAMPLUS).

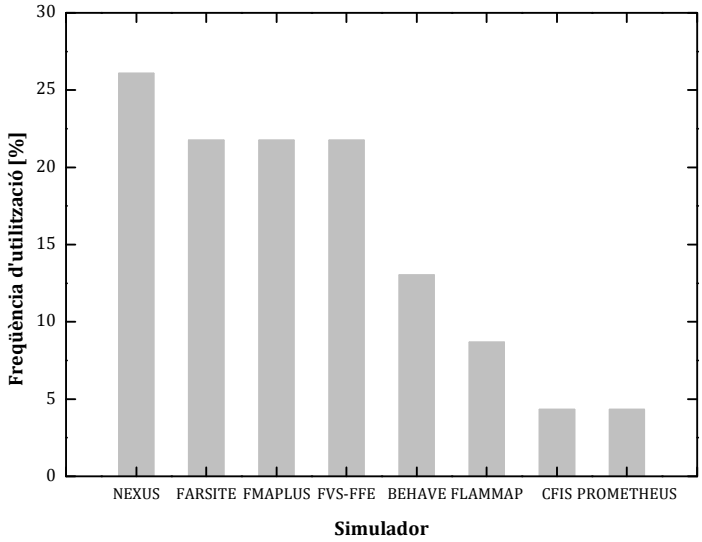

Figura 2.2. Utilització dels simuladors en els diferents treballs de simulació recollits que avaluen l'efectivitat dels tractaments de combustible. La suma és superior al 100 % perquè hi ha treballs en els que s'usen més d'un simulador.

D'altra banda, les variables més extensament utilitzades han estat aquelles que avaluen la propagació dels incendis de capçada (*CI*) i de superfície (*R*). Aquestes són les variables més utilitzades tradicionalment en els estudis de simulació en general per avaluar el comportament del foc (Figura 2.3). L'ampli ús de *CI* s'explica perquè aquesta s'obté amb l'eina NEXUS, el simulador més d'utilitzat. *R* és una variable utilitzada per tots els simuladors.

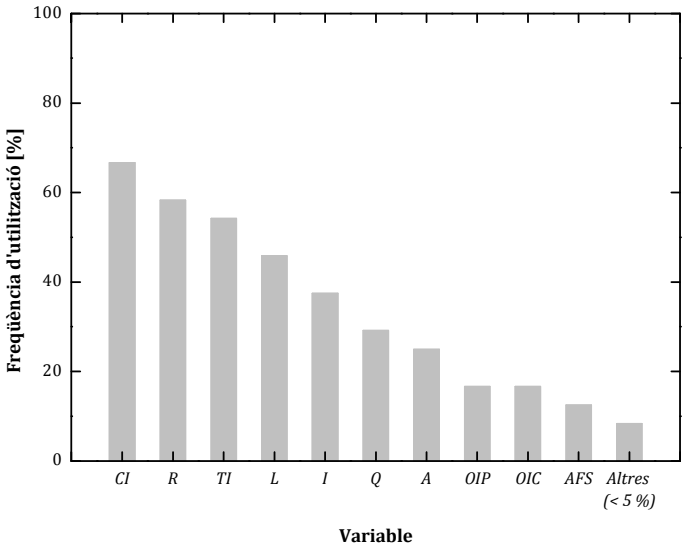

Figura 2.3. Utilització de les variables descriptores del comportament dels incendis forestals en els diferents treballs de simulació recollits que avaluen l'efectivitat dels tractaments de combustible. La suma és superior al 100 % perquè en la major part de treballs s'usen més d'una variable.

Parametrització del combustible

En els simuladors esmentats, els principals paràmetres d'entrada que cal conèixer adequadament i que condicionen en bona part els resultats obtinguts fan referència a la caracterització del combustible i a les condicions ambientals. Ambdós grups de paràmetres poden presentar valors molt diversos i poden canviar significativament tant al llarg del temps com en el mateix territori.

La caracterització del combustible és un factor determinant per realitzar prediccions acurades sobre el comportament d'un incendi forestal i la seva evolució en el territori. En les eines de simulació quasiempíriques, per representar el combustible s'acostuma a utilitzar models de combustible forestal. Un model de combustible és una descripció ordenada i simplificada del combustible que s'utilitza com a estructura de paràmetres d'entrada en els models matemàtics que descriuen el comportament del foc. Per cada model de combustible es defineixen determinats paràmetres extrínsecs i intrínsecs del combustible de superfície necessaris per resoldre el model matemàtic de propagació dels incendis de superfície.

Cada eina de simulació incorpora el seu propi tipus de model de combustible. Els models de combustible utilitzats per les eines basades en el model de propagació de superfície de Rothermel (1972) (BEHAVE, FARSITE, NEXUS, FLAMMAP, FVS-FFE i FMAPLUS)estan definits mitjançant la càrrega de combustible, la relació àrea superficial-volum, l'altura del llit de combustible, la calor de combustió i la humitat d'extinció del combustible mort. Cal ressaltar que els models de combustible mencionats descriuen únicament el combustible de superfície i no inclouen paràmetres referents al combustible de capçada, això s'explica pel fet que l'esmentat model de Rothermel (1972) calcula la velocitat de propagació a través del combustible de superfície. Així doncs, per calcular les variables descriptores del comportament dels incendis de capçades (*TI*, *CI*, etc.) s'ha d'emprar una versió ampliada d'aquesta estructura de dades incloent els paràmetres referents al combustible de capçada (com la densitat aparent del combustible disponible de les capçades, l'altura a la base de les capçades i la càrrega disponible de les capçades).

Els models de combustible utilitzats pels simuladors de la família 'Behave' poden ser els models estàndards del NFDRS (National Fire Danger Rating System) implementats per defecte -13 models descrits per Anderson (1982), posteriorment ampliats a 40 models per Scott i Burgan (2005)- i definits a partir de claus fotogràfiques, o bé, es poden construir nous models de combustible per caracteritzar un determinat tipus de vegetació no inclòs en els models estàndards. Aquests són els anomenats models de combustible propis i es construeixen introduint nous valors a les diferents categories de paràmetres, tot obtenint les dades mitjançant estimacions o tècniques de mostreig experimental. Els models de combustible propis permeten caracteritzar més detalladament el combustible, no obstant s'utilitzen menys freqüentment perquè cal determinar les propietats del combustible a camp. En canvi, els models estàndards permeten caracteritzar el combustible sense la necessitat de realitzar treball de camp, són més directes i senzills d'utilitzar.

En els treballs recopilats, la caracterització del combustible en els simuladors de la família 'Behave' s'ha realitzat a partir d'informació preexistent o bé s'ha descrit el combustible a partir de treball de camp. Així, Stephens (1998) i Stratton (2004) utilitzaren cartografia preexistent sobre tipus de vegetació i assignaren a cadascun dels diferents tipus de vegetació presents el model de combustible estàndard més adient. Altres treballs caracteritzaren el combustible a camp i posteriorment assignaren un model de combustible estàndard (Schmidt *et al.*, 2008; Stephens *et al.*, 2009; Manson *et al.*, 2007). Els criteris per justificar l'ús de models de combustible estàndards o propis varien segons el treball. Per exemple, Scott (1998a, 2006), Duguy *et al.* (2007), Schmidt *et al.* (2008) i Stephens *et al.* (2009), optaren únicament per models estàndards justificant la seva elecció atenent a què aquests són els

que foren utilitzats per parametritzar i calibrar el model de propagació d'incendis inclòs en el simulador que varen emprar. Altres treballs, com Van Wagtendonk (1996), Kalabokidis i Omi (1998), Fulé *et al.* (2001a, 2002), Brose i Wade (2002) i Manson *et al.* (2007) utilitzaren models propis perquè eren els que caracteritzaven d'una forma més acurada el combustible. La resta de treballs recopilats van fer servir els models estàndards per caracteritzar el combustible de les zones no tractades i els models propis pel combustible de les zones tractades (Stephens, 1998; Stratton, 2004).

El nivell de detall de la informació del combustible en els models quasiempírics que inclouen cartografia digitalitzada, com FARSITE i FLAMMAP, depèn de la resolució cartogràfica sobre la qual es treballa (normalment de 30 x 30 m) essent aquesta en moltes ocasions poc detallada per poder realitzar una caracterització del combustible suficientment acurada. En el cas concret de la Conca Mediterrània, s'utilitzen els mateixos models de combustible esmentats els quals han estat desenvolupats a partir de caracterització del combustible dels EUA, per aquesta raó la utilització d'aquests models sovint no s'adapta prou acuradament a les condicions reals del territori i requereix prèviament parametritzar a camp el model pel combustible típic de la zona tal i com realitzaren Duguy *et al.* (2007).

D'altra banda, el simulador PROMETHEUS basat en el model empíric CFBP system (Forestry Canada Fire Danger Group, 1992) utilitza 16 models de combustible per descriure els diferents tipus de vegetació canadencs (De Groot, 1993). A diferència del models de combustible d'Anderson (1982) i Scott i Burgan (2005), el sistema canadenc descriu el combustible de forma qualitativa mitjançant paràmetres com el tipus de sòl i capa d'humus, la presència o absència de diferents estrats de combustible (fullaraca, herbaci i arbustiu) i el tipus de combustible de capçades. Beverly *et al.* (2009) utilitzaren el sistema canadenc per avaluar l'efectivitat de les cremes prescrites en un bosc de coníferes a Canadà.

Finalment, l'eina CFIS no empra cap dels models de combustible descrits anteriorment. CFIS és una eina dissenyada principalment per avaluar el potencial dels incendis de capçades i per caracteritzar el combustible utilitza variables com la càrrega de combustible de capçada, el contingut d'humitat i l'altura de la superfície a la base de la capçada.

Parametrització de les condicions ambientals

Les condicions ambientals són un factor clau a l'hora d'avaluar un determinat tractament. Els principals paràmetres ambientals requerits pels simuladors són la temperatura, humitat relativa i la direcció i velocitat del vent. Així mateix, també cal determinar la humitat del

combustible, un paràmetre molt lligat a les condicions ambientals existents i que es calcula a partir del coneixement d'aquestes. Les dades meteorològiques introduïdes en el cas dels simuladors quasiempírics no poden canviar en l'espai, de manera que totes les condicions ambientals utilitzades són uniformes en tot el territori. Això comporta que les condicions ambientals utilitzades en aquests simuladors no tinguin en compte comportaments locals com remolins de vent, la interacció local de la meteorologia i la topografia o aquells causats pel mateix incendi. Tampoc tenen en consideració fenòmens provocats per forts vents, com són la caiguda d'arbres o la disminució de l'altura de la flama, els quals modifiquen el comportament de l'incendi (Cruz i Alexander, 2010).

En la bibliografia és freqüent la utilització d'escenaris ambientals teòrics per a realitzar les simulacions. Aquests escenaris s'elaboren mitjançant el càlcul de percentils, és a dir, de la distribució de freqüència acumulada de les dades meteorològiques històriques d'una determinada variable. D'aquesta manera es tenen en compte per separat els valors més freqüents per cadascuna de les variables considerades. Els valors obtinguts per cada variable en cada percentil s'agrupen en els diferents escenaris teòrics: els escenaris moderats (normalment percentils 75– 80), escenaris alts (percentils 85-90) i els escenaris extrems (percentils 95, 97 o 97,5). A tall d'exemple, un escenari meteorològic de temperatura extrema del percentil 97 implica la utilització d'aquell valor de temperatura que es troba per sobre el 97 % del conjunt de dades analitzades. En els treballs recopilats els percentils es calculen a partir de dades meteorològiques diàries de temperatura, humitat i velocitat i direcció del vent corresponents a diferents períodes (d'entre 11 anys fins a 40 anys segons el treball), i en la majoria de casos considerant únicament els mesos més secs (abril-octubre, juny-setembre o maig-octubre segons el treball), tot i que en alguns treballs també es fa el càlcul d'un sol mes, el mes en el qual històricament han ocorregut més incendis forestals (Fulé *et al.*, 2001a, 2001b i 2002). Molts d'aquests treballs realitzen aquests càlculs amb un programa específic, el FireFamily Plus (Main *et al.*, 1990) el qual permet analitzar i sintetitzar dades meteorològiques històriques diàries.

En els diferents treballs recollits es calculen entre un i tres escenaris diferents. Per exemple, Stephens i Moghaddas (2005a) avaluaren l'efectivitat de cremes prescrites, tractaments d'aclarida i tractaments d'aclarida seguits de cremes en tres escenaris diferents. Els autors recopilaren les dades meteorològiques de 40 anys i construïren els tres escenaris teòrics (moderat, alt i extrem) obtinguts a partir dels percentils 80, 90 i 97,5 de les dades meteorològiques recopilades per cada variable, respectivament. En la resta de bibliografia, Stratton (2004), Stephens i Moghaddas (2005b), Schmidt *et al.* (2008) i Stephens *et al.* (2009) van utilitzar també escenaris moderats, alts i extrems, Van Wagtendonk (1996),

Stephens (1998), Fulé *et al.* (2001a, 2001b, 2002) van fer servir escenaris alts i extrems i Ager *et al.* (2007) només l'extrem.

Cal, però, anar amb cautela a l'hora d'utilitzar aquesta pràctica ja que de vegades els escenaris construïts no reflecteixen situacions reals perquè consideren situacions extremes simultàniament per totes les variables. Els percentils es calculen per cada variable separadament, és a dir es cerquen els valors extrems de temperatura, humitat i velocitat del vent, essent la probabilitat de què es donin simultàniament totes aquestes condicions ambientals extremes eventualment poc realista en determinades regions. Una alternativa millor per realitzar els escenaris per aquestes simulacions es considerar la variable que té un efecte més destacat sobre el comportament del foc i utilitzar els valors de la resta de variables associats a aquesta variable de referència.

Cruz i Alexander (2010) observaren que en alguns dels treballs de simulació recopilats se subestima la potencialitat dels incendis de capçades per determinades condicions ambientals extremes (Fulé *et al.*, 2002; Raymond i Peterson, 2005). En base a l'estudi d'incendis reals Cruz i Alexander (2010) observaren que per iniciar i propagar un incendi de capçades les humitats del combustible i les velocitats del vent calia que fossin baixes. En canvi, en treballs de simulació com els de Fulé *et al.*, 2002; Raymond i Peterson, 2005, tot i que es basen en condicions d'humitat del combustible extremes, requereixen velocitats del vent per iniciar i propagar un incendi excessivament elevades.

En el mateix treball (Cruz i Alexander, 2010) es compararen els valors obtinguts en les zones no tractades o control de diferents treballs de simulacions amb els d'incendis forestals històrics dels EUA i observaren que les condicions utilitzades en aquestes simulacions són extremadament severes i no representatives de les condicions típiques registrades en incendis forestals reals d'alta intensitat que inclouen activitat de capçades. Per exemple, mentre que en els treballs de simulació els valors de la humitats del combustible varien entre 1-4 % els registrats en incendis reals es situen entre 6-10 %. D'acord amb Cruz i Alexander (2010) els errors que incorporen aquestes simulacions es deuen entre altres a l'ús de models de combustible que simplifiquen la realitat i que si no es calibren per un determinat tipus de vegetació poden tenir com a conseqüència errors importants en els resultats, i també al fet d'utilitzar conjuntament els models de propagació de superfície, de transició a capçades i propagació per les capçades, cadascun d'ells desenvolupat amb diferents plantejaments i diferents escenaris experimentals.

Resultats comparatius d'eficàcia de tractaments obtinguts amb simulacions

Els resultats obtinguts en els diferents treballs recopilats són força variables ja sigui perquè les variables d'entrada són molt distintes, pels diversos tipus de tractaments aplicats o per la utilització de diferents simuladors. Amb tot, en el següent apartat es pretén fer una comparació dels resultats obtinguts en aquests treballs. En primer lloc s'analitzen els resultats obtinguts en l'efectivitat dels tractaments d'aclarida, a continuació, es comparen els resultats obtinguts en treballs on s'han realitzat a la vegada tractaments d'aclarida i cremes prescrites. Seguidament, s'avaluen els resultats obtinguts en les simulacions pel que fa a la diferent gestió de les restes generades amb l'aclarida i, finalment, s'analitzen els treballs on es realitzen tractaments de combustible combinats. També s'avalua l'efectivitat dels tractaments en el temps.

Tractaments d'aclarida

En els treballs que se centren en l'avaluació de l'efectivitat dels tractaments d'aclarida s'ha utilitzat aquesta tècnica silvícola per realitzar reduccions de combustible amb diferents intensitats o bé de forma més especifica per afavorir un determinat tipus d'estructura forestal. Fulé *et al.* (2001a) simularen el comportament d'incendis de capçades en zones on s'aplicà el mateix tractament d'aclarida però eliminant diferent quantitat de combustible en cada zona. Els tractaments disminuïren entre un 77-88 % la densitat d'arbres. Tots els tractaments d'aclarida provocaren una reducció de les variables descriptores del comportament de l'incendi sota les mateixes condicions ambientals. Tal i com és d'esperar en els tractaments més intensius, és a dir, en els tractaments en què s'eliminà més combustible de capçada, s'obtingué un *CI* més elevat que significa que es requerien velocitats del vent més altes per mantenir la propagació d'un incendi de capçades i, per tant, un eventual incendi tindria més dificultat per propagar-se per les capçades.

Fiedler i Keegan (2003) simularen tres tipus de tractaments d'aclarida (Figura 2.4). El primer consistia en l'eliminació d'arbres amb diàmetre inferior a 23 cm, el segon en l'eliminació d'arbres amb diàmetre inferior a 41 cm i el darrer era una aclarida selectiva dirigida a seleccionar la composició i estructura final de la massa forestal. En aquest treball es determinà únicament el *CI*, el qual incrementà un 313 % en les zones on s'aplicà el tractament d'aclarida selectiva, que foren les que resultaren ser més resistents a la propagació d'un eventual incendi de capçades. L'eliminació d'arbres amb diàmetre inferior a 23 cm suposà un increment menor en el *CI* (144 %), ja que aquest tractament és el que eliminà menys quantitat de combustible de capçada, mentre que el segon tractament suposà

un increment de *CI* major (281 %). A llarg termini, 30 anys després de l'aplicació del tractament, el valor de *CI* respecte les condicions inicials fou semblant pels tractament d'aclarida selectiva (250 %) i pel d'eliminació dels arbres amb diàmetre inferior a 41 cm (256 %) mentre que l'eliminació d'arbres amb diàmetre inferior a 23 cm continuà essent en el que més fàcilment es propagava un incendi de capçades (131 %).

En un treball semblant, Fiedler *et al.* (2004) aplicaren també tres tractaments d'aclarida: l'eliminació d'arbres amb diàmetre inferior a 23 cm, la reducció d'un 50 % de la quantitat de combustible de capçada talant arbres però sense fer distinció en el seu diàmetre i el darrer era també una aclarida selectiva dirigida a seleccionar la composició i estructura final de la massa forestal (Figura 2.4). L'aclarida selectiva fou la que presentà un increment en el *CI* més elevat tant immediatament després del tractament (215 %) com 30 anys més tard (146 %). La reducció del 50 % de la quantitat de combustible augmentà un 100 % el *CI* després del tractament i un 52 % passats 30 anys. L'eliminació d'arbres amb diàmetre inferior a 23 cm incrementà en menor proporció el *CI* tant després del tractament (26 %) com passats 30 anys (11 %). Tot i que ambdós estudis (Fiedler i Keegan, 2003; Fiedler *et al.*, 2004) trobaren que els tractaments d'aclarida eren clarament efectius per disminuir el risc d'incendis de capçades i que la seva efectivitat disminuïa en el temps, els dos treballs obtingueren resultats quantitativament diferents (Figura 2.4). Tanmateix tots dos coincideixen en que l'aclarida selectiva dirigida a seleccionar la composició i estructura final de la massa en base a la densitat de peus és el tractament d'aclarida més efectiu.

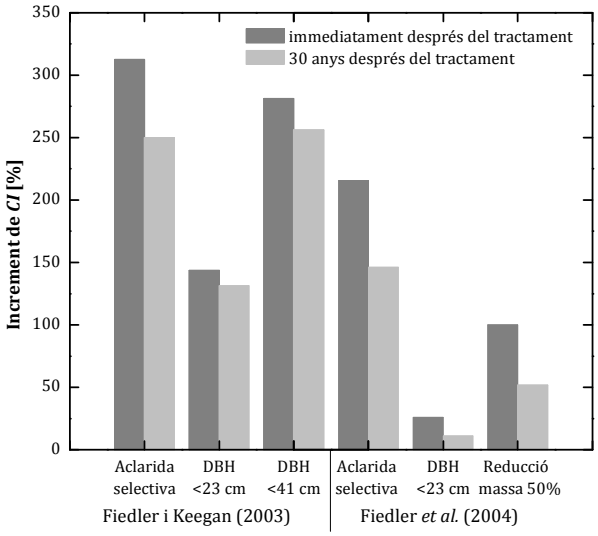

Figura 2.4. Increment de *CI* al llarg del temps en dos estudis de simulació.

Stratton (2004) avaluà l'efectivitat d'un tractament d'aclarida en l'espai considerant tres escenaris meteorològics diferents (moderat, alt i extrem). La intensitat lineal del front disminuí un 13 %, 59 % i 53 % pels escenaris moderat, alt i extrem. La longitud de la flama disminuí un 15 %, 44 % i 40% pels escenaris moderat, alt i extrem. Segons l'autor l'efectivitat del tractament s'incrementa quan aquest està distribuït de manera estratègica en el territori.

Stephens i Moghaddas (2005b) compararen l'efectivitat en la reducció del risc d'incendi dels tractaments d'aclarida més utilitzats tradicionalment en els boscos mixtes de coníferes a Sierra Nevada (EUA). S'avaluaren tres tractaments d'aclarida diferents: aclarida selectiva de determinats arbres per tal d'assolir una estructura de capçades amb diferents estrats, una aclarida dels arbres amb diàmetres més petits (aclarida baixa) per afavorir una estructura d'arbres madurs i una aclarida dels arbres amb diàmetres més grans (aclarida alta) per afavorir una estructura forestal jove. Les variables analitzades foren la *R* i la intensitat lineal del front per als escenaris moderat, alt i extrem per les que el tractament d'aclarida dels arbres amb diàmetres més grans fou el que produí una reducció major d'aquestes variables. D'altra banda, també s'estudià el comportament de l'incendi de capçades calculant el *TI* i el *CI*. Per *TI* l'aclarida dels arbres amb diàmetres més grans fou el tractament més eficient, mentre que per *CI* fou l'aclarida selectiva i l'aclarida dels arbres amb diàmetres més petits. Tanmateix, segons els autors les variables estudiades no presentaven diferències significatives entre els tractaments.

Com a resum d'aquests treballs es pot destacar que les variables descriptores dels incendis de superfície mostren reduccions importants en els tractaments d'aclarida que afecten l'estrat arbori jove o el combustible d'escala, mentre que per les variables descriptores dels incendis de capçades els tractaments que redueixen la càrrega de combustible de capçada com l'eliminació d'arbres madurs són els més efectius. Tots els treballs de simulació que avaluen l'efectivitat dels tractaments d'aclarida posen en evidència que els tractaments que tenen per objectiu assolir una estructura vegetal madura són els més eficients modificant tant el combustible de capçada com el de superfície.

Tractaments d'aclarides i cremes prescrites

En molts dels treballs recollits es comparen tractaments d'aclarida i cremes prescrites. Stephens i Moghaddas (2005a) aplicaren tractaments de cremes prescrites, d'aclarida i tractaments d'aclarida seguits de cremes que reduïren la densitat arbòria entre un 48 i 71 % Les restes originades amb el tractament d'aclarida van ser triturades i repartides de manera

uniforme sobre el terreny. El tractament que causà una reducció de la velocitat de propagació més gran foren les cremes prescrites en els escenaris moderat i alt (74 % i 83 % de reducció de *R*, respectivament) (Figura 2.5). El tractament d'aclarida amb eliminació de les restes mitjançant cremes va resultar també efectiu (reducció de *R* un 63 % en l'escenari moderat i un 75 % en l'alt) mentre que el tractament d'aclarida sense eliminació de les restes fou el menys efectiu dels tres i, fins i tot, provocà situacions més favorables per a la propagació del foc (increment de *R* un 105 % i 33 % pels escenaris moderat i alt, respectivament). En l'escenari extrem la no aplicació de cap tractament fou l'estratègia menys efectiva, mentre que els tres tractaments considerats no presentaren diferències significatives i reduïren la *R* entre 76-97 %.

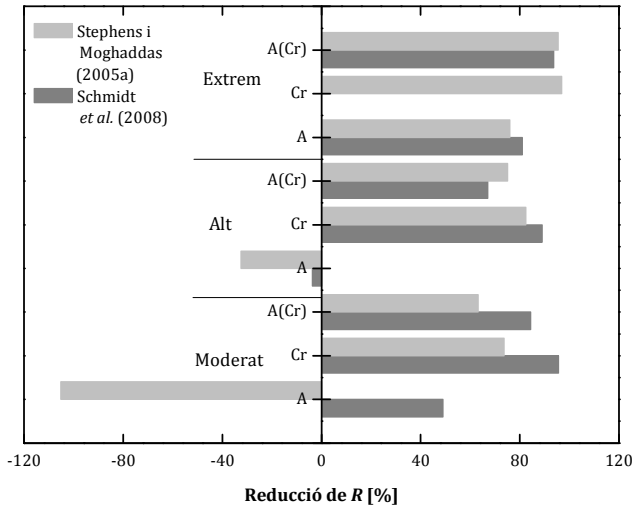

Figura 2.5. Reducció de la velocitat de propagació en els treballs de Stephens i Moghaddas (2005a) i Schmidt *et al.* (2008).

Schmidt *et al.* (2008) avaluaren els mateixos tipus de tractaments que en el cas anterior aplicant també tres escenaris meteorològics diferents (Figura 2.5) i observaren igualment que les cremes prescrites eren el tractament amb el que s'aconseguia una reducció de la velocitat de propagació superior en els escenaris moderat i alt (90 % i 88 %, respectivament) seguides per l'aclarida amb crema de restes (65 % per ambdós escenaris), en canvi, pels tractament d'aclarida sense tractament de restes, la *R* incrementà (15 % en l'escenari moderat i 10 % en l'alt). En l'escenari extrem s'observen diferències: els tractaments d'aclarida, tant els que foren seguits de cremes com els que no, disminuïren considerablement la velocitat de propagació (94 % i 84 % respectivament) mentre que les cremes prescrites no la modificaren. La Figura 2.5 mostra que en general tant les cremes com

les aclarides seguides de cremes pels escenaris considerats redueixen la *R* entre 63-97 %, excepte les cremes que en l'escenari extrem no provoquen cap modificació per aquesta variable. Una cas a part és el tractament d'aclarida sense gestió de les restes el qual causa un augment de *R* en els escenaris moderat i alt i una disminució de *R* en l'escenari extrem.

Van Wagtendonk (1996) avaluà en els escenaris moderat i extrem l'efectivitat de cremes prescrites i dos tractaments d'aclarida. El primer d'ells consistia en l'eliminació del combustible de superfície i el segon del de les capçades. En ambdós casos s'aplicaren diferents mecanismes d'eliminació de les restes (escampades, apilades i cremades o cremades sense apilar prèviament). En l'escenari moderat els únics tractaments que reduïren la velocitat de propagació foren les cremes prescrites (27 %) i l'aclarida de capçades seguida de la crema de les restes (20 %). Sota condicions extremes, les cremes prescrites també foren el tractament més efectiu, i provocaren la reducció de la intensitat lineal del front (76 %), de la velocitat de propagació (7 %) i de l'àrea cremada (37 %), així mateix, s'evitaren comportaments del foc més severs com són els relacionats amb els incendis de capçades. Aquests valors contrasten amb els obtinguts amb el tractament d'aclarida de superfície i restes escampades en què s'obtingueren increments del 97 %, 52 % i 71 % de la intensitat, la velocitat de propagació i l'àrea cremada, respectivament. Tanmateix, el tractament d'aclarida de capçades combinat amb cremes per eliminar les restes presentà una reducció de la intensitat semblant a les cremes prescrites (71 %) i una menor reducció de l'àrea cremada de (16 %) però un augment de la velocitat de propagació (14 %) (Figura 2.6).

Fulé *et al.* (2002) analitzaren l'efectivitat de les cremes prescrites i de dos tractaments d'aclarida, per una banda una aclarida baixa i per l'altra una aclarida selectiva que pretenia restaurar l'estructura forestal d'un bosc existent anteriorment a l'aprofitament forestal d'aquest. L'aclarida selectiva fou el més efectiu en la reducció de la velocitat de propagació (47 %) mentre que les cremes prescrites reduïren aquesta variable en menor proporció (31 %). L'aclarida baixa provocà uns disminució de *R* de 35 %.

Tant Stephens i Moghaddas (2005a) com Schmidt *et al.* (2008) van concloure que una de les conseqüències negatives que pot tenir lloc posteriorment a les cremes és la mort i caiguda d'arbres que s'acumulen a la superfície provocant un increment del combustible de superfície. La majoria de treballs que han avaluat l'efectivitat dels tractaments d'aclarida coincideixen en que aquests poden augmentar efectivament la resiliència dels boscos enfront els incendis. En aquests treballs s'apunta que els tractaments d'aclarida són eines més selectives i precises que les cremes prescrites i que provoquen menys danys sobre les

poblacions forestals afectades (Schmidt *et al.*, 2008). No obstant, no hi ha un consens general sobre quin és el tipus de tractament més efectiu, tot i que en molts treballs les cremes prescrites són les més efectives, les aclarides sempre i quan se'n gestionin les restes tenen una efectivitat també elevada.

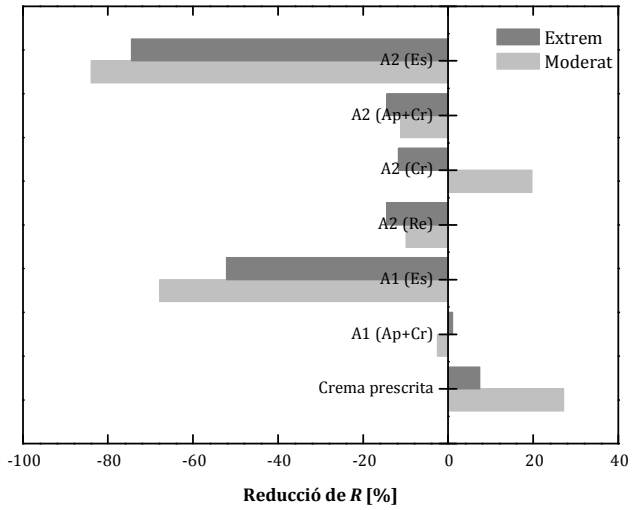

Figura 2.6. Reducció de la velocitat de propagació en el treball de Van Wagtendonk (1996). A1: Aclarida del combustible de superfície. A2: Aclarida del combustible de capçada.

Tractaments de les restes de l'aclarida

Un fet clau a l'hora d'avaluar l'efectivitat d'aquestes actuacions té a veure amb el tractament de les restes obtingudes en l'aclarida. Van Wagtendonk (1996) i Stephens (1998) aplicaren diferents tractaments a les restes: les dipositaren en el mateix terreny on es realitzà l'aclarida escampant-les uniformement, les apilaren i després les cremaren o bé realitzaren cremes per tota la superfície indistintament. Observaren que quan es realitzaren cremes posteriorment a l'aclarida, el risc d'incendi era inferior que quan les restes s'apilaven primer i després es cremaven, ja que en el primer cas s'eliminaven les restes originades en l'aclarida i també tot el combustible de superfície, mentre que en el segon s'eliminava exclusivament el combustible originat en l'aclarida. Els mateixos autors també observaren que la disposició del material de l'aclarida uniformement en el mateix lloc suposava un augment del risc d'incendi immediatament després del tractament superior fins i tot al de les zones no tractades amb increments de la velocitat de propagació propers al 70 %. D'altra banda, Manson *et al.* (2007) observaren que l'índex de capçada actiu era superior en zones on les restes s'apilaren que en les que les restes s'escampaven uniformement per la zona tractada.

A Stephens *et al*. (2005a) les restes es dipositaren en el mateix lloc que s'originaren o bé es cremaren, i en ambdós casos es trituraren. En aquest treball les cremes van ser el tractament de restes d'aclarida més efectiu. Així mateix, quan les restes van ser triturades, el risc d'incendis de capçades disminuí. Schmidt *et al.* (2008) i Stephens *et al.* (2009) dipositaren les restes pel terreny talment com les obtingueren de l'aclarida o bé les cremaren. Observaren igualment que la utilització del foc de forma controlada per eliminar les restes fou el tractament d'aclarida més efectiu. Kalabokidis i Omi (1998) conclogueren que l'aclarida sense tractament de les restes és un tractament inapropiat perquè hi ha més disponibilitat de combustible per la combustió i per tant contribueix a l'aparició d'incendis extrems. D'altra banda, segons els autors, l'aclarida amb tractament de les restes mitjançant crema de les piles és el mètode més efectiu. L'aclarida amb retirada de tot el material també és efectiu però és necessari disposar de zones àmplies per dipositar el material. Finalment, l'aclarida seguida de la reducció del volum de les restes i la seva dispersió és efectiva a partir d'una màxima quantitat de material dipositat (de menys de 20 t ha^{-1} segons Wakimoto *et al.*, 1998).

Treballs de tractament de combustible combinats

Alguns dels treballs recopilats avaluen i comparen l'efectivitat en la reducció del risc d'incendi de diferents tipus de tractaments de combustible, principalment les cremes prescrites, les aclarides, l'ús d'herbicides o de tallafocs. Així, Brose i Wade (2002) compararen l'efectivitat de les cremes prescrites, d'un tractament d'aclarida selectiva amb fins comercials i de l'aplicació d'herbicides durant els 5 anys posteriors a l'aplicació del tractament. Com a resultat trobaren valors de velocitat de propagació i longitud de la flama inferiors en el cas de les cremes prescrites. No obstant, al llarg del temps el tractament amb herbicides fou el que mantingué uns valors més baixos d'aquestes variables. Els autors conclogueren que les cremes prescrites són el tractament que permet millorar més ràpidament l'estructura forestal per evitar un incendi. No obstant, la millor alternativa és l'aplicació de tractaments conjunts. En el cas de Duguy *et al.* (2007) s'estudià el comportament d'un incendi en zones que es caracteritzaven per tenir diferent quantitat de combustible i zones on s'havien realitzat tallafocs. Els tallafocs aplicats sense realitzar cap altre tractament de combustible no resultaven efectius per si sols en la reducció del risc d'incendi.

Evolució dels tractaments al llarg del temps

La durabilitat de l'efecte del tractament està condicionada a les propietats de la vegetació. Quan es realitzen cremes prescrites, el coneixement de les dinàmiques del combustible

s'utilitza per definir un interval de retorn i la intensitat que caldrà que tingui la crema per arribar a l'objectiu de gestió desitjat. En el cas de les cremes prescrites el risc d'incendi pot tornar a aparèixer entre 2 i 5 anys després de la crema (Sackett, 1975; Van Wagtendonk i Sydoriak, 1987; Fensham, 1992).

Existeix menys informació disponible sobre els tractaments d'aclarida i són pocs els treballs de simulació on es tingué en compte l'evolució temporal d'aquests tractaments (Brose i Wade, 2002; Fulé *et al.*, 2002; Manson *et al.*, 2007; Fiedler i Keegan, 2003; Fiedler, 2004; Schmidt *et al.*, 2008). Manson *et al.* (2007) observaren que el temps transcorregut des del tractament afectava el combustible de superfície però els seus resultats no foren consistents per les diferents parcel·les ni en els diferents tractaments. Fiedler i Keegan (2003) i Fiedler (2004) calcularen el *CI* 30 anys després del tractament i van constatar l'efectivitat dels tres tipus de tractaments d'aclarida (baixa, alta i selectiva) en el temps. Brose i Wade (2002) van trobar que 5 anys després del tractament el perill d'incendi podia ser moderat o alt.

2.3. Conclusions

Amb aquest estudi bibliogràfic queda palès que l'avaluació de l'efectivitat dels tractaments de combustible en la reducció del risc de propagació d'incendi és una tasca de certa complexitat. En els estudis recopilats s'avaluen tractaments de combustible en condicions ambientals molt variades, es comparen diversos tractaments que a la vegada s'apliquen de diferent forma i s'avaluen tractaments que tenen dimensions desiguals i es distribueixen heterogèniament en el territori. Per tant, els valors obtinguts en les simuladors són valors relatius útils únicament per fer comparacions entre tractaments avaluats sota les mateixes condicions ambientals. En alguns treballs es dóna el cas que les variables descriptores dels incendis obtingudes a partir de diferents escenaris prenen valors molt elevats que en la realitat no poden donar-se. Tot això fa que sigui difícil comparar diferents tractaments entre sí i avaluar-ne el seu grau d'efectivitat. A més, existeixen moltes i variades eines per avaluar aquests tractaments que presenten diferents avantatges i inconvenients. Tot i això, es poden observar certes tendències, que a tall de conclusions es resumeixen a continuació.

La modelització i simulació d'incendis forestals ha estat la metodologia més extensament utilitzada per avaluar l'efectivitat dels tractaments de combustible donat el seu caràcter no destructiu. Malgrat que els simuladors de la família 'Behave' han estat àmpliament utilitzats per avaluar l'efectivitat de tractaments de combustible, algunes de les seves prediccions presenten certes divergències amb les realitzades per altres simuladors o les obtingudes en

escenaris reals. Per exemple, Scott (2006) avaluà l'efectivitat de diversos tractaments d'aclarida i trobà diferències significatives en el comportament del foc de capçades predit per les eines FLAMMAP, NEXUS i CFIS, mostrant tal i com ja s'ha comentat aquesta darrera uns valors de velocitat de propagació dels incendis de capçada i d'inici de foc de capçada més elevats. Cruz i Alexander (2010) realitzaren una exhaustiva revisió crítica sobre les prediccions realitzades per simuladors quasiempírics en l'avaluació de l'efectivitat de tractaments de combustible específicament per incendis de capçades. Els autors apuntaren diverses evidències que reflecteixen la subestimació dels incendis de capçades, com són la utilització de condicions ambientals extremes i força improbables i l'obtenció de resultats de vegades poc realistes. Els autors donen diverses raons per explicar aquets errors, algunes d'ells són inherents als mateixos programes de simulació quasiempírics, obtinguts a partir d'unes condicions determinades i que deixen de ser vàlids quan les condicions de simulació són diferents.

El desenvolupament de simuladors que porten implementats models físics obre un nou camp per l'avaluació de l'efectivitat dels tractaments de combustible. Tot i que requereixen d'una capacitat computacional molt elevada poden ser de gran utilitat per complementar els estudis d'efectivitat dels tractaments realitzats amb els models quasiempírics. Recentment, s'han realitzat treballs de simulació d'incendis forestals basats en models físics amb l'objectiu d'entendre les relacions entre els fenòmens físics que es donen en els incendis i els canvis en les característiques topogràfiques, les condicions ambientals i les característiques del combustible. Per exemple, Porterie *et al.* (2000) avaluaren l'efecte del vent en el comportament del foc mitjançant l'eina FIRESTAR, Morvan i Dupuy (2001) utilitzaren la mateixa eina per avaluar l'efecte de diferents càrregues de combustible. Morvan *et al.* (2009) modelitzaren la propagació d'un incendi en prats d'herbassars utilitzant FIRESTAR, l'eina empírica MK5 i la quasiempírica BEHAVE i ho compararen amb dades reals de l'incendi. Amb la mateixa eina, Dupuy i Morvan (2005) avaluaren l'efectivitat de tallafocs situats en zones tractades. Mell *et al.* (2007a) simularen incendis en prats d'herbassars amb WFDS i compararen els resultats amb els obtinguts amb dades experimentals reals. Mell *et al.* (2009) desenvoluparen el mateix plantejament en boscos de coníferes. Esforços similars han realitzat Winterkam *et al.* (2009) amb l'eina FIRETEC per tal de d'avaluar els efectes de tractaments d'aclarida.

La simulació de tractaments implica en tot cas una bona caracterització del combustible. D'entre les diverses opcions disponibles, la caracterització pròpia és la més indicada per obtenir bones dades sobre el combustible particular de la zona d'estudi ja que permet tipificar-lo més acuradament tot i que també és més costosa a nivell econòmic i de temps. A

més, també és molt important la caracterització de les condicions ambientals típiques de la zona estudiada ja que provoquen considerables variacions en els resultats obtinguts amb les simulacions. Amb tot, les simulacions no estan exemptes d'errors. Les principals fonts d'aquests poden venir donades per les hipòtesis i limitacions dels propis models que porten implementats els simuladors, pel desconeixement de les condicions que envolten el foc i per la dificultat de descriure amb aquests simuladors l'heterogeneïtat del combustible i les condicions ambientals locals. No obstant, el desenvolupament dels models físics per a la predicció d'incendis forestals obre noves perspectives en l'avaluació de l'efectivitat dels diferents tractaments.

Pel que fa als resultats d'eficàcia dels tractaments, les variables descriptores del comportament d'un potencial incendi posen en evidència l'efectivitat dels tractaments de combustible en la reducció del risc de propagació d'incendi en els treballs recopilats, essent la velocitat de propagació i l'índex de capçades les més utilitzades. De totes maneres, els diferents treballs no estan d'acord sobre quin tipus de tractament és el més efectiu ja que els contextos en els que s'han desenvolupat els treballs són molt diferenciats i això repercuteix fortament i directa a l'eficiència dels tractaments estudiats. A més, les múltiples opcions disponibles pel que fa al tractament de les restes originades amb les aclarides, així com la seva diferent evolució en el temps, fan difícil avaluar aquesta tècnica i comparar-la amb l'efectivitat de les cremes prescrites. El que sí queda palès és que els tractaments que utilitzen el foc, ja sigui com a tractament principal o bé posteriorment a l'aclarida per eliminar les restes, han estat els més efectius en la reducció del risc d'incendi.

Tanmateix, tot i que en molts dels estudis s'observen incendis més severs en els tractaments d'aclarida sense gestió de les restes, no existeix encara prou informació contrastable per determinar l'efectivitat d'aquests tractaments al llarg del temps. L'avaluació dels tractaments d'aclarida al llarg del temps no és senzilla, ja que existeixen múltiples factors que cal considerar com el tipus i la intensitat de l'aclarida, les característiques fisiològiques de les espècies vegetals afectades, el tipus de restes vegetals generades o el tipus de combustible eliminat (capçada, escala o superfície), entre d'altres. És necessari realitzar més investigació en aquest camp per tal de conèixer els efectes a llarg termini dels tractaments de combustible i determinar com pot afectar al comportament del foc en les diferents estacions que segueixen el tractament.

3. DESCRIPCIÓ DE LA ZONA D'ESTUDI

Per tal d'estudiar l'efectivitat dels tractaments d'aclarida es va escollir una zona d'estudi ubicada dins del perímetre del gran incendi forestal del Bages de l'any 1994. En aquest zona, se'n determinaren les característiques del combustible i les condicions ambientals in situ per tal d'analitzar-ne posteriorment el comportament d'un eventual incendi mitjançant simulacions i cremes experimentals ex-situ.

En aquest capítol es detalla en primer lloc el context territorial de la zona afectada per l'esmentat incendi forestal de la Catalunya Central, a continuació es descriu l'àrea escollida per realitzar l'estudi i se'n detallen les parcel·les seleccionades. Finalment, es recopilen i discuteixen les dades meteorològiques de l'àrea d'estudi, per tal d'elaborar diferents escenaris meteorològics representatius del règim d'incendis de l'àrea d'estudi. Aquests escenaris són d'utilitat per realitzar simulacions d'incendis, detallades en el capítol 6.

3.1. Context territorial

El context territorial d'aquesta tesi és el de la Catalunya central, a les comarques del Bages i Berguedà. El relleu s'emmarca dins de l'extrem oriental de la depressió central catalana. És un territori morfològicament complex, amb un conjunt d'altiplans fortament excavats en sentit dominant nord–sud pels cursos del sistema Cardener–Llobregat–Gavarresa. Els cursos fluvials han modelat el territori, obrint-lo cap al mar sobre la part central del litoral català. L'erosió fluvial ha format algunes àmplies conques internes com el Pla de Bages.

El clima de la zona, mediterrani de tendència continental, es caracteritza per una elevada amplitud tèrmica. Les precipitacions són equinoccials amb un mínim destacat a l'hivern i a l'estiu només hi ha un mes de sequera. El relleu propi de la zona i la distància del litoral afavoreixen els fenòmens d'inversió tèrmica (Badia, 2000).

En les zones planes els usos del sòl principals són els conreus de secà i és on es troben els principals assentaments humans mentre que en les zones més elevades majoritàriament hi ha bosquines i prats i boscos d'aciculifolis. La vegetació potencial de la zona correspon al domini de les rouredes, però sovint han estat substituïdes per les pinedes de pinassa i més recentment a causa dels incendis per pinedes de pi blanc. En les zones més baixes i els solells apareix el carrascar. Aquestes masses boscoses s'intercalen amb conreus de secà, brolles i prats secs mediterranis.

3.1.1. Règim d'incendis a la Catalunya central

El territori català està tipificat per diferents tipologies d'incendis forestals descrits en termes de recurrència, intensitat i patró espacial d'afectació segons la classificació d'ORGEST (Orientacions de gestió sostenible i multifuncional per als boscos de Catalunya) (Piqué *et al.*, 2011), per tal d'integrar la pertorbació del foc i l'estudi del seu comportament tant en la gestió i planificació forestal com en l'extinció (Castellnou *et al*., 2009). La Catalunya central és un territori que presenta un règim d'incendis característic, conegut i destacat. La seva reconstrucció evidencia que és una de les zones, conjuntament amb l'Empordà i Terres de l'Ebre, que crema més freqüentment, al voltant de cada 70 anys.

A diferència d'aquestes altres dues zones, on els incendis dominants són de vent de tramuntana i mestral respectivament, a la Catalunya central les situacions d'ona de calor de sud, en primer lloc, i de vents de ponent, en segon lloc, són les principals responsables dels

incendis que es declaren en la zona. Aquestes dues situacions són responsables de dos tipologies de comportaments dels incendis; els dominats pel plomall i els conduits pel vent (Rothermel, 1991), respectivament. En els incendis dominats pel plomall, la columna de fums s'alça verticalment sobre el foc i el comportament de l'incendi està dominat pels moviments d'aire que es generen al voltant de la columna deguts a la convecció. Aquest fenomen fa que s'assoleixin velocitats del vent més grans a la superfície que en cotes més elevades. D'altra banda, els incendis dominats pel vent es donen quan la velocitat del vent és elevada i creixent en altura. És aquest fenomen el que condueix el foc, tot provocant una inclinació de la columna de convecció.

En el cas concret de les ones de calor de sud, l'entrada de calor que s'inicia pel sud de la Península Ibèrica, acaba revertint greument sobre la part central de Catalunya degut al perfil de la seva micro i macro topografia (Ninyerola *et al.*, 2003), i particularment a la vall del Llobregat, que és un eix perfecte de sud a nord des del litoral al Pirineu, permetent la penetració sense obstacles del vent de sud. La seqüència que presenten aquestes situacions és l'entrada d'una ona de sud (aire calent i sec en superfície i alçada) a la Península Ibèrica i el seu posterior arrossegament des de ponent a llevant. És a dir, la circulació general sinòptica acaba arrossegant cap al Mediterrani l'aire calent de l'ona de sud que a més s'ha ressecat i escalfat a sobre de la Península. Aquesta sortida d'aire es fa per sobre del sistema ibèric, per la vall de l'Ebre i cap al litoral català. La depressió de Manresa (Pla de Bages), acumula aquest aire sec que queda atrapat per la frontera que suposa el Pirineu, la serralada prelitoral i per la pressió de l'aire calent del sud que puja pel Llobregat i per l'Ebre. És per aquesta raó, que les ones de sud tenen aquesta especial incidència al Pla de Bages i afavoreixen allí les condicions més extremes de gran incendi de la Península Ibèrica en aquest marc meteorològic. Aquest aire calent al final, només pot evacuar cap al mar pel canal del Llobregat i sortir encaixat a les serralades prelitoral i litoral cap a Gavarres, esdevenint en ponentades o altrament dit "ressaques" de les ones de sud.

3.2. Àrea d'estudi

L'àrea d'estudi es troba situada al Pla de Bages, dins la finca Casamitjana (200 ha), a uns 3 km del nucli urbà de Castellnou del Bages, comarca del Bages (Figura 3.1). La latitud i longitud del centroide de la finca és 41°51'N i 1°49'E, respectivament. El terreny és irregular, amb pendents entre el 10 i el 40 %, amb zones relativament planes i petits turons que fan que hi hagi vessants orientades pràcticament en totes direccions (Figura 3.2). L'alçada mitjana sobre el nivell del mar és d'uns 530 m, tot i que es troben punts de fins a 613 m. Els

sòls de l'àrea d'estudi, d'acord amb el mapa geològic de Catalunya (ICC, 2009), estan classificats com a lutites roges, gresos i calcàries.

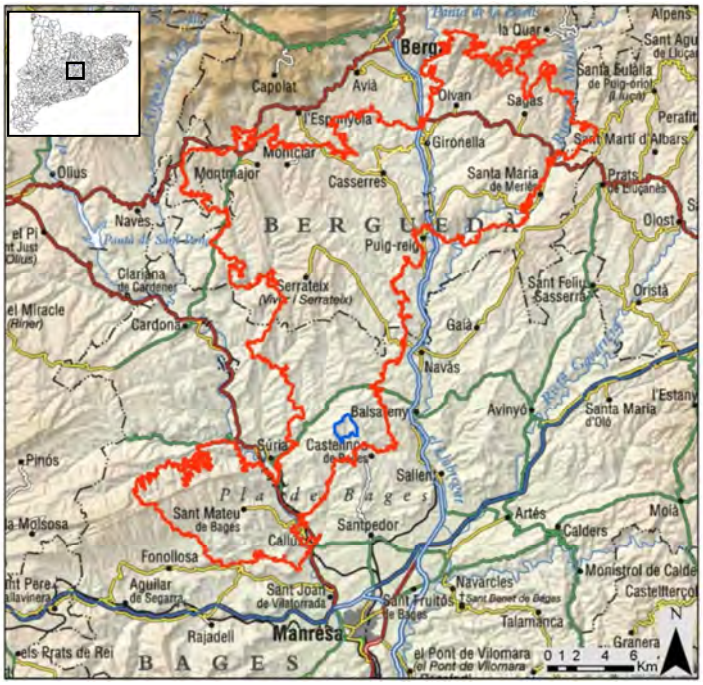

Figura 3.1. Ubicació de l'àrea d'estudi (es mostra el perímetre de l'incendi de 1994, en vermell i el perímetre de l'àrea d'estudi, en blau).

El gran incendi forestal ocorregut l'any 1994 va afectar de ple la finca de Casamitjana. Aquest incendi va comportar un canvi en els usos del sòl de la finca, que va passar d'un predomini del bosc d'aciculifolis abans de l'incendi al domini de bosquines i prats després. L'escenari actual 16 anys després és el de poblacions joves de regenerats de pi blanc (*Pinus halepensis*), en les etapes de creixement de plançoneda i plançoneda grossa (vegeu capítol 1), amb unes densitats de peus elevades (entre 10.000 a 100.000 peus ha^{-1} de mitjana).

Transcorreguts diversos anys després de l'incendi del 1994, els tècnics i gestors competents van decidir aplicar un programa de tractaments silvícoles en algunes de les zones afectades per l'incendi, per tal de reduir la densitat d'arbres. El programa va consistir en tractaments d'aclarida mecànica intensius per reduir la densitat dels regenerats de pi blanc al voltant del 80-90 %, arribant a densitats de fins a 1.200 peus ha^{-1}. L'objectiu era millorar el creixement radial dels arbres, augmentar la producció de pinyes i reduir la continuïtat del combustible. Durant aquests tractaments, les restes de l'aclarida no es van retirar ni foren tractades (per

exemple apilant-les, triturant-les o bé cremant-les) sinó que es van deixar en el mateix lloc en el que es van originar, incrementat d'aquesta manera la quantitat de càrrega de combustible disponible per cremar.

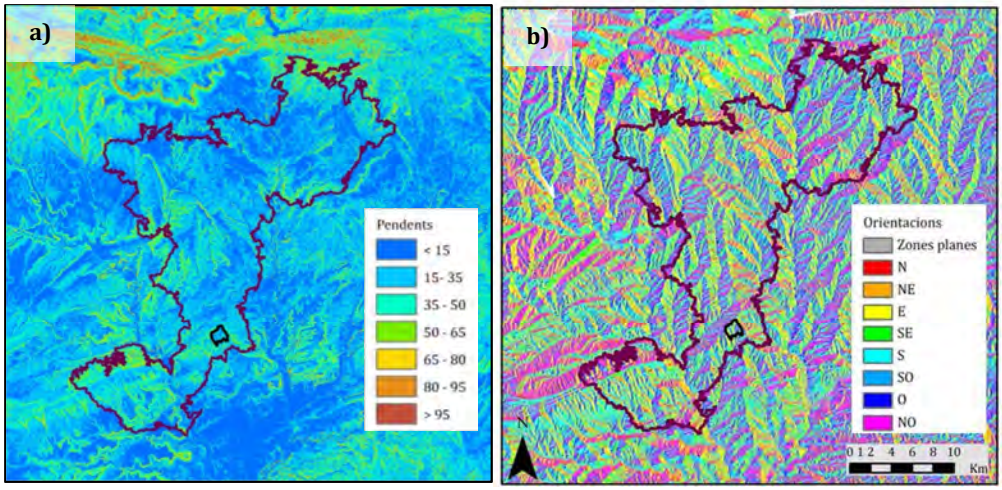

Figura 3.2. Mapa de a) pendents i b) orientacions de l'àrea d'estudi. Es mostra el perímetre de l'incendi de 1994, en grana i el perímetre de l'àrea d'estudi, en negre.

D'acord amb el mapa de models d'Inflamabilitat (CREAF, 2000-2001), el qual dóna una idea del risc d'ignició de la vegetació d'una zona determinada calculat a partir del grau d'inflamabilitat de cada espècie (Valette *et al.*, 1979; Hernando i Elvira, 1989) i el seu percentatge de cobertura, a la finca Casamitjana li correspon el model 8 d'inflamabilitat, caracteritzat per un recobriment del 80 a 89 % d'espècies molt inflamables. Aquesta situació aplica a l'estat actual de la finca ja que el regenerat posterior a l'incendi és una auto-successió actualment dominada pel pi blanc i que està compost pel mateix tipus de vegetació anterior a l'incendi però amb la dominància actual de les espècies de creixement més ràpid.

D'altra banda, el mapa de models de combustibilitat (CREAF, 2003), establert per a tipificar el comportament del foc en base a la càrrega de combustible i basat en els 13 models de combustibles forestals nord-americans (Anderson, 1982) atorga a la finca el model 7, dins el grup dels matollars de càrrega elevada. Tanmateix, en l'elaboració d'aquest mapa es va evitar l'assignació de models de combustible del grup de restes silvícoles ja que es va considerar les tales com a fenòmens puntuals en el temps. Considerant les restes en l'àrea d'estudi, li corresponen els models 11 i 12. El model 11 domina en les zones tractades on ha passat més temps des de l'aclarida i es caracteritza per l'existència d'un bosc molt aclarit amb les restes

de poda disperses i plantes herbàcies rebrotant. L'incendi que pot esdevenir en aquest tipus de vegetació es propaga per les restes i el material herbaci. El model 12 de combustible es troba en àrees recentment aclarides on predominen les restes sobre l'arbrat. El foc que pot ocórrer en aquest model pot arribar a propagar-se ràpidament amb intensitat elevada tot generant focus secundaris.

3.2.1. Descripció de les parcel·les experimentals

Requeriments de les parcel·les experimentals

Per tal de seleccionar les parcel·les més adients per avaluar l'efectivitat del tractament d'aclarida es van definir una sèrie de requeriments. Calia seleccionar diverses parcel·les tractades en diferents períodes de temps, que corresponguessin a una mateixa sèrie cronològica, és a dir, que partissin d'unes mateixes condicions inicials i que haguessin estat sotmeses a les mateixes condicions climatològiques al llarg del temps.

Totes les parcel·les havien de ser regenerats de pi blanc de l'incendi del 1994, i en la mesura del possible, havien de tenir una densitat de peus inicial (abans de ser tractades) i una intensitat de tractament similars, i una mateixa orientació i pendent. Aquestes foren característiques fixades com a idònies. Atenent a aquests criteris i a la disponibilitat de la finca Casamitjana, calgué tanmateix acceptar alguna desviació respecte l'ideal. En tot cas, es pogué conformar un joc de parcel·les raonablement adequades per a abordar els objectius plantejats en aquest treball.

Selecció de les parcel·les experimentals

A partir dels registres proporcionats per l'Administració, pel que fa referència a densitats de peus inicial i intensitats de tractament, i amb el suport de sistemes d'informació geogràfica per avaluar la localització i les característiques topogràfiques, es van seleccionar dins de l'àrea d'estudi 4 parcel·les tractades, conjuntament amb una parcel·la control (Figura 3.3). Les parcel·les es van identificar com: Z-1 (tractada el juny de l'any 2009), Z-6 (tractada el desembre de l'any 2008), Z-26 (tractada el març de l'any 2007), Z-40 (tractada el gener de l'any 2006) i Z-control (no tractada). La nomenclatura de les parcel·les tractades correspon als mesos transcorreguts entre el tractament d'aclarida i el mostreig realitzat a cada parcel·la. La parcel·la Z-1 corresponia a la meitat de la parcel·la control, la qual es va aclarir i es va mostrejar un mes després.

Les parcel·les Z-6, Z-26 i Z-control mesuraven 400 m^2 (20 m per 20 m) mentre que la Z-40 mesurava 300 m^2 (15 m per 20 m) i la Z-1 mesurava 200 m^2 (10 m per 20 m). Les diferències en les dimensions de les parcel·les es deu a la dificultat de trobar parcel·les similars que complissin tots els requeriments anteriorment esmentats.

Figura 3.3. Detall de les parcel·les seleccionades per a fer l'estudi, dins la finca Casamitjana. a) Z-control. b) Z-1. c) Z-6. d) Z-26. e) Z-40.

Les parcel·les seleccionades presentaven unes condicions físiques semblants pel que fa a densitat d'arbres després del tractament (al voltant de 1.800 arbres ha^{-1}), orientació (NE/E) i altura sobre el nivell del mar (sobre els 550 m), el pendent presentava més variabilitat a les diferents parcel·les (9-26 %). Tanmateix la densitat inicial de les parcel·les Z-26 i Z-40 era força diferent a la de la resta de parcel·les (Taula 3.1 i Taula 3.2). Aquest fet fou degut a la recopilació de registres erronis per part de l'Administració.

Taula 3.1.Principals característiques de les parcel·les experimentals d'acord amb el tractament i el mostreig.

Parcel·la	Densitat inicial [arbres ha^{-1}]	Densitat final [arbres ha^{-1}]	Intensitat del tractament [%]	Data del tractament [mes i any]	Data de mostreig [mes i any]
Z-control	30.000	n.a.	n.a.	n.a.	05/2009
Z-1	30.000	1.000	97	06/2009	07/2009
Z-6	30.000	1.500	95	12/2008	05/2009
Z-26	15.000	2.500	83	03/2007	05/2009
Z-40	14.000	2.000	86	01/2006	05/2009

n.a. no aplica.

Taula 3.2. Característiques físiques de les parcel·les d'estudi seleccionades.

Parcel·la	Coordenades del centroide [UTM]	Orientació	Pendent mitjana [°]	Altura [m]
Z-control	401.290, 4.633.959	NE	14	525
Z-1	401.290, 4.633.959	NE	14	525
Z-6	401.237, 4.634.126	NE	9	530
Z-26	401.530, 4.634.509	NE	10	560
Z-40	401.830, 4.634.934	E	26	550

Descripció qualitativa del combustible present en les parcel·les

Parcel·la Z-control

La parcel·la Z-control (Figura 3.4) es va replantejar seguint l'orientació NS/EO, marcant un quadrat de 20 m de longitud. El combustible present a la parcel·la presentava la següent estructura i composició: l'estrat de virosta era molt continu, d'entre 3 i 4 cm de profunditat. L'estrat herbaci, d'uns 30 cm d'altura de mitjana, presentava aproximadament un 60 % de material mort i era poc abundant. No obstant, s'hi va trobar una bona representació de rotgeta (*Rubia peregrina*). L'estrat arbustiu estava format per diferents espècies, entre

d'altres, la botja d'escombres (*Dorycnium pentaphyllum*), l'esbarzer (*Rubus ulmifolius*), el romaní (*Rosmarinu sofficinalis*), el cirerer d'arboç (*Arbutus unedo*), el llentiscle (*Pistacia lentiscus*) i el roldor (*Coriaria myrtifolia*). A més, s'hi observava molta densitat i una vegetació robusta i vigorosa, amb alçades mitjanes de 0,8 m que podien arribar fins els 2 m, sobreposant-se amb l'estrat arbori. Finalment, l'estrat arbori estava compost majoritàriament per pi blanc amb una altura mitjana aproximada de 2 m i un diàmetre a l'alçada del pit mitjà d'uns 2 cm.

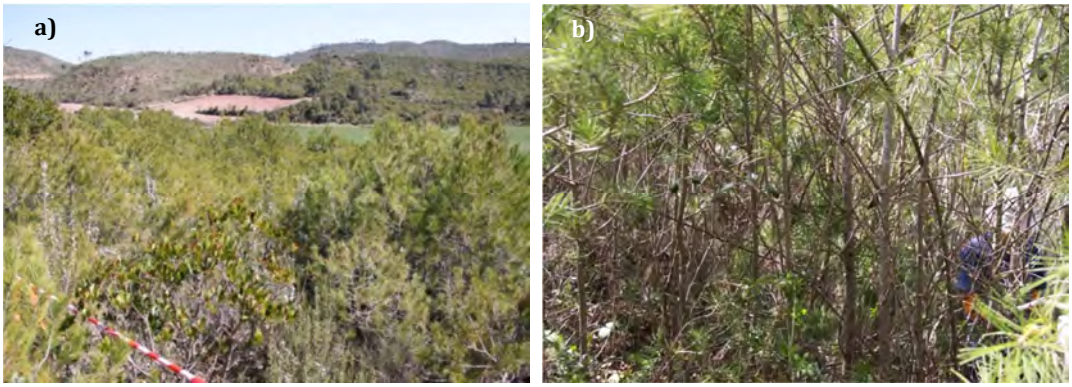

Figura 3.4. Estructura del combustible a la parcel·la Z-control. a) Vista general de la parcel·la. b) Detall de la vegetació de la parcel·la.

Parcel·la Z-1

Un mes després de mostrejar la parcel·la Z-control, es va replantejar la meitat de la parcel·la, i va ser anomenada com a Z-1. Aquesta parcel·la va ser sotmesa al mateix tractament d'aclarida que la resta de parcel·les. Per tant la parcel·la Z-1 presentava les mateixes característiques físiques que la Z-control. Es va replantejar seguint l'orientació NS/EO, marcant un rectangle de 20 m de longitud per 10 m d'amplada.

El combustible present en la parcel·la Z-1 (Figura 3.5) presentava força diferències pel que fa a l'estructura i composició respecte la parcel·la Z-control. La virosta formava un estrat molt continu, difícil d'observar ja que es trobava sota les restes de tala. L'estrat herbaci presentava una altura d'uns 10 cm, amb més del 50 % de material mort i amb masses compactes que podien arribar en algun cas fins a 100 cm. Aparentment semblava un estrat discontinu perquè quedava majoritàriament amagat a sota de les restes de tala. Les espècies arbustives presents formaven un estat molt discontinu i tenien altures força baixes (no més de 15 cm), entre d'altres especies s'hi trobaven la botja d'escombres (*Dorycnium*

pentaphyllum), l'esbarzer (*Rubus ulmifolius*), la gatosa (*Ulex parviflorus*) i el llentiscle (*Pistacea lentiscus*). Per últim, l'estrat arbori estava compost únicament per pi blanc d'una altura mitjana aproximada entre 2,5 i 3 m, amb peus prims amb un diàmetre mitjà aproximat d'1-2,5 cm, i amb capçades molt esclarissades.

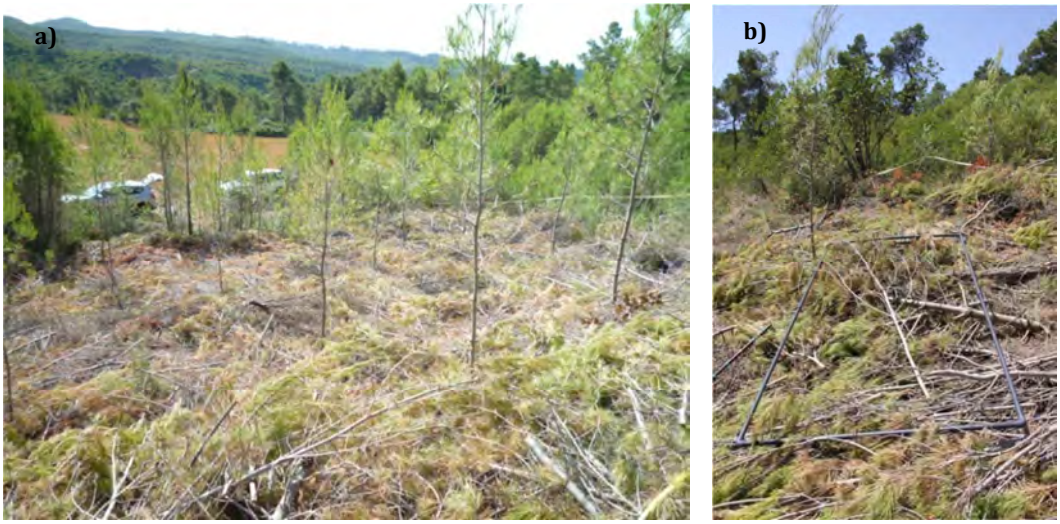

Figura 3.5. Estructura del combustible a la parcel·la Z-1. a) Vista general de la parcel·la. b) Detall de la vegetació de la parcel·la, les dimensions del rectangle són 2x 1 m.

Pel que fa a l'estrat format per les restes de tala, hi havia una gran quantitat de combustible mort d'1h no descompost i de fullatge encara verd que cobria tota la superfície amb un mantell força uniforme. També s'hi observava combustible verd de 10h i 100h amb un alt contingut humitat. L'altura mitjana aproximada de les restes era d'uns 40 cm, però podia arribar en algun cas fins a 1 m.

Parcel·la Z-6

La parcel·la Z-6 es va començar a aclarir a finals de l'any 2008 i es va acabar al mes de març de 2009. Va ser replantejada seguint l'orientació NS/EO, marcant un quadrat de 20 m de longitud

A la parcel·la Z-6 el combustible presentava una estructura i composició que a simple vista era difícil de diferenciar de la parcel·la Z-1, a nivell dels estrats de virosta, herbaci, arbustiu i arbori (Figura 3.6). Tanmateix, pel que fa a les restes de tala s'observaven algunes diferències. A la parcel·la Z-6 hi havia també un mantell força uniforme de combustible mort

d'1h no descompost i de fullatge, però ja més sec que en la parcel·la Z-1. També s'hi observava combustible de 10h i 100h. Les restes estaven més compactades i més seques que en la parcel·la Z-1, amb una altura mitjana d'uns 25 cm, però podia arribar també en algun cas fins a 1 m.

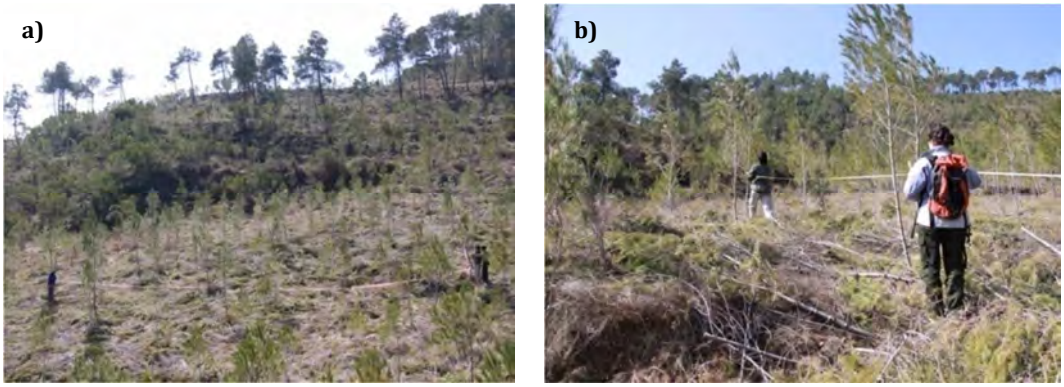

Figura 3.6. Estructura del combustible a la parcel·la Z-6. a) Vista general de la parcel·la. b) Detall de les restes d'aclarida dipositades a la superfície.

Parcel·la Z-26

La parcel·la Z-26 va ser tractada a finals de l'any 2007. Va ser replantejada seguint l'orientació NS/EO, marcant un quadrat de 20 m de longitud.

El combustible existent en la parcel·la Z-26 (Figura 3.7) presentava una estructura i composició diferent al de les parcel·les descrites anteriorment. La virosta formava un estrat molt continu, d'uns 4 cm de profunditat. L'estrat herbaci, d'uns 35-40 cm d'altura, era un estrat força regular i aparentment més continu que en la parcel·la Z-6. Presentava aproximadament un 40 % de material mort. Com a herbes enfiladisses hi havia la rotgeta (*Rubia peregrina*). Les espècies arbustives eren entre d'altres la botja d'escombres (*Dorycnium pentaphyllum*), l'esbarzer (*Rubus ulmifolius*), el romaní (*Rosmarinus officinalis*) i l'argelaga (*Genista scorpius*). L'estrat arbustiu era també discontinu (com en el cas de la parcel·la Z-6), però tenia més cobertura. No s'hi observaven arbusts massa alts (no més de 50 cm). L'estrat arbori estava compost únicament per pi blanc (altura 2,5-3 m) amb més diàmetre que el present en les anteriors parcel·les Z-1 i Z-6 i amb capçades molt esclarissades.

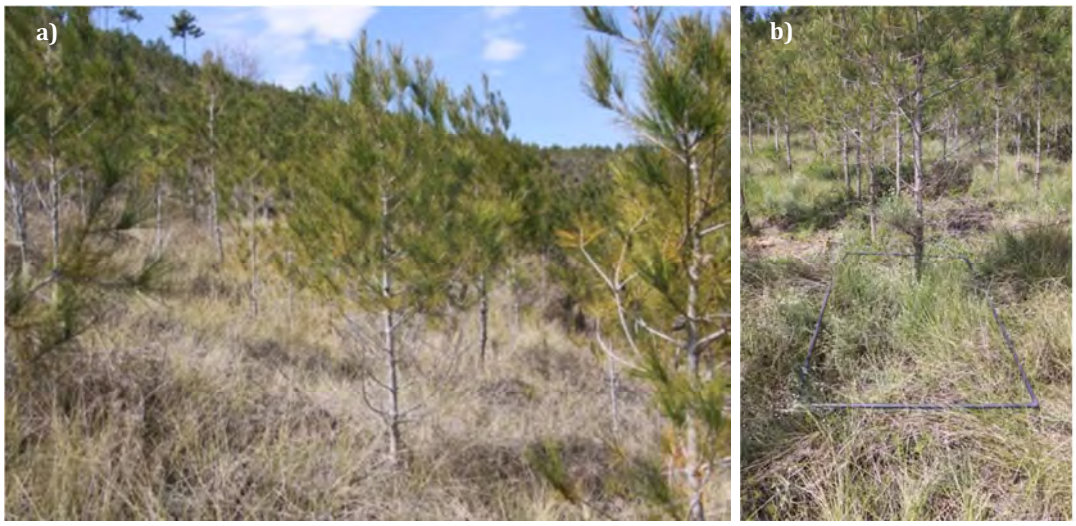

Figura 3.7. Estructura del combustible a la parcel·la Z-26. a) Vista general de la parcel·la. b) Detall de les restes d'aclarida dipositades a la superfície, les dimensions del rectangle són 2x 1 m.

Les restes de tala ja no eren tan evidents com en el cas de els parcel·les Z-1 i Z-6. Hi havia combustible d'1h no descompost però amb fullatge ja mort. També s'observava combustible mort de 10h i 100h. L'altura mitjana aproximada de les restes era d'uns 25 cm, tot i que en algun cas es podia arribar fins 1 m.

Parcel·la Z-40

La parcel·la Z-40, tractada el 2006, va ser replantejada seguint l'orientació NO-SE/SO-NE, marcant un rectangle de 20 m de longitud (en els costats orientats NE i SO) per 15 m de longitud (en els costats orientats NO i SE).

Aquesta parcel·la (Figura 3.8) tenia una diversitat florística més gran que les altres. La virosta continuava essent un estrat molt continu, d'uns 4 cm de profunditat. L'estrat herbaci d'uns 25 cm d'altura presentava un 50 % de material mort. Com a herbes enfiladisses hi havia la rotgeta (*Rubia peregrina*). L'estrat arbustiu presentava espècies com la botja d'escombres (*Dorycnium pentaphyllum*), el romaní (*Rosmarinus officinalis*), el cirerer d'arboç (*Arbutu sunedo*), el llentiscle (*Pistacia lentiscus*), el càdec (*Juniperus oxycedrus*), el garric (*Quercus coccifera*) i l'argelaga (*Ulex parviflorus*). Aquest estrat també era discontinu i presentava una cobertura superior a les parcel·les anteriorment descrites. No s'hi observaven arbusts massa alts (no més de 50 cm de mitjana aproximada). L'estrat arbori estava compost majoritàriament per pi blanc (*Pinus halepensis*) (altura de 2-2,5 m i diàmetre

mitjà d'uns 2 cm) però amb presència de petits peus de roure cerrioide (*Quercus cerrioides*) i alzines (*Quercus ilex*) amb capçades molt esclarissades. No obstant, la majoria d'aquest peus tenien altures inferiors a 1,3 m amb la qual cosa es pot considerar que formaven part de l'estrat arbustiu.

Les restes de tala estaven molt amagades i es confonien amb l'estrat herbaci i estaven formades per material mort. Aparentment no s'hi distingien piles i semblava un estrat continu. L'alçada de les restes era inferior a les parcel·les Z-6 i Z-26, d'uns 15 cm.

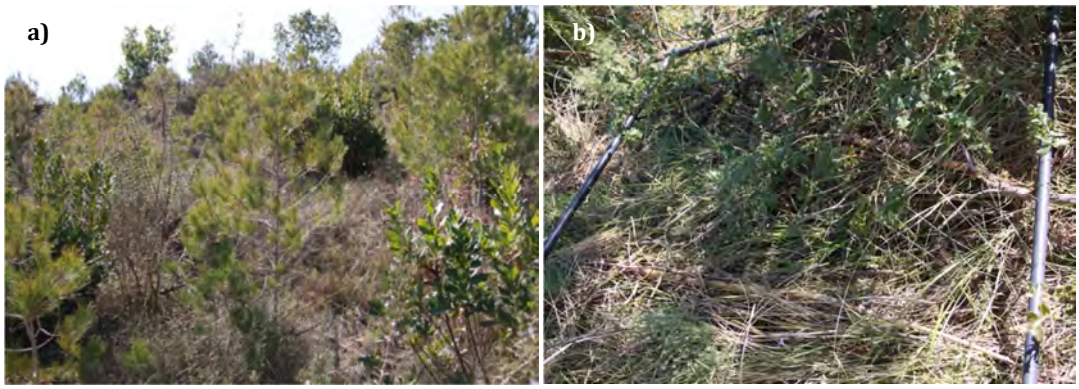

Figura 3.8. Estructura del combustible a la parcel·la Z-40. a) Vista general de la parcel·la. b) Detall de les restes d'aclarida presents sota l'estrat herbaci.

3.3. Descripció de la meteorologia de l'àrea d'estudi i tipificació d'escenaris meteorològics

3.3.1. Meteorologia de la zona d'estudi

Les dades meteorològiques per caracteritzar l'àrea d'estudi s'obtingueren de l'estació automàtica del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) situada al municipi de Castellnou de Bages, a 4 km de les parcel·les d'estudi i a una altura de 507 m sobre el nivell del mar. El SMC proporciona per aquesta estació dades diàries de temperatures mitjana, màxima i mínima (*Tmit*, *Tmax* i *Tmin*, °C), humitat mínima i mitjana (*HRmit* i *HRmin*, %), velocitat del vent (mesurada a 2 m d'alçada) mitjana i màxima (*VVmit*, *VVmax*, m s^{-1}), direcció del vent (*DV*, graus), precipitació total (*PPt*, mm) i l'evapotranspiració de referència (*ETo*, mm). A la Taula 3.3 es recullen els principals estadístics d'aquestes variables meteorològiques diàries per un període d'11 anys comprès entre els anys 1998 i 2008.

Taula 3.3. Variables meteorològiques procedents de l'estació meteorològica de Castellnou de Bages pel període 1998-2008.

Variable	Valor mitjà	Valor màxim	Valor mínim	d.e.	n	% de dades del període 1998-2008(*)
Tmit [°C]	13,6	29,4	-5,1	7,1	3.929	97,8
Tmax [°C]	19,9	38,6	-0,5	8,2	3.935	97,9
Tmin [°C]	8,5	35,0	-9,6	6,4	3.934	97,9
HRmit [%]	73,0	100,0	26,1	14,4	3.930	97,8
HRmin [%]	46,8	100,0	7,3	18,7	3.933	97,9
VVmit [m s^{-1}]	1,3	5,5	0,0	0,7	3.934	97,9
VVmax [m s^{-1}]	7,4	25,2	0,0	2,6	3.934	97,9
DV [graus]	215,2	n.a.	n.a.	83,4	3.936	98,0
PPt [mm]	1,5	139,1	0,0	5,6	3.937	98,0
ETo [mm]	2,8	7,2	0,1	1,8	3.930	97,8

n.a. no aplica. d.e: desviació estàndard; n: nombre de dades disponibles. (*) Les dades obtingudes del Servei meteorològic de Catalunya presentaven incompleteses puntuals.

Analitzant amb més detall aquest registre de dades, s'observa com la temperatura va seguir un cicle estacional característic per tots els anys considerats (Figura 3.9). El mes més calorós fou el juliol, amb temperatures màximes mitjanes de de 30,6±3,1 °C, i el mes més fred el gener amb temperatures mínimes mitjanes de 0,9±3,0 °C. La temperatura màxima absoluta es va assolir l'agost de 2003 amb 38,6 °C, mentre que la mínima absoluta es va registrar el mes de desembre de 2001 amb -9,6 °C. Les temperatures màximes diàries es van assolir entre les 12:00 i 14:00 h, mentre que les temperatures mínimes van tenir lloc entre les 2:00 i les 5:00 h.

Pel que fa a les humitats, els valors mitjans d'humitat relativa mitjana diària com d'humitat relativa mínima (Figura 3.10) van assolir els valors més alts durant els mesos d'hivern (novembre, desembre, gener) i els inferiors als mesos d'estiu (juny, juliol i agost). Els valors d'humitat relativa mitjana se situaren aproximadament entre el 60 % i el 80 % i els d'humitat relativa mínima entre 30 % i el 60 % . La humitat relativa mínima absoluta més baixa va ser 7,3 % i es va assolir al gener de 1999. Durant els mesos de juny, juliol i agost, que corresponen al centre del període sec, es van enregistrar humitats relatives mínimes absolutes de 8 %.

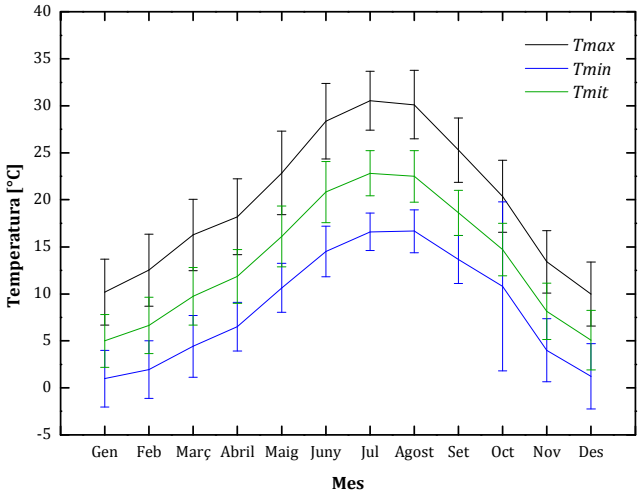

Figura 3.9. Valors mitjans de temperatura mitjana (*Tmit*), màxima (*Tmax*) i mínima (*Tmin*) diària [°C] per mesos (1998-2008).

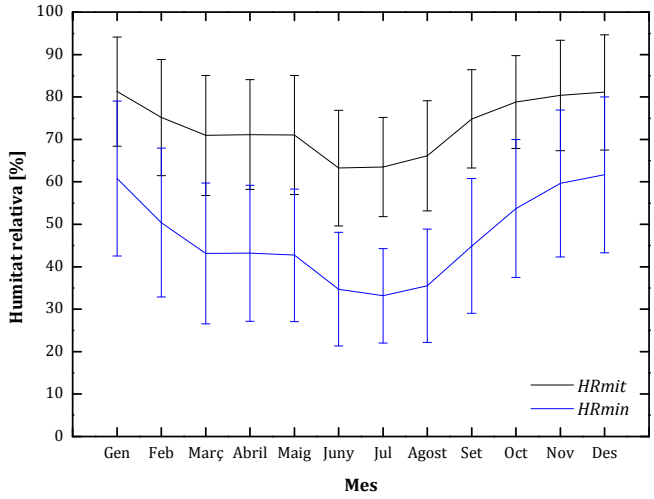

Figura 3.10. Valors mitjans d'humitat relativa mitjana (*HRmit*) i mínima (*HR*min) diària per mesos (1998-2008).

Analitzant els registres de vent diaris per tot el període recopilat (Figura 3.11), s'observa com les direccions del vent mesurat a 2 m d'alçada més freqüents van ser la sud (S), sud-oest (SO) i oest (O), amb dades de velocitat mitjana compreses entre 1,1 i 1,8 m s^{-1} i que plegades corresponen al 70 % de les dades recopilades. Pel que fa a les velocitats màximes o ratxes (no il·lustrades), s'arribaren a mesurar valors de fins 25 m s^{-1}, predominantment en direcció nord.

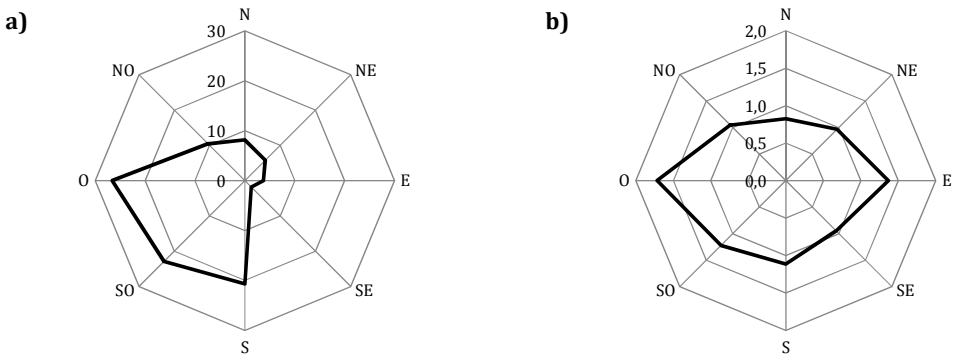

Figura 3.11. Freqüència [%] a) i velocitat mitjana [m s^{-1}] b) del vent mesurat a 2 m d'alçada.

El valor mitjà de precipitació diària mitjana va ser de 1,5±5,6 mm, amb valors màxims absoluts diaris de 28,9 mm (agost de 2004) fins a 139,1 (juny de 2000). Analitzant els acumulats anuals (Figura 3.12) i considerant únicament els anys pels que es tenen sèries de dades anuals complertes, s'observa com la precipitació total anual va oscil·lar entre 410,8 mm (any 2001) i 776,8 mm (any 2008), essent el valor mitjà dels anys considerats 572,6±119,3 mm. En la majoria d'anys, entre els mesos d'abril a juny va ser quan es va acumular més precipitació.

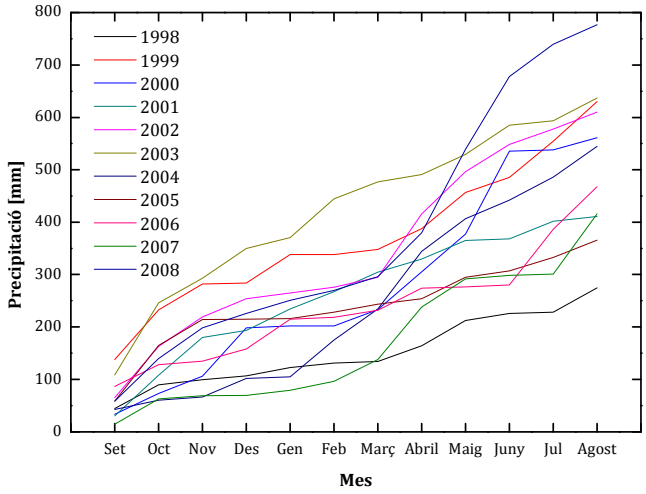

Figura 3.12. Precipitació acumulada [mm] per mesos, segons l'any pluviomètric (comprès entre l'1 de setembre i el 31 d'agost). Pels anys 1998 (gener, abril i maig), 2005 (octubre i desembre) i 2007 (desembre) no es disposa de la sèrie de dades complerta per a tots els dies.

L'evapotranspiració de referència (*ETo*) va seguir un cicle similar al de la temperatura amb valors elevats durant els mesos d'estiu (no il·lustrat). Amb aquesta variable i la precipitació total es va obtenir la precipitació neta com el balanç hídric entre *PPt* (aportació positiva) i *ETo* (aportació negativa). El balanç va resultar positiu per a dies amb pluja superiors a 5 l m^{-2} mentre que la resta de dies el balanç va ser favorable a l'evapotranspiració, obtenint una precipitació neta negativa (Figura 3.13). Els valors facilitats pel Servei Català de meteorologia corresponen a valors acumulats diaris.

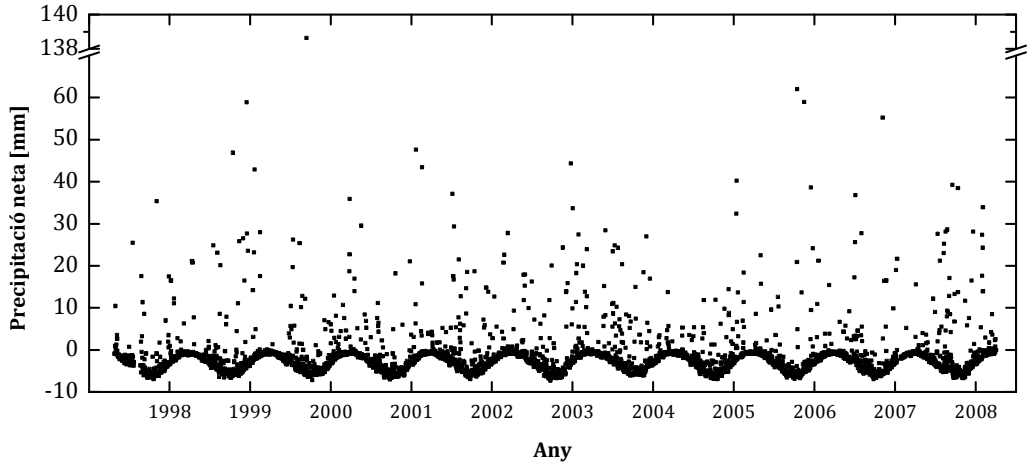

Figura 3.13. Precipitació neta [mm].

3.4. Tipificació d'escenaris meteorològics

Per poder tipificar situacions estàndard a nivell meteorològic cal entendre el règim de focs d'una determinada zona per tal d'identificar els seus incendis tipus o situacions de risc de propagació tipus. Cada zona geogràfica és més sensible a una meteorologia que a una altra degut a les interaccions topogràfiques amb la situació atmosfèrica sinòptica a meso escala.

Tal i com s'ha esmentat anteriorment, a la zona de Catalunya Central existeixen principalment dues situacions responsables dels incendis que es declaren a la zona: les ones de calor de sud i els vents de ponent. Per exemple, en els incendis de Guisona (1/07/2003, 1.400 ha cremades), Balsereny (17/07/2005, 1.200 ha cremades) i Donzell d'Urgell (17/07/2009, 5.000 ha cremades) es van donar condicions de vent de ponent, mentre que en els incendis del Bages-Berguedà (05/07/1994, 45.000 ha cremades), Solsonès (20/07/1998, 27.000 ha cremades) i Sant Llorenç Savall (11/08/2003, 4.800 ha cremades) va dominar la

situació d'ones de calor de sud (Piqué *et al.*, 2011). Tal i com es desprèn de tots aquests exemples, la majoria d'incendis van tenir lloc el mes de juliol, a excepció del de Sant Llorenç Savall que va ser a l'agost.

Pels incendis de vent de ponent s'observen ratxes elevades de vent de component oest mentre que els valors de temperatures i humitats relatives són més variables entre els diferents incendis. D'altra banda, per les ones de calor de sud la humitat relativa mínima és baixa. Un dels aspectes més importants que cal considerar en aquest tipus d'incendis són les humitats nocturnes, que es mantenen baixes, i no permeten una recuperació de la humitat diària. Aquest paràmetre marca la disponibilitat de la vegetació per cremar dia i nit, i és un factor que afavoreix l'aparició de grans incendis forestals. Es pot concloure que aquestes dues situacions creen condicions d'incendis semblants, amb humitats relatives baixes durant períodes de temps llargs i vents secs i intensos.

Per construir els escenaris de simulació per cada tipus d'incendi es van calcular tres escenaris meteorològics corresponents a condicions severes, molt severes i extremes. Pels escenaris d'incendis amb ponentades es recopilaren les dades meteorològiques de tots els dies de juliol dins el període 1998-2008 amb vent de component oest (225°<*DV*<315º) i s'obtingueren els percentils 75, 95 i 99 corresponents a la velocitat màxima (ratxa) de vent (*VVmax*). Un cop conegut el valor de *VVmax* de cada percentil, la resta de variables d'interès per configurar l'escenari meteorològic de l'incendi (temperatura mitjana -*Tmit*-, temperatura màxima -*Tmax*-, humitat relativa mitjana -*HRmit*-, humitat relativa mínima -*HRmin*) es van obtenir a partir dels valors diaris corresponents a cadascun dels percentils obtinguts per la *VVmax* (Taula 3.4).

Per a la tipificació d'escenaris d'incendis amb ona de calor de sud, es calcularen els percentils 75, 95 i 99 de la humitat relativa mínima d'entre tots els dies de juliol del període comprès entre 1998 i 2008. Igualment, les altres variables meteorològiques corresponen als valors del dia de cadascun dels percentils obtinguts per a la humitat relativa mínima (Taula 3.4).

En el cas concret de la velocitat del vent, les dades obtingudes a l'estació meteorològica de Castellnou de Bages corresponien a un vent mesurat a 2 m d'alçada. Tanmateix, la major part dels models de simulació utilitzen la velocitat del vent mesurada a 10 m per sobre de la vegetació. Per realitzar aquesta conversió s'utilitzà el model de Pasquill (1961) considerant una estabilitat atmosfèrica de classe A.

Taula 3.4. Variables meteorològiques per als diferents escenaris.

Escenari (percentil)	Incendis de vent de ponent					Incendis d'ones de calor de sud				
	Tmit [°C]	*Tmax* [°C]	*HRmit* [%]	*HRmin* [%]	*VVmax* (*)[m s^{-1}]	*Tmit* [°C]	*Tmax* [°C]	*HRmit* [%]	*HR min* [%]	*VVmax* (*) [m s^{-1}]
Sever (P75)	20,0	27,4	58,7	29,1	11,4	24,6	32,8	53,6	25,3	9,0
Molt sever (P95)	21,8	27,6	52,1	26,8	14,0	22,4	30,7	37,1	16,7	8,6
Extrem (P99)	22,7	28,4	50,7	32,6	15,7	28,2	37,4	31,6	13,1	7,9

(*) Correspon a la velocitat del vent mesurada a 10 m aplicant la conversió de Pasquill (1961).

Tipificació de la humitat del combustible

Tal i com s'ha mencionat en el capítol primer, la humitat dels combustibles ve marcada per les condicions meteorològiques. Les variables més influents en la humitat dels combustibles morts són la temperatura i la humitat relativa, mentre que per la humitat dels combustibles vius, la variable més preponderant és la sequera acumulada.

Atenent als escenaris meteorològics descrits, la humitat del combustible mort d'1h, 10h i 100h es calculà seguint el model de Rothermel (1983). Aquest model conté una sèrie de taules en què es relaciona la temperatura i la humitat relativa amb la humitat del combustible. Les taules són diferents per a horari diürn i nocturn, i també contenen un factor de correcció pel pendent i l'orientació. Per a obtenir la humitat del combustible van ser emprades les dades de temperatura màxima i humitat relativa mínima de cada escenari, considerant, a banda, la franja horària de 12:00h a 16:00h per a zones orientades a l'est i amb pendents inferiors al 30 %. A la Taula 3.5 s'han recopilat els resultats obtinguts amb aquest model.

D'altra banda, la humitat del combustible viu es va obtenir a partir d'informació facilitada pel Departament d'Interior i pel Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural de la Generalitat de Catalunya. Les dades proporcionades inclouen un seguiment periòdic de la humitat del combustible de superfície herbaci (M_{Lh}) i llenyós (M_{Lw}) i de les acícules de les capçades (M_{cap}) des de 2008 fins a 2010 en una zona de la Catalunya central, concretament a Torà.

Per cada tipus de combustible es van seleccionar aquelles dades d'humitat corresponents al mes de juliol dels tres anys disponibles. A continuació es calcularen els percentils 75, 95 i 99

per obtenir els escenaris sever, moderat i extrem per la humitat del combustible viu (Taula 3.6).

Taula 3.5. Humitat del combustible mort (M_{1h}, M_{10h} i M_{100h}) [%] per als diferents escenaris.

Escenari (percentil)	**Incendis de vent de ponent**			**Incendis d'ones de calor de sud**		
	M_{1h}	M_{10h}	M_{100h}	M_{1h}	M_{10h}	M_{100h}
Sever (P75)	5	6	7	5	6	7
Molt sever (P95)	5	6	7	4	5	6
Extrem (P99)	6	7	8	3	4	5

Taula 3.6. Humitat del combustible viu (M_{Lh}, M_{Lw} i M_{cap}) [%] per als diferents escenaris.

Escenari (percentil)	M_{Lh}	M_{Lw}	M_{cap}
Sever (P75)	130	120	115
Molt sever (P95)	100	90	100
Extrem (P99)	90	70	90

4. EFECTES DEL TRACTAMENT SOBRE EL COMBUSTIBLE

Els tractaments de combustible afecten la composició i estructura de les poblacions forestals, per tal que si es produeix un incendi forestal aquest tingui menys intensitat i es propagui més lentament. Així l'incendi serà més fàcil de controlar i els seus efectes en l'ecosistema seran menys severs.

L'objectiu d'aquest capítol és detallar la caracterització del combustible de les diferents parcel·les experimentals del Bages que es va dur a terme per tal d'obtenir una bona representació de l'estructura de la població forestal de regenerats de l'incendi de 1994 existent 16 anys després i així poder avaluar els efectes dels tractaments d'aclarida.

El contingut d'aquest capítol s'estructura de la següent forma: en primer lloc, es descriu el disseny experimental dels mostrejos i la metodologia utilitzada per determinar les propietats del combustible i a continuació s'analitzen i discuteixen els resultats obtinguts fent esment a les principals troballes extretes en aquesta part del treball.

4.1. Material i mètodes per determinar les propietats del combustible

La metodologia emprada per determinar les propietats del combustible va constar d'un ampli ventall de procediments de mostreig. Pel que fa a les propietats extrínseques, es va requerir un gran esforç de treball de camp mentre que per a les propietats intrínseques, va ser necessari treballar al laboratori i fer una cerca bibliogràfica exhaustiva.

4.1.1. Propietats extrínseques del combustible

A cadascuna de les parcel·les seleccionades s'hi va replantejar l'àrea de mostreig corresponent definint àrees quadrades de 20 x 20 m per les parcel·les Z-control, Z-6 i Z-26, i de 20 x 15 m per la Z-40 (àrees coincidents amb el replantejament de les parcel·les). En el cas concret de la parcel·la Z-control, tal i com s'ha explicat en el capítol anterior, a la seva meitat superior i posteriorment al seu mostreig, se li va aplicar el tractament d'aclarida com a la resta de parcel·les. Aquest tractament va servir per definir una nova parcel·la tractada, la Z-1, amb una àrea de 20 x 10 m, que es va mostrejar un mes després de ser tractada.

De la bibliografia se seleccionaren diversos mètodes de mostreig raonablement ràpids i senzills d'implementar, adequats per a cada estrat present en les parcel·les (restes dipositades al sotabosc, combustible de superfície i combustible de capçades). En alguns casos, certes propietats quedaren caracteritzades per més d'un mètode, amb la qual cosa es pogué realitzar un contrast de les dades i així la validació de l'adequació dels mètodes.

Tot seguit es resumeixen les principals característiques de cadascuna de les tècniques de mostreig emprades i a l'Annex I se'n descriuen els procediments i les dades recopilades amb més nivell de detall.

Mostreig del combustible dipositat al sotabosc

L'objectiu del mostreig de combustible dipositat al sotabosc (*CDS*) era caracteritzar específicament la càrrega (W_{1h}, $W_{10h,}$ W_{100h}) del combustible dipositat al sotabosc. Aquest material comprèn les tiges, branquillons, branques i troncs d'arbres o arbusts que han caigut i es troben dipositats sobre el terra, bé per efectes d'una tala o bé perquè han davallat de forma natural.

La tècnica de mostreig emprada va ser la proposada per Brown (1974) que és la més estesa per inventariar aquest tipus de combustible. Segons aquesta tècnica, l'inventari s'efectua traçant transsectes planars (Brown, 1971), altrament dit plans de mostreig verticals perpendiculars al terra que intercepten imaginàriament el combustible. Es plantejaren per a cada parcel·la 10 plans de mostreig de 20 m de longitud, excepte per les parcel·les Z-1 i Z-40 en les quals es van realitzar 10 i 9 plans de mostreig respectivament, de 10, 15 i 20 m longitud ateses les magnituds de les parcel·les, ja que les seves dimensions no permetien realitzar més plans (Figura 4.1).

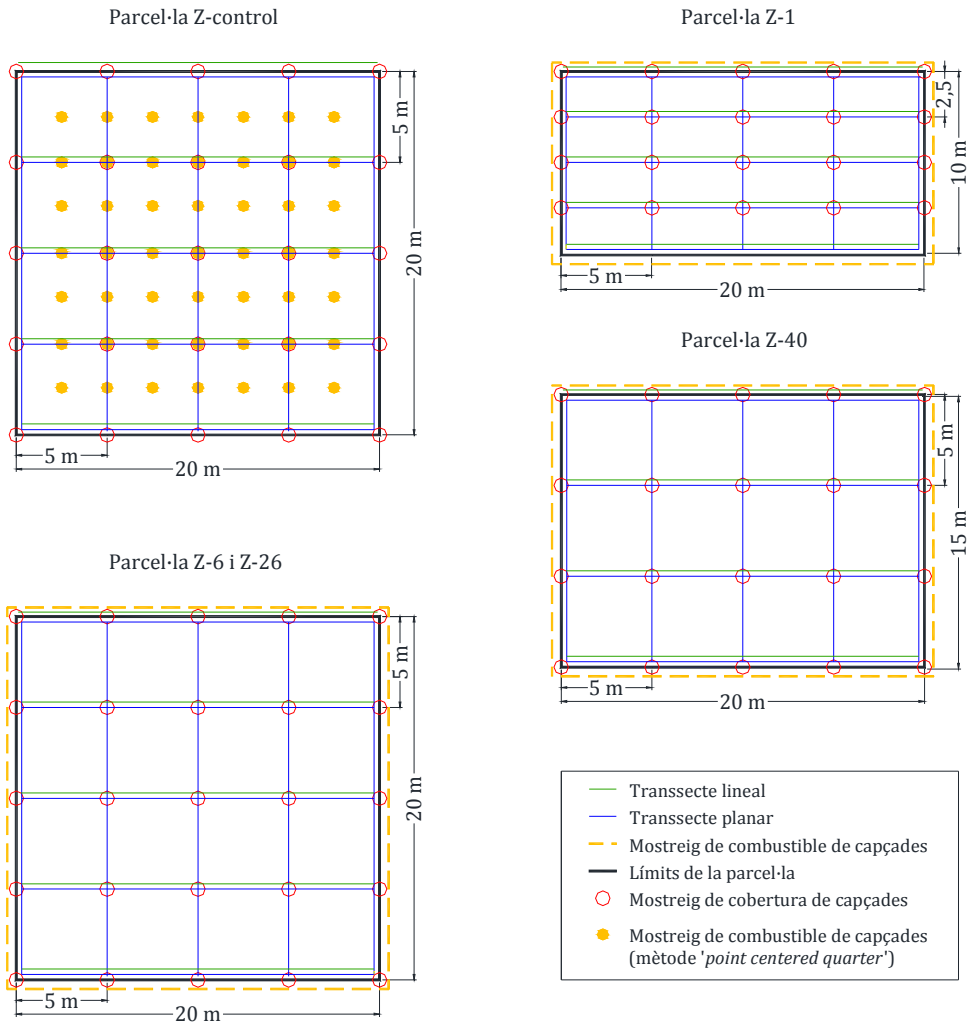

Figura 4.1.Esquema dels mostrejos realitzats en cada parcel·la.

En cada pla de mostreig es comptabilitzaren les intercepcions de material dipositat en el sotabosc segons les classes diametrals que categoritzen el combustible d'1h, 10h i 100h, tal com si el pla de mostreig fos una guillotina que caigués damunt les restes vegetals (Figura 4.2). Per fer el comptatge se seguí la següent pauta (Brown, 1974): en els 5 primers metres del pla de mostreig es va comptabilitzar totes les intercepcions de material d'1h i 10h, en els 10 primers metres es va compatibilitzar el material de 100h i al llarg de tot el transsecte planar es va comptar el material més gruixut de 7,6 cm (llindar superior de la classe diametral de 100h). Amb el nombre d'intercepcions comptabilitzades per a cada classe diametral, la longitud total de les seccions dels plans mostrejats per cada classe i el pendent dels plans de mostreig se seguí el model i la parametrització de Brown (1974) –vegeu Annex I- per donar finalment el valor de càrrega de combustible d'1h, 10h i 100h del combustible dipositat al sotabosc en cada parcel·la.

Figura 4.2. Mostreig del combustible dipositat al sotabosc.

Mostreig del combustible de superfície en peu

El mostreig del combustible herbaci i arbustiu es va realitzar, d'una banda, emprant el mètode de Canfield (1941), amb el qual s'obté el percentatge de cobertura total (*CS*) i per espècies i l'altura de la vegetació (D_s) mitjançant el recorregut de diversos transsectes lineals replantejats a les parcel·les. A cada àrea de mostreig es van dur a terme 4 (en el cas de la parcel·la Z-40) o 5 (per les parcel·les Z-control, Z-6, Z-26 i Z-40) transsectes lineals de 20 m de longitud. La línia base d'inici dels transsecte es va situar de sud a nord, excepte en la parcel·la Z-40 en la que es va situar de sud-est a nord-oest degut a la seva ubicació (vegeu Figura 4.1).

D'altra banda, les càrregues de combustible de superfície en peu foren determinades mitjançant mostrejos destructius (*CS-MD*). A cada parcel·la es van posicionar de forma

aleatòria 3 quadrats de 2 x 1 m d'àrea, excepte en la Z-1 en la qual se'n van posicionar només 2 (Figura 4.3).

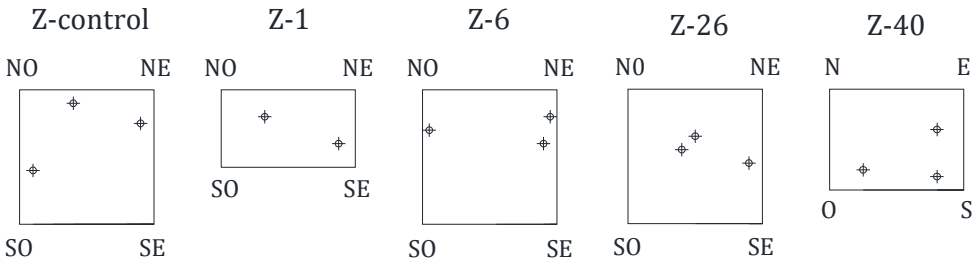

Figura 4.3. Localització dels mostrejos destructius dins de cada parcel·la d'estudi.

A cada quadrat es va recollir i pesar per separat tot el contingut dels següents estrats: virosta, restes de tala, combustible herbaci (mort i viu) i combustible llenyós (mort i viu). Igualment es classificà el material mort en classes diametrals d'1h, 10h i 100h i el viu en classes de diàmetres inferiors a 3 mm i de 3 a 6 mm.

De cada classe de combustible es van agafar mostres per a determinar la humitat al laboratori i a continuació la càrrega en base seca. Finalment es van calcular les mitjanes de les càrregues per tots els quadrats de mostreig a cada parcel·la.

Mostreig del combustible arbori

Les propietats del combustible que es van inventariar a camp van ser la cobertura de les capçades (*CC*), la densitat de peus (*DP*), l'altura dels arbres (*SH*), l'altura de la base de les capçades (*CBH*), el diàmetre a l'altura del pit (*DBH*) i l'amplada de les capçades (*CW*). A partir d'aquestes es van calcular la càrrega de combustible disponible (*ACFL*) i la densitat aparent del combustible disponible (*ACBD*).

La metodologia emprada per caracteritzar aquests propietats va consistir en primer lloc en un dimensionament de l'estructura dels arbres, conformada per *SH*, *CBH, DBH* i *CW*. En les parcel·les Z-1, Z-6, Z-26 i Z-40, aquest dimensionament es dugué a terme de manera intensiva, mesurant tots els arbres de la parcel·la i calculant la mitjana de cada propietat, per a cada parcel·la. Per cada arbre de la zona de mostreig, se'n mesurà l'alçada i l'altura de la base de la capçada (com la distància des de la superfície a la primera branca amb acícules vives), es van prendre dues mesures de *DBH* (una en l'eix N-S i l'altra en l'eix E-O) i dues

mesures de *CW* (projectant dues vores oposades al terra i mesurant la llargada dels eixos N-S i E-O formats d'una vora a l'altra). Amb el nombre d'arbres comptabilitzats i la superfície de parcel·la es calculà finalment la densitat de peus *DP* (peus m^{-2}).

Pel que fa al dimensionament de l'estructura dels arbres en la parcel·la Z-control, s'emprà el mètode de mostreig puntual del quadrant centrat (*Point centered quarter)* (Cottam i Curtis, 1956; Müller-Dombois i Ellenberg, 1974), degut a la gran densitat de peus que presentà. Per aplicar aquest mètode es definí inicialment una malla de punts de mostreig separats 2,5 m entre ells (vegeu Figura 4.1). Cadascun d'aquests punts correspongué al punt central d'una circumferència imaginària de 2 m de radi. A cada circumferència es dimensionà l'estructura de 4 arbres, corresponents als 4 peus més propers al punt central, localitzats a cadascun dels quatre quadrants de la circumferència. També es prengué nota de la distància de cadascun dels quatre arbres al punt central. Les dades de *SH, CBH, DBH* i *CW* per a la parcel·la Z-control s'obtingueren de les mitjanes dels arbres mostrejats. La densitat de peus s'obtingué amb la relació proposada per Mitchell (2007) on:

$$DP = \frac{1}{\bar{r}^2} \qquad \text{Eq. 4.1}$$

Amb $\bar{r}^2$ essent el quadrat de la mitjana de les distàncies entre els arbres mostrejats i llurs punts de mostreig.

Pel que fa al mostreig de la cobertura de capçades, aquest es va dur a terme de manera puntual, en 25 localitzacions de les parcel·les, separades entre elles 5 m (parcel·les Z-6, Z-26 i Z-40,) i en 20 localitzacions en el cas de les parcel·les Z-control i Z-1 (vegeu Figura 4.1). Les mesures es van prendre mitjançant densitòmetres específics a tal efecte (Figura 4.4), seguint el procediment proposat per Lemmon (1956). La cobertura de capçades de cada parcel·la es calculà a partir de la mitjana de cada valor de *CC* proporcionat pel densitòmetre a cada punt de mostreig.

Finalment, es planificà un programa de mostreig específic per quantificar l'*ACFL* i l'*ACBD* dels arbres presents en les parcel·les. Un mètode comunament utilitzat per calcular càrregues de capçades és mitjançant l'obtenció d'equacions al·lomètriques empíriques de la forma $ACFL = a\ (X)^b$, on *X* és la variable dependent que es correspon a una dimensió determinada dels arbres (*DBH, SH, CBH* o *CW*) i a i b són paràmetres de l'equació. Amb l'objectiu d'obtenir una relació al·lomètrica representativa dels arbres presents en les parcel·les, se seleccionaren aleatòriament 7 arbres ubicats en zones contigües a la parcel·la Z-6, que

cobrissin el rang de DBH (< 7 cm) detectat durant les tasques de dimensionament de l'estructura dels arbres. Per cada arbre seleccionat se'n mesurà la seva estructura (tal i com ja s'ha explicat anteriorment), per obtenir els valors de *DBH*, *SH*, *CBH*, *VCD*, *CW*. A continuació els arbres es van tallar i se'n separà el següent material: acícules vives, acícules mortes, branques inferiors a 0,6 cm, branques de 0,6 a 2,5 cm, branques de 2,5 a 7,6 cm i branques superiors a 7,6 cm. Seguidament el combustible de cada classe es va pesar i se'n va agafar una mostra per determinar-ne el seu pes sec al laboratori. Una vegada dut a terme el mostreig destructiu, es generaren les diferents equacions al·lomètriques per cada classe i se seleccionaren les que presentaren millor correlació (vegeu Annex I). En base a aquestes equacions, es pot estimar a partir de l'alçada d'un arbre, la seva càrrega de combustible disponible de capçades com la suma de la massa de les acícules més una meitat de la massa continguda en les branques de diàmetre entra 0 i 0,6 cm (Reinhardt *et al.*, 2006).

Figura 4.4. Densitòmetre utilitzat per mesurar la cobertura de les capçades.

Aleshores, per a cadascuna de les parcel·les Z-1, Z-6, Z-26 i Z-40, l'*ACFL* s'obtingué calculant la massa de combustible disponible de capçades per a cada arbre mostrejat, sumant totes aquestes masses i dividint el resultat pel número de peus mostrejats. En el cas de la parcel·la Z-control, també es calcularen i sumaren les masses dels arbres mostrejats, es dividí el resultat pel nombre de peus mostrejats i es multiplicà per la densitat de peus en aquesta parcel·la.

Amb el valor d'*ACFL* es va obtenir de manera senzilla la densitat aparent del combustible disponible de capçades (*ACBD*) com:

$$ACBD = \frac{ACFL}{CH} \qquad \text{Eq. 4.2}$$

On *CH* és l'altura mitjana de l'estrat de capçades, és a dir la diferència entre l'altura de l'arbre i l'altura de la base de la capçada, estimada com la mitjana per parcel·la de l'altura de les capçades de tots els arbres mesurats.

4.1.2. Propietats intrínseques del combustible

D'entre les principals propietats intrínseques del combustible esmentades en la Introducció (capítol 1), foren d'interès per aquesta tesi el poder calorífic del combustible, extret a partir d'una anàlisi bibliogràfica sobre les espècies presents en la zona d'estudi i la densitat del combustible, la qual fou obtinguda per diferents estrats de vegetació, per classes diametrals i subclasses de partícules tot mesurant acuradament la massa i la geometria de les partícules. Tot seguit se'n resumeixen els detalls.

La informació sobre la calor de combustió es va extreure a partir d'un estudi bibliogràfic (recopilat en l'Annex I), ja que la quantificació d'aquestes propietats requereix l'ús d'equipament molt especialitzat, fora de l'abast d'aquest treball. Les dades recopilades sobre poder calorífic per les espècies presents en les parcel·les i per classes de partícules, permeteren donar valor al poder calorífic inferior del combustible fi mort, combustible viu, combustible de capçades i combustible gruixut mort per a cada parcel·la, tot ponderant els valors de referència amb les fraccions màssiques obtingudes pel que fa als diferents estrats.

Les dades sobre la densitat i la geometria de les partícules combustibles es van obtenir mitjançant la realització de treball de mesura i pesatge d'alta precisió al laboratori (vegeu l'Annex I). En primer lloc es van seleccionar mostres representatives de tot el combustible. A continuació, a cada classe de combustible es va mesurar la longitud, secció, volum, perímetre i àrea superficial de la partícula. Després les mostes es van pesar i assecar per obtenir la densitat de les partícules.

4.1.3. Anàlisi estadística

L'anàlisi estadística tenia per objectiu estudiar les diferències de les propietats extrínseques entre les diferents parcel·les. Per determinar si els valors obtinguts a partir del treball de camp per cadascuna de les propietats extrínseques eren significativament diferents entre les parcel·les d'estudi es van realitzar l'anàlisi de variància (ANOVA) (amb un nivell de significació de 0,05). Prèviament a la realització del test d'ANOVA, es va analitzar si les dades seguien una distribució normal i la variància era igual entre les parcel·les (es van aplicar els

Tests de Barlett i Levene depenent de si les dades seguien o no una distribució normal, respectivament). Com que amb els resultats del test d'ANOVA només es podia concloure que al menys una de les mitjanes era diferent de la resta, a continuació es va dur a terme el test Tukey per realitzar comparacions múltiples, és a dir, entre parelles de parcel·les. En els casos en que les mostres no es distribuïen de forma normal però tenien variàncies iguals s'aplicà el test no paramètric de Mann-Whitney, per comparar les parcel·les per parelles.

4.2. Resultats

4.2.1. Resultats per a les propietats extrínseques

Els valors numèrics dels resultats obtinguts per les propietats extrínseques es recullen en l'Annex I. En aquest annex també es fa una anàlisi dels paràmetres obtinguts per duplicat a partir de diferents mètodes de mostreig i s'escull el mètode més adient per cadascun d'ells. A continuació es mostren els resultats més destacats, separats entre el combustible de superfície i el de capçades. Les parcel·les s'analitzen totes juntes tot i que cal recordar que no parteixen de situacions idèntiques, les parcel·les Z-26 i Z-40 tenien densitats inicials inferiors a Z-control, Z-1 i Z-6.

Combustible de superfície

El combustible de superfície inclou tant el dipositat al sòl (virosta i restes de tala) com el que es troba en peu (herbaci, arbustiu i arbori jove). A continuació s'analitzen els resultats obtingut per les altures, cobertura i càrrega de combustible.

Altura del combustible dipositat al sotabosc

A la Figura 4.5 es representa, per a les parcel·les tractades, la mitjana de l'altura màxima de la virosta obtinguda en base a les dades preses durant els mostrejos del combustible dipositat al sotabosc (*CDS*). Per a la parcel·la Z-control es representa l'altura mitjana calculada a partir dels valors obtinguts en els tres mostrejos destructius realitzats en aquesta parcel·la (*CS-MD*).

Segons els resultats obtinguts, entre 1 i 6 mesos post-tractament l'altura de l'estrat de virosta incrementa, i entre els 6 i 40 decreix. Tanmateix l'anàlisi estadístic dels resultats mostra que només existeixen diferències significatives entre la parcel·la Z-40 i la resta de parcel·les tractades.

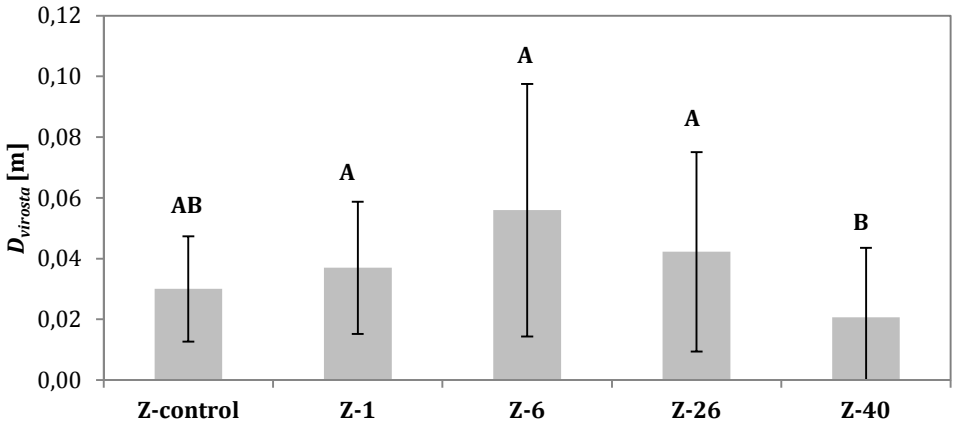

Figura 4.5. Altura mitjana de la virosta (*D*) [m]. L'amplada de les barres d'error correspon a dues desviacions estàndards. Es mostren els resultats dels tests de comparació múltiple; la mateixa lletra representa que les mitjanes no són significativament diferents (p>0,05).

L'altura mitjana de les restes de tala, obtinguda en base a les dades preses durant els mostrejos del combustible dipositat al sotabosc (*CDS*), es representa a la Figura 4.6 per a cada parcel·la.

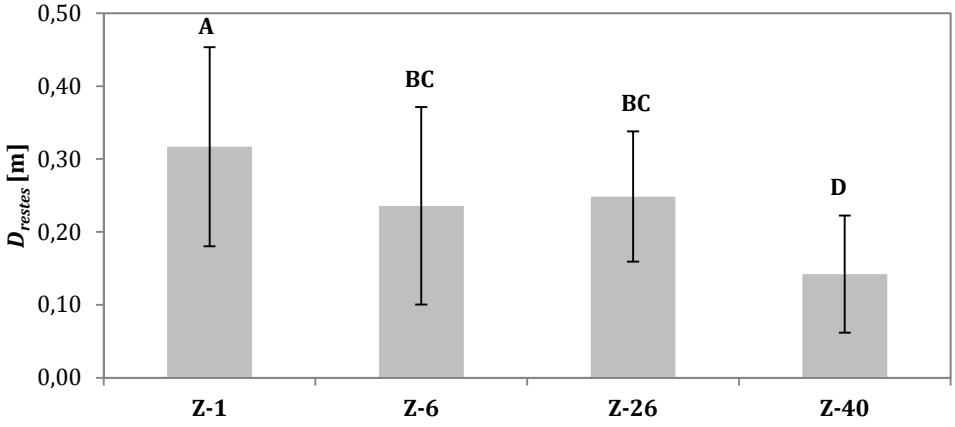

Figura 4.6. Altura mitjana de les restes de tala(*D*) [m]. L'amplada de les barres d'error correspon a dues desviacions estàndards. Es mostren els resultats dels tests de comparació múltiple; la mateixa lletra representa que les mitjanes no són significativament diferents (p>0,05).

Els resultats de la comparació múltiple indiquen, igual que en el cas de l'altura de la virosta, que l'altura de les restes de tala de la parcel·la Z-40 és significativament diferent de la resta de les parcel·les. Així mateix, les parcel·les Z-6 i Z-26 no presenten diferències significatives.

A més, la parcel·la Z-1 és també significativament diferent. Així, s'observa que l'altura decreix ràpidament en els primers mesos i a un ritme més lent durant els mesos següents.

Altura del combustible de superfície en peu

L'altura mitjana del combustible de superfície en peu, obtinguda a partir de les dades determinades durant la realització de transsectes lineals, es presenta a la Figura 4.7 per a cada parcel·la. A partir d'aquesta figura es pot observar que l'altura del combustible de superfície en peu no presenta diferències significatives entre les parcel·les mostrejades 1 mes i 6 mesos després del tractament i tampoc entre les mostrejades 26 i 40 mesos després del tractament. A més a més, la parcel·la Z-control mostra una altura del combustible de superfície significativament superior al de la resta de parcel·les. Tot i que en aquesta figura no es mostra, cal destacar que són els arbusts i els arbres joves els que mostren una variació de l'altura més pronunciada entre les diferents parcel·les (vegeu Annex I).

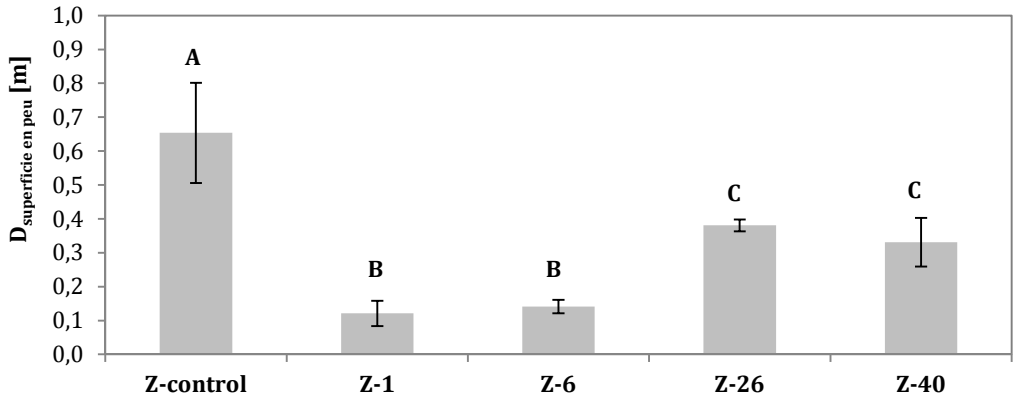

Figura 4.7. Altura mitjana del combustible de superfície en peu (*D*) [m]. L'amplada de les barres d'error correspon a dues desviacions estàndards. Es mostren els resultats dels tests de comparació múltiple; la mateixa lletra representa que les mitjanes no són significativament diferents ($p>0,05$).

Cobertura del combustible de superfície en peu

Un altre resultat interessant relatiu al combustible de superfície en peu es presenta a la Figura 4.8. En aquesta es pot veure el percentatge de parcel·la coberta per combustible herbaci, arbustiu i arbori jove. Atès que aquest percentatge no era del 100 % en cap de les

parcel·les, el percentatge restant es pot associar a zones de la parcel·la desproveïdes totalment de vegetació de superfície en peu.

Les diferències entre els valors de cobertura de combustible de superfície en peu no són estadísticament significatives entre les parcel·les Z-1 i Z-6, ni entre les parcel·les Z-26, Z-40 i Z-control (incloent aquesta última parcel·la en l'anàlisi, tot i que té una desviació estàndard molt més petita que la de la resta de parcel·les). Aquest resultat indica que a la parcel·la Z-26 i Z-40 la cobertura de combustible de superfície en peu assoleix valors similars als de la parcel·la Z-control.

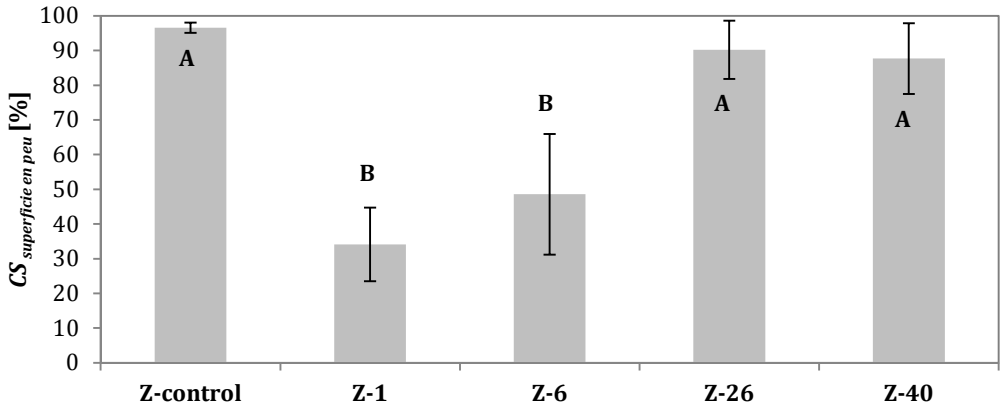

Figura 4.8. Cobertura mitjana del combustible de superfície en peu (herbaci, arbustiu i arbori jove) (*CS*) [m]. L'amplada de les barres d'error correspon a dues desviacions estàndards. Es mostren els resultats dels tests de comparació múltiple; la mateixa lletra representa que les mitjanes no són significativament diferents (p>0,05).

Càrrega de combustible mort

Els valors mitjans de càrrega de combustible mort d'1h, 10h i 100h es presenten a la Figura 4.9. La càrrega de combustible d'1h i 10h després del tractament disminueix significativament en funció del temps transcorregut. Aquests mateixos paràmetres per les parcel·les Z-control i Z-1 són significativament diferents, els valors mitjans de càrrega de combustible d'1h i 10h per la parcel·la Z-1 són 4,4 i 12,4 vegades superiors als de la parcel·la Z-control, respectivament. En canvi, entre les parcel·les Z-control i Z-40 no existeixen diferències significatives per la càrrega de combustible d'1h i 10h. Pel que fa al combustible de 100h, no s'han trobat diferències significatives entre les parcel·les, probablement degut a

la poca quantitat de combustible d'aquest tipus que hi havia a les parcel·les, això també explica les altes desviacions estàndards que s'obtenen.

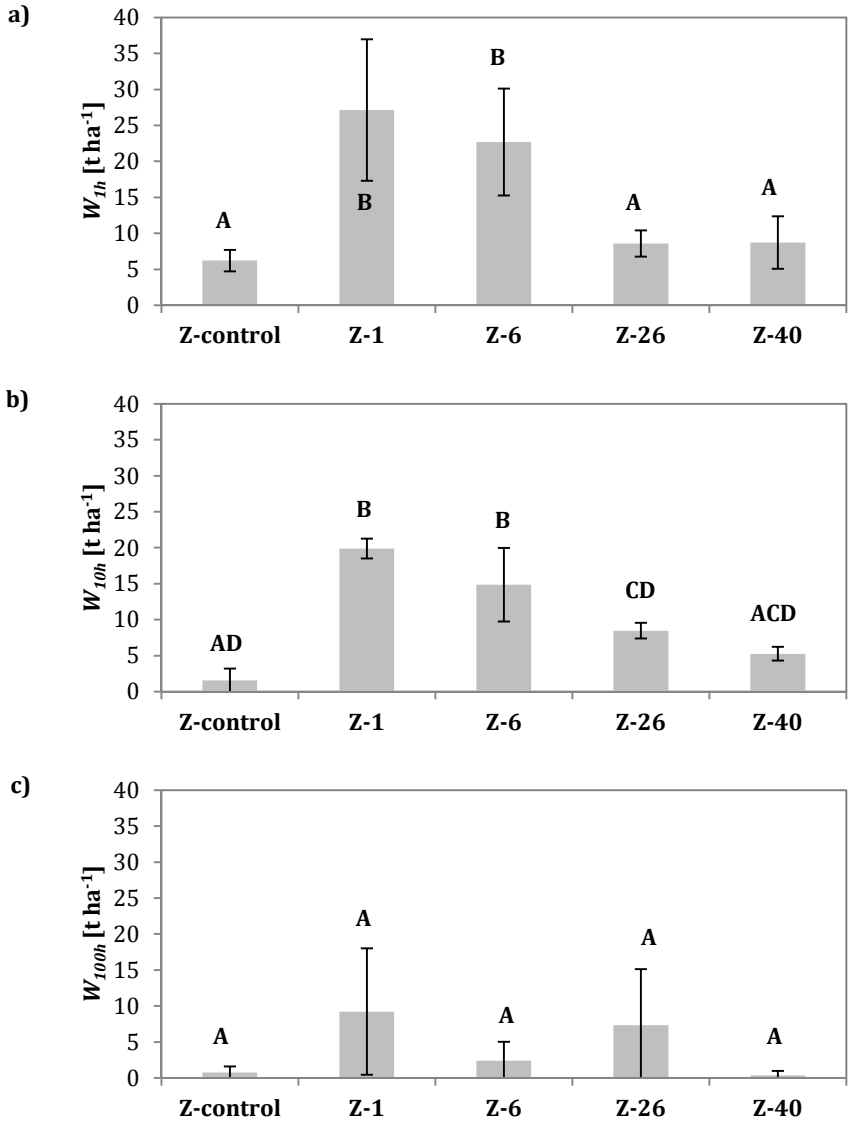

Figura 4.9. Càrrega de combustible mort (*W*) [t ha^{-1}]. a) Càrrega de combustible mort d'1h. b) Càrrega de combustible mort d'10h. c) Càrrega de combustible mort d'100h. L'amplada de les barres d'error correspon a dues desviacions estàndards. Es mostren els resultats dels tests de comparació múltiple; la mateixa lletra representa que les mitjanes no són significativament diferents (p>0,05).

Càrrega de combustible viu

Els valors mitjans de càrrega de combustible viu, herbaci i llenyós, obtinguts també durant els mostrejos destructius, es presenten a la Figura 4.10. Per la càrrega de combustible viu herbaci no s'han trobat clares diferències significatives entre les parcel·les, això es degut a les elevades desviacions obtingudes després del mostreig destructiu de només 2 o 3 rectangles en les parcel·les experimentals. En el cas de la càrrega de combustible viu llenyós tampoc s'han trobat diferències significatives. Tanmateix, s'observa una tendència d'increment de càrrega de combustible viu llenyós després del tractament.

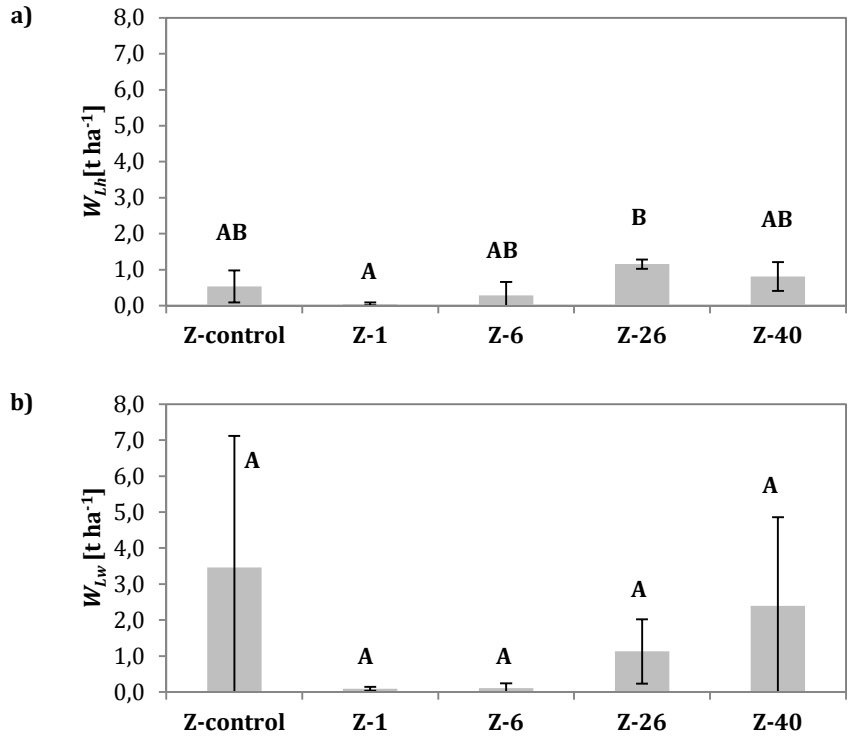

Figura 4.10. Càrrega de combustible viu (W) [t ha^{-1}]. a) Càrrega de combustible viu herbaci. b)Càrrega de combustible viu llenyós. L'amplada de les barres d'error correspon a dues desviacions estàndards. Es mostren els resultats dels tests de comparació múltiple; la mateixa lletra representa que les mitjanes no són significativament diferents ($p>0,05$).

Combustible de capçades

A continuació s'analitzen els valors obtinguts per a diverses propietats relacionades amb el combustible arbori o de capçades, com són l'altura dels arbres, l'altura de la base de les capçades, el diàmetre dels troncs dels arbres, l'amplada de les capçades, la densitat aparent i la cobertura de les capçades.

Altura dels arbres i altura de la base de les capçades

Els primers valors que s'analitzen es presenten a la Figura 4.11 i són l'altura dels arbres (*SH*) i l'altura de la base de les capçades (*CBH*).

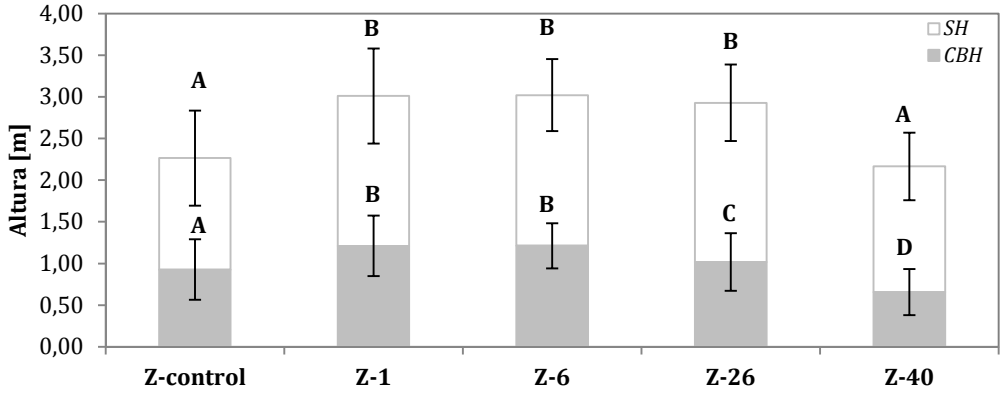

Figura 4.11. Altures característiques dels arbres: altura total i altura de la base de les capçades [m]. L'amplada de les barres d'error correspon a dues desviacions estàndards. Es mostren els resultats dels tests de comparació múltiple; la mateixa lletra representa que les mitjanes no són significativament diferents (p>0,05).

La relació entre *CBH* respecte *SH* representa un 41 % a la parcel·la Z-control, un 40 % a les Z-1 i Z-6, un 35 % a la Z-26 i un 30 % a la Z-40. Segons l'anàlisi estadística les parcel·les mostrejades entre 1 i 26 mesos després del tractament presenten *SH* similars, succeeix el mateix entre la parcel·la control i la mostrejada 40 mesos després del tractament. A més, les parcel·les Z-1 i Z-6 presenten valors per *CBH* similars. Aquest resultat coincideix amb l'obtingut amb l'altura dels arbres per aquestes dues parcel·les. En canvi, el *CBH* de les parcel·les Z-26, Z-40 i Z-control és diferent.

L'increment en l'altura dels arbres després del tractament per les parcel·les Z-1, Z-6 i Z-26 pot ser degut a l'efecte indirecte del mateix tractament d'aclarida, ja que se seleccionaren

positivament els arbres més alts i com a conseqüència l'altura mitjana de les parcel·les tractades incrementà. No es pot fer la mateixa afirmació per la parcel·la Z-40, que presenta una altura semblant a Z-control. L'increment de l'altura de la base de la capçada també és pot atribuir a l'efecte indirecte del tractament, que seleccionà els arbres més alts i els que tenien una altura de la base de la capçada superior.

Diàmetre dels arbres a l'altura del pit

Els valors mitjans de diàmetre dels arbres a l'altura del pit (*DBH*) es mostren a la Figura 4.12 per a cadascuna de les parcel·les. Els valors de *DBH* segueixen la mateixa tendència que l'altura de l'arbre i de la base de les capçades, augmenten després del tractament i disminueixen a Z-40, per tornar a valors semblants als de la situació pre-tractament, i també es pot atribuir a l'efecte indirecte del tractament d'aclarida.

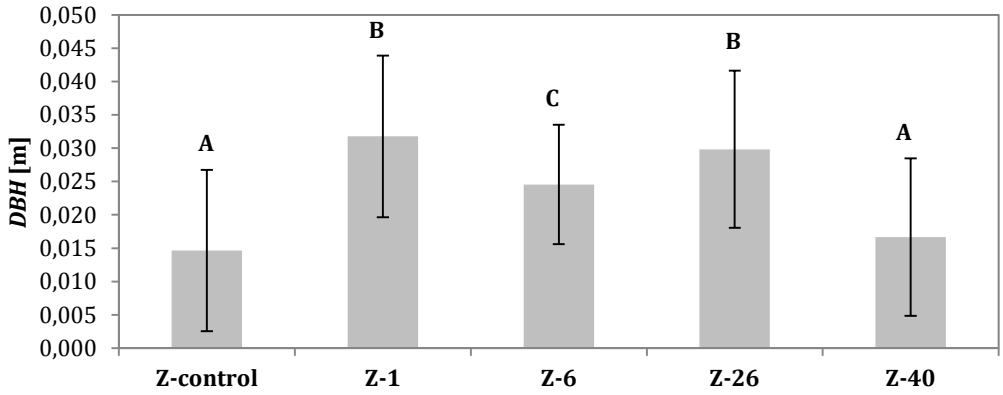

Figura 4.12. Diàmetre dels arbres a l'altura del pit *DBH* [m]. L'amplada de les barres d'error correspon a dues desviacions estàndards. Es mostren els resultats dels tests de comparació múltiple; la mateixa lletra representa que les mitjanes no són significativament diferents (p>0,05).

Amplada de les capçades

A la Figura 4.13 es representen els valors mitjans d'amplada de les capçades (*CW*). Les parcel·les Z-1, Z-6 i Z-26 tenen una amplada mitjana de les capçades semblant, mentre que les altres dos parcel·les (Z-control i Z-40), tenen valors de *CW* diferents al de la resta de parcel·les. Les parcel·les tractades presenten una *CW* superior que Z-control, i és la parcel·la Z-40 la que assoleix un valor més gran d'amplada de capçades.

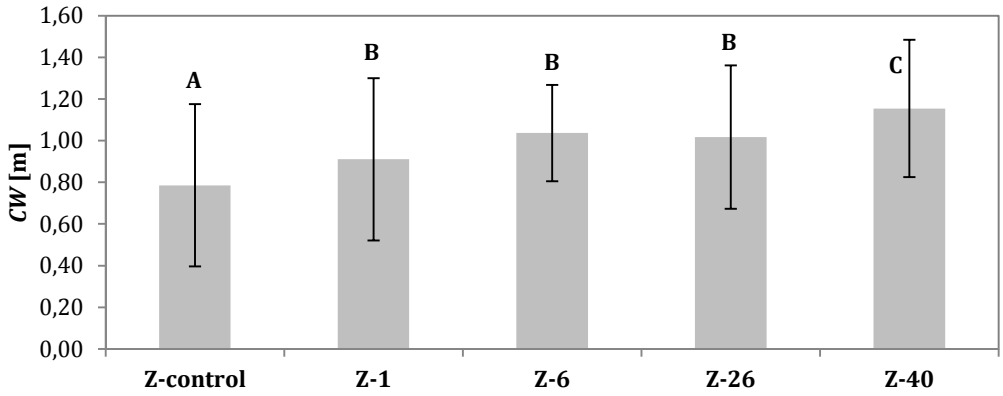

Figura 4.13. Amplada de les capçades (*CW*) [m]. L'amplada de les barres d'error correspon a dues desviacions estàndards. Es mostren els resultats dels tests de comparació múltiple; la mateixa lletra representa que les mitjanes no són significativament diferents (p>0,05).

Densitat aparent del combustible disponible de capçada (ACBD)

Els valors de densitat aparent de les capçades obtinguts per a les diferents parcel·les es presenten a la Figura 4.14. En aquest cas, tal i com s'indica en l'Annex I, amb els càlculs realitzats s'obtenen valors únics per parcel·la, i per tant no té sentit aplicar cap l'anàlisi estadística perquè no hi ha variabilitat entre parcel·la.

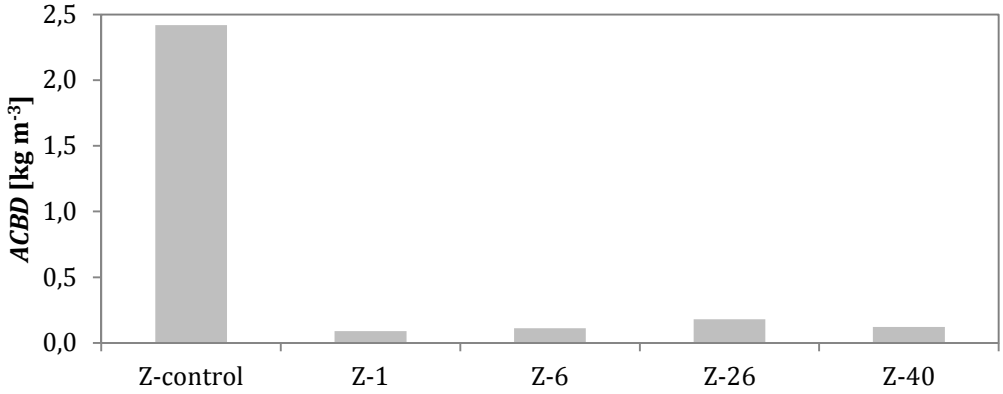

Figura 4.14. Densitat aparent del combustible disponible de capçada d'un arbre (ACBD) [kg m^{-3}].

L'*ACBD* és un paràmetre difícil de mesurar i que pot ser estimat de diferents maneres. A més tal i com s'ha esmentat en el capítol 1 d'Introducció no existeix un consens general sobre com determinar el combustible disponible. Els resultats obtinguts mostren diferències

importants entre la parcel·la control i la resta de parcel·les, la qual presenta una densitat aparent unes 20 vegades superior que a la resta de parcel·les.

Part d'aquesta diferència es pot explicar perquè pel mostreig destructiu de capçades es van agafar únicament 7 arbres, tots ells d'una de les parcel·les tractades. El més adequat hauria estat poder mostrejar més arbres i també mostrejar arbres de la parcel·la control per tal de determinar les seves pròpies relacions al·lomètriques. La parcel·la control presenta una elevada densitat de peus, els quals tenen menys espai per desenvolupar-se i per tant una tipologia de creixement diferent.

Cobertura de les capçades

Els valors de cobertura de les capçades (CC) obtinguts durant el mostreig dels arbres es representen a la Figura 4.15. Segons aquests, existeix significació (tot i que feble) en la CC de les parcel·les Z-1, Z-6 i Z-40, i entre les parcel·les Z-26 i Z-control. La densitat final d'arbres de la parcel·la Z-26 va resultar ser més gran que la de la resta de parcel·les tractades, i això podria explicar perquè la CC de la parcel·la Z-26 és diferent de la de les parcel·les Z-1, Z-6 i Z-40.

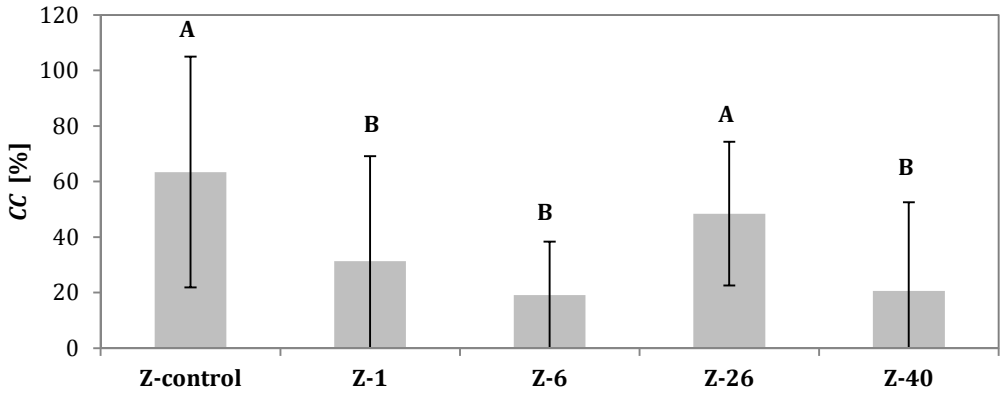

Figura 4.15. Cobertura de les capçades (CC) [%]. L'amplada de les barres d'error correspon a dues desviacions estàndards. Es mostren els resultats dels tests de comparació múltiple; la mateixa lletra representa que les mitjanes no són significativament diferents (p>0,05).

Anàlisi dels resultats per a les propietats extrínseques

La Figura 4.16 mostra la càrrega de combustible presents a les parcel·les estudiades segons els diferents estrats de vegetació. Tal i com es pot veure, les restes de tala representen, en

aquells casos en què n'hi ha, el combustible que aporta una fracció de càrrega total més gran a la parcel·la. Cal tenir en compte que la suma de tots els estrats no correspon a la càrrega total de la parcel·la, només es presenta les càrregues de combustibles disponible, que són les que tenen més importància en la propagació d'un incendi i en el cas de les restes es té en compte el combustible d'1h i 10h .

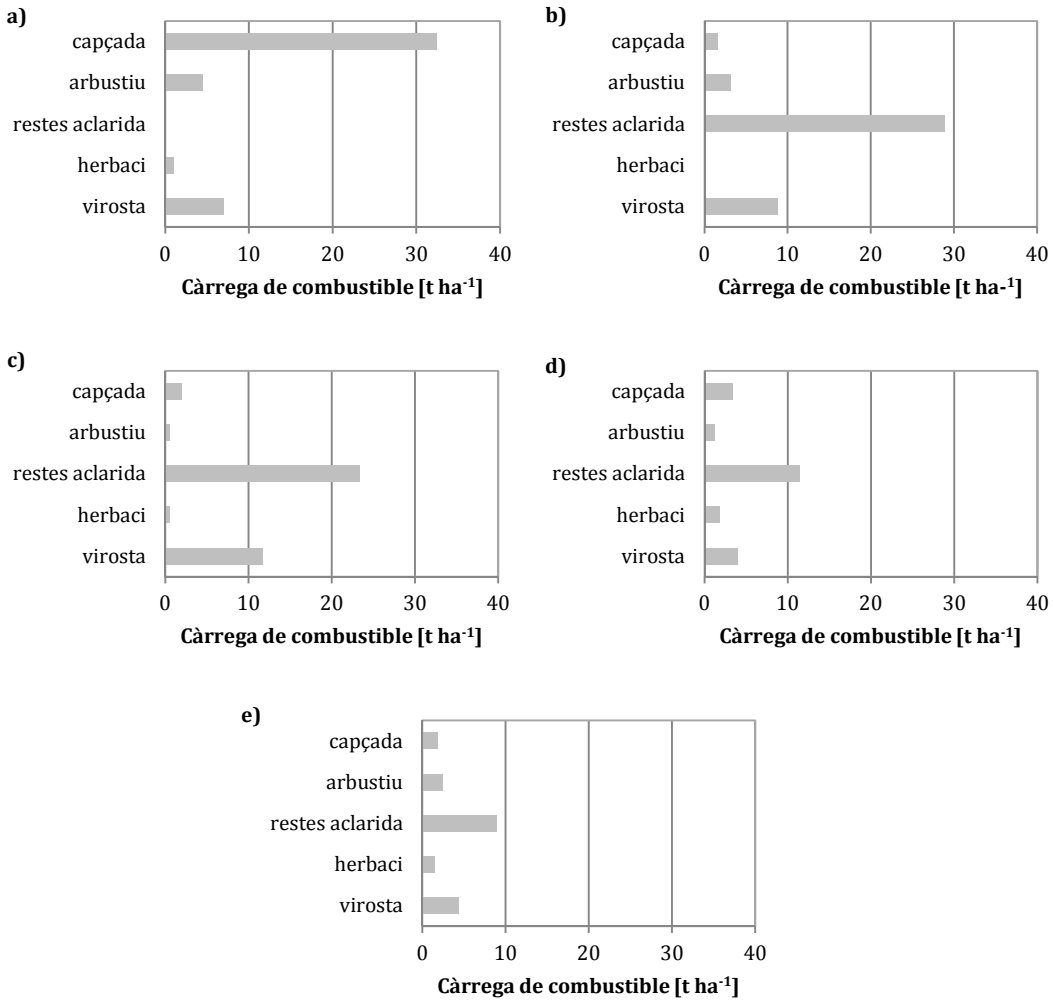

Figura 4.16. Càrrega de combustible per estrats per a cadascuna de les parcel·les (*W*) [t ha^{-1}]. a) Z-control. b) Z-1. c) Z-6. d) Z-26. e) Z-40.

La major part de les propietats determinades són similars per a les parcel·les Z-1 i Z-6, excepte l'altura de les restes de tala i el diàmetre dels arbres a l'altura del pit. Per a la Z-1 aquestes dos propietats són més elevades que per a la Z-6.

La parcel·la Z-control té majoritàriament propietats similars a les de la parcel·la Z-40 o diferents a les de la resta de grups de parcel·les. Observant els resultats, es podria inferir que 40 mesos després del tractament de la parcel·la Z-control s'assoleixen valors similars de diferents propietats extrínseques que els que s'observarien sense fer un tractament de la parcel·la (cobertura del combustible de superfície en peu, càrrega de combustible mort d'1h, altura dels arbres i diàmetre dels arbres a l'altura del pit). Ara bé, aquesta afirmació s'ha de matisar en tant que la parcel·la Z-40 partia d'una densitat d'arbres inicial inferior a la de la Z-control. Així, tenint en compte que les parcel·les Z-26 i Z-40 partien de densitats inicials inferiors (15.000 peus ha^{-1}) a Z-control (30.000 peus ha^{-1}), es pot afirmar que els valors de les variables obtinguts també són inferiors als que correspondrien a unes parcel·les amb la mateixa densitat inicial que Z-control i que haguessin estat mostrejades 26 i 40 mesos després de l'aclarida. Per tant, d'aquí es dedueix que 40 mesos després del tractament encara no s'han assolit les condicions prèvies al tractament.

La major part de les propietats determinades a partir de les dades preses durant els mostrejos destructius (càrregues de combustible) han presentat desviacions elevades. Tot i que s'han pogut realitzar proves estadístiques per determinar la significació entre les diferents parcel·les, les conclusions que es poden extreure sobre la igualtat o no de les propietats extrínseques s'han de prendre amb cautela.

4.2.2. Resultats per a les propietats intrínseques

Calor de combustió

Els poders calorífics superiors (*PCS*) de les espècies més representatives de l'àrea d'estudi trobats en la bibliografia es recullen a l'Annex I. El poder calorífic s'ha calculat pel combustible mort fi, viu i de capçades. Per tal de donar un valor representatiu per cada espècie o tipus de combustible present a les parcel·les s'ha ponderat el valor del seu *PCS* tenint en compte el pes relatiu de cada espècie o tipus de combustible. El *PCI* es va obtenir restant al *PCS* la calor alliberada en la vaporització de l'aigua (Alexander, 1982) (Annex I).

Poder calorífic del combustible fi mort

El combustible fi mort present a les parcel·les està composat bàsicament per la capa de virosta (majoritàriament agulles i branques fines mortes de pi blanc i altres partícules fines d'espècies minoritàries) i per la capa de restes de tala, tret de la parcel·la Z-control, on predominen acícules i ramatge fi de pi blanc. Comparativament amb les aportacions ja

mencionades, la càrrega de combustible herbaci i arbustiu mort que pot participar en la propagació del foc per aquest estrat és menyspreable davant la càrrega de partícules fines mortes de pi. Així doncs, fent l'arrodoniment dels valors mitjans de poder calorífic (PCS_{mit}) per agulles mortes de pi blanc i per branques mortes de 0 a 6 mm i ponderant aquests valors segons la proporció de càrrega d'acícules i branques fines (Taula 4.1) es poden calcular els valors del poder calorífic superior del combustible mort (PCS_d) per a cada parcel·la i també del poder calorífic inferior del combustible mort (PCI_d).

Taula 4.1. Poders calorífics mitjans pel combustible fi mort present a les parcel·les.

Classe de partícula	PCS_{mit}	Valors de ponderació per parcel·la				
	[kJ kg^{-1}]	Z-control	Z-1	Z-6	Z-26	Z-40
Acícules mortes de pi blanc	22.000	0,50	0,37	0,25	0,17	0,06
Branques de 0 a 6 mm de pi	20.500	0,50	0,63	0,75	0,83	0,94
PCS_d		21.250	21.055	20.875	20.755	20.590
PCI_d		19.987	19.792	19.612	19.492	19.327

Poder calorífic del combustible viu

El conjunt de combustible de superfície viu present a les parcel·les fa referència a l'estrat herbaci, l'arbustiu i l'arbori jove. Per obtenir el poder calorífic del combustible viu (PCS_l), es procedeix igualment a calcular valors mitjans del poder calorífic superior per espècies i classes de partícules vives i fines, i a ponderar-los segons els valors recopilats a la Taula 4.2.

Poder calorífic del combustible de capçades (PCS_{cap})

Aquest estrat està dominat per fulles vives i ramatge fi viu de pi blanc, tot i que alguns peus de roure superior a 130 cm d'altura també formen part en certes parcel·les mostrejades. A la bibliografia no es disposa de valors de poder calorífic de ramatge viu. Això és deu a que la propagació en incendis de capçades està menys estudiada i parametritzada que la propagació en incendis de superfície, particularment en ecosistemes mediterranis. Així, per defecte s'utilitzen únicament valors mitjans de poder calorífic d'acícules i fullatge viu (PCS_{cap} és de 21.750 kJ kg^{-1} i el PCI_{cap} és de 20.487 kJ kg^{-1}per a totes les parcel·les).

Taula 4.2. Poders calorífics mitjans pel combustible viu present a les parcel·les.

Estrat	Espècie	PCS_{mit} [kJ kg^{-1}]	Valors de ponderació per parcel·la				
			Z-control	Z-1	Z-6	Z-26	Z-40
Estrat herbaci		18.000(*)	*0,41*	*0,74*	*0,92*	*0,91*	*0,72*
Estrat arbustiu (fulles i branques fines i vives)	Gatosa	20.900	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00
	Romaní	22.750	0,43	0,26	0,00	0,08	0,10
	Cirerer d'arboç	21.000	0,03	0,00	0,00	0,00	0,09
	Càdec	21.500	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
	Garric	19.500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06
	TOTAL valor ponderació estrat arbustiu		*0,47*	*0,26*	*0,05*	*0,08*	*0,25*
Estrat arbori jove (acícules i fulles vives)	Pi blanc	21.750	0,13	0,00	0,03	0,01	0,01
	Alzina	20.200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
	TOTAL valor ponderació estrat arbori jove		*0,13*	*0,00*	*0,03*	*0,01*	*0,03*
PCS$_I$			20.829	19.235	18.270	18.418	18.917
PCI$_I$			19.566	17.972	17.007	17.155	17.654

(*) Extret de Jenkins *et al.* (1998) com a valor genèric de combustibles herbacis. El total d'alguns valors de ponderació no suma exactament 1 a causa de l'arrodoniment dels decimals.

Densitat i geometria de les partícules

La partícula tipus per a cada mostra queda perfectament definida comptabilitzant-ne la secció (S), la relació superfície-volum (σ) i la densitat en base seca (ρ). A la Taula 4.3 es recullen els valors numèrics de les mitjanes obtingudes per a cada subclasse, així com les seves desviacions. A l'Annex I s'explica en detall com s'han obtingut aquestes característiques.

Aquelles partícules de combustible amb una secció molt baixa (acícules en virosta i en restes de tala, i combustible herbaci viu) són les que òbviament presenten valors de σ més elevats (valors propers a 7.000-8.000 m^{-1}), mentre que el combustible més gruixut (de 10h) és el que té una relació àrea superficial-volum més baixa (de l'ordre de 500 m^{-1}). Aquests resultats són valors característics típics per aquestes espècies i grandàries (Arnaldos *et al.*, 2004). Tanmateix, també resulta característic el nivell de dispersió trobat –fruit de la gran heterogeneïtat de les partícules d'aquest tipus de material– tot i la magnitud de la mostra analitzada de cada subclasse de combustible.

Taula 4.3. Valors mitjans de secció, relació superfície-volum i densitat de la partícula tipus per a cada mostra identificada.

Estrat	Classe de partícula	S [mm^2]	σ [m^{-1}]	ρ [kg m^{-3}]
Combustible mort de superfície d'1h	Acícules en virosta	0,39 (0,20)	7.634 (1865)	542 (284)
	Branques 1h en virosta	9,74 (7,54)	1.477 (540)	361 (171)
	Herbaci mort	1,46 (0,82)	4.653 (1364)	240 (136)
	Acícules en restes	0,52 (0,36)	6.677 (1480)	462 (209)
	Branques 1h en restes	8,51 (5,76)	1.621 (492)	499 (168)
	Material fi 1h en arbustiu	3,52 (1,94)	2.500 (768)	617 (246)
Combustible mort de superfície de 10h	Branques 10h en virosta	65,44 (25,13)	563 (83)	439 (158)
	Branques 10h en restes	90,51 (50,18)	506 (140)	650 (363)
Combustible herbaci viu	Herba en estat viu	0,57 (0,31)	7.764 (3158)	542 (202)
Combustible llenyós viu	Arbustiu < 3 mm	2,40 (1,35)	3.128 (1148)	546 (180)
	Arbustiu de 3 a 6 mm	19,95 (8,78)	1.034 (193)	280 (103)
	Arbori jove < 3 mm	3,17 (1,38)	2.497 (741)	553 (262)
	Arbori jove de 3 a 6 mm	12,25 (4,31)	1.250 (279)	640 (214)

Desviació estàndard entre parèntesis.

Pel que fa a la densitat de material, s'hi poden observar diferències per diferents especies i per diferents diàmetres de partícula. No obstant, els valors es troben dins del rang de valors característics dels combustibles forestals.

Anàlisi dels resultats per a les propietats intrínseques

Les principals propietats intrínseques del combustible existent a la zona d'estudi han estat caracteritzades mitjançant un estudi bibliogràfic exhaustiu i mitjançant tècniques avançades de laboratori de metrologia i pesatge. Els resultats obtinguts han estat ponderats segons espècies i càrregues, tot emprant els resultats de les propietats extrínseques. D'aquesta manera s'ha pogut determinar la informació necessària de partícules tipus per als diferents estrats i subclasses de combustible de l'estructura forestal de regenerats de pi blanc que representa les parcel·les de treball.

Els resultats obtinguts amb les propietats intrínseques s'empren per realitzar les simulacions per avaluar el comportament d'un eventual incendi forestal (capítol 6). Tot i que aquestes propietats tenen una incidència menor que les propietats extrínseques en els resultats proveïts pels simuladors, les propietats intrínseques han estat igualment parametritzades de manera precisa i rigorosa, per tal de minimitzar l'error que una

caracterització pobra hagués pogut induir. Això queda especialment palès, per exemple, en el cas del poder calorífic superior, on es pot observar que entre tots els valors que s'utilitzen en les simulacions, no hi ha mai més d'un 10 % de diferència. Tanmateix, la caracterització minuciosa de les propietats extrínseques, ha permès una caracterització igualment detallada de les propietats intrínseques, en benefici de les posteriors simulacions que cal realitzar.

4.2.3. Models de combustible obtinguts

Els resultats obtinguts han servit per caracteritzar el combustible de superfície i determinar un model de combustible propi per cadascuna de les parcel·les d'estudi. Les principals característiques d'aquests models estan resumides a la Taula 4.4. D'altra banda, les principals propietats del combustible de capçades es troben recollides a la Taula 4.5.

Taula 4.4. Propietats del combustible de superfície.

Paràmetre	Parcel·la					
	Z-control$_s$	**Z-control**	**Z-1**	**Z-6**	**Z-26**	**Z-40**
w_{1h} [t ha^{-1}]	6,2	6,2	27,1	22,7	8,6	8,7
w_{10h} [t ha^{-1}]	1,6	1,6	19,9	14,9	8,5	5,3
w_{100h} [t ha^{-1}]	0,8	0,8	9,2	2,4	7,3	0,4
w_{Lh} [t ha^{-1}]	23,8	0,5	0,1	0,3	1,2	0,8
w_{Lw} [t ha^{-1}]	21,6	3,5	0,1	0,1	1,1	2,4
w_{Total} [t ha^{-1}]	54,0	12,6	56,4	40,4	26,7	17,6
σ_{1h} [cm^{-1}]	41,9	41,9	35,8	28,9	27,3	21,2
σ_{Lh} [cm^{-1}]	66,8	77,6	77,6	77,6	77,6	77,6
σ_{Lw} [cm^{-1}]	16,2	26,3	17,0	23,1	28,8	26,4
D_s (*) [cm]	227	65	23	16	24	21
PCI_d [kJ kg^{-1}]	19.987	19.987	19.792	19.612	19.492	19.327
PCI_l [kJ kg^{-1}]	20.487	19.566	17.972	17.007	17.155	17.654

(*) Valors ponderats pel combustible dipositat al sòl i el combustible de superfície en peu. Al model de combustible Z-control$_s$ el pi blanc forma part del model, és a dir, està inclòs dins del combustible de superfície, mentre que a Z-control el pi blanc es defineix com a combustible de capçades. w_{Total} contempla el combustible mort d'1h, 10h, 100h i el combustible viu herbaci i llenyós.

Per la parcel·la no tractada s'han definit dos models de combustible, Z-control i Z-control$_s$. El model de combustible per Z-control conté els estrats de virosta, herbaci i arbustiu i els arbres estan considerats com a combustible aeri o de capçada. Tanmateix, els regenerats de pi blanc es poden considerar com a part de l'estrat arbustiu ja que per la seva altura i

característiques morfològiques encara no han assolit una estructura arbòria desenvolupada. Es per això que s'ha considerat convenient dur a terme una altra aproximació a aquesta qüestió tot construir un model de combustible (Z-control$_s$) que incorpori els regenerats de pi blanc en l'estrat arbustiu de superfície (Taula 4.4). En aquest nou model, per definir el combustible viu herbaci s'ha fet servir el combustible viu herbaci present a la superfície, i per descriure el combustible viu llenyós s'ha utilitzat el combustible viu llenyós de l'estrat de superfície i les branques vives inferiors a 6 mm dels pins. L'altura del llit de combustible correspon a l'altura mitjana de l'estrat format pels pins. I el *PCI* del combustible de superfície viu correspon al *PCI* del combustible disponible de les capçades.

Taula 4.5. Propietats del combustible de capçada.

Paràmetre	**Parcel·la**				
	Z-control	**Z-1**	**Z-6**	**Z-26**	**Z-40**
ACFL [kg m^{-2}]	3,238	0,162	0,202	0,342	0,183
ACBD [kg m^{-3}]	2,418	0,090	0,112	0,179	0,121
CBH [m]	0,93	1,21	1,21	1,02	0,66
CC [%]	63	31	19	48	21
PCI_c [kJ kg^{-1}]	20.487	20.487	20.487	20.487	20.487

4.3. Discussió

Les diferències trobades entre els diferents mètodes aplicats (vegeu Annex I) es poden atribuir a les característiques dels propis mètodes, en alguns casos puntuals i en d'altres cobrint tota l'àrea de la parcel·la. Això ha fet que en general el mostreig destructiu (de tipus puntual) sigui més fiable en aquelles mesures que afecten combustible amb una presència elevada i una distribució homogènia mentre que el mostreig de restes (que cobreix tota la parcel·la) dóna més bons resultats pel combustible que té poca presència i es troba repartit de forma irregular en la parcel·la. En qualsevol cas el que ha quedat palès és que no hi ha un mètode universal i que és molt convenient aplicar diversos mètodes duplicant la mesura d'alguns paràmetres.

Prèviament a presentar a la discussió sobre l'evolució temporal de les propietats del combustible recopilades, cal assenyalar que les dades que corresponen a les parcel·les Z-26 (26 mesos entre el tractament i el mostreig) i la Z-40 (40 mesos entre mostreig i tractament) no parteixen de la mateixa situació de pre-tractament que les altres parcel·les (Z-control, Z-1 i Z-6). A la Z-26 es va passar d'una densitat inicial de 15.000 peus ha^{-1} a una final de 2.550

peus ha^{-1} i a la Z-40 de 14.000 peus ha^{-1} a 2.100 peus ha^{-1}, mentre que a les altres es partia d'una densitat inicial de 30.000 peus ha^{-1} i es deixà una densitat final de 1.300 peus ha^{-1} (aproximadament). Per tant no es poden analitzar conjuntament.

4.3.1. Combustible de superfície

Si s'analitzen els resultats de les càrregues de combustible en detall, s'observa que la càrrega del combustible fi mort (1h) present a la parcel·la després d'1 mes de ser tractada és molt superior a la que hi havia a la parcel·la abans de ser tractada (4,4 vegades superior) i està distribuïda de manera força homogènia per tota la parcel·la (coberta d'un 85 %), però que aquesta càrrega, ja disminueix sensiblement (16 %) transcorreguts 5 mesos i té una coberta menys densa (38 %). Durant els primers 5 mesos s'han reduït aproximadament 0,88 t ha^{-1} per mes, si aquesta evolució fos lineal en el temps, això voldria dir que serien necessaris com a mínim 24 mesos per arribar a la situació inicial. Tanmateix, relacionant aquests resultats amb les dades que proporcionen les parcel·les Z-26 i Z-40 en les quals la càrrega de combustible fi encara no ha recuperat el seu valor inicial després de 40 mesos de tractament, es pot afirmar amb seguretat que la tendència no serà en absolut lineal**.** Pel que fa al combustible de 10h, s'observa una tendència similar. La càrrega present de combustible de 10h després d'1 mes de tractament és molt superior a la que hi havia a la parcel·la abans de ser tractada (12,4 vegades superior). Aquesta càrrega disminueix un 25 % després de 5 mesos però es pot afirmar que després de 40 mesos no ha recuperat els seus valors inicials.

Pel que fa a la càrrega de combustible herbaci i arbustiu, aquest experimenta una reducció significativa degut al tractament (amb percentatges de reducció sobre la situació inicial pre-tractament d'un 80 % d'herbaci i un 97 % d'arbustiu mesurats 1 mes després de la tala), càrrega que d'altra banda no se n'observa un augment significatiu al cap de 5 mesos. Relacionant aquests resultats amb les dades que proporcionen les parcel·les Z-26 i Z-40 no es pot arribar a afirmacions concloents sobre l'evolució de la càrrega en els estrats herbaci i arbustiu, tot i que sí es pot intuir lleugerament una tendència d'increment de la càrrega arbustiva amb el temps posterior al tractament.

Respecte la virosta, tot i que estadísticament només la parcel·la Z-40 presenta una altura significativament inferior a les altres (i ja partia d'una situació inicial d'una reducció de peus molt inferior) sembla que l'altura de la virosta tendeix a augmentar durant els primers mesos de tractament, per posteriorment anar-se reduint gradualment. Amb les dades de què

es disposa però no és possible conèixer si es retornaria a la situació inicial i quant de temps es tardaria en arribar-hi.

D'altra banda en les restes de tala, comparant la Z-1 amb la Z-6, s'observa una reducció en l'altura d'un 25 % en 5 mesos. De tota manera no s'espera que aquesta sigui una tendència que depengui linealment del temps. La distància entre l'estrat arbustiu i l'estrat arbori augmenta significativament després del tractament (de l'ordre de 20 vegades), tot i que posteriorment amb el temps torna a reduir-se novament, encara que no es pot afirmar si s'arribarà als valors inicials o no.

D'entre els 13 models estàndards de combustible d'Estats Units (Anderson, 1982), les parcel·les tractades equivalen a un model de restes de tala, el model 11 (càrrega total del combustible de superfície de 28,45 t ha^{-1}) o el 12 (85,40 t ha^{-1}). El combustible present a la parcel·la Z-$control_s$ es podria assimilar a un model 4 de matollar dens de dos metres d'alçada (39,58 t ha^{-1}) i el combustible de superfície de la Z-control a un model 7 de matollar amb espècies molt inflamables (12,2 t ha^{-1}). Tanmateix cap dels 13 models descriu amb precisió el combustible present a les parcel·les de la zona d'estudi.

La major part dels valors de càrrega obtinguts pel combustible de superfície se situen dins del rang de valors trobats per la vegetació mediterrània en la bibliografia. Per exemple, Dimitrakopoulos (2002) descriu càrregues totals de 25,5 t ha^{-1} (17,8 t ha^{-1} de combustible mort i 7,7 t ha^{-1} de combustible viu) per màquies mediterrànies d'una altura entre 1,5 i 3 m, i 53,0 t ha^{-1}(42,4 t ha^{-1} de combustible mort i 10,6 t ha^{-1} de combustible viu) per màquies superiors a 3 m. Baeza *et al.* (2002) recullen valors de càrrega total de matollars d'*Ulex parviflorus* de 12,3, 38,2 i 38,3 t ha^{-1}, per formacions de 3, 9 i 12 anys, respectivament. Padilla (2004) construí un model de combustible per a un regenerat de pi blanc de 27 anys d'edat, considerant que el regenerat formava part del matollar, i obtingué una càrrega total de 42 t ha^{-1} (17 t ha^{-1} de combustible mort i 25 t ha^{-1} de combustible viu). Com a excepció, el model de combustible Z-control presenta una càrrega total de combustible de superfície baixa en comparació amb el valors trobats a la bibliografia. Aquesta diferència es pot explicar perquè a Z-control la biomassa es concentra principalment en els regenerat de pi blanc, de manera que es podria parlar d'una brolla arbrada. Sembla doncs més adient en el cas de la parcel·la Z-control incloure els pins dins del model de combustible de superfície, és a dir, utilitzar el model Z-$control_s$.

4.3.2. Combustible de capçades

S'han trobat pocs estudis que determinin les característiques del combustible de capçada del pi blanc, per aquesta raó s'han utilitzat també altres espècies de pi amb característiques de capçada semblants per comparar els resultats obtinguts. A continuació s'esmenten valors de la bibliografia referents a característiques del combustible de capçada per varies poblacions forestals recopilats per Mitsopoulos i Dimitrakopoulos (2007b). Pel que fa a la càrrega de combustible de capçades, els mateixos autors (Mitsopoulos i Dimitrakopoulos, 2007b) citen valors entre 0,96 i 1,65 kg m^{-2} pel pi blanc (en poblacions forestals d'uns 700 peus ha^{-1} i alçades dels arbres entre 13 i 20 m). Cruz *et al.* (2003) descriuen la càrrega de combustible de capçada per diferents tipus de combustible; les poblacions mixtes de diferents coníferes són les que tenen els valors d'*ACFL* més elevats (1,4 kg m^{-2}), seguides per poblacions forestals de *Pinus contorta* (1,0 kg m^{-2}), *Pseudotsuga menziesii* (1,0 kg m^{-2}) i *Pinus ponderosa* (0,61 kg m^{-2}). Alexander *et al.* (2004) assenyalen valors entre 0,6 i 1,5 kg m^{-2} per pinedes mixtes. Scott i Reinhardt (2001) mencionen valors per *Pinus contorta* i *Pinus ponderosa* de 1,22 i 2,25 kg m^{-2}, respectivament.

En el cas de la densitat de capçades disponible, Mitsopoulos i Dimitrakopoulos (2007b) esmenten valors pel pi blanc entre 0,09 i 0,22 kg m^{-3}. Alvarez *et al.* (2011) donen valors entre 0,02 i 0,08 kg m^{-3} per pins blancs d'alçades entre 4 i 13 m. Alexander *et al.* (2004) assenyalen valors mitjans de 0,16 kg m^{-3}. Cruz *et al.* (2003) troben valors similars per *Pinus ponderosa* i *Pseudotsuga menziesii* (0,18 kg m^{-3}). Els boscos mixtes de coníferes i de *Pinus contorta* es caracteritzen per valors més elevats (0,32 kg m^{-3} i 0,28 kg m^{-3}, respectivament). Agee (1996) dóna valors semblants per *Pinus ponderosa*, *Pseudotsuga menziesii* i *Abies grandis.* També Scott i Reinhardt (2002) esmenten valors semblants per coníferes del nord d'Amèrica.

Els resultats obtinguts en la bibliografia s'ha de prendre amb cautela ja que en alguns casos les relacions al·lomètriques utilitzades per estimar la càrrega de combustible de capçades no es van desenvolupar en les mateix poblacions on es va realitzar l'estudi. A més a més, per espècies per les quals no hi havia publicades relacions al·lomètriques alguns autors utilitzaren valors d'espècies semblants. En el cas de les parcel·les d'estudi es crearen unes relacions al·lomètriques especifiques per les zones tractades. Els valors trobats per les zones tractades entren dins el rang de valors existents a la bibliografia, tanmateix per la zona no tractada hi ha una certa sobreestimació. Això pot ser degut a la utilització per la parcel·la Z-control de les relacions al·lomètriques obtingudes per les parcel·les tractades. Cal assenyalar també que les dades trobades a al bibliografia corresponen a poblacions forestals adultes, amb densitats d'arbres inferiors i altures dels arbres i *DBH* superiors a la Z-control.

5. CREMES EXPERIMENTALS

Tal i com s'ha esmentat en el capítol 1, l'estudi del comportament dels incendis forestals es pot enfocar de forma experimental o utilitzant eines de simulació. Les dues aproximacions ofereixen avantatges i inconvenients, l'enfoc experimental és complicat de realitzar a gran escala i presenta certa complexitat de disseny però permet ajustar paràmetres que amb les simulacions resulten difícils de determinar. En aquest capítol és detalla l'experimentació de forma controlada a camp que es realitzà en el marc d'aquesta tesi.

Amb la finalitat d'estudiar el comportament del foc i davant la dificultat de realitzar cremes controlades a la zona d'estudi degut a la conjuntura politico-social actual, es va plantejar fer unes cremes experimentals *ex-situ*, és a dir, cremar parcel·les de dimensions reduïdes en una zona no forestal que reproduïssin tan fidelment com fos possible les parcel·les mostrejades.

Aquest capítol s'inicia amb un apartat on es detalla el disseny experimental de les cremes i metodologies emprades. En aquest apartat també es descriuen qualitativament les proves, fent especial incís als tipus de comportament de foc observats durant les diferents fases de cada experiment i s'expliquen amb detall les metodologies de processament de dades per obtenir les variables d'interès de comportament del foc. A continuació es presenten i discuteixen els resultats. Finalment s'enumeren les conclusions més significatives.

5.1. Material i mètodes

Durant setmanes prèvies al dia dels experiments es van preparar dues parcel·les de 17 m x 8 m (136 m^2) que procuressin reproduir les característiques de les parcel·les Z-6 i Z-40 caracteritzades 6 i 40 mesos després de la seva aclarida, respectivament. S'escolliren només dues parcel·les perquè la preparació i execució de les proves requeria molt temps i mitjans tant humans com econòmics, per això es va decidir reproduir la parcel·la Z-6, ja que era la que presentava un risc d'incendi més elevat per la gran quantitat de combustible mort que contenia, i la parcel·la Z-40 que representava la situació final després de l'aclarida en la qual es notaven els efectes positius d l'aclarida. Les parcel·les que es van preparar van prendre per nom SIMZ-6 i SIMZ-40. Les cremes experimentals es van dur a terme al Centre de Formació en Seguretat 'Can Padró', situat a les rodalies de Sant Vicenç de Castellet (Bages, Barcelona).

Degut a la naturalesa ex-situ de les proves, les tasques de recol·lecció, transport, mesura i disposició del material combustible van ser molt complexes (Figura 5.1). Això va comportar diferències notables pel que fa a les càrregues, dimensions i disposicions dels diferents estrats de les parcel·les SIMZ-6 i SIMZ-40 amb les seves equivalents Z-6 i Z-40. Les diferències més significatives es detectaren en el *DBH* i en la càrrega de combustible herbaci. A més, en el cas de la virosta no s'aconseguí reproduir de manera adequada aquesta capa, degut a la condició heterogènia d'aquest tipus de combustible. Tanmateix, les parcel·les SIMZ-6 i SIMZ-40 presentaren diferències significatives entre elles tal i com es pot observar a la Taula 5.1.

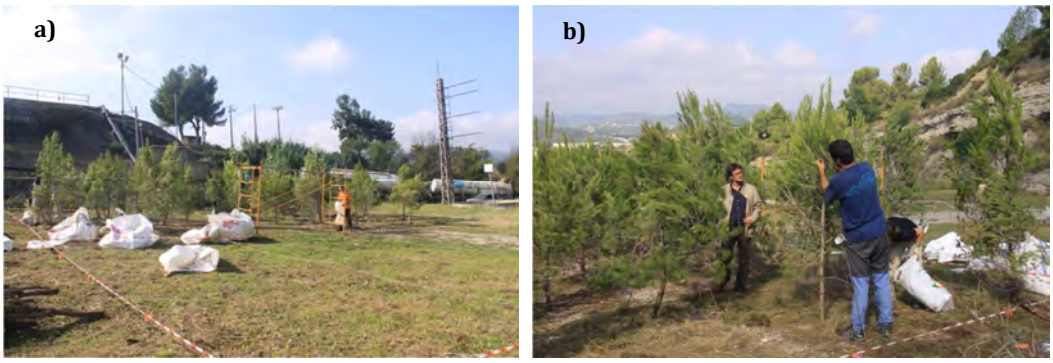

Figura 5.1. Disposició del combustible en les parcel·les. a) SIMZ-6. b) SIMZ-40.

Taula 5.1. Característiques del combustible de les parcel·les experimentals (SIMZ-6 i SIMZ-40) i les corresponents parcel·les de la finca Casamitjana (Z-6 i Z-40).

Estrat	Propietat	Z-6 (d.e.)	SIMZ-6 (d.e.)	Diferència respecte a Z-6 [%]	Z-40 (d.e.)	SIMZ-40 (d.e.)	Diferència respecte a Z-40 [%]
Arbori	Densitat arbres [peus m^{-2}]	0,14	0,14	0,0	0,21	0,21	0,0
	Distància mitjana entre arbres [m]	2,65	2,68	1,1	2,18	2,17	0,5
	DBH [m]	0,025 (0,01)	0,028 (0,01)	12,0	0,017 (0,01)	0,029 (0,01)	70,6
	Alçada [m]	3,02 (0,58)	2,53 (0,47)	16,2	2,17 (0,50)	2,30 (0,35)	6,0
	Amplada de la capçada [m]	1,04 (0,23)	1,37 (0,34)	31,7	1,15 (0,33)	1,45 (0,49)	26,1
	CBH [m]	1,21 (0,27)	0,83 (0,28)	31,4	0,66 (0,28)	0,53 (0,23)	19,7
Arbustiu	Alçada [m]	0,19 (0,09)	n.d.	n.a.	0,52 (0,08)	0,69 (0,12)	32,7
	Càrrega [kg m^{-2}]	0,05 (0,03)	0,05	0,0	0,25 (0,33)	0,26	4,0
Restes de tala	Alçada [m]	0,24 (0,14)	0,25 (0,09)	4,2	0,14 (0,08)	0,18 (0,11)	28,6
	Càrrega [kg m^{-2}]	2,41 (1,42)	2,60	7,9	0,89 (0,38)	0,93	4,5
Herbaci	Alçada [m]	0,14 (0,02)	n.d.	n.a.	0,23 (0,05)	n.d.	n.a.
	Càrrega [kg m^{-2}]	0,05 (0,01)	0,05	0,0	0,16 (0,12)	0,28	75,0
Virosta	Càrrega [kg m^{-2}]	1,17 (0,94)	1,28	9,4	0,43 (0,21)	0,39	9,3

n.d.: no disponible. n.a.: no aplica**.** d.e.: desviació estàndard.

5.1.1. Mesures efectuades durant les cremes experimentals

L'experimentació va ser dissenyada per estudiar el major nombre possible de variables característiques dels fronts de flames. La metodologia utilitzada es detalla a continuació i en la Figura 5.2 s'il·lustra un esquema de la disposició dels diferents instruments utilitzats:

- *Càmera infraroja*. Totes les proves es van filmar amb una càmera termogràfica (TIR, rang 7,5-13 μm), la qual enregistra imatges que representen la distribució de

temperatura dels objectes que són visibles per aquesta. La càmera té una lent de 24° x 18° i utilitza un detector capaç de generar imatges de 320 x 240 píxels. Les seqüències d'imatges generades per la càmera es van controlar i emmagatzemar en un ordinador portàtil a una velocitat de captura d'imatges de fins a un màxim de 4 imatges per segon. La càmera es va posicionar sobre una elevació natural del terreny contigu a les parcel·les, uns 19 m respecte el terreny on es trobaven les parcel·les (Figura 5.3a). El camp de visió de la càmera cobria la totalitat del perímetre de les parcel·les. Aquestes, estaven envoltades per petites torxes col·locades a punts coneguts, per tal de facilitar el posterior tractament de les imatges (Figura 5.3b).

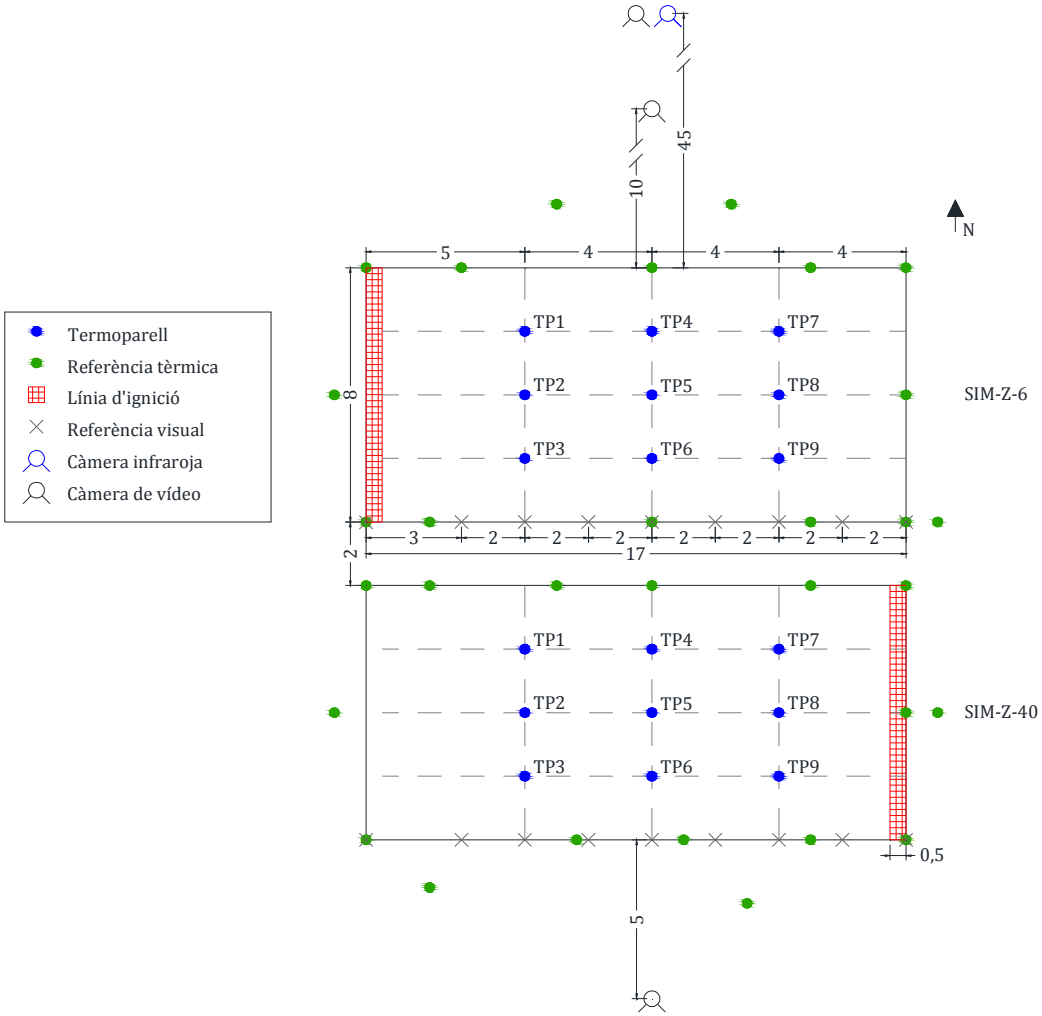

Figura 5.2. Esquema de la disposició dels equips de monitorització i de la posició de les línies d'ignició. Cotes en metres. TP: Termoparells.

- *Càmeres de vídeo i de fotografia*. Totes les proves es van filmar amb 2 càmeres de vídeo. Una de les càmeres de vídeo es va ubicar al costat de la càmera IR (Figura 5.3a). Es va posicionar per tal que cobrís completament el perímetre de les dues parcel·les. L'altra càmera es va situar a nivell de terra (a la mateixa cota que les parcel·les) en posició perpendicular a la direcció de propagació del front de flames en cada prova. Es va col.locar de manera que el camp de visió cobrís completament l'altura màxima visible del front de flames. Tant durant el període de preparació dels experiments com durant l'execució de les proves s'empraren dues càmeres de fotografia digitals per enregistrar a nivell de detall tots els esdeveniments.

- *Termoparells.* Es van utilitzar termoparells de tipus K, els quals són capaços de suportar temperatures de fins a 1.200 °C. Els termoparells van ser un complement indispensable per validar el tractament d'imatges termogràfiques, a banda de donar idea del temps de residència de la flama. (Figura 5.3c). Els termoparells mesuraven 1 mm de diàmetre i 0,3 m de llargària, i estaven embeinats amb un recobriment aïllant d'Inconel 600. Aquests es connectaren directament a 9 sistemes d'adquisició i emmagatzematge de dades (dataloggers) de la marca comercial ONSET (model HOBO U12). Els aparells HOBO U12 es van enterrar a diferents posicions dins de les parcel·les, dins un recipient de plàstic recobert de tela de fibra de vidre acabada amb una làmina d'alumini.

- *Observadors.* Dos observadors es van situar a un dels laterals de les parcel·les (lateral en què no es bloquejava la vista a les càmeres IR i de vídeo de la parcel·la que cremava) per tal d'anar anotant les característiques geomètriques del front i els instants de temps (llegits en sengles cronòmetres) en què la posició més avançada del front de flames arribava a diverses referències que s'havien col·locat al llarg del lateral de la parcel·la. Les referències consistien en vares metàl·liques posicionades al llarg de les vores longitudinals de les parcel·les, clavades verticalment a distàncies conegudes i recobertes de cinta adhesiva vermella i platejada a alçades determinades (Figura 5.3d).

- *Petit aparellatge.* Durant les cremes hi havia una persona encarregada d'enregistrar les variacions en la velocitat i la direcció del vent mitjançant un anemòmetre d'hèlice multidireccional. D'altra banda, les dades de temperatura i humitat ambient es prenien amb un termohigròmetre digital a l'inici i un cop finalitzades les proves. Per acabar, al final de cada prova, el contorn cremat es va resseguir amb un GPS d'alta precisió.

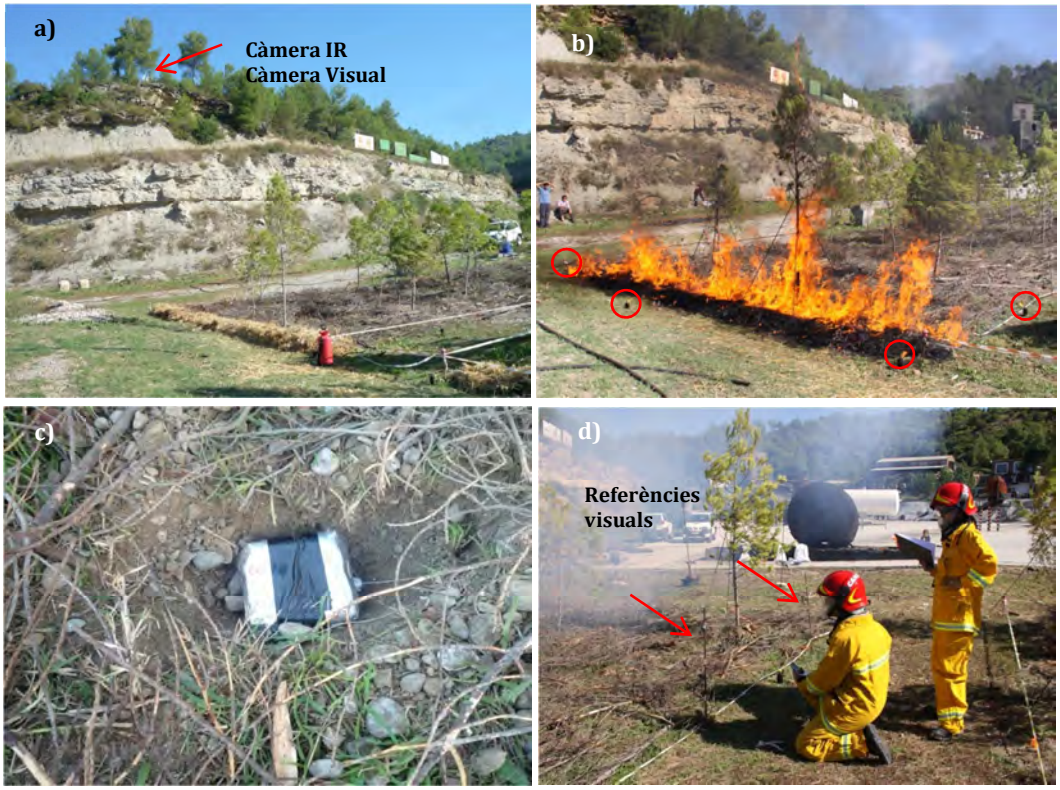

Figura 5.3. Instrumentació utilitzada en les cremes experimentals. a) Ubicació de les càmeres IR i visual. b) Petites torxes fent de referències tèrmiques encerclades en vermell. c) Sistemes d'adquisició i emmagatzematge de dades de temperatura emprats en la parcel·la SIMZ-6. d) Vares de ferro emprades com a referències visuals i observadors.

5.1.2. Anàlisi qualitativa de les cremes experimentals

Durant el dia 06/10/2010 s'executaren un total de 3 proves experimentals. Dues d'elles tingueren lloc en la parcel·la SIMZ-6 (anomenades SIMZ-6-1, SIMZ-6-2). Això es va poder produir perquè la primera de les proves va auto-extingir-se de seguida, havent deixat pràcticament la meitat de la parcel·la sense cremar. Així, es va creure convenient obtenir una rèplica de l'experiment per tal d'aprofitar al màxim la feina feta de preparació dels experiments. La tercera prova va tenir lloc a la parcel·la SIMZ-40. Aquesta prova va implicar la crema de la parcel·la en tota la seva longitud, de tal manera que no se'n va poder efectuar cap rèplica.

Per tal d'optimitzar el procés de generació de resultats sobre el comportament del foc, les tres proves experimentals van ser prèviament analitzades de manera qualitativa mitjançant el visionat conjunt de fotos, seqüències de vídeo i seqüències termogràfiques. L'objectiu d'aquesta anàlisi prèvia fou el d'identificar diferents fases pel que fa al comportament del foc que s'esdevingueren en cada crema, donades les heterogeneïtats de les condicions experimentals (variabilitat del vent, discontinuïtats del combustible, etc.). Aquest procés es realitzà per les tres proves executades.

En Taula 5.2 es descriuen les fases identificades en la primera crema (SIMZ-6-1) i en la Figura 5.4 es mostren instants representatius de les fases més significatives d'aquesta. Seguidament la Taula 5.3 recull el comportament de la crema SIMZ-6-2 i la Figura 5.5 il·lustra instants representatius de les fases més rellevants. Finalment la Taula 5.4 explica els comportaments de la crema efectuada a la parcel·la SIMZ-40, il·lustrats en la Figura 5.6.

Taula 5.2. Fases del comportament del foc en la crema experimental SIMZ-6-1.

Fase	Descripció	Període [h:min:s] (Duració, s)	Observacions
Ignició	Encesa i crema del combustible (hidrocarbur i vegetal) emprat per a la ignició.	12:42:33-12:43:30 (57 s).	Finalitza quan ja no s'observa fum negre, fruit de la combustió de l'hidrocarbur emprat per l'encesa.
Fase 1	Perímetre continu. Sense vent.	12:43:31-12:44:27 (56 s).	Les flames són majoritàriament verticals, l'avanç del perímetre del foc és lent i no s'observa una inclinació significativa del plomall de fum.
Fase 2	Perímetre continu. Vent a favor (calma, velocitat vent < 0,2 m s^{-1}, component O).	12:44:28-12:47:24 (176 s).	L'efecte del vent és significatiu en el comportament del foc, fent que el perímetre avanci més ràpidament, amb flames inclinades cap al combustible no cremat afavorint l'aparició de diversos focs de torxa. Aquesta fase finalitza quan, degut a una discontinuïtat en el combustible, el perímetre es divideix en dues parts.
Fase 3	Perímetre discontinu. Vent a favor (calma, velocitat vent < 0,2 m s^{-1}, component O).	12:47:25-12:55:54) (509 s).	La divisió del perímetre provoca una davallada en la velocitat de propagació i intensitat del foc. Tanmateix, la inclinació de les flames afavoreix l'aparició d'algun foc de torxa.

Taula 5.2. Fases del comportament del foc en la crema experimental SIMZ-6-1 (continuació).

Fase	Descripció	Període [h:min:s] (Duració, s)	Observacions
Fase 4	Perímetre discontinu. Turbulències (calma, velocitat vent < 0,2 m s^{-1}, direccions variables S, SE, E).	12:55:55-12:58:13 (168 s).	Apareixen moltes turbulències i canvis en la direcció del vent, fet que provoca una davallada molt significativa en l'activitat de les diferents divisions del perímetre de foc.
Auto-extinció	Perímetre marginal. Sense vent.	12:58:14-13:05:24 (430 s).	Les petites flames discontinues s'auto-extingeixen degut a la manca de vent i a la manca de continuïtat del combustible.

Figura 5.4. Instantànies que il·lustren el comportament descrit en a) fase 1, b) fase 2, c) fase 3 i d) fase 4 de l'experiment SIMZ-6-1.

Taula 5.3. Fases del comportament del foc en la crema experimental SIMZ-6-2.

Fase	Descripció	Període (h:min:s) (Duració, s)	Observacions
Ignició	Encesa i crema del combustible (hidrocarbur i vegetal) emprat per a la ignició.	13:32:19-13:32:49 (30 s).	Finalitza quan ja no s'observa fum negre, fruit de la combustió de l'hidrocarbur emprat per l'encesa.
Fase 1	Perímetre discontinu. Vent a favor (calma, velocitat vent < 0,2 m s^{-1}, component O).	13:32:50-13:35:01 (131 s).	L'efecte del vent és significatiu en el comportament del foc, fent que les flames avancin inclinades sobre el combustible no cremat. Tanmateix, la propagació del foc és mitjançant un perímetre discontinu degut a les discontinuïtats del combustible.
Fase 2	Perímetre discontinu. Sense vent.	13:35:02-13:35:46 (44 s).	Les flames tenen dimensions reduïdes i avancen lentament en un perímetre trencat per diverses seccions.
Auto-extinció	Perímetre marginal. Vent a favor (calma, velocitat vent < 0,2 m s^{-1}, component O).	13:35:47-13:39:46 (239 s).	Les petites flames discontinues s'auto-extingeixen degut a la manca de continuïtat del combustible.

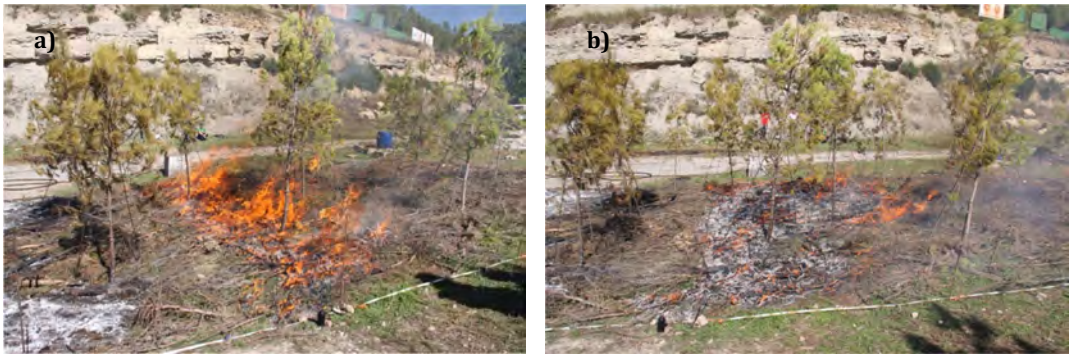

Figura 5.5. Instantànies que il·lustren el comportament descrit en a) fase 1, b) fase 2 de l'experiment SIMZ-6-2.

Taula 5.4. Fases del comportament del foc en la crema experimental SIMZ-40.

Fase	Descripció	Període (h:min:s) (Duració, s)	Observacions
Ignició	Encesa i crema del combustible (hidrocarbur i vegetal) emprat per a la ignició.	15:09:22-15:10:27 (66 s).	Finalitza quan ja no s'observa fum negre, fruit de la combustió de l'hidrocarbur emprat per l'encesa.
Fase 1	Perímetre discontinu. Vent variable (a favor in en contra), velocitats del vent entre calma (< 0,2 m s^{-1}) i vent fluix (0,3 m s^{-1})	15:10:28-15:21:05 (636 s).	El foc es propaga ja des de l'inici amb un perímetre trencat, fruit de les irregularitats en el vent i en la disposició del combustible. Predominantment, es propaga de cua, fins i tot amb focs de torxa. Tanmateix, les flames s'inclinen puntualment cap al combustible no cremat en ratxes de vent a favor.
Fase 2	Perímetre discontinu. Vent a favor (calma, velocitat vent < 0,2 m s^{-1}, component E)	15:21:06-15:23:11 (125 s).	L'efecte del vent és molt significatiu en el comportament del foc, fent que el perímetre avanci de manera molt ràpida i intensa. Es produeixen diversos focs de torxa simultanis amb altures de flama molt significatives.
Fase 3	Perímetre discontinu. Vent en contra, velocitat del vent variable entre calma (<0,2 m s^{-1}) i mitjà (2 m s^{-1}), component S, SO.	15:23:12-15:25:48 (156 s).	Tot i el vent en contra, segueixen havent-hi focs de torxa diversos.
Auto-extinció	Perímetre marginal. Vent a favor (calma, velocitat vent < 0,2 m s^{-1}, component E).	15:25:49-15:35:22 (573 s).	Les petites flames discontinues s'auto-extingeixen degut a la manca de continuïtat del combustible.

Figura 5.6. Instantànies que il·lustren el comportament descrit en a) fase 1, b) fase 2 i c) fase 3 de l'experiment SIMZ-40.

5.1.3. Metodologia d'obtenció de les variables de comportament del foc

Velocitat de propagació

La velocitat de propagació (R) va ser calculada per a cada fase de les proves executades, mitjançant les anotacions preses pels observadors (R^{obs}) dels instants de temps en què el punt més avançat del foc assolia una determinada distància (aquestes distàncies es prenien en base a les vares metàl·liques situades a les vores de les parcel·les separades 2 m entre elles) i mitjançant el tractament de les imatges termogràfiques (R^{IR}). Pel que fa al primer mètode, per a cada fase, es van prendre totes les dades anotades pels dos observadors, es van calcular velocitats de propagació per cada parell de dades consecutives i se'n van calcular les mitjanes (R_m^{obs}) i les màximes (R_x^{obs}).

D'altra banda, es va calcular també la velocitat de propagació fent ús de les imatges termogràfiques enregistrades. Aquest mètode va consistir bàsicament en el

desenvolupament i implementació dels algoritmes apropiats amb el software MATLAB® per tal de:

1. Rectificar la seqüència d'imatges mitjançant el mètode de georeferenciació desenvolupat a Pastor *et al.* (2006) i millorat per Cubells (2009). Aquest mètode necessita conèixer la posició exacta de diversos punts captats per la càmera (les petites torxes col·locades al voltant de les parcel·les), per tal d'aplicar les transformacions matricials adequades i així obtenir una imatge perfectament ortogonal (Figura 5.7).
2. Detectar el punt més avançat del perímetre de flames, tot saturant les imatges a una temperatura de 320 °C, que és el llindar de detecció de flama estàndard (Cruz *et al.*, 2010).

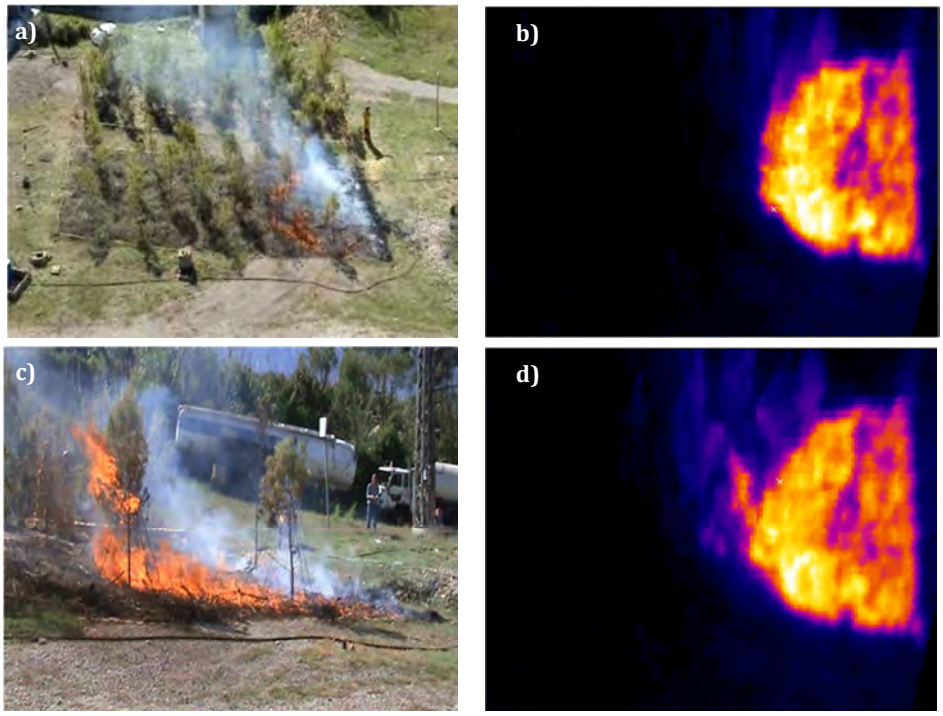

Figura 5.7. Imatges obtingudes amb la càmera de vídeo i la càmera termogràfica. a) Imatge visible d'un instant de la crema de la parcel·la SIMZ-6-1, enregistrada amb la càmera posicionada al cantó de la càmera IR. b) Imatge termogràfica ortorectificada del mateix instant. c) Imatge visible d'un instant de la crema de la parcel·la SIMZ-6-1, un s'observa un foc de torxa. d) Imatge termogràfica ortorectificada del mateix instant.

3. Extreure la funció posició més avançada de la flama respecte el temps amb una freqüència d'una dada per segon. En aquest procés s'aplicà un filtre 'rlowess' (lineal robust amb un *span* de 20 mostres) per tal d'eliminar el soroll de les dades (Figura 5.8), generat bàsicament pels focs de torxa puntuals (sense continuïtat amb el combustible de superfície) que s'anaven produint (vegeu Figura 5.7c i d).

4. Derivar les representacions anteriors per trobar l'evolució de la velocitat de propagació amb el temps i calcular-ne les mitjanes (R_m^{IR}) i les màximes (R_x^{IR}) pels diferents períodes (Figura 5.9).

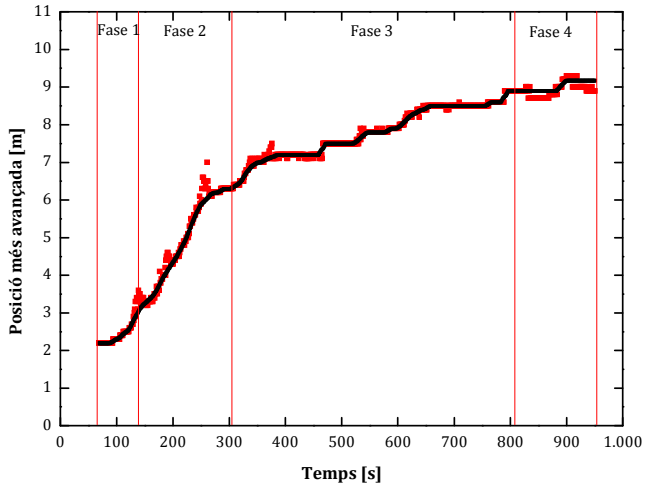

Figura 5.8. Representació de la posició més avançada del front de flames, en les 4 fases de SIMZ-6-1. La línia de punts vermella representa el punt més avançat en cada segon de la prova i la línia de punts negra representa l'evolució posició temps un cop aplicat el filtre.

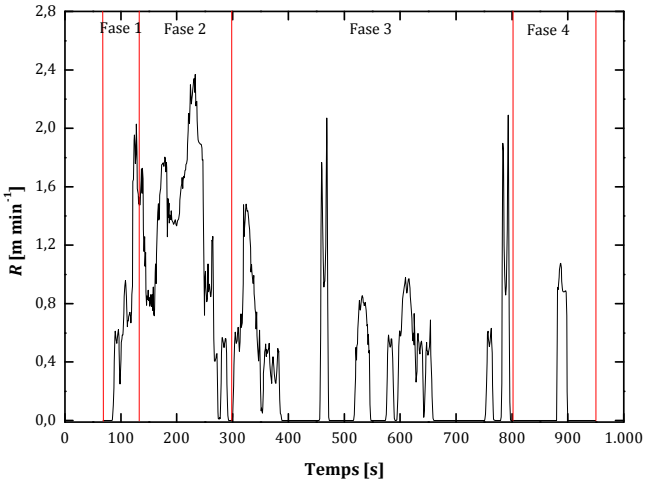

Figura 5.9. Representació de la velocitat al llarg de les diferents fases de la prova SIMZ-6-1.

Temps de residència de les flames i temperatures màximes

El temps de residència (t_r) de les flames i les temperatures màximes (T_{max}) es van obtenir a partir dels termoparells posicionats en les parcel·les. El procediment fou el següent: per a cada experiment, es determinà en quina fase havien estat excitats els termoparells tot observant l'instant de temps en què aquests detectaven la temperatura màxima. Aleshores, a partir de la corba de temperatura en funció del temps proporcionada pel termoparell, es determinà el temps de residència de la flama com aquell interval de temps en què la temperatura enregistrada pel termoparell fou superior a 320 °C (Cruz *et al.*, 2010) (Figura 5.10).

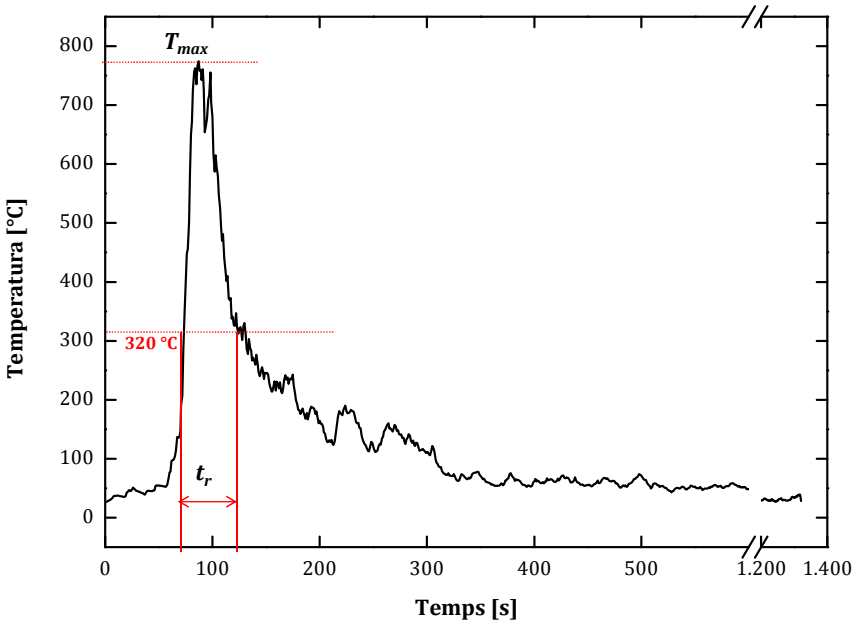

Figura 5.10. Evolució de la temperatura amb el temps enregistrada per un termoparell excitat durant la fase 1 de l'experiment SIMZ-6-1.

Geometria de les flames

Les dades sobre la geometria de les flames (longitud L, angle α, i altura de flama, H) s'obtingueren mitjançant les estimacions visuals efectuades pels observadors de les flames propagant en superfície (H^{obs} *i* α^{obs}) i mitjançant el tractament d'imatges digitals enregistrades durant les proves. Mitjançant aquest tractament, es pogué extreure informació de l'altura de les flames propagant pel combustible de superfície (H^{ID}), de l'altura dels focs de

torxa (H_{tx}^{ID}), de la longitud de les flames (L^{ID}) i de l'angle d'inclinació de les flames (α^{ID}). La representació gràfica de les variables geomètriques emprades en aquest estudi s'il·lustra a la Figura 5.11. Pel que fa als observadors, aquests estimaren visualment l'altura i l'angle de les flames durant diversos instants de les cremes. Aquestes dades s'agruparen per fases i se'n calcularen les mitjanes.

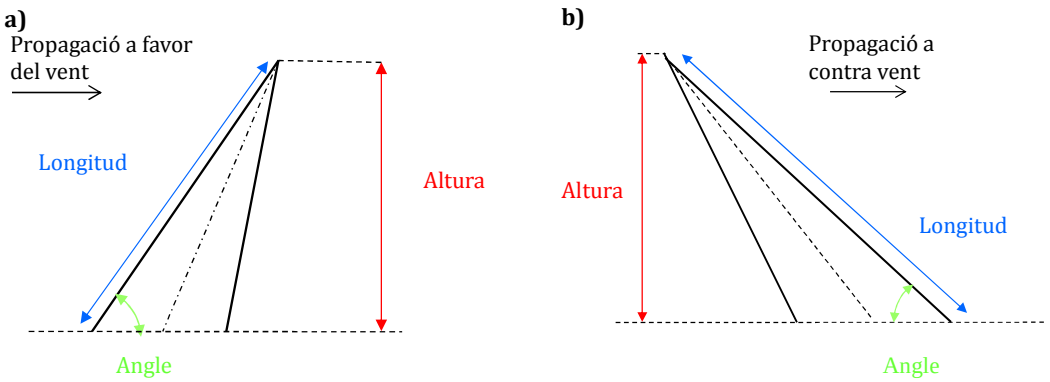

Figura 5.11. Representació esquemàtica de les variables geomètriques de les flames. a) Flames empeses pel vent. b) Direcció de les flames a contra vent.

Per altra banda, el tractament de les imatges es va fer a partir de fotografies enregistrades per les càmeres i a partir de *frames* enregistrats per la càmera de vídeo posicionada a prop de les parcel·les. S'escolliren diferents imatges representatives de cada fase (de l'ordre d'unes 4 imatges per fase) per a cada experiment. El tractament de les imatges va constar de diversos passos. Inicialment es va dimensionar el píxel del pla en què calia mesurar la geometria de les flames. Per fer-ho es van considerar les dimensions conegudes d'elements estructurals de les parcel·les presents en les imatges, aquests foren les barres primes corrugades de ferro de 2 m de longitud que sostenien els arbres. La mida del píxel es va obtenir dividint la dimensió coneguda en metres, pel nombre de píxels en la imatge. Seguidament es dimensionà la flama mitjançant trigonometria, tot donant valor a l'altura, l'angle i la longitud de flama. En la mesura del possible i per tal d'assolir una millor precisió es realitzaren diferents dimensionaments de flames al llarg de tot el perímetre (d'entre 4 i 10 segments dins el perímetre, segons allò que es percebia en la imatge). Aquest procés queda il·lustrat en la Figura 5.12. Finalment es va fer la mitjana per cada imatge i la mitjana de totes les imatges seleccionades per a cada fase.

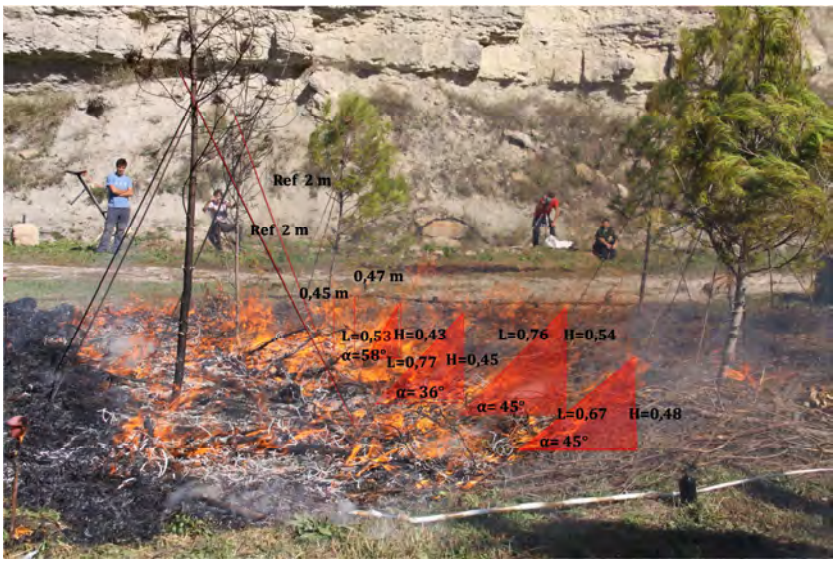

Figura 5.12. Dimensionament de les flames (4 seccions representatives del perímetre), corresponents a un instant de la fase 2 de la prova SIMZ-6-1.

Àrea cremada

L'àrea cremada es va calcular mitjançant el software AutoCad®, després de bolcar la informació del polígon enregistrat amb el GPS tot resseguint l'àrea cremada al finalitzar les proves. La Figura 5.13 il·lustra el perímetre cremat en les tres proves experimentals.

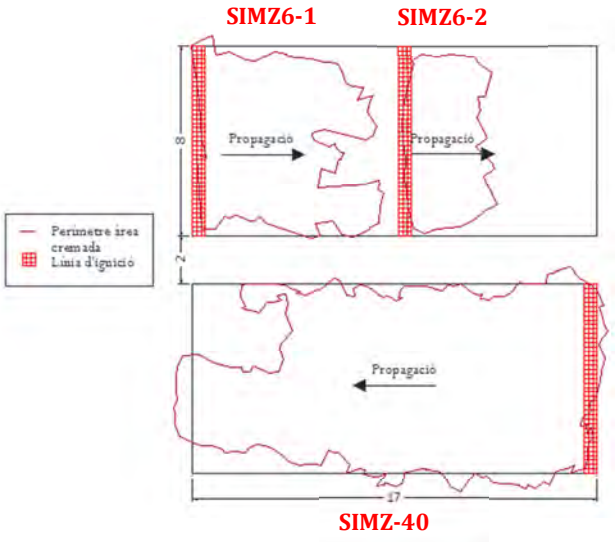

Figura 5.13. Polígons de les àrees cremades en les tres proves experimentals.

5.2. Resultats

5.2.1. Prova experimental SIMZ-6-1

Els resultats per fases de la prova SIMZ-6-1 es mostren a la Taula 5.5. Es valoren les fases 1-4, menystenint tant el període d'ignició i el d'auto-extinció pel que fa als resultats.

Taula 5.5. Resultats de les variables descriptores del comportament del foc per la prova SIMZ-6-1.

Fase	Duració [min: s]	R_m^{obs} (R_x^{obs}) [d.e.; n] [m min^{-1}]	R_m^{IR} (R_x^{IR}) [d.e.; n] [m min^{-1}]	T_{max} [°C]	t_r [s]	H^{obs} [m]	H^{ID} [m]	H_{tx}^{ID} [m]	L^{ID} [m]	α^{obs} [°]	α^{ID} [°]
Ignició	0:57	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Fase 1 Per. continu. Sense vent.	0:56	0,63 (0,67) [0,07;2]	0,52 (1,95) [0,49;64]	774	49	0,4	0,58	n.a.	0,88	90	74
Fase 2 Per. continu. Vent a favor.	2:56	1,39 (2,86) [0,76;8]	1,22 (2,37) [0,636;196]	853	100	0,4	0,58	2,04	0,86	n.d.	54
Fase 3 Per. discontinu. Vent a favor.	8:29	0,38 (0,52) [0,08;5]	0,31 (2,09) [0,43;564]	n.d.	n.d.	0,3	1,06	1,83	1,50	48	52
Fase 4 Per. discontinu. Turbulències.	2:18	0,22 (0,22) [-;1]	0,12 (1,07) [0,31;152]	n.d.	n.d.	0,2	0,2	n.a.	0,28	90	65
Auto-extinció	7:10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Duració total	**23:16**	**Àrea cremada**				47,56 m² (35 % de la parcel·la)					

n.d.: no disponible. n.a.: no aplica. d.e.: desviació estàndard. n: nombre de dades disponibles. Per.: Perímetre del foc.

Les dues primeres fases correspongueren a una evolució d'un perímetre continu de foc, la primera sense vent i la segona, amb vent (de calma, <0,2 m s^{-1}) a favor. Les diferències entre aquests dos comportaments són notables pel que fa a les velocitats de propagació, perquè tant considerant les dades proporcionades pels observadors com les dades extretes de la metodologia IR, es poden observar increments significatius de *R*, tant en els seus valors mitjans (120 % d'increment per R_m^{obs} i 134 % d'increment per R_m^{IR}) com en els seus valors màxims (326 % d'increment per R_x^{obs} i 21,5 % d'increment per R_x^{IR}). Cal assenyalar que les dades de *R* extretes amb la tecnologia IR són més precises, ja que la mostra que configura el càlcul es compon d'una dada per segon en cada fase, mentre que les dades de les observacions visuals són molt menys nombroses. A més, amb la tecnologia IR es poden captar pics instantanis de *R* màximes, que amb les observacions a camp passen

desapercebuts. Nogensmenys, les *R* mitjanes obtingudes amb els dos mètodes són en totes les fases comparables pel que fa al seu ordre de magnitud.

Tanmateix, aquests valors de velocitat de propagació són essencialment baixos i no es corresponen en cap cas als valors que s'haguessin obtingut en cremes experimentals in-situ ni en incendis reals que haguessin ocorregut eventualment en les parcel·les mostrejades de l'àrea d'estudi, sota les mateixes condicions ambientals. Això és degut a la manca de veracitat en la caracterització de la capa de virosta i de la capa d'humus, provocada per l'enfoc ex-situ de l'experimentació.

D'altra banda, s'observà com la presència de vent també implicà un abatiment de les flames i una presència de flames de torxa (discontínues del foc de superfície), afectant la vegetació arbòria, assolint valors de fins a 2 m d'altura. En la tercera fase identificada, tot i el vent, el perímetre es trencà degut a les irregularitats en la disposició del combustible, provocant un decreixement molt important en la velocitat de propagació (decrement del 72 % de la velocitat de propagació segons els observadors i del 76 % segons les dades IR, pel que fa a les velocitats mitjanes). Malgrat això, el vent fou responsable de la presència d'altres focs de torxa propers també als 2 m d'altura. Amb les observacions de les seqüències de vídeo enregistrades, es comptabilitzaren globalment un total de 4 focs de torxa per la SIMZ-6-1. Finalment, l'aparició de irregularitats i turbulències en la direcció del vent, fomentà una propagació erràtica del foc en la fase 4, que donà lloc a l'auto-extinció al cap d'uns minuts, havent quedat afectats prop de 48 m^2 de parcel·la (un 35 % de la superfície total disponible).

En el cas del termoparells les dades de molts d'ells no es van poder aprofitar per diferents raons; perquè no van funcionar, perquè el foc no va arribar-hi o bé perquè es trobaven massa a prop de la línia d'ignició. La informació proporcionada pels termoparells va ser de caràcter orientatiu i essencialment necessària per a validar el mètode IR de càlcul de *R*. No obstant, no es poden extreure conclusions sobre els valors de T_{max} ni t_r recopilats a la taula Taula 5.5 però sí que poden donar una idea de l'ordre de magnitud.

5.2.2. Prova experimental SIMZ-6-2

Els resultats per fases de la prova SIMZ-6-2 es mostren a la Taula 5.6. Únicament es valoren les fases 1 i 2, menystenint tant el període d'ignició i el d'auto-extinció pel que fa als resultats.

Taula 5.6. Resultats de les variables descriptores del comportament del foc per la prova SIMZ-6-2.

Fase	Duració [min: s]	R_m^{obs} (R_x^{obs}) [d.e.; n] [m min^{-1}]	R_m^{IR} (R_x^{IR}) [d.e.; n] [m min^{-1}]	T_{max} [°C]	t_r [s]	H^{obs} [m]	H^{ID} [m]	H_{tx}^{ID} [m]	L^{ID} [m]	α^{obs} [°]	α^{ID} [°]
Ignició	0:30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fase 1 Per. discontinu. Vent a favor.	2:11	1,19 (1,28) [0,12;2]	n.d.	n.d.	n.d.	0,33	0,52	n.a.	0,70	30	53
Fase 2 Per. discontinu. Sense vent.	0:44	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,31	n.a.	0,42	n.d.	62
Auto-extinció	3:59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Duració total	**7:24**	**Àrea cremada**					23.86 m^2 (18 % de la parcel·la)				

n.d.: no disponible. n.a.: no aplica. d.e.: desviació estàndard. n: nombre de dades disponibles. Per.: Perímetre del foc.

El segon experiment dut a terme a la parcel·la SIMZ-6 s'inicià amb perímetre trencat, degut a la manca de continuïtat del combustible de superfície, i amb vent a favor (calma <0,2 m s^{-1}), fet que propicià unes velocitats de propagació amb un ordre de magnitud proper a la fase 2 de l'experiment SIMZ-6-1. Aquest vent també implicà un abatiment de les flames però en aquest cas no propicià l'aparició de focs de torxa, com sí passà en la prova anterior. Tot i l'aleatorietat implícita a l'aparició de focs de torxa, cal assenyalar que aquest fenomen depèn de l'altura de les flames en superfície, i en el cas de l'experiment SIMZ-6-2, aquestes altures foren lleugerament inferiors a les observades en l'experiment SIMZ-6-1. En la fase 2, la manca de vent propicià una caiguda de la velocitat de propagació fet que conduí al cap de poca estona a una auto-extinció de la prova. En aquest cas foren cremats uns 24 m^2, corresponents a un 18 % de la superfície total de la parcel·la SIMZ-6. Degut al comportament poc rellevant del foc en aquesta prova no es considerà necessari realitzar el tractament de la informació proporcionada per la càmera de termografia.

5.2.3. Prova experimental SIMZ-40

Els resultats per fases de la prova SIMZ-40 es mostren a la Taula 5.7. Únicament es valoren les fases 1-3, negligint tant el període d'ignició i el d'auto-extinció pel que fa als resultats.

Taula 5.7. Resultats de les variables descriptores del comportament del foc per la prova SIMZ-40.

Fase	Duració [min: s]	R_m^{obs} (R_x^{obs}) [d.e.; n] [m min^{-1}]	R_m^{IR} (R_x^{IR}) [d.e.; n] [m min^{-1}]	T_{max} [°C]	t_r [s]	H^{obs} [m]	H^{ID} [m]	H_{tx}^{ID} [m]	L^{ID} [m]	α^{obs} [°]	α^{ID} [°]
Ignició	1:06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fase 1 Per. discontinu. Vent variable (a favor en contra)	10:36	0,29 (0,65) [0,24;9]	0,37 (3,82) [0,57;704]	593	44	0,25	0,30	2,09	0,43	15*	49*
Fase 2 Per. discontinu. Vent a favor.	2:05	3,79 (8,57) [2,79;10]	1,95 (12,84) [1,86;139]	555	31	1,35	1,21	2,51	2,13	30	49
Fase 3 Per. discontinu. Vent en contra	2:36	n.d.	0,20 (0,67) [0,25;174]	n.d.	n.d.	n.d.	0,26	1,99	0,41	n.d.	42*
Auto-extinció	9:33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Duració total	**25:56**	**Àrea cremada**					118,61m^2 (87 % de la parcel·la)				

n.d.: no disponible. n.a.: no aplica. d.e.: desviació estàndard. n: nombre de dades disponibles. *es propaga de cua. Per.: Perímetre del foc.

La prova SIMZ-40 s'inicià amb un perímetre trencat, fruit de la disposició del combustible i de la variabilitat en la velocitat del vent. Tanmateix, en la fase 2 d'aquest experiment és quan s'observaren els comportaments de foc més intensos de tota la campanya experimental. Les ratxes de vent propiciaren l'aparició de carreres de foc amb velocitats significatives i molt superiors a les detectades en la fase anterior (R_m^{IR}de 1,95 m min^{-1} amb puntes màximes de fins a 12,84 m min^{-1}), fet que afavorí el consum del combustible de capçades. Al llarg de tota la prova es comptabilitzaren fins a 14 focs de torxa. Aparentment, el comportament del foc en l'experiment efectuat en la parcel·la SIMZ-40 fou més intens i sever que en les dues proves realitzades a la parcel·la SIM Z-6. Tanmateix no es pot dur a terme una comparació fefaent entre les dues parcel·les perquè les condicions de vent foren molt diferents. Durant l'execució de la prova SIMZ-40 s'observaren velocitats de vent més sostingudes i amb ratxes més grans que durant l'execució de les proves a la parcel·la SIMZ-6, fet que condicionà en gran mesura aquest comportament.

La prova SIMZ-40 conclogué amb el 87 % de la parcel·la cremada, i tot i que tal i com ja s'ha dit s'observà un comportament de foc més intens, aquest tampoc es correspon al que s'hagués observat efectuant les cremes in-situ o en un eventual incendi en la parcel·la corresponent a la zona d'estudi, amb les mateixes condicions de temperatura, humitat relativa i vent.

D'altra banda, comparant els valors de t_r de les parcel·les SIMZ-6-1 i SIMZ-40 s'observa que t_r de la parcel·la SIMZ-6-1 és superior al de la SIMZ-40.

5.3. Discussió

Les metodologies de monitorització emprades durant l'execució de les proves i el tractament de dades posterior van ser adequats per obtenir informació precisa i detallada del comportament del foc. Els dos mètodes emprats pel que fa a la caracterització de la velocitat de propagació van ser d'utilitat per calibrar la bondat de les observacions preses in situ.

La continuïtat del combustible i la presència de vent van ser factors claus a l'hora d'explicar el comportament de la propagació del front de flames en les proves executades. Les variacions en la velocitat de propagació i en la geometria de les flames es pogueren explicar en funció de les variacions en la continuïtat del combustible de superfície i en la variació en la velocitat del vent.

Amb l'experimentació ex-situ no s'aconseguí reproduir comportaments de foc similars als que s'haguessin obtingut duent a terme una experimentació in-situ a les parcel·les d'estudi o comportaments de foc similars als d'un eventual incendi real que ocorregués a la zona d'estudi. Això fou degut bàsicament a la mala caracterització de la capa de virosta, tant pel que fa al diàmetre de partícules com a la continuïtat del combustible, i a la manca de capa orgànica en descomposició (humus). Ambdues capes són indispensables per assegurar la continuïtat del perímetre de l'incendi i el seu avanç, i tot i ser presents a les parcel·les d'estudi, no es varen reproduir adequadament a les parcel·les simulades. D'altra banda, cal assenyalar que la longitud del perímetre d'incendi condiciona la seva velocitat de propagació i la magnitud de les flames (Cheney *et al.*, 1993; Pérez, 2010) amb la qual cosa un perímetre d'incendi de 8 m d'amplada com a màxim presentarà un comportament menys intens i menys sever que un perímetre de més longitud (com el que s'hagués donat in situ o en un incendi real).

Els comportaments de foc observats, tot i ser menys intensos que els que s'observarien en la realitat, van donar lloc a un nombre significatiu de focs de torxa persistents en ambdues parcel·les (més torxes comptabilitzades en la SIMZ-40 que en les proves SIMZ-6 ja que van haver-hi ratxes de vent més intenses i la densitat dels arbres també era major). L'estrat arbori, molt jove, va quedar malmès. Això hagués pogut provocar un grau de mortalitat

elevat en els arbres més joves i una afectació menor, però també significativa, en les capçades dels arbres més grans.

S'observaren diferències pel que fa al comportament del foc entre les dues parcel·les cremades, SIMZ-6 i SIMZ-40. Tanmateix, aquestes desviacions no poden ser valorades degut a les grans diferències de comportament de vent durant els experiments.

La relació entre el cost (a nivell logístic, de desplegament de mitjans, de personal i de dedicació posterior per a l'obtenció de resultats) i les conclusions extretes del bloc experimental fan desaconsellable aquest tipus d'experimentació. Ha quedat demostrat que la reproducció de l'ecosistema no és prou fidel en condicions ex-situ.

6. AVALUACIÓ DEL COMPORTAMENT DEL FOC MITJANÇANT SIMULACIONS

El coneixement dels simuladors i dels models implementats en aquests, ha permès escollir les eines més adients per aquest estudi i alhora aprofundir en el seu funcionament. Per tal de poder realitzar un estudi complert que tingui en compte tant observacions empíriques preexistents com aspectes físics i químics del comportament del foc, i a la vegada sigui viable en termes de cost computacional, s'ha cregut convenient escollir dos simuladors, un basat en un model quasiempíric i l'altre en un model físic. El simulador quasiempíric escollit ha estat NEXUS (Scott, 1999), principalment perquè és un simulador molt contrastat i utilitzat en l'avaluació de l'efectivitat dels tractaments de combustible. D'altra banda, com a simulador físic s'ha optat per WFDS (Mell *et al.*, 2007a), ja que en el conjunt de models físics existents és el que requereix d'una capacitat de còmput inferior, té un entorn amigable i és obert a tota la comunitat científica. Mentre que NEXUS ha estat extensament utilitzat, tant en l'àmbit operacional com en recerca, WFDS està encara en fase de desenvolupament i ha estat necessari validar-lo.

En aquest capítol en primer lloc s'inclou una breu descripció dels simuladors utilitzats. A continuació es detalla la metodologia i els resultats obtinguts en les simulacions d'incendis

de les parcel·les experimentals del Bages (caracteritzades en el capítol 4). Finalment es descriu la metodologia i es detallen els resultats de les simulacions de les parcel·les experimentals de Can Padró (capítol 5).

6.1. Breu descripció dels simuladors emprats

6.1.1. NEXUS

NEXUS (Scott, 1999) és un model quasiempíric utilitzat àmpliament com a eina de simulació per avaluar l'efectivitat dels tractaments de combustible (e.g. Fulé *et al.*, 2001b, 2002; Scott, 2006; Manson *et al.*, 2007, etc.). Aquest simulador parteix dels principis bàsics de funcionament de les eines BEHAVEPLUS, FARSITE i FLAMMAP, tot adaptant la interfície gràfica a un format més adient per a la simulació simultània de diversos escenaris experimentals puntuals.

NEXUS 2.0 (la versió utilitzada en aquesta tesi) té una gran flexibilitat i presenta els resultats en forma de taules, gràfics i diagrames. Pot ser útil per a conèixer l'ordre de magnitud dels resultats d'una manera ràpida i tanmateix amb algun detall addicional pel que fa a l'activitat de capçades. Requereix poca capacitat de còmput, amb la qual cosa pot ser implementat a qualsevol ordinador corrent. Tanmateix, com ja s'ha esmentat en el capítol 2, els resultats que s'obtenen poden presentar certes imprecisions degut als errors dels mateixos models matemàtics que porta implementats i a la unió d'aquests models en un únic simulador.

NEXUS incorpora bàsicament tres models matemàtics: el model de Rothermel (1972) que permet avaluar el comportament dels incendis de superfície, el model de transició del foc a capçades de Van Wagner (1977) i el model de propagació del foc per les capçades de Rothermel (1991).

Model de propagació del foc per la superfície (Rothermel, 1972)

Rothermel (1972) va desenvolupar un plantejament teòric basat en el treball de Frandsen (1971) per explicar mitjançant el principi de conservació de l'energia la propagació d'un incendi forestal. Rothermel (1972) va utilitzar eines experimentals i analítiques per resoldre els termes teòrics de les equacions de Frandsen (1971).

Rothermel (1972) va determinar la velocitat de propagació d'un incendi de superfície (R_{supf}) mitjançant una relació entre la calor rebuda per unitat de superfície de combustible i

la densitat d'energia necessària perquè aquest combustible arribi a la temperatura d'ignició. Les característiques del llit de combustible necessàries per resoldre aquesta relació es troben recollides dins els models de combustible. El model es va parametritzar mitjançant experiments de laboratori i inclou dos coeficients adimensionals per avaluar l'efecte del vent i del pendent en la propagació del front, ambdós tenen com a objectiu contemplar un increment de calor que arriba al combustible adjacent.

Model de propagació del foc per les capçades (Rothermel, 1991)

Després d'observar i analitzar les dades corresponents a vuit incendis de gran intensitat ocorreguts a les Muntanyes Rocoses septentrionals d'EUA, entre 1960 i 1980, Rothermel (1991) va obtenir una relació estadística per la predicció de la velocitat de propagació dels incendis amb combustió aèria continuada. Rothermel (1991) va estimar que la velocitat de propagació d'un incendi actiu de capçades (R_{actiu}) era 3,34 cops superior a la velocitat predita pel seu model de superfície, amb les característiques ambientals presents en els incendis reals, utilitzant el model de combustible 10 (Anderson, 1982) i un factor de reducció del vent de 0,4 (per tal d'ajustar la velocitat del vent mesurada a 6,1 m -20 peus- a la velocitat del vent a mitja flama).

Model de transició del foc a capçades

Van Wagner (1977) va presentar un model semiempíric, basat en principis teòrics i combinat amb observacions experimentals, en el que va exposar les condicions per a l'inici de diferents tipologies d'incendis de capçades. Va establir criteris per la predicció dels focs de torxa (incendis passius), de la transició a un incendi amb combustió continuada del material aeri (incendis actius) i finament de l'aparició de foc de capçades independent (incendis actius independents de la propagació del foc de superfície). Mitjançant expressions referides a la intensitat lineal del front i a la velocitat de propagació, va determinar els valors llindar d'aquests paràmetres (I_0 i R_0, respectivament) que indiquen l'aparició d'incendis de capçades actius i passius.

Van Wagner (1977) va definir tres factors limitants (la intensitat del foc de superfície, el flux de calor horitzontal per les capçades i la velocitat de propagació) i dos fases en el procés de transició superfície-capçada (iniciació i propagació) i també va definir tres classes diferents de focs de capçades (passiu, actiu i independent). Segons aquesta classificació un incendi de capçades tindrà lloc quan la intensitat (I) sigui superior a la intensitat crítica (I_0) (Figura 6.1). La intensitat requerida dependrà de la humitat de les fulles de les capçades i de l'altura

de la superfície a la base de la capçada. Si I no és superior a I_0 el foc continuarà propagant per la superfície. Un cop el foc de capçades s'ha iniciat, quan la velocitat de propagació (R_{actiu}) sigui inferior a la velocitat de propagació crítica (R_0) tindran lloc els incendis de capçades passius, mentre que quan I_R i R_{actiu} siguin superiors a I_0 i R_0, respectivament, es produirà un foc actiu. Pel que fa als incendis de capçades actius independents, l'autor estima que la seva aparició es produeix quan el flux horitzontal d'energia per unitat d'àrea necessari per la ignició del combustible aeri, el subministra íntegrament la reacció de combustió de les capçades.

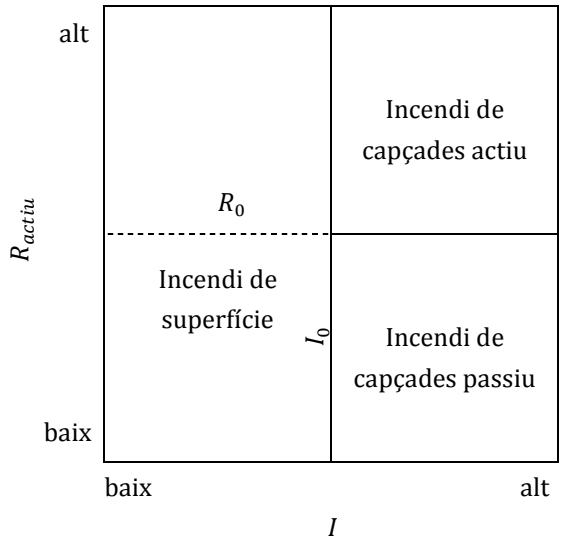

Figura 6.1. Classificació dels incendis de capçades. Adaptat de Scott i Reinhardt (2001)

Classificació dels incendis de capçades a NEXUS

Partint del raonament de Van Wagner (1977), a partir de la modificació de certs paràmetres ambientals, Scott i Reinhardt (2001) definiren dos índexs, l'índex de torxa (*TI*) i l'índex de capçades (*CI*), per tal de quantificar el risc d'incendi de capçades. En els models matemàtics presents a NEXUS les variables ambientals considerades són bàsicament la velocitat del vent i la humitat del combustible mort. D'aquestes, la velocitat del vent és la que té un efecte més important sobre la propagació d'un incendi. Així, Scott i Reinhardt (2001) definiren la velocitat del vent crítica necessària per tal que tingui lloc un incendi actiu sota unes determinades característiques del combustible de superfície i de capçada, i unes determinades condicions d'humitat del combustible (Figura 6.2).

L'índex de torxa (*TI,* km h^{-1}) correspon a la velocitat del vent (mesurada a 6,1 m) en la que es preveu que s'iniciï un incendi de capçades, considerant els models de propagació per superfície de Rothermel (1972) i el criteri d'inici d'un foc de capçades de Van Wagner (1977). *TI* depèn de les característiques del combustible de superfície (recollides en els models de combustible), de les humitats del combustible de superfície, del contingut d'humitat de les fulles de les capçades, de l'altura de la superfície a les capçades, del pendent i de la reducció de la velocitat del vent degut a l'oposició que exerceixen les capçades. L'índex de capçades (*CI,* km h^{-1}) correspon a la velocitat del vent (mesurada a 6,1 m) necessària per tal que es mantingui un incendi de capçades, atenent als models de propagació de capçades de Rothermel (1991) i el criteri pels focs actius de Van Wagner (1977). *CI* depèn de la densitat aparent de les capçades, del pendent i del contingut d'humitat del combustible.

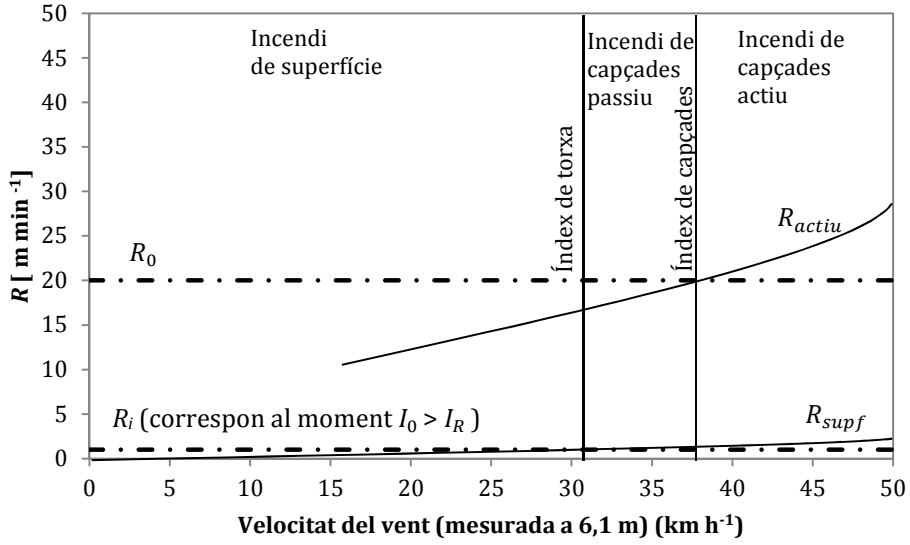

Figura 6.2. Determinació gràfica de l'índex de torxa i de l'índex de capçada. Adaptat de Scott i Reinhardt (2001).

Càlcul de la velocitat de propagació final a NEXUS

NEXUS calcula la velocitat de propagació final (R), ja sigui un incendi de superfície (R_{supf}) o capçades utilitzant un nou paràmetre, la fracció de capçada cremada (*CFB*) (Eq. 6.1).

$$R = R_{supf} + CFB\left(R_{actiu} - R_{supf}\right) \qquad \text{Eq. 6.1}$$

La fracció de capçada cremada pot prendre valors de 0 a 1 (Figura 6.3).. Per velocitats del vent inferiors a *TI*, es preveuen incendis de superfície, per tant *CFB* és 0, i *R* és igual a R_{supf}. Quan les velocitats del vent són superiors a *CI*, es preveuen incendis de capçades actius, *CFB* és 1 i *R* és igual a R_{actiu}. En la regió dels incendis passius, entre *TI* i *CI*, *CFB* pren valors entre 0 i 1, i *R* es troba entre R_{supf} i R_{actiu}.

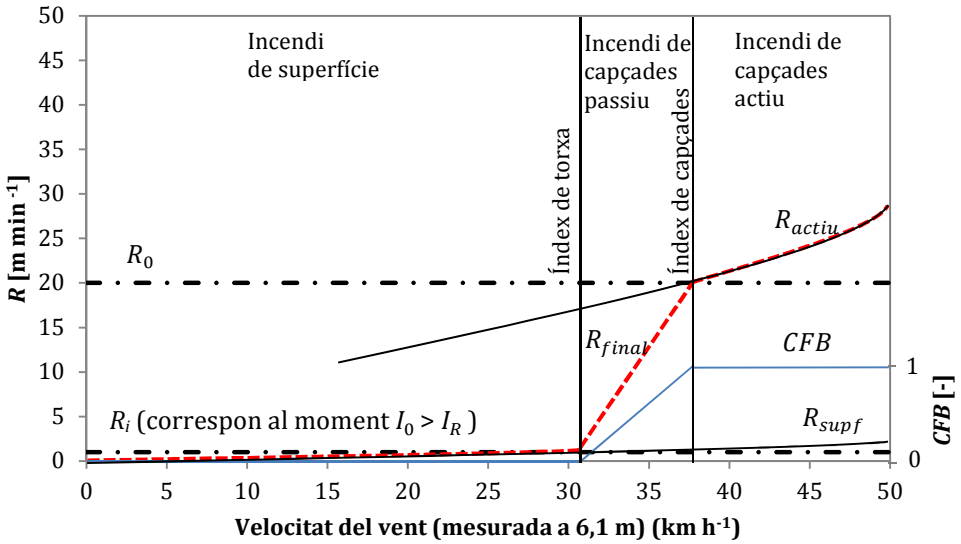

Figura 6.3. Velocitat de propagació final (R_{final}). Adaptat de Scott i Reinhardt (2001). La velocitat de propagació final correspon a la línia vermella i la fracció de capçada cremada (*CFB*) a la línia blava.

6.1.2. WFDS

WFDS (*Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator*) (Mell *et al.*, 2009) és una extensió del software FDS (*Fire Dynamics Simulator*) (McGrattan *et al.*, 2008a) que inclou combustibles vegetals i permet realitzar simulacions a l'exterior, com és el cas dels incendis forestals.

Per treballar amb aquest simulador es necessita un esforç de còmput considerable, amb la qual cosa pot ser recomanable treballar en paral·lel amb diversos ordinadors connectats en xarxa, així com emprar computadors amb multi-processadors. El software FDS és una eina que actualment es troba en desenvolupament i es modifica i actualitza freqüentment, la versió utilitzada en aquesta tesi és la 5.5.3 (d'octubre de 2010). Per generar les imatges i

animacions a partir dels resultats obtinguts pel model s'utilitza el programa *Smokeview* (Forney, 2007).

FDS és una eina de simulació de dinàmica de fluids computacional que resol numèricament una forma de les equacions de Navier-Stokes de moviment dels fluids apropiada per a fluxos conduïts tèrmicament a baixes velocitats, fent especial èmfasi a la generació de fum i al transport d'energia de l'incendi (Alvear *et al.*, 2007).

FDS permet modelitzar diferents fenòmens fisicoquímics com són la transferència de calor per radiació i convecció, les reaccions de piròlisi i combustió de materials per causa d'un incendi, el creixement de l'incendi i propagació de les flames entre d'altres. Els paràmetres d'entrada s'especifiquen a partir de propietats intrínseques del combustible (densitat, composició química, poder calorífic, entre d'altres), de les propietats extrínseques (e.g. altura dels arbres, densitat del combustible de capçades) i a partir de variables del comportament d'aquest incendi referents a la combustió.

El model de combustió utilitzat per FDS és el de combustió de fracció de mescla, és a dir la velocitat de crema es determina a partir de la velocitat amb què el combustible i l'oxigen es barregen. El model assumeix que aquesta combustió està controlada per la mescla, i que la reacció del combustible i l'oxigen es instantània.

FDS tracta la turbulència amb el mètode de simulació de grans remolins (LES, *Large Eddy Simulation*). El principi d'aquesta tècnica és que només es calculen directament els remolins grans, els petits estan amitjanats en el domini. A priori, com més fina és la malla, millor és la resolució de les escales de turbulència i menys important són les suposicions o simplificacions del model.

Funcionament del simulador

L'entrada de dades es realitza a partir d'un fitxer de text en el qual s'hi especifiquen tots els paràmetres d'entrada per definir l'espai a simular, l'inici de la ignició, les característiques de la vegetació, els paràmetres de reacció, l'escenari meteorològic, la humitat del combustible i els dispositius de mesura per obtenir els resultats.

L'espai (3D) on es desenvolupen els càlculs computacionals amb WFDS s'anomena domini i està compost per una malla subdividida en milers o milions de cel·les. El nombre de cel·les

en què es divideix la malla defineix la resolució de les simulacions. El model resol les equacions de Navier-Stokes per a cada cel·la i per a cada unitat de temps.

Pel que fa a l'inici de la ignició, amb WFDS es pot realitzar detallant una franja amb una determinada potencia calorífica sense necessitat d'especificar les propietats de la substància emprada a tal efecte.

Per definir la vegetació s'utilitzen paràmetres fàcilment mesurables com la temperatura inicial de la vegetació, la relació àrea superficial-volum, la humitat del combustible, la densitat del combustible i la densitat aparent del combustible. Tanmateix WFDS també requereix altres paràmetres com la fracció carbonitzada que queda quan es crema la vegetació, el coeficient d'arrossegament que indica la interacció entre el flux gasós i la vegetació per tal de corregir les turbulències superficials que crea el combustible en el flux de vent, la velocitat màxima de crema i la velocitat màxima de deshidratació de la vegetació.

Els paràmetres per simular les reaccions són els que es requereixen per modelitzar la fase gasosa de la combustió (McGrattan *et al.*, 2008b) i fan referència a la composició del combustible (proporció de carboni, hidrogen i oxigen i fracció de sutge del combustible) i a les seves propietats tèrmiques (calor de combustió).

D'altra banda, per calcular la velocitat de propagació, WFDS permet disposar en l'escenari de simulació diferents mesuradors de temperatura (que volen emular sensors) a distàncies conegudes. Per calcular la velocitat de propagació (R, m min^{-1}) es poden disposar de manera equidistant diferents mesuradors de temperatura al llarg del domini. Cada mesurador de temperatura funciona com un termoparell, registrant la temperatura al llarg del temps. Coneixent la distància entre aquests mesuradors i l'instant en què cada mesurador assoleix la temperatura màxima es pot calcular la velocitat de propagació del front. La velocitat de propagació s'obté a partir del pendent de la recta de regressió entre les posicions dels mesuradors de temperatura i els corresponents instants en què assoleixen la temperatura màxima.

WFDS també proporciona l'evolució de la potència calorífica (HRR, kW) emesa pel foc al llarg del temps de la simulació, essent d'especial rellevància el valor màxim (HRR_{max}) d'aquesta corba. HRR és fàcilment comparable amb la intensitat lineal (I), ja que aquesta darrera es pot obtenir dividint la potència calorífica emesa per la unitat de longitud del front d'incendi. Un altre paràmetre d'interès que proporciona WFDS és l'energia total alliberada durant l'incendi (EAT, kJ), que s'obté de la integració de la corba HRR(t) generada pel simulador.

6.2. Simulacions amb NEXUS

6.2.1. Entrada de dades

Amb l'eina de càlcul NEXUS es van simular un total de 30 incendis diferents, que corresponien a 5 parcel·les (Z-control, Z-1, Z-6, Z-26 i Z-40) amb les dos situacions meteorològiques considerades (ponentades i ones de calor de sud) i amb 3 percentils diferents pel que fa a la severitat de les condicions meteorològiques (percentils 75, 95 i 99).

Les dades que es van introduir a NEXUS es poden agrupar en tres blocs: les utilitzades per caracteritzar el combustible de superfície, per avaluar les condicions ambientals i per descriure el combustible de capçades. Els paràmetres utilitzats pel combustible de superfície corresponen bàsicament a les característiques que defineixen l'estructura i l'estat del combustible (per estrats i classes diametrals). Pel que fa a l'estructura i propietats tèrmiques del combustible, a la Taula 6.1 se'n recullen les principals dades introduïdes.

Cal assenyalar que la parcel·la Z-Control es va simular en tots els escenaris definint una capa única i contínua de combustible de superfície (model de combustible Z-control$_s$ detallat al capítol 4), ja que tal com s'ha esmentat al capítol 4 la parcel·la original de regenerat de pi blanc sense cap tractament presentava una gran continuïtat del combustible arbustiu completament difós entre el combustible arbori jove. Altrament, les parcel·les Z-1, Z-6, Z-26 i Z-40 es van definir emprant dos estrats, el de superfície (que incloïa les capes de virosta, herba, arbusts, restes de tala i pins més joves) i l'estrat de capçades (que incloïa els pins d'altura superior a 130 cm).

Les dades que van diferenciar les simulacions, van ser aquelles que depenien dels diferents escenaris meteorològics, que eren la humitat del combustible mort d'1h, 10h i 100h, la humitat del combustible viu herbaci i llenyós, la humitat del combustible de capçades i la velocitat del vent. Aquestes dades van ser extretes segons la pauta explicada en el capítol 3. Per la caracterització topogràfica del terreny es van considerar totes les parcel·les uniformes i sense pendent.

D'altra banda, atès que la velocitat del vent disminueix per la fricció amb la superfície, NEXUS permet multiplicar la velocitat del vent (mesurada a 6,1 m) per un factor de reducció del vent (*WRF*) per a estimar la velocitat del vent a la meitat de la flama, i d'aquesta manera predir de forma més acurada el comportament del foc (Taula 6.2). En el cas que hi hagi combustible de

capçades, per determinar el *WRF* cal tenir en compte la cobertura d'aquest combustible (Finney, 1998). Quan només hi hagi combustible de superfície, el *WRF* dependrà del model de combustible, el qual caldrà assimilar a un dels 13 models estàndards (Anderson, 1982) segons les taules creades per Rothermel (1983).

Taula 6.1. Caracterització del combustible (superficial i de capçades) utilitzat en les simulacions de les parcel·les d'estudi amb NEXUS.

Paràmetre d'entrada		**Parcel·la**				
		Z-Control$_s$	**Z-1**	**Z-6**	**Z-26**	**Z-40**
Model de combustible	W_{1h} [t ha^{-1}]	6,2	27,1	22,7	8,6	8,7
	W_{10h} [t ha^{-1}]	1,6	19,9	14,9	8,5	5,3
	W_{100h} [t ha^{-1}]	0,8	9,2	2,4	7,3	0,4
	W_{Lh} [t ha^{-1}]	23,8	0,1	0,3	1,2	0,8
	W_{Lw} [t ha^{-1}]	21,6	0,1	0,1	1,1	2,4
	σ_{1h} [cm^{-1}]	41,9	35,8	29	27,3	21,2
	σ_{Lh} [cm^{-1}]	66,8	77,6	77,6	77,6	77,6
	σ_{Lw} [cm^{-1}]	16,2	17	23,1	28,8	26,4
	D_s [cm]	227	23	16	24	21
	Humitat d'extinció [%]	30	30	30	30	30
	PCI_d [kJ kg^{-1}]	19.987	19.792	19.612	19.492	19.327
	PCI_l [kJ kg^{-1}]	20.487	17.972	17.007	17.155	17.654
Combustible de capçades	*ACBD*[kg m^{-3}]	n.a.	0,092	0,143	0,206	0,139
	CBH[m]	n.a.	1,21	1,21	1,02	0,66
	ACFL[t acre^{-1}]	n.a.	0,656	0,818	1,385	0,741

Taula 6.2. Determinació del factor de reducció del vent (*WRF*) per les parcel·les a simular (Font: Rothermel, 1983).

Criteri 1. Cobertura del combustible de capçades			
Model de combustible	**Cobertura [%]**	**Rang de valors de cobertura [%]**	***WRF***
Z-1	31	30-50	0,15
Z-6	19	15-30	0,20
Z-26	48	30-50	0,15
Z-40	21	15-30	0,20
Criteri 2. Model de combustible similar			
Model de combustible	**Model a què s'assimila**		***WRF***
Z-control$_s$	Model 4		0,60

6.2.2. Resultats

Els resultats de les simulacions realitzades amb NEXUS per a estimar el comportament potencial del foc en les diferents parcel·les es presenten a la Taula 6.3, Taula 6.4 i Taula 6.5 que es corresponen cada una d'elles a un dels diferents percentils de severitat utilitzats. A la part superior de cada taula, es recullen els resultats d'incendis de ponentades, mentre que a la part inferior es recullen els resultats d'ona de calor de sud.

Les variables recollides fan referència al tipus d'incendi esdevingut (de superfície, de capçades passiu o de capçades actiu), als descriptors bàsics de comportament de foc (velocitat de propagació, longitud de flama, intensitat lineal i calor emès per unitat d'àrea cremada, essent aquest últim concepte el producte del poder calorífic i la càrrega superficial de combustible consumida) i a l'afectació de l'incendi a les capçades, expressant la fracció de combustible de capçades cremat, l'índex de torxa i l'índex de capçades actiu. A la Figura 6.4 es detalla l'evolució de la velocitat de propagació segons la situació meteorològica i l'escenari de severitat per totes les parcel·les.

Taula 6.3. Comportament del foc per a percentil 75 en vent de ponent i ones de calor de sud.

Vent de ponent					
Parcel·la	Z-control	Z-1	Z-6	Z-26	Z-40
Tipus de foc	Superfície	Passiu	Actiu	Actiu	Actiu
Velocitat de propagació (*R*) [m min^{-1}]	16,47	17,16	23,13	23,13	22,94
Calor per unitat d'àrea (*HPUA*) [kJ m^{-2}]	11.128	30.873	31.763	24.683	30.703
Intensitat lineal del foc (*I*) [kW m^{-1}]	3.055	8.830	12.247	9.517	11.739
Longitud de la flama (*L*) [m]	3,1	9,6	14,2	12,0	13,8
Fracció cremada de les capçades (*CFB*) [%]	0	0,72	1	1	1
Índex de torxa (*TI*) [km h^{-1}]	-	9,7	13,9	25,6	3,3
Índex de capçades actiu (*CI*) [km h^{-1}]	-	52,8	38,4	29,4	39,2
Ones de calor de sud					
Parcel·la	Z-control	Z-1	Z-6	Z-26	Z-40
Tipus de foc	Superfície	Passiu	Passiu	Actiu	Passiu
Velocitat de propagació (*R*) [m min^{-1}]	11,81	9,22	12,9	16,63	13,47
Calor per unitat d'àrea (*HPUA*) [kJ m^{-2}]	11.128	29.920	30.652	24.683	29.787
Intensitat lineal del foc (*I*) [kW m^{-1}]	2.191	4.598	6.589	6.842	6.687
Longitud de la flama (*L*) [m]	2,7	5,6	8,2	9,6	8,5
Fracció cremada de les capçades (*CFB*) [%]	0	0,51	0,76	1	0,8
Índex de torxa (*TI*) [km h^{-1}]	-	9,7	13,9	25,6	3,3
Índex de capçades actiu (*CI*) [km h^{-1}]	-	52,8	38,4	29,4	39,2

Taula 6.4. Comportament del foc per a percentil 95 en vent de ponent i ones de calor de sud.

Vent de ponent					
Parcel·la	Z-control	Z-1	Z-6	Z-26	Z-40
Tipus de foc	Superfície	Actiu	Actiu	Actiu	Actiu
Velocitat de propagació (*R*) [m min^{-1}]	27,02	37,26	37,26	37,22	36,92
Calor per unitat d'àrea (*HPUA*) [kJ m^{-2}]	11.128	32.149	31.765	24.817	30.986
Intensitat lineal del foc (*I*) [kW m^{-1}]	5.011	19.966	19.728	15.396	19.069
Longitud de la flama (*L*) [m]	3,9	19,6	19,5	16,5	19,0
Fracció cremada de les capçades (*CFB*) [%]	0	1	1	1	1
Índex de torxa (*TI*) [km h^{-1}]	-	6,5	9,8	16,8	1
Índex de capçades actiu (*CI*) [km h^{-1}]	-	45,8	33,3	25,4	34
Ones de calor de sud					
Parcel·la	Z-control	Z-1	Z-6	Z-26	Z-40
Tipus de foc	Superfície	Passiu	Passiu	Actiu	Passiu
Velocitat de propagació (*R*) [m min^{-1}]	14,8	14,03	19,8	20,35	19,22
Calor per unitat d'àrea (*HPUA*) [kJ m^{-2}]	11.818	32.302	33.277	25.889	32.116
Intensitat lineal del foc (*I*) [kW m^{-1}]	2.915	7.554	10.984	8.781	10.287
Longitud de la flama (*L*) [m]	3,0	8,4	13,0	11,3	12,2
Fracció cremada de les capçades (*CFB*) [%]	0	0,67	0,97	1	0,95
Índex de torxa (*TI*) [km h^{-1}]	-	4,2	7,5	14,4	0,4
Índex de capçades actiu (*CI*) [km h^{-1}]	-	44	31,9	24,3	32,6

Taula 6.5. Comportament del foc per a percentil 99 en vent de ponent i ones de calor de sud.

Vent de ponent					
Parcel·la	Z-control	Z-1	Z-6	Z-26	Z-40
Tipus de foc	Superfície	Actiu	Actiu	Actiu	Actiu
Velocitat de propagació (*R*) [m min^{-1}]	33,3	48,88	48,88	48,84	48,41
Calor per unitat d'àrea (*HPUA*) [kJ m^{-2}]	10.557	30.754	30.407	23.989	30.011
Intensitat lineal del foc (*I*) [kW m^{-1}]	5.860	25.055	24.772	19.529	24.215
Longitud de la flama (*L*) [m]	4,2	22,8	22,6	19,3	22,3
Fracció cremada de les capçades (*CFB*) [%]	0	1	1	1	1
Índex de torxa (*TI*) [km h^{-1}]	-	6,5	9,6	14,4	0,2
Índex de capçades actiu (*CI*) [km h^{-1}]	-	42,5	30,8	23,4	31,4
Ones de calor de sud					
Parcel·la	Z-control	Z-1	Z-6	Z-26	Z-40
Tipus de foc	Superfície	Passiu	Actiu	Actiu	Actiu
Velocitat de propagació (*R*) [m min^{-1}]	15,36	16,92	22,31	22,27	22,08
Calor per unitat d'àrea (*HPUA*) [kJ m^{-2}]	12.640	35.847	35.368	27.220	34.117
Intensitat lineal del foc (*I*) [kW m^{-1}]	3.235	13.329	13.151	10.102	12.554
Longitud de la flama (*L*) [m]	3,2	15,0	14,8	12,5	14,4
Fracció cremada de les capçades (*CFB*) [%]	0	0,74	1	1	1
Índex de torxa (*TI*) [km h^{-1}]	-	0,3	3,6	8,7	0
Índex de capçades actiu (*CI*) [km h^{-1}]	-	37,6	27,2	20,6	27,7

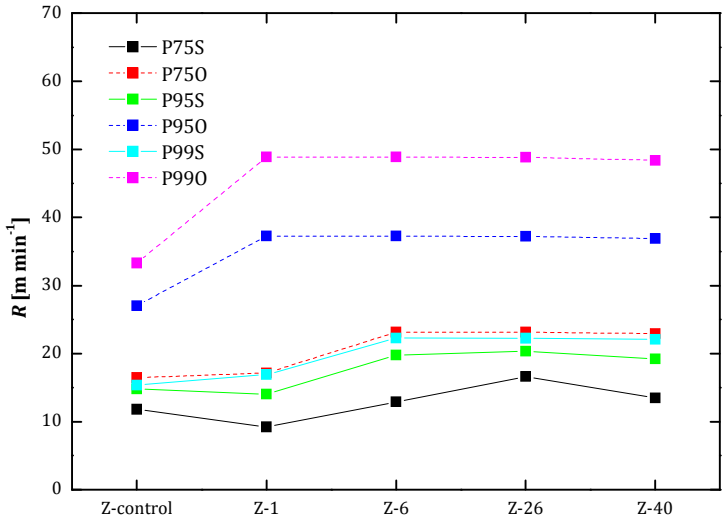

Figura 6.4. Velocitats de propagació (m min^{-1}) per a les parcel·les simulades amb NEXUS per les situacions meteorològiques de vent de ponent (O) (línies discontinues) i d'ones de calor de sud (S) (línies continues) pels diferents percentils (P75, P95 i P99).

6.2.3. Discussió

Els resultats obtinguts es poden analitzar des de dues perspectives, tenint en compte les diferències entre els escenaris de vent de ponent i d'ones de calor de sud o bé, tenint en compte les diferències entre parcel·les per a cada escenari. Tot seguit se'n fa una discussió seguint aquests dos punts de vista.

Diferències entre els escenaris d'ones de calor de sud i de vent de ponent

Segons els resultats obtinguts, la calor per unitat d'àrea (*HPUA*) és pràcticament independent del tipus d'escenari plantejat, és a dir, de vent de ponent o d'ones de calor de sud (Figura 6.5a). Ara bé, la velocitat de propagació (*R*) és més gran en els escenaris de vent de ponent (Figura 6.5b).

Atès que la intensitat lineal del front de flames es calcula multiplicant la velocitat de propagació per la calor per unitat d'àrea, les diferències entre els dos escenaris pel que fa a aquesta variable també són importants, obtenint-se intensitats lineals en els escenaris de vent de ponent entre un 39,1 % i un 164,3 % més grans respecte als escenaris d'ones de calor de sud (valors corresponents a la parcel·la Z-26 pel percentil 75 i a la parcel·la Z-1pel percentil 95, respectivament).

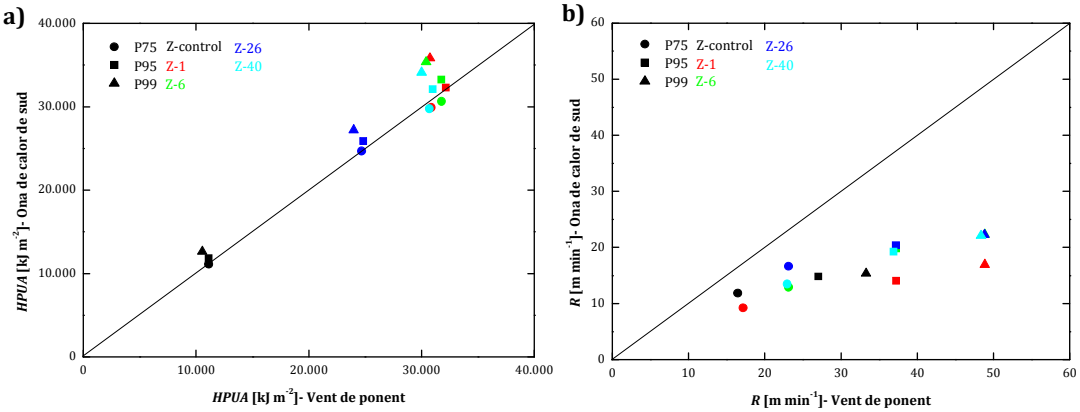

Figura 6.5. Comparació de la calor per unitat d'àrea (*HPUA*) a) i la velocitat de propagació (*R*) b) entre els incendis de vent de ponent i d'ones de calor de sud.

De manera corresponent, tenint en compte que la longitud de les flames es calcula a partir de relacions potencials amb la intensitat lineal del front (Byram, 1959; Thomas, 1963), les longituds de flama també són més grans en els escenaris de vent de ponent respecte als escenaris d'ones de calor de sud, entre un 14,8 % (Z-control, percentil 75) i un 133,3 % (Z-1, percentil 95).

Pel que fa a l'índex de capçades actiu (*CI*) gairebé no existeixen diferències per als dos escenaris (Figura 6.6a). Per contra, les diferències en l'índex de torxa (*TI*) són marcades, especialment en el percentil 99 (Figura 6.6b). Aquests resultats s'expliquen tenint en compte quines variables intervenen en el càlcul d'aquests índexs.

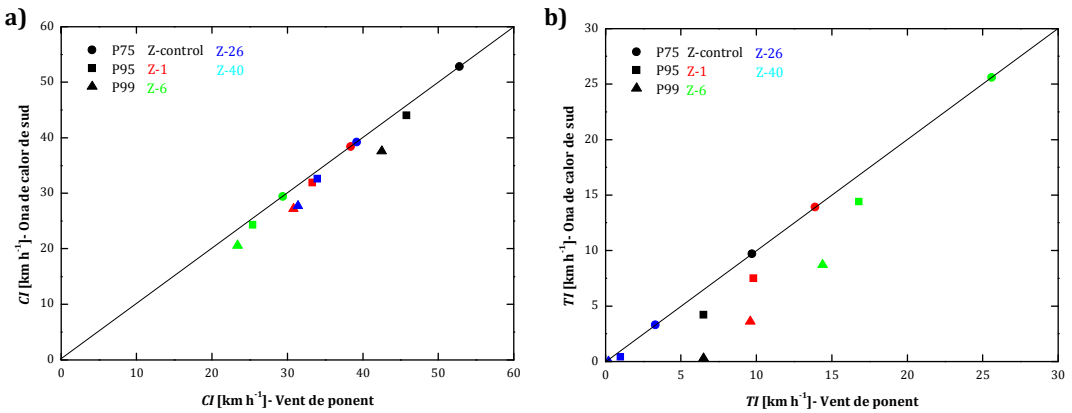

Figura 6.6. Comparació de l'índex de capçades (*CI*) (a) i l'índex de torxa (*TI*) (b) entre els incendis de vent de ponent i d'ones de calor de sud.

El *CI* depèn, bàsicament, de la humitat del combustible, del pendent del terreny i de la densitat aparent de les capçades. Per a una mateixa parcel·la en els dos escenaris meteorològics (ponentades versus ona de sud), el pendent del terreny, i la densitat aparent de les capçades no varien. Així, les petites diferències que es computen (0–13,6 %) vénen donades per les diferències en la humitat del combustible. Això es pot veure a la a Figura 6.6 a, on el *CI* en el cas del percentil 75 és el mateix per al dos escenaris, ja que la humitat del combustible en els dos escenaris no varia.

El *TI* depèn del tipus de model de combustible de superfície, de la humitat del combustible de superfície, de l'altura a la base de les capçades, de la humitat del fullatge del combustible de capçades i de la reducció de la velocitat del vent per efecte de les capçades (*WRF*). Per a una mateixa parcel·la, totes aquestes variables, excepte la humitat del combustible de superfície, són iguals entre escenaris. Així, la humitat del combustible de superfície explica les diferències. Cal remarcar, però, que la humitat del combustible provoca un efecte més gran sobre el *TI* que sobre el *CI*. Això es deu a què l'equació utilitzada per calcular *TI* presenta factors multiplicadors superiors a la feta servir per calcular *CI*, i per tant les diferències són més grans per *TI.*

Diferències entre parcel·les

Al capítol 4 ja s'ha vist que existeixen diferències importants entre parcel·les pel que fa a la situació de partida. Per això, no es poden comparar els resultats de les simulacions de les parcel·les Z-control, Z-1 i Z-6 amb els de les parcel·les Z-26 i Z-40. És per això que aquí només es discuteixen en detall els resultats associats a les tres primeres.

El tipus de foc que es prediu a la parcel·la Z-control és de superfície; això és així en tant que en el tipus de simulació escollida per a aquesta parcel·la no hi ha combustible de capçades. D'altra banda, el tipus d'incendi que s'estima per a la Z-1 és passiu de capçades en tots els percentils de l'escenari d'ona de calor de sud. En l'escenari de vent de ponent, en aquesta parcel·la només es prediu un foc passiu per al percentil 75; per als altres dos percentils es prediuen incendis actius de capçades. A la parcel·la Z-6, als percentils 75 i 95 de l'escenari d'ona de calor de sud es prediuen incendis passius de capçades, però ja al percentil 99 el comportament que es prediu és el d'un incendi de capçades actiu. En l'escenari de vent de ponent, el tipus de foc es prediu de capçades actives en totes les parcel·les, per tots tres percentils (exceptuant la Z-1 al percentil 75), a més, a la parcel·la Z-6 el comportament del foc pel que fa al tipus d'incendi és pitjor que el de la Z-1.

Els resultats indiquen que hi ha un augment significatiu de la calor per unitat d'àrea després del tractament (169-191 % a les parcel·les Z-1 i Z-6). Aquest resultat té a veure amb el fet que el combustible dels arbres que en la Z-control estava viu, després d'1 o 6 mesos del tractament acaba essent mort. La velocitat de propagació, per contra, no mostra variacions tan elevades respecte a la situació que es dóna a la Z-control (variació màxima d'un 47 %) i, fins i tot, en l'escenari d'ona de calor de sud disminueix entre un 5 % i un 22 % en els percentils 75 i 95, respectivament, per a la Z-6. Aquest comportament és causat pel fet que el vector més important que fa propagar el foc és el vent, i en els diferents escenaris d'ona de sud, el vent és significativament inferior que en les ponentades.

Pel que fa a les altres dues parcel·les, Z-26 i Z-40, es pot dir que el comportament del foc que s'observa a la parcel·la Z-40 és similar al de la parcel·la Z-6. Això es deu bàsicament al fet que la càrrega disponible de les capçades i la densitat aparent d'aquestes són similars en ambdues parcel·les. La densitat aparent de les capçades determina en un grau important l'índex de capçades actiu (*CI*), el qual, a la vegada, determina si el foc serà de capçades actiu o passiu. Com que en la en la majoria de situacions plantejades s'estimen focs actius, la càrrega disponible de les capçades també acaba fixant en un grau important la velocitat de propagació, que també és similar entre la Z-40 i la Z-6.

La densitat aparent del combustible de capçades (*ACBD*) de la parcel·la Z-26 és un 44-48 % més gran que la de les parcel·les Z-6 i Z-40. L'*ACBD* determina de manera significativa com serà el foc, si passiu o actiu de capçades. Llavors, les diferencies significatives d'*ACBD* entre la Z-26 i les parcel·les Z-6 i Z-40 expliquen que en tots els escenaris simulats, tant situacions de vent de ponent com en ones de calor de sud , s'hagin obtingut focs actius de capçades per Z-26 i en canvi per Z-26 i Z-40 en ones de calor de sud pels percentils 75 i 95 s'hagin obtinguts focs passius de capçades. Les diferencies d'*ACBD* entre Z-26 i Z-6 i Z-40 també expliquen que la velocitat de propagació sigui lleugerament superior en els escenaris de la parcel·la Z-26 respecte als escenaris de les parcel·les Z-6 i Z-40 quan en aquestes dues últimes s'estima un foc passiu de capçades.

6.3. Simulacions amb WFDS

WFDS és una eina relativament recent i encara està en fase de desenvolupament. Per aquesta raó, prèviament a utilitzar el model per simular les parcel·les d'estudi, es va creure convenient realitzar una parametrització inicial de l'eina a petita escala utilitzant valors experimentals coneguts. A tall d'exemple a l'Annex II s'han recopilat dos dels arxius amb el

codi utilitzat per les simulacions, un corresponent a la parametrització del model i l'altre a una de les parcel·les del Bages.

6.3.1. Parametrització del model

La metodologia de treball per realitzar les simulacions amb WFDS va constar d'un estudi inicial de sensibilitat del domini i la malla, en el que s'avaluaven els resultats obtinguts en variar les dimensions del domini (altura, amplada i longitud) i de la malla, per tal de fixar les dimensions més adients. A continuació es va realitzar un estudi de sensibilitat dels paràmetres d'entrada del model per tal d'avaluar la seva importància relativa. Un cop coneguts els paràmetres més sensibles es va procedir a calibrar-los ja que alguns dels paràmetres es desconeixien i el valor utilitzat provenia de la bibliografia. Finalment es van dur a terme les simulacions predictives utilitzant els paràmetres calibrats per validar el model. La parametrització es va basar en el treball de Pérez (2010) en el que es van realitzar diferents proves experimentals en una taula de combustió sobre un llit de palla d'ordi (*Hordeum vulgare*) amb una amplada i altura variable (Taula 6.6 i Figura 6.7). En l'experimentació de Pérez (2010) es va utilitzar diferent aparellatge (termoparells, càmera de vídeo, càmera infraroja, etc.) per determinar les variables descriptores del comportament del foc com la velocitat de propagació o l'altura de la flama, entre d'altres.

Taula 6.6. Característiques del llit de combustible en els experiments de Pérez (2010) i velocitats de propagació obtingudes en cada cas.

Prova experimental	Amplada [m]	Altura [m]	Longitud [m]	n	R [m min^{-1}]
W25	0,25	0,02	1,5	5	0,462 (0,052)
W50	0,50	0,04	1,5	4	0,627 (0,028)
W100	1,00	0,08	1,5	8	0,996 (0,105)

Figura 6.7. Imatges registrades per Pérez (2010) de la prova experimental W100. a) 10 segons després de la ignició. b) 52 segons després de la ignició.

Construcció de l'escenari de simulació

L'escenari de simulació (Figura 6.8) es va construir reproduint amb la major fidelitat possible l'escenari real. L'escenari constava d'una taula de combustió d'acer de 3,0 m de longitud, 1,6 m d'amplada i 0,8 m d'altura, amb dos entrades d'aire de 0,20 m i 0,15 m d'altura situades en els dos extrems oposats de la taula i sense sostre. Sobre la taula de combustió hi havia una campana d'extracció (3,6 m de longitud, 2,2 m d'amplada i 0,60 m d'altura) amb un flux d'extracció natural que sortia a l'exterior mitjançant un tub quadrat de 0,26 m de secció. El llit de combustible simulat fou el corresponent a W100 (Taula 6.7). Tanmateix, tot i que en l'escenari real el llit de combustible es va situar a la part anterior de la taula de combustió, en les simulacions es va posicionar a la seva part central per tal d'evitar l'efecte de la línia d'ignició sobre la velocitat de propagació.

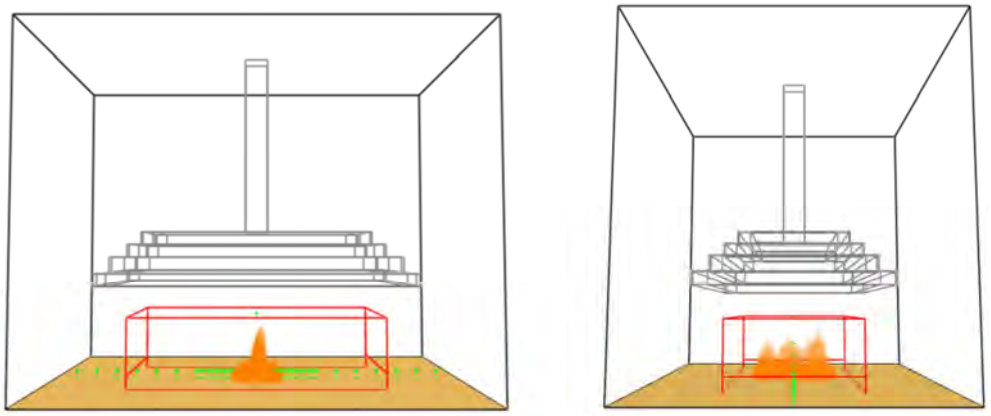

Figura 6.8. Imatges de la simulació dels experiments de Pérez (2010), 69 segons després de la ignició. a) Vista del costat longitudinal. b)Vista frontal.

Pel que fa als paràmetres de reacció de la palla, com a fracció de sutge del combustible es va utilitzar el valor de 0,02 (Mell *et al.*, 2009). El número d'àtoms d'oxigen, carboni i hidrogen utilitzat fou de 2,46 mols d'oxigen, 3,60 mols de carboni i 4,96 mols d'hidrogen calculats a partir de les fórmules empíriques de Gaur i Reed (1998). Per definir la calor de combustió es va fer servir el *PCI* de la palla d'ordi (16.148 kJ kg^{-1}) detallat a Pérez (2010).

La relació àrea superficial-volum, la densitat del combustible, la densitat aparent de la vegetació i l'altura del combustible es van obtenir a partir de les dades dels experiments reals. Pel que fa a la resta de paràmetres que es necessiten amb WFDS per caracteritzar com

crema el combustible, es van agafar valors de referència obtinguts a partir de la bibliografia (Mell *et al.*, 2009). Aquests paràmetres són la fracció carbonitzada (0,07), el coeficient d'arrossegament (0,375), la velocitat màxima de crema i la velocitat màxima de deshidratació de la vegetació, fixats aquests dos darrers a 0,4 kg m^{-3} s^{-1}.

Taula 6.7. Valors d'entrada per a descriure amb WFDS el combustible de superfície de la prova experimental W100 (font: Pérez, 2010).

Paràmetre d'entrada	**Valors**
Relació àrea superficial-volum [m^{-1}]	16.339
Densitat del combustible [kg m^{-3}]	595
Densitat aparent del vegetació [kg m^{-3}]	7,5
Humitat del combustible [%]	6,1
Altura de la vegetació [m]	0,08

En els experiments originals la línia d'ignició consistia en un fil de llana xopat amb gasolina, col·locat al llarg de tota l'amplada del llit de combustible (1 m), en un dels seus extrems. En el cas de la simulació, la línia d'ignició tenia la mateixa longitud però era més ampla (0,25 m) per tal d'assegurar que la ignició fos suficient per iniciar l'incendi. La potència calorífica fou de 250 kW m^{-2} (Mell *et al.*, 2007b). La ignició començava 1,5 segons després de l'inici de la simulació i durava 25 segons.

En l'experimentació real s'utilitzà la termografia infraroja per determinar la velocitat de propagació, en el cas de les simulacions es van fer servir diferents mesuradors de temperatura. Els termoparells es van col·locar en un pla vertical imaginari posicionat longitudinal al centre de la taula a una altura de 0,1 m i separats entre ells 0,25 m.

Estudi preliminar de sensibilitat del domini i la malla

Les dimensions del domini i la mida de la malla tenen un efecte important en el comportament de l'incendi. Per tal de definir el domini i la mida de les cel·les més adients en termes de temps computacional i fidelitat dels resultats es va realitzar un estudi de sensibilitat. El criteri de comparació utilitzat fou la velocitat de propagació.

L'estudi de sensibilitat del domini i la malla s'inicià a partir d'un escenari preliminar (Figura 6.9) que contenia 388.000 cel·les de 0,05 x 0,05 x 0,05 m cadascuna i tenia unes dimensions de 5,0 x 3,6 x 2,8 m. Partint d'aquest escenari preliminar es va analitzar separadament l'efecte de la longitud, amplada, altura del domini i de la mida de les cel·les.

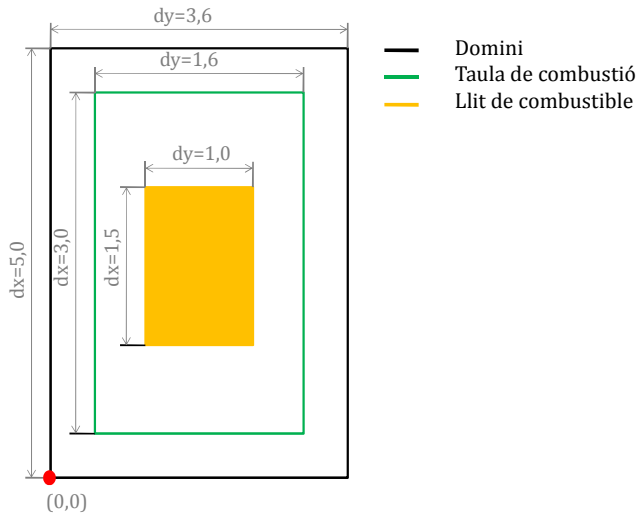

Figura 6.9. Vista aèria de l'escenari preliminar.

Els valors de velocitat de propagació obtinguts per diferents altures, longituds i amplades del domini i per diverses mides de malla es mostren a la Figura 6.10, on també es detalla el valor mitjà i la desviació estàndard de *R* obtingut en els experiments reals de Pérez (2010). Aquesta figura va permetre trobar en quin moment hi havia convergència cap al mateix valor i per tant escollir el domini i malla òptims en els que tot i augmentar les seves dimensions els resultats no variaven significativament. En la majoria de casos els valors dels experiments reals van ser inferiors als de les simulacions, motiu pel qual es va decidir realitzar un calibratge a posteriori.

La mida de les cel·les de la malla, seguida de l'altura del domini, van ser els factors que van provocar una major variabilitat en la velocitat de propagació (d.e. 2,14 i 0,44 m min^{-1}, respectivament) i no van mostrar convergència cap a un valor concret. A partir dels resultats es va observar que l'augment de l'altura del domini provocava un increment no lineal en la velocitat de propagació. Degut a la falta de convergència en aquest cas concret es va optar per utilitzar l'altura real de l'emplaçament on estava la taula de combustió, que corresponia a 4 m. Pel que fa a la malla, es va utilitzar una mida de cel·la petita, de 4 cm per costat, però que alhora permetés realitzar les simulacions amb un temps raonable.

L'amplada i la longitud del domini no tenien un efecte important en la velocitat de propagació (d.e. 0,12 i 0,11 m min^{-1}, respectivament), amb tots dos factors s'obtenien valors

de *R* força constant. Per tal de reduir el temps computacional necessari per realitzar les simulacions es va escollir com a òptim un domini de 3,6 m d'amplada i 5 m de longitud.

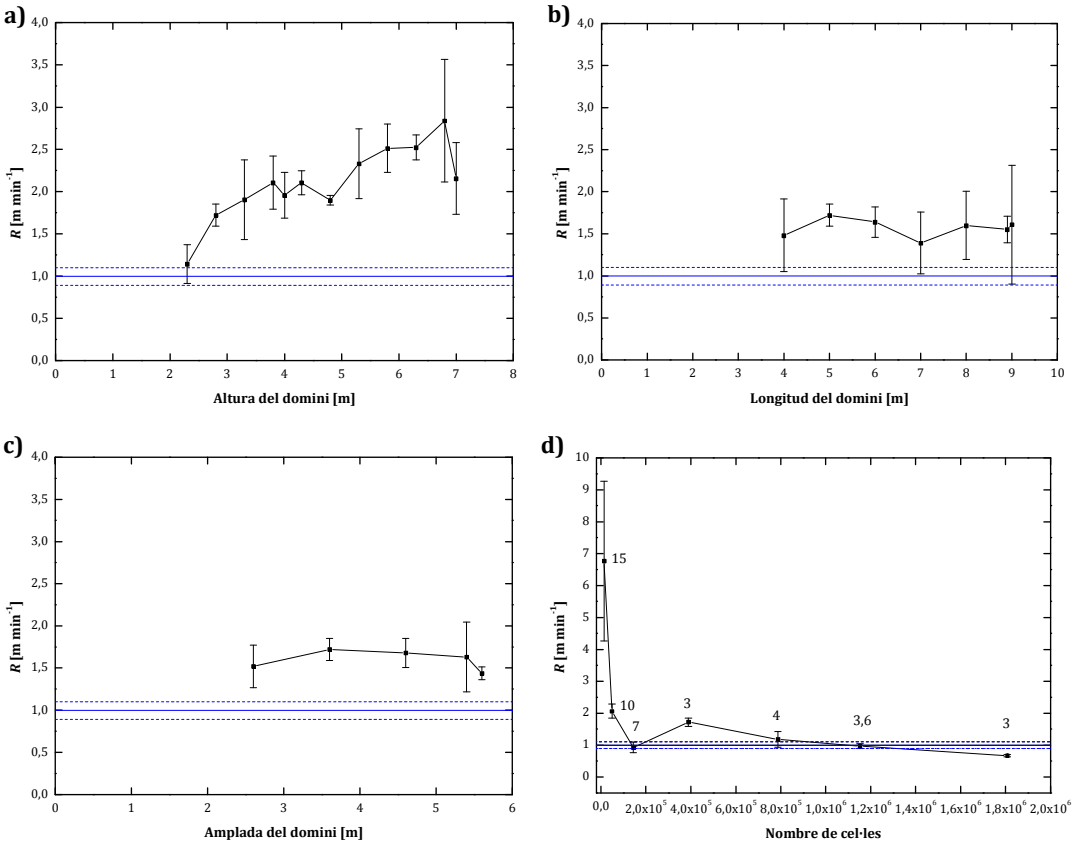

Figura 6.10. Velocitat de propagació [m min^{-1}] obtinguda en l'estudi preliminar de sensibilitat del domini i de la malla. a) Altura del domini. b) Longitud del domini. c) Amplada del domini. d) Malla, s'indica la mida de la cel·la [cm]. La velocitat de propagació de l'experiment real es mostra en una línia blava continua, la desviació estàndard s'indica en una línia blava discontinua.

En resum, el domini escollit va ser un domini obert de 5 m de llargada, 3,6 m d'amplada i 4 m d'altura amb una mida de cel·la de 0,035 x 0,036 x 0,037 m i un total de 1.555.200 cel·les. Cal esmentar que les cel·les no tenien les mateixes dimensions per tots els costats degut al propi funcionament del simulador, ja que una part important de les operacions que realitza FDS utilitzen un programa de resolució d'equacions de Poisson que només accepta determinades divisions de la malla (McGrattan *et al.*, 2008b).

Amb aquest domini i malla, la velocitat de propagació obtinguda va ser de 2,286 m min^{-1}, valor encara molt allunyat de l'obtingut en els experiments reals (0,996 m min^{-1}). Per tal d'ajustar els valors de les simulacions als obtinguts experimentalment i a la vegada determinar els valors dels paràmetres desconeguts es va procedir a analitzar la sensibilitat dels paràmetres d'entrada i realitzar-ne un posterior calibratge.

Anàlisi de sensibilitat dels paràmetres

L'estudi de sensibilitat va consistir en una anàlisi per determinar la influència relativa dels paràmetres d'entrada sobre les variables de sortida que proporcionava el model. D'aquesta manera es podien identificar els paràmetres que calia estimar més acuradament.

Per realitzar l'estudi de sensibilitat s'escolliren 12 paràmetres que descrivien el combustible, la reacció de combustió i la temperatura ambiental (Taula 6.8). Es realitzaren tres simulacions per cada paràmetre; una amb el mateix valor del paràmetre que l'utilitzat en l'estudi de sensibilitat del domini i la malla, la segona incrementant el seu valor un 10 % i la tercera disminuint-lo un 10 %. El valor de la resta dels paràmetres es mantenia constant. Per cada simulació es va obtenir el valor de *R* i a continuació es va calcular la sensibilitat de cada paràmetre a partir de l'Eq. 6.2 (Bartelink, 1998).

$$RS = \frac{R_{+10\%} - R_{-10\%}}{0{,}2\ R} \qquad \text{Eq. 6.2}$$

On *RS* és la sensibilitat relativa, $R_{+10\%}$ és el valor de *R* quan el valor inicial del paràmetre ha incrementat un 10 %, $R_{-10\%}$ és el valor de *R* quan el valor del paràmetre ha disminuït un 10 % i *R* és el valor del paràmetre per defecte, que és 2,286 m min^{-1}. Valors de *RS* inferiors a 1 indiquen insensibilitat (<0,5) o sensibilitat baixa (0,5-1); valors superiors a 1 indiquen sensibilitat del model, que es pot dividir en sensibilitat moderada (1-2) i alta (>2).

L'estudi de sensibilitat va mostrar que la majoria de paràmetres no eren sensibles (Taula 6.8), únicament el poder calorífic inferior tenia una sensibilitat moderada i la densitat aparent una sensibilitat baixa. El tercer i quart paràmetre més sensible van ser la humitat del combustible i la velocitat màxima de crema, respectivament.

Taula 6.8. Sensibilitat relativa dels paràmetres utilitzats en la parametrització del model.

Paràmetre d'entrada	*RS*	Sensibilitat
Fracció de sutge	0,03	Insensible
Poder calorífic inferior	1,55	Moderada
Temperatura ambiental	0,01	Insensible
Temperatura inicial de la vegetació	0,14	Insensible
Relació àrea superficial-volum	0,00	Insensible
Humitat del combustible	0,42	Insensible
Fracció carbonitzada	0,04	Insensible
Coeficient d'arrossegament	0,21	Insensible
Densitat del combustible	0,18	Insensible
Densitat aparent del combustible	0,71	Baixa
Velocitat màxima de crema	0,37	Insensible
Velocitat màxima de deshidratació	0,01	Insensible

Calibratge paramètric

A partir dels resultats de sensibilitat obtinguts, es van escollir tres paràmetres per realitzar-ne el calibratge; el poder calorífic inferior, la densitat aparent i la velocitat màxima de crema. El poder calorífic inferior i la densitat aparent eren els dos paràmetres pels que el model presentava una sensibilitat més elevada i calia determinar-los acuradament. Particularment el poder de combustió era un paràmetre idoni per ser calibrat ja que es va obtenir a partir de la bibliografia (capítol 4) perquè la seva determinació experimental era difícil i requeria de la utilització d'una bomba calorimètrica. A més, per realitzar les simulacions amb WFDS es necessitava un únic valor pel poder calorífic que representés tot el combustible tot i que aquest és un paràmetre particular i específic per a cada espècie. Com a tercer paràmetre, enlloc d'escollir la humitat del combustible, que es va obtenir experimentalment de manera fiable, es va triar la velocitat màxima de crema, ja que aquest era un paràmetre no conegut obtingut a partir de la bibliografia (Mell *et al.*, 2009) i el seu calibratge era més aconsellable que la humitat del combustible.

Per tal de calibrar els tres paràmetres escollits, es partí d'un disseny factorial amb 3 nivells (3^3), essent els valors dels tres paràmetres els valors per defecte i els valors de +/- un 10 % (tal i com es va fer en l'anàlisi de sensibilitat). D'aquesta manera s'obtingueren 27 escenaris de simulació diferents (deixant la resta de paràmetres no sensibles amb el seu valor per defecte) dels quals se n'obtingué la R i se'n computà la diferència amb el valor experimental (0,996 m min^{-1}), obtenint així ΔR.

A partir d'aquest disseny factorial (3^3) es pot modelitzar la superfície de resposta ΔR segons la funció descrita en l'equació 6.3 (Box *et al.*, 1989):

$$\Delta R = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^1 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 \qquad \text{Eq. 6.3}$$

On x_1, x_2 i x_3 són els valors que prenen el poder calorífic inferior, la densitat aparent i la velocitat màxima de crema, respectivament i b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13} i b_{23} són els paràmetres del model.

Els paràmetres d'aquest model es van obtenir mitjançant una estimació lineal amb el mètode dels mínims quadrats, essent doncs la superfície de resposta obtinguda:

$$\begin{aligned}\Delta R = {} & -1.61 \cdot 10^{-1} - 2.58 \cdot 10^{-10} x_1^2 - 1.05 \cdot 10^{-3} x_2^2 - 3.56 \cdot 10^{-2} x_3^2 - 5.09 \cdot 10^{-7} x_1 x_2 \\ & + 5.06 \cdot 10^{-6} x_1 x_3 + 2.11 \cdot 10^{-3} x_2 x_3 + 1.09 \cdot 10^{-5} x_1 + 1.94 \cdot 10^{-2} x_2 \\ & - 1.15 \cdot 10^{-2} x_3\end{aligned} \qquad \text{Eq. 6.4}$$

Un cop ajustada la superfície de resposta ΔR s'establiren els valors pels paràmetres poder calorífic inferior, densitat aparent i velocitat màxima de crema mitjançant criteris d'optimització, imposant la minimització de ΔR, és a dir que la diferència entre la R simulada i l'experimental fos mínima. Mitjançant l'algoritme d'optimització de Gradient Reduït Generalitzat (Ravindran *et al.*, 2006) s'obtingueren uns valors de poder calorífic inferior de 16.148 kJ kg^{-1}, densitat aparent de 7,2775 kg m^{-3} i velocitat màxima de crema de 0,35744 Kg m^{-3} s^{-1} amb un valor per ΔR de $3{,}75 \cdot 10^{-10}$, és a dir una diferència entre la velocitat simulada i l'experimental pràcticament inexistent.

Simulació predictiva

El darrer pas en la parametrització del model va ser realitzar simulacions predictives de les altres dos proves experimentals (W25 i W50) de Pérez (2010), amb els valors obtinguts dels paràmetres en el calibratge i d'aquesta manera validar els resultats.

El valor de R obtingut en la simulació predictiva de W25 (0,30 m min^{-1}) va ser raonablement proper al dels experiments reals (0,42 m min^{-1}). Per W50 es va obtenir una molt bona aproximació de R (en les simulacions, R va valer 0,66 m min^{-1} i la dada experimental real va ser de 0,63 m min^{-1}).

Les simulacions dels experiments de Pérez (2010) van servir per detectar els paràmetres als que el model era més sensible, i ajustar els valors d'entrada més sensibles o els menys coneguts. Alhora, la parametrització del model també va ser útil per comparar els resultats de les simulacions amb els del cas real i comprovar que el model (amb els ajusts incorporats) prediu amb una elevada fiabilitat els resultats obtinguts en els experiments reals. Els ajusts realitzats en la parametrització del model es van incorporar posteriorment a les simulacions de les parcel·les d'estudi del Bages

6.3.2. Simulacions a les parcel·les d'estudi

Construcció de l'escenari de simulació

L'escenari de simulació per cadascuna de les parcel·les d'estudi (Z-control, Z-1, Z-6, Z-26 i Z-40) es va compondre de parcel·les de 20 x 20 m. La franja d'ignició es va col·locar a la part anterior de la parcel·la, amb unes dimensions de 2 x 20 m. Entre la franja i la parcel·la es va deixar una secció d'1 x 20 m que contenia únicament vegetació de superfície per tal d'evitar que la ignició afectés directament a la propagació del foc per la parcel·la (Figura 6.11).

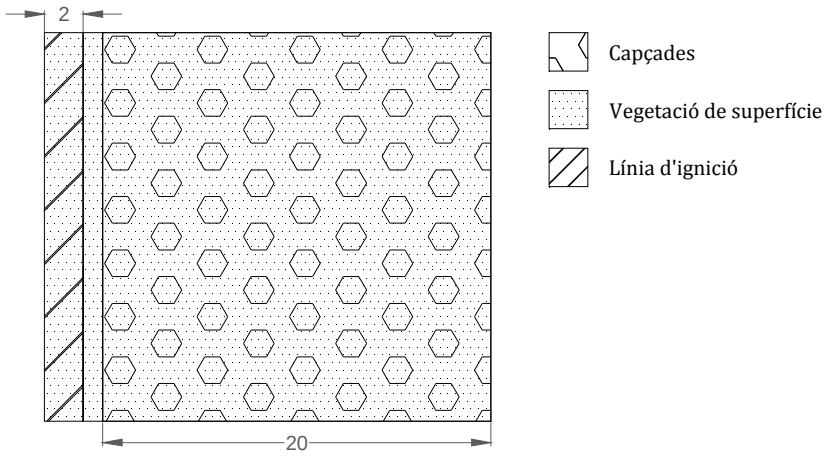

Figura 6.11. Esquema de la disposició del combustible en les parcel·les a simular (cotes en m).

El combustible de les parcel·les es va definir mitjançant dues capes; una capa inferior formada pel combustible de superfície i una de superior formada pel combustible de capçades. Pel que fa al combustible de superfície aquest estava format per una capa uniforme i homogènia representativa dels estrats de virosta, herbaci, restes, arbustos i arbres joves.

Els paràmetres d'entrada requerits pel simulador es van ponderar tenint en compte el percentatge de cobertura de cada estrat (Taula 6.9 i Taula 6.10).

Taula 6.9. Valors d'entrada per a descriure amb WFDS el combustible de superfície de les parcel·les d'estudi.

Paràmetre d'entrada	**Z-control**	**Z-1**	**Z-6**	**Z-26**	**Z-40**
Relació àrea superficial-volum [m^{-1}]	3.873	3.779	3.492	3.998	3.432
Densitat del combustible [kg m^{-3}]	484	481	477	469	472
Densitat aparent de la vegetació [kg m^{-3}]	0,8	4,6	5,5	1,3	1,7
Altura de la vegetació [m]	0,65	0,23	0,16	0,24	0,21

Taula 6.10. Valors d'entrada per a descriure amb WFDS el combustible de capçades de les parcel·les d'estudi.

Paràmetre d'entrada	**Z-control**	**Z-1**	**Z-6**	**Z-26**	**Z-40**
Relació àrea superficial-volum [m^{-1}]	4.546	4.546	4.546	4.546	4.546
Densitat del combustible [kg m^{-3}]	478	478	478	478	478
Densitat aparent de la vegetació [kg m^{-3}]	11,06	4,10	7,97	3,83	6,47

La relació àrea superficial-volum, la densitat del combustible, la densitat aparent de la vegetació i l'altura del combustible es van obtenir a partir de les dades dels mostrejos. La fracció carbonitzada (0,25) i el coeficient d'arrossegament (0,375) es van treure de valors existents en la bibliografia (Mell *et al.*, 2009). Com a velocitat màxima de crema i la velocitat màxima de deshidratació de la vegetació es van utilitzar els valors optimitzats en la tasca de parametrització del model (0,3574 kg m^{-3} s^{-1}).

Per tal de distribuir els arbres de manera aleatòria en les parcel·les però a la vegada sense que se solapessin els uns amb els altres, les parcel·les es van dividir en quadrícules i es va col·locar un arbre dins de cadascuna de les quadrícules, però enlloc d'ubicar cada arbre en un lloc concret de la quadrícula, els arbres es van distribuir de forma aleatòria dins d'aquesta. El nombre de quadrícules per parcel·la coincidia amb el nombre d'arbres de cada parcel·la (Taula 6.11).

Taula 6.11. Densitat arbòria de les parcel·les simulades amb WFDS

Paràmetre d'entrada	**Parcel·la**				
	Z-control	**Z-1**	**Z-6**	**Z-26**	**Z-40**
Nombre d'arbres	465	18	18	36	32
Densitat per parcel·la [peus ha^{-1}]	34.191	1.324	1.324	2.647	2.353

Seguidament, es va especificar la geometria de les capçades dels arbres. Aquestes es van definir mitjançant una morfologia cònica, amb la qual cosa es va haver d'especificar la seva amplada, altura, i altura de la base de la capçada respecte el terra. Els troncs es van definir com a figures cilíndriques i es va especificar el seu diàmetre (Taula 6.12).

Taula 6.12. Valors d'entrada per a descriure geomètricament amb WFDS el combustible de capçades de les parcel·les d'estudi.

Paràmetre d'entrada	**Parcel·la**				
	Z-control	**Z-1**	**Z-6**	**Z-26**	**Z-40**
Geometria de la capçada	cònica	cònica	cònica	cònica	cònica
Altura de la base de la capçada [m]	0,930	1,21	1,21	1,02	0,66
Amplada de les capçades [m]	0,79	0,91	1,04	1,05	1,15
Altura de l' arbre [m]	2,27	3,01	3,02	2,93	2,17
Geometria del tronc	cilíndrica	cilíndrica	cilíndrica	cilíndrica	cilíndrica
Diàmetre del tronc [m]	0,015	0,032	0,025	0,030	0,017

La composició del combustible es va obtenir a partir de la bibliografia (Ritchie *et al.*, 1997). Per al combustible de superfície es va utilitzar el poder calorífic inferior amitjanat de les diferents espècies presents als estrats herbaci i arbustiu, i per al combustible de capçades es va fer servir el valor de les acícules de pi blanc, única espècie present a l'estrat arbori. Els valors es van ponderar entre els dos estrats per a obtenir un valor únic per a cada parcel·la (Taula 6.13).

Taula 6.13. Poders calorífics inferiors ponderats (kJ kg^{-1}) per a les parcel·les d'estudi.

Paràmetre d'entrada	**Parcel·la**				
	Z-control	**Z-1**	**Z-6**	**Z-26**	**Z-40**
Poder calorífic inferior [kJ kg^{-1}]	19.286	17.898	16.938	17.084	17.583

La potència calorífica de la ignició va ser de 250 kW m^{-2}. La ignició començava 31 segons després de l'inici de la simulació per deixar temps a què el vent s'estabilitzés i durava 15 segons. Els termoparells es van col·locar en un pla vertical imaginari posicionat longitudinal al centre de la taula a una altura de 0,1 m i separats entre ells 0,25 m.

Es van simular els 6 escenaris meteorològics descrits en el capítol 3 per cada parcel·la. Per a la temperatura inicial de la vegetació es va assumir el mateix valor que per a la temperatura ambient, tant pel que fa a la vegetació de superfície com de capçades. La humitat del combustible es va definir individualment per a cadascuna d'aquestes capes, la de superfície i

la de capçades. Pel combustible de superfície es va utilitzar la humitat del combustible d'1h i pel combustible de capçades la humitat de les acícules.

Pel que fa al vent, en les simulacions aquest provenia del mateix costat en el que hi havia la línia d'ignició i s'iniciava des del primer moment de la simulació. La velocitat del vent es va definir amb un perfil de vent obtingut a partir del model de Pasquill (1961) considerant una estabilitat atmosfèrica de classe A.

Estudi preliminar de sensibilitat del domini i de la malla

L'estudi del domini i de la malla es va realitzar únicament en una de les parcel·les, a la Z-1, ja que totes presentaven un escenari de simulació semblant. L'escenari preliminar contenia 560.000 cel·les de 0,03 x 0,03 x 0,03 m cadascuna i tenia unes dimensions de 42 x 30 x 12 m. Partint d'aquest escenari preliminar es va analitzar separadament l'efecte de la longitud, amplada, altura del domini i de la mida de les cel·les.

Els valors de velocitat de propagació obtinguts per diferents altures, longituds i amplades del domini i per diverses mides de malla es mostren a la Figura 6.12. La mida de les cel·les va ser el factor que va provocar una variació més accentuada en la velocitat de propagació (d.e. 11,29 m min^{-1}) (Figura 6.12). Es va observar que en incrementar el nombre de cel·les del domini (que és el mateix que dir en disminuir la mida de les cel·les) *R* presentava una tendència a incrementar. Atesa la falta de convergència dels valors, es va escollir una mida de cel.la petita (21 x 21 x 22 cm) però que permetés realitzar les simulacions en un temps raonable.

La llargada i altura del domini van tenir efectes considerables en *R* (d.e. 4,48 i 3,05 m min^{-1}, respectivament) però no tant pronunciats com la mida de les cel·les. La llargada escollida va ser de 34 m perquè tot i que entre els 37 i 47 m de llargada *R* augmentava, a partir d'una llargada de 50 m prenia valors semblants als obtinguts en 34 m. Seguint el mateix raonament, l'altura escollida fou d'11 m. En variar l'amplada del domini, *R* va presentar una variació menor (d.e. 1,76 m min^{-1}) que en variar la resta de factors. L'amplada escollida pel domini final va ser de 31 m d'amplada perquè amb amplades superiors els valors de *R* eren semblants.

Els valors obtinguts en l'estudi del domini-malla de les parcel·les del Bages presentaven una variabilitat superior que en el cas de la reproducció dels experiments de Pérez (2010) (d.e. 2,14 per la mida de les cel·les de la malla, 0,44 per l'altura, 0,12 per l'amplada i 0,11 m min^{-1},

per la longitud del domini). La mida de les cel·les va ser en tots dos casos el factor responsable de les variacions de *R* més grans respecte a la resta de factors. En canvi, la llargada del domini en les parcel·les del Bages va tenir efectes més destacats respecte la resta de factors que en les simulacions dels experiments en la taula de combustió.

Així doncs, les dimensions del domini escollit van ser 34 m de longitud, 31 m d'amplada i 11 m d'altura amb una mida de cel·la de 0,21 x 0,21 x 0,22 m i un total de 1.215.000 cel·les.

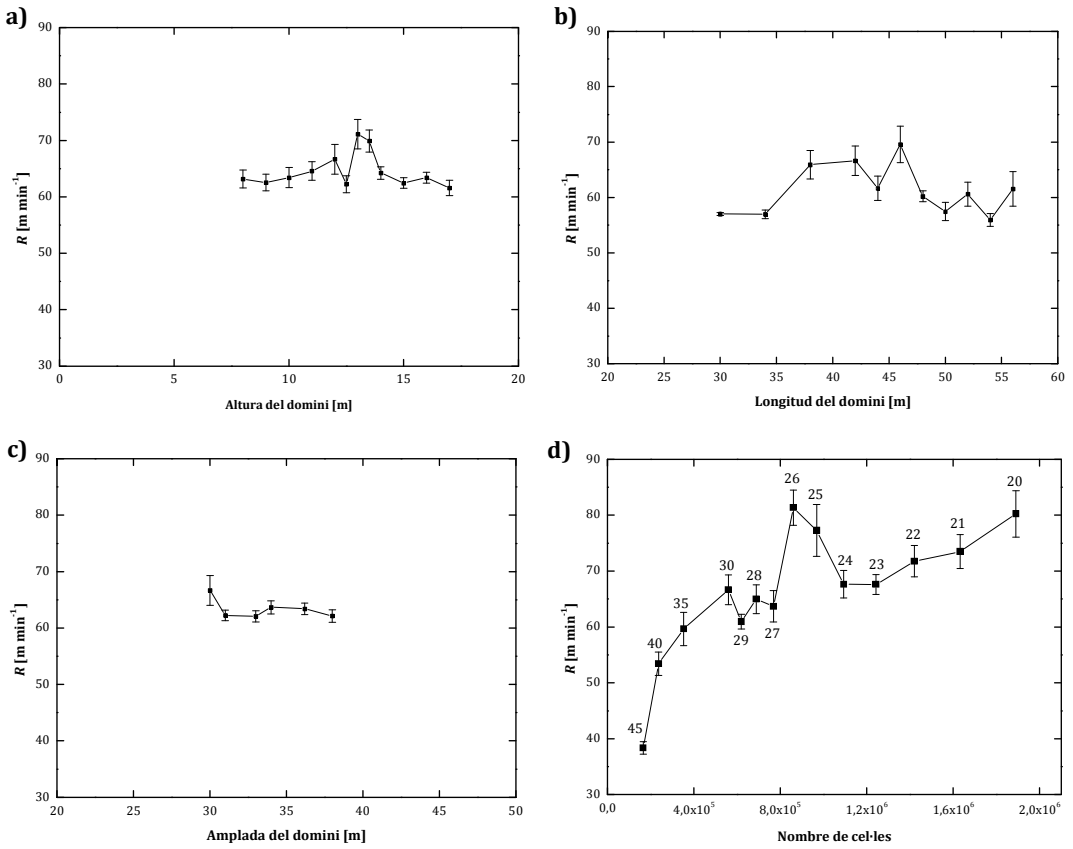

Figura 6.12. Velocitat de propagació [m min^{-1}] obtinguda en l'estudi preliminar de sensibilitat del domini i de la malla per la parcel·la Z-1. a) Altura del domini. b) Longitud del domini. c) Amplada del domini. d) Malla, s'indica la mida de la cel·la [cm].

Anàlisi de sensibilitat dels paràmetres

Malgrat que per les parcel·les experimentals no es podia fer un calibratge ja que no es disposava de valors reals experimentals, es va realitzar també l'estudi de sensibilitat per tenir una idea de quins paràmetres eren els més sensibles.

Per l'anàlisi de sensibilitat s'escolliren els mateixos paràmetres que els que s'escolliren prèviament, però en aquest cas es va considerar oportú estudiar també la sensibilitat dels paràmetres descriptors de la vegetació de capçades, de manera que foren 21 finalment els paràmetres escollits (Taula 6.14).

Taula 6.14. Sensibilitat relativa dels paràmetres utilitzats per simular les parcel·les d'estudi

Paràmetre d'entrada	***RS***	**Sensibilitat**
Fracció de sutge	0,19	Insensible
Poder calorífic inferior	1,97	Moderada
Temperatura ambiental	0,01	Insensible
Combustible de superfície		
Temperatura inicial de la vegetació	0,72	Baixa
Relació àrea superficial-volum	0,11	Insensible
Humitat del combustible	0,32	Insensible
Fracció carbonitzada	0,13	Insensible
Coeficient d'arrossegament	0,48	Insensible
Densitat del combustible	0,10	Insensible
Densitat aparent del combustible	1,12	Moderada
Velocitat màxima de crema	0,66	Baixa
Velocitat màxima de deshidratació	0,26	Insensible
Combustible de capçades		
Temperatura inicial de la vegetació	0,04	Insensible
Relació àrea superficial-volum	0,12	Insensible
Humitat del combustible	0,73	Baixa
Fracció carbonitzada	0,70	Baixa
Coeficient d'arrossegament	0,98	Baixa
Densitat del combustible	0,06	Insensible
Densitat aparent del combustible	0,01	Insensible
Velocitat màxima de crema	1,43	Moderada
Velocitat màxima de deshidratació	1,48	Moderada

En general, en les simulacions de les parcel·les del Bages es van trobar valors de *RS* superiors que en el cas de les simulacions dels experiments de Pérez (2010). D'igual manera que en l'estudi de sensibilitat realitzat amb anterioritat, el paràmetre més sensible va ser el poder calorífic inferior, tot i que aquí altres paràmetres també presentaven una sensibilitat moderada (la velocitat màxima de deshidratació i la velocitat màxima de crema de les capçades).

Cal destacar que la velocitat màxima de crema i la velocitat màxima de deshidratació mostraven més sensibilitat en el cas del combustible de capçades que en el de superfície. Igualment, la densitat aparent del combustible de superfície, presentava també una sensibilitat moderada. El coeficient d'arrossegament, la humitat del combustible de capçades, la temperatura inicial de la vegetació de superfície, la fracció carbonitzada de les capçades i la velocitat màxima de crema del combustible de superfície presentaven una sensibilitat baixa. La resta de paràmetres tenien índexs *RS* inferiors a 1.

Resultats de les simulacions

A la Figura 6.13 es poden veure dues imatges corresponents a dos instants de les simulacions realitzades amb WFDS. La velocitat de propagació en la major part dels casos presenta coeficients de correlació elevats (Taula 6.15) i per tant el mètode utilitzat per a obtenir aquest paràmetre és consistent. El rang de velocitats de propagació compren valors d'entre 62 i 210 m min^{-1} comptant tots els 30 escenaris simulats.

Les parcel·les Z-1, Z-26 i Z-40 presenten valors de *R* superiors a les parcel·les Z-control i Z-6, i és en les situacions de vent de ponent pels percentils 95 i 99 quan s'assoleixen les velocitats de propagació més elevades, mentre que pel percentil 75 s'assoleixen valors semblants (Z-control) o superiors (Z-control, Z-1, Z-6, Z-26 i Z-40) en les situacions d'ones de calor de sud que en les de vent de ponent (Figura 6.14).

La potència calorífica alliberada (*HRR*) mostra diferències en el temps per a cada parcel·la i per a les diferents situacions meteorològiques (Figura). Z-1 i Z-6 són les parcel·les que registren valors més elevats, però mentre que Z-1 mostra un pic d'*HRR* durant uns pocs segons, Z-6 en general presenta valors inferiors a Z-1 però durant més temps. La Taula 6.15 recull els principals valors numèrics de les variables esmentades. L'energia emesa total pren valors entre 1,4 10^6 i 6,6 10^6 kJ essent les parcel·les Z-1 i Z-6 les que assoleixen valors superiors. La intensitat lineal del foc màxima pren valors d'entre 8.786 a 23.739 kW m^{-1}, i

són les parcel·les Z-40, Z-26 i Z-control les que presenten valors inferiors, i la Z-1 la que pren els valors superiors tant per ponentades com per ones de sud.

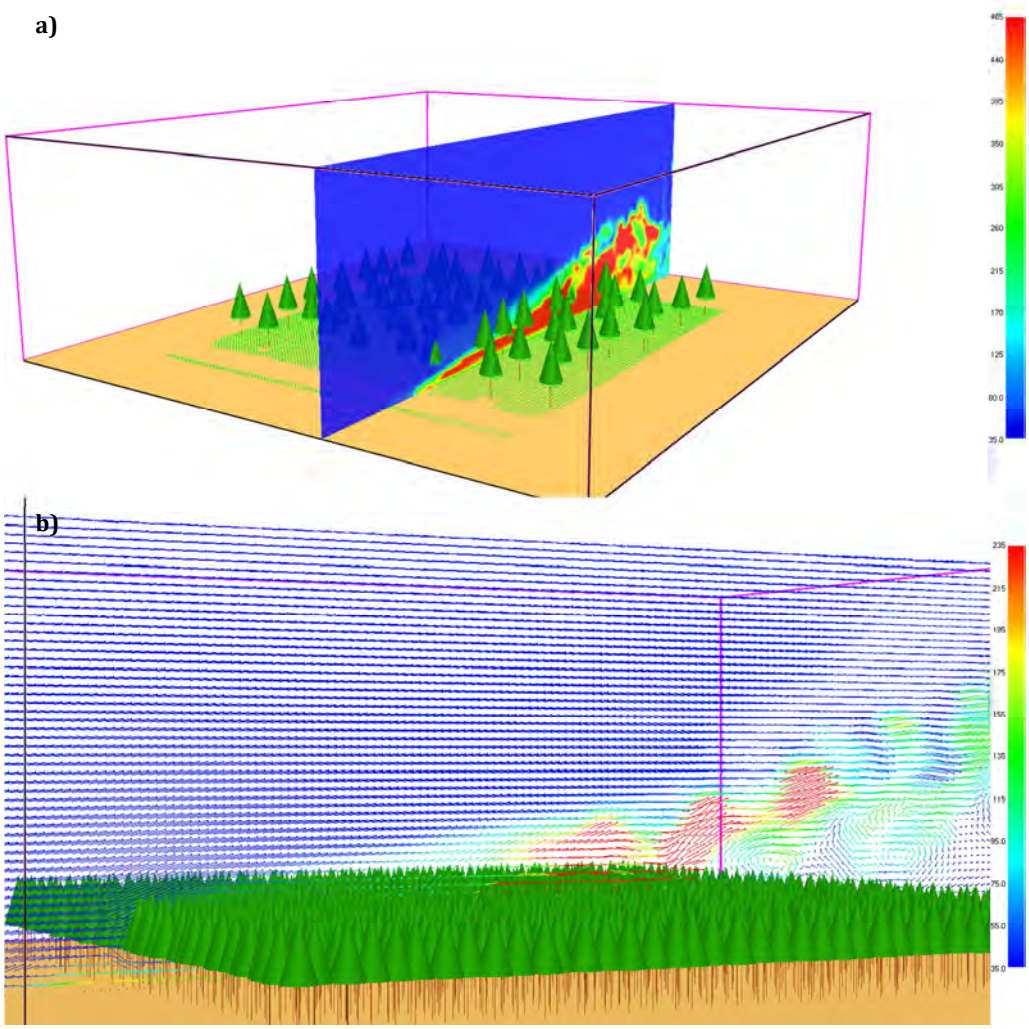

Figura 6.13. Perfils de temperatura obtinguts amb les simulacions de WFDS. a) Z-6, escenari de vent de ponent (P99) (imatge corresponent als 54 s des de l'inici de la simulació). b) Z-control, escenari d'ones de calor de sud (P99) (imatge corresponent als 45 s des de l'inici de la simulació), no es mostra l'estat de combustible de superfície.

Taula 6.15. Resultats per les diferents situacions meteorològiques i escenaris simulats amb WFDS.

Situació meteorològica	Escenari	Parcel·la	R [m min^{-1}] (R^2)	EAT [kJ]	HRR_{max} [kW]	I_{max} [kW m^{-1}]
Vent de ponent	P75	Z-control	75,47 (0,99)	3.254.345	233.230	11.661
		Z-1	82,97 (0,74)	4.624.907	279.771	13.989
		Z-6	62,83 (0,98)	5.213.984	267.748	13.387
		Z-26	143,72 (0,59)	1.482.284	183.378	9.169
		Z-40	113,15 (0,96)	2.060.410	210.858	10.543
	P95	Z-control	86,41 (0,98)	3.220.478	249.956	12.498
		Z-1	142,58 (0,92)	5.531.081	445.000	22.250
		Z-6	71,21 (0,98)	5.005.666	273.035	13.652
		Z-26	203,72 (0,99)	1.383.052	187.422	9.371
		Z-40	118,01 (0,98)	2.156.115	201.748	10.087
	P99	Z-control	88,03 (0,98)	3.173.157	238.176	11.909
		Z-1	144,86 (0,95)	5.511.620	432.747	21.637
		Z-6	81,64 (0,98)	4.746.604	264.755	13.238
		Z-26	209,81 (0,95)	1.621.761	284.373	14.219
		Z-40	114,53 (0,94)	1.782.445	176.161	8.808
Ones de calor de sud	P75	Z-control	73,60 (0,99)	3.301.094	237.523	11.876
		Z-1	98,51 (0,85)	5.791.079	474.778	23.739
		Z-6	73,36 (0,60)	6.560.072	360.521	18.026
		Z-26	173,73 (0,98)	1.681.064	208.591	10.430
		Z-40	117,59 (0,96)	2.215.316	213.263	10.663
	P95	Z-control	73,61 (0,99)	3.304.853	222.765	11.138
		Z-1	99,64 (0,80)	5.804.662	425.651	21.283
		Z-6	62,18 (0,78)	5.971.828	332.356	16.618
		Z-26	112,13 (0,42)	1.606.997	175.721	8.786
		Z-40	122,43 (0,85)	2.161.152	217.365	10.868
	P99	Z-control	76,86 (0,99)	3.307.226	235.457	11.773
		Z-1	106,06 (0,97)	5.824.529	447.199	22.360
		Z-6	68,46 (0,90)	6.026.405	306.562	15.328
		Z-26	151,67 (0,97)	1.681.399	210.409	10.520
		Z-40	122,89 (0,95)	2.179.593	224.563	11.228

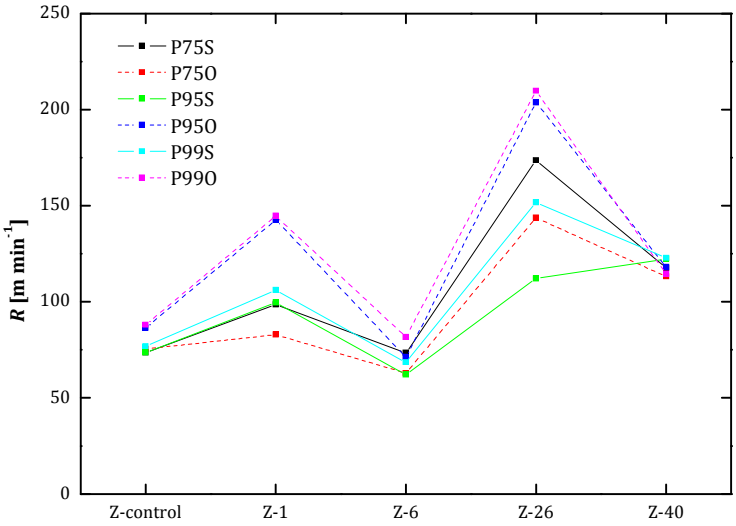

Figura 6.14. Velocitats de propagació [m min^{-1}] per a les parcel·les simulades amb WFDS per les situacions meteorològiques de vent de ponent (O, en la figura) (línies continues) i d'ones de calor de sud (S, en la figura) (línies discontinues) pels diferents percentils (P75, P95 i P99).

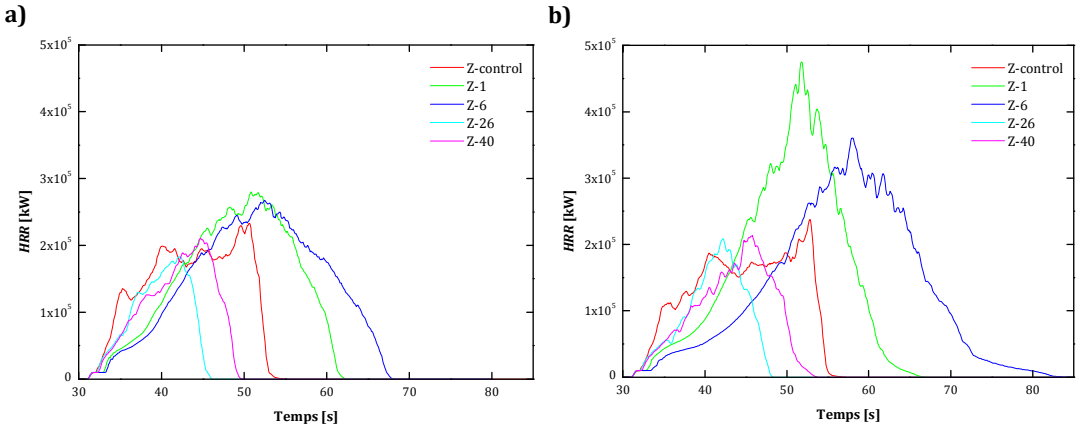

Figura 6.15. Potència calorífica (*HRR*, kW) per les parcel·les simulades amb WFDS. a) Escenari de vent de ponent (P75). b) Escenari d'ones de calor de sud (P75).

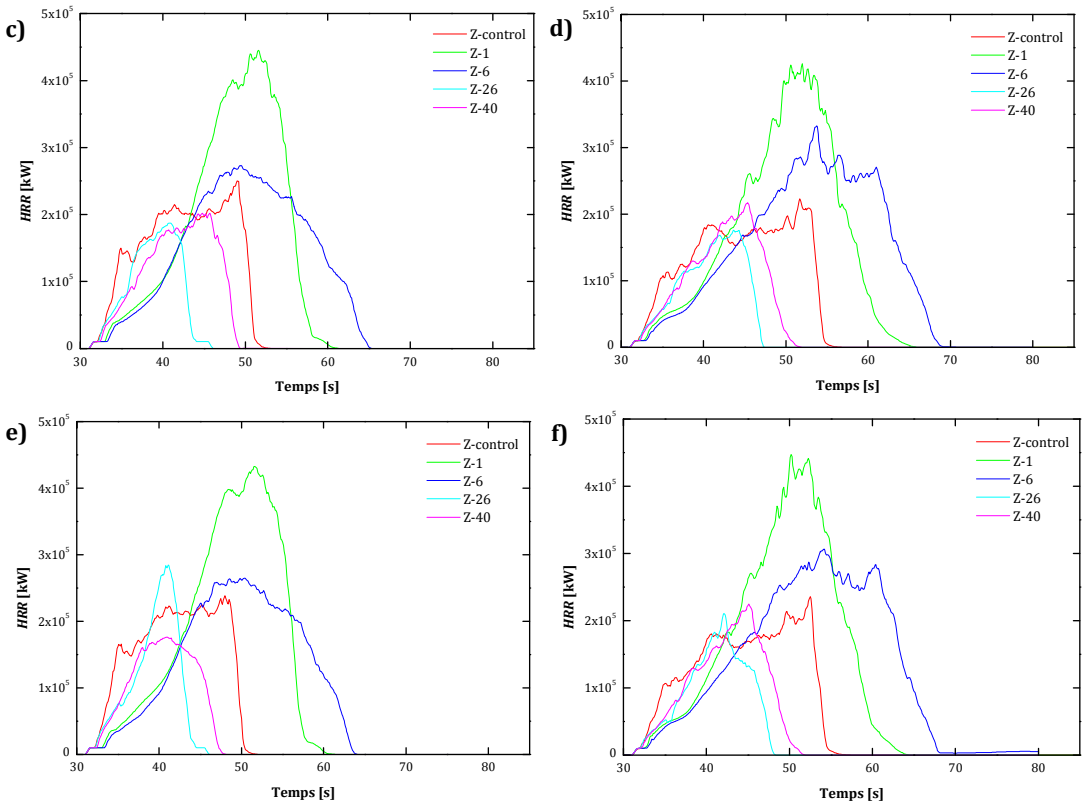

Figura 6.15. Potència calorífica (*HRR*, kW) per les parcel·les simulades amb WFDS (continuació). c) Escenari de vent de ponent (P95). d) Escenari d'ones de calor de sud (P95). e) Escenari de vent de ponent (P99). f) Escenari d'ones de calor de sud (P99) (continuació).

Discussió

Igual com s'ha fet amb el simulador NEXUS, a continuació s'analitzen els resultats des de dues perspectives, primer tenint en compte les diferències entre els escenaris de vent de ponent i d'ones de calor de sud i després tenint en compte les diferències entre parcel·les per a cada escenari.

Diferències entre els escenaris d'ones de calor de sud i de vent de ponent

En general s'observa que per als percentils 95 i 99 la velocitat de propagació és més gran en els escenaris de vent de ponent que en els escenaris d'ones de calor de sud, mentre que pel percentil 75 la velocitat de propagació per les ones de calor de sud és superior a la de les

ponentades. Les parcel·les Z-1 i Z-26 són les que presenten diferències superiors entre escenaris (Figura 6.16).

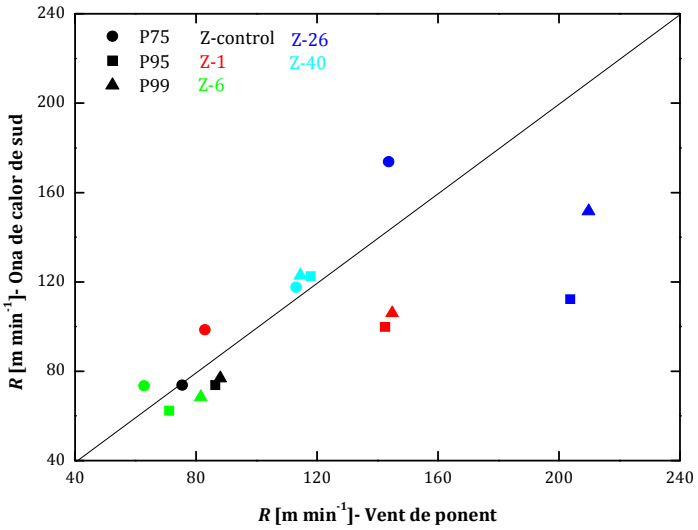

Figura 6.16. Comparació de la velocitat de propagació (*R*) entre els incendis de vent de ponent i d'ones de calor de sud.

D'altra banda, per a l'energia alliberada total (*EAT*) (Figura 6.17a) pràcticament no s'observen diferències entre els escenaris però sí entre parcel·les, essent la Z-1 i la Z-6 les que més energia alliberen amb força diferència respecte les altres. Pel què fa a la potència calorífica màxima (HRR_{max}) (Figura 6.17b) en el percentil 75 totes les parcel·les presenten valors més elevats per les ones de calor de sud que en les ponentades, essent les parcel·les Z-1 i Z-6 les que mostren més diferències entre les dues situacions meteorològiques. La mateixa tendència s'observa per la parcel·la Z-6 en els percentils 95 i 99. Això està en consonància amb el fet que les parcel·les Z-1 i Z-6 són les que tenen més combustible de superfície i aquest està clarament més disponible durant una ona de calor de sud, degut a les baixes humitats del combustible.

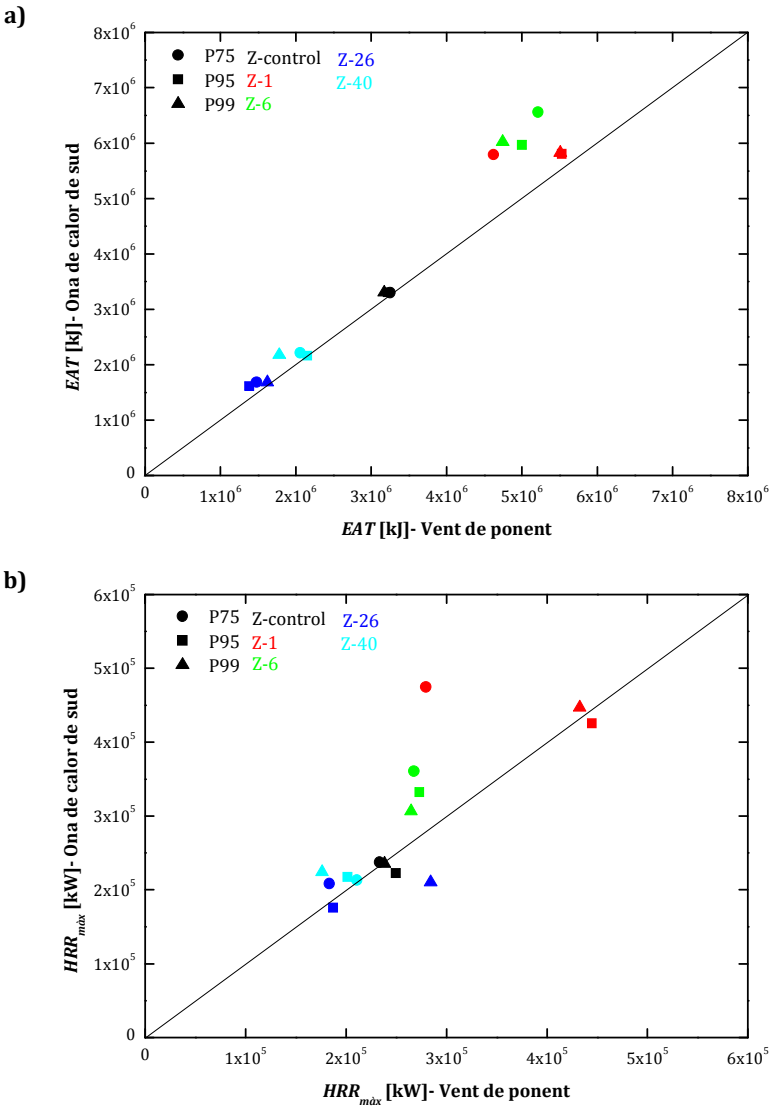

Figura 6.17. Comparació de la calor alliberada total (*EAT*) a) i la potència calorífica màxima ($HRR_{màx}$) b) entre els incendis de vent de ponent i d'ones de calor de sud.

Diferències entre parcel·les

Els resultats indiquen que un mes després del tractament la velocitat de propagació incrementa significativament (entre 10 i 65 % en situacions de vent de ponent i entre 34 i 38 % en les ones de calor de sud) i disminueix sis mesos després del tractament (entre 7 i 18 % en situacions de vent de ponent i entre 0,3 i 16 % en les ones de calor de sud).

A la parcel·la Z-control la calor s'allibera ràpidament (entre 20 i 25 segons) mentre que a la parcel·la tractada 6 mesos després de l'aclarida la calor s'allibera més lentament (entre 35-40 segons), degut òbviament a que les velocitats de propagació en les parcel·les tractades són menors. La parcel·la Z-1 la calor s'allibera durant uns 30 segons. Tanmateix, el valor màxim de *HRR* de Z-6, en primer lloc, seguit de Z-1 és superior al de Z-control per tots els escenaris (20-82% per Z-1 i 9-15 % per Z-6 per les ponentades; 90-100 % per Z-1 i 30-52 % per Z-6 per les ones de calor de sud). Aquests resultats es poden explicar perquè les parcel·les tractades presenten molt més combustible fi disponible que la parcel·la Z-control i per tant la calor alliberada és més gran.

Les parcel·les Z-26 i Z-40 presenten densitats arbòries diferents a la resta de parcel·les i, per tant, els resultats no es poden comparar directament. Tanmateix, s'observa en aquestes parcel·les que en general les *HRR* màximes són inferiors a la resta de parcel·les i que l'energia alliberada total també és inferior, sobretot comparant-les amb les parcel·les Z-1 i Z-6. Aquest fet novament es pot explicar amb els valors de càrrega de combustible disponible de superfície, ja que les parcel·les Z-26 i Z-40 són les que tenen menor càrrega i per tant alliberen menys energia.

Les parcel·les Z-26 i Z-40 arriben a un comportament semblant a la parcel·la Z-control pel que fa a la potència calorífica alliberada per unitat de temps (vegeu Figura) però amb una potència calorífica màxima i intensitat lineal del front inferior i una velocitat de propagació superior. En aquestes parcel·les (Z-26 i Z-40) hi ha menys combustible mort fi i les restes estan més compactades. Pel que fa a la densitat arbòria aquesta és inferior a la Z-control, amb la qual cosa l'efecte del vent és més rellevant pel que fa a la propagació del foc en el combustible de superfície.

6.4. Simulacions de les cremes experimentals

Per tal de comprovar si els simuladors eren capaços de representar la realitat amb prou fidelitat, es van realitzar també simulacions de les cremes experimentals de Can Padró. La caracterització del combustible i els resultats experimentals de les cremes es recullen al capítol 5. A continuació es detallen la metodologia i els resultats obtinguts en les simulacions de l'escenari experimental i es comparen els resultats obtinguts amb les dades reals de les cremes efectuades a Can Padró.

6.4.1. Entrada de dades per a la simulació de les cremes experimentals

NEXUS

Amb NEXUS es van simular les dues cremes experimentals realitzades a Can Padró, la parcel·la SIM-Z6 i SIM-Z40, totes dues amb les condicions meteorològiques del dia de les proves (Taula 6.16).

Taula 6.16. Condicions meteorològiques de les cremes experimentals de Can Padró

Paràmetre d'entrada	Parcel·la	
	SIM-Z6	SIM-Z40
Temperatura [°C]	29	24
Humitat relativa [%]	27	50
Vent [km h^{-1}]	0,00	8,28

Les dades que s'han d'introduir a NEXUS (Taula 6.17) es van calcular a partir de les dades recollides el dia de les cremes. Pel combustible de superfície es va construir un nou model detallant les càrregues de combustible característic de les parcel·les de Can Padró ja que no es va aconseguir reproduir exactament les parcel·les originals. Les propietats tèrmiques del combustible foren les mateixes que per les parcel·les d'estudi ubicades al Bages ja que corresponia al mateix tipus de combustible.

Pel combustible de capçades es calculà la densitat del combustible disponible de capçades (*ACBD*), l'altura de la base de les capçades (*CBH*) i la càrrega de combustible disponible de capçades (*ACFL*) a partir de les dades recollides en els inventaris dels arbres de les parcel·les de Can Padró. Els càlculs de *ACFL* i *ACBD* es van realitzar seguint el mateix procediment que s'utilitzà en les parcel·les d'estudi del Bages.

Igualment com a les parcel·les tractades, les parcel·les SIM-Z6 i SIM-Z40 es van definir emprant dos estrats, el de superfície (que inclou les capes de virosta, herba, arbusts, restes de tala i pins més joves) i l'estrat de capçades (que inclou els arbres d'altura superior a 130 cm).

Taula 6.17. Paràmetres que caracteritzen els models de combustible utilitzats en les simulacions de les cremes experimentals de Can Padró.

Paràmetre d'entrada		Parcel·la	
		SIMZ-6	SIMZ-40
Combustible de superfície	W_{1h} [t ha^{-1}]	28,19	12,58
	W_{10h} [t ha^{-1}]	9,77	3,58
	W_{100h} [t ha^{-1}]	1,83	2,43
	W_{Lh} [t ha^{-1}]	0,00	0,00
	W_{Lw} [t ha^{-1}]	0,00	0,00
	σ_{1h} [cm^{-1}]	29,0	21,2
	σ_{Lh} [cm^{-1}]	77,6	77,6
	σ_{Lw} [cm^{-1}]	23,1	26,4
	D_s [cm]	25	41
Combustible de capçades	$ACBD$ [kg m^{-3}]	0,109	0,157
	$CABH$[m]	0,83	0,53
	$ACFL$[kg m^{-2}]	0,14	0,19
Poders calorífics	PCI_d [kJ kg^{-1}]	19.612	19.327
	PCI_l [kJ kg^{-1}]	17.007	17.654

Atès que les mostres d'humitat preses el dia de les proves no totes corresponen a l'instant d'inici de la crema, la humitat del combustible mort es va determinar de dues maneres diferents (Taula 6.18):

(A) A partir de la temperatura i humitat relativa del dia de les cremes utilitzant les taules de Rothermel (1983). En aquest cas es va considerar la franja horària de 12:00h a 16:00h dels dies del mes d'octubre per a zones amb pendents inferiors al 30 %.

(B) A partir de les humitats determinades el dia de les proves.

D'aquesta manera es tenia un rang de resultats on en el cas (A) s'obtindrien mínims i pel cas (B) màxims ja que les humitats determinades el dia de les proves eren força superiors als valors predits a les taules de Rothermel (1983).

Taula 6.18. Humitat del combustible mort.

Paràmetre d'entrada	Parcel·la			
	SIM-Z6A	SIM-Z6B	SIM-Z40A	SIM-Z40B
M_{1h} [%]	6	16,8	10	11,8
M_{10h} [%]	7	17,8	11	12,8
M_{100h} [%]	8	19,8	12	13,8

WFDS

Amb WFDS per simular les cremes experimentals de Can Padró es va utilitzar el mateix domini que el de les parcel·les del Bages (34 m de longitud, 31 m d'amplada i 11 m d'altura amb una mida de cel·la de 0,21 x 0,21 x 0,22 m).

La parcel·la estava situada al centre del domini i mesurava 17 m x 8 m. Es van utilitzar els mateixos paràmetres de reacció i ignició que en el cas de les parcel·les d'estudi del Bages, i es van fer servir les propietats corresponents al combustible de superfície i de capçades de les parcel·les de Can Padró (Taula 6.19 i Taula 6.20). També es van utilitzar la temperatura i el vent característics del dia de les proves (vegeu Taula 6.16). Amb WFDS només es va utilitzar un escenari d'humitat del combustible, el corresponent a la humitat determinada el dia de les cremes experimentals.

Taula 6.19. Valors d'entrada per a descriure amb WFDS el combustible de superfície de les parcel·les de Can Padró.

Paràmetre d'entrada	**Parcel·la**	
	SIMZ-6	**SIMZ-40**
Relació àrea superficial-volum [m^{-1}]	3.492	3.432
Densitat del combustible [kg m^{-3}]	477	472
Densitat aparent del vegetació [kg m^{-3}]	5,6	1,7
Altura de la vegetació[m]	0,25	0,41

Taula 6.20. Valors d'entrada per a descriure amb WFDS el combustible de capçades de les parcel·les de Can Padró.

Paràmetre d'entrada	**Parcel·la**	
	SIMZ-6	**SIMZ-40**
Relació àrea superficial-volum [m^{-1}]	4.546	4.546
Densitat del combustible [kg m^{-3}]	478	478
Densitat aparent de la vegetació [kg m^{-3}]	7,97	6,47
Nombre d'arbres	19	29
Densitat per parcel·la [peus ha^{-1}]	2.584	3.944
Geometria de la capçada	cònica	cònica
Altura de la base de la capçada [m]	0,83	0,53
Amplada de les capçades [m]	1,37	1,45
Altura de l' arbre[m]	2,53	2,30
Geometria del tronc	cilíndrica	cilíndrica
Diàmetre del tronc [m]	0,028	0,029

6.4.2. Resultats per a les cremes experimentals de Can Padró

La Taula 6.21 recull els resultats de les simulacions realitzades amb NEXUS pels dos escenaris d'humitat utilitzats. Tal com s'esperava, l'escenari (A) proporciona resultats amb valors més alts de velocitats de propagació, calor emesa i intensitat lineal que l'escenari (B). Nogensmenys, en tots els casos les velocitats de propagació i les intensitats lineals del front són petites, coincidint amb el que ja es va observar durant les cremes.

Taula 6.21. Resultats obtinguts amb NEXUS de les cremes experimentals de Can Padró.

Variable	**Parcel·la**			
	SIMZ-6$_A$	**SIMZ-6$_B$**	**SIMZ-40$_A$**	**SIMZ-40$_B$**
Tipus de foc	Superfície	Superfície	Passiu	Passiu
Velocitat de propagació (*R*) [m min^{-1}]	0,46	0,27	2,02	1,87
Calor per unitat d'àrea (*HPUA*) [kJ m^{-2}]	57.202	46.428	32.174	31.197
Intensitat lineal del foc (*I*) [kW m^{-1}]	437	211	1081	970
Longitud de la flama (*L*) [m]	1,3	0,9	2,2	2,1
Fracció cremada de les capçades *(CFB*) [%]	0	0	0,30	0,29
Índex de torxa (*TI*) [km h^{-1}]	0	0	0	0
Índex de crema de capçades (*CI*) [km h^{-1}]	48,4	60,8	41	42,3

Subíndex A: Els càlculs es van realitzar utilitzant la humitat del combustible determinada a partir de les taules de Rothermel (1983). Subíndex B: Els càlculs es van realitzar utilitzant la humitat del combustible obtinguda el dia de les proves.

Pel que fa als resultats obtinguts amb WFDS es mostren a la Taula 6.22. Com es pot observar WFDS prediu que la parcel·la SIMZ-6 no crema. Tal com mostra la Figura 6.18, la potència calorífica màxima segons la simulació amb WFDS a la parcel·la SIMZ-40 es dóna únicament durant un breu període de temps d'uns 10 s, la resta de la crema presenta valors menors d'*HRR* que donarien intensitats lineals al voltant de 1.165 kW·m^{-1}, valors molt similars als obtinguts amb NEXUS.

Taula 6.22. Resultats obtinguts amb WFDS de les cremes experimentals de Can Padró.

Variable	**Parcel·la**	
	SIMZ-6	**SIMZ-40**
Velocitat de propagació (*R*) [m min^{-1}]	0	16,15
Potència calorífica màxima (HRR_{max}) [kW]	0	27.480
Intensitat lineal del foc màxima (I_{max}) [kW m^{-1}]	0	3.435
Intensitat lineal del foc mitjana (I_{mitj}) [kW m^{-1}]	0	1.221
Energia alliberada total (*EAT*) [kJ]	0	835.893

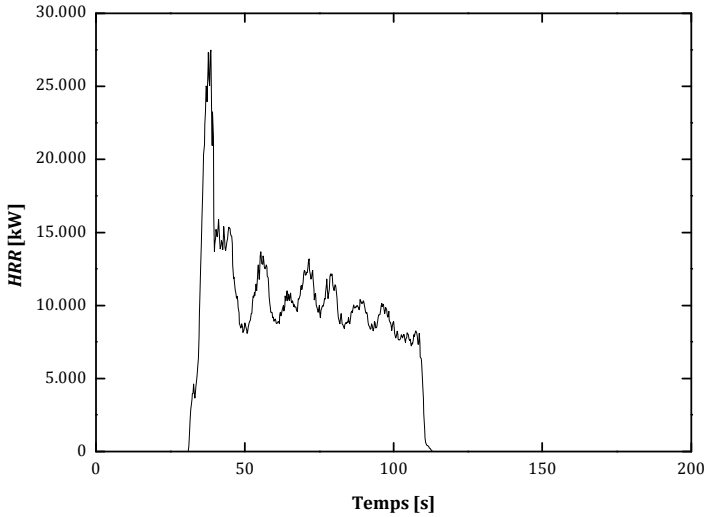

Figura 6.18. Potència calorífica alliberada en funció del temps segons la simulació amb WFDS per a la parcel·la SIMZ-40.

A la Taula 6.23 es mostra, a efectes comparatius, un resum dels resultats obtinguts per a les parcel·les experimentals de Can Padró amb els dos simuladors utilitzats i experimentalment.

Taula 6.23. Comparativa de resultats obtinguts per a les parcel·les experimentals de Can Padró.

Parcel·la	Variable	NEXUS	WFDS	Experimental(*)
SIMZ-6	R [m·min^{-1}]	0,27–0,46	0	0,22–1,39
	L [m]	0,9–1,3	n.a.	0,28–1,5
	I [kW·m^{-1}]	211–437	0	197–627
SIMZ-40	R [m·min^{-1}]	2,02–1,87	16,15	0,320–3,79
	L [m]	2,1–2,2	n.a.	0,41–2,13
	I [kW·m^{-1}]	970–1.081	1.221	38–1.344
	Durada [s]	n.a.	175	175

n.a.: no aplica. (*) El rang fa referència al valor màxim i mínim dels valors mitjans de les diferents fases identificades en cada crema.

Es pot observar que els simuladors prediuen raonablement bé els resultats obtinguts experimentalment. Nogensmenys, la velocitat de propagació per la parcel·la SIMZ-40 simulada amb WFDS presenta valors superiors als experimentals i als obtinguts amb NEXUS. A la llum dels resultats dels experiments, es pot afirmar que NEXUS subestima els valors de R, ja que NEXUS dóna valors del mateix ordre de magnitud que els experimentals i cal recordar que durant els experiments el vent no va ser constant i només assolí ràfegues

puntuals de 2 m s^{-1}, mentre que a NEXUS el vent és un paràmetre constant que fou assignat a la velocitat màxima de les cremes.

Cal dir que el fet que la parcel·la SIMZ-6 cremés a Can Padró i WFDS predigui que no crema té sentit ja que no s'ha pogut simular la línia d'ignició que es va fer a Can Padró i de fet aquesta parcel·la va cremar inicialment per efecte de la línia d'ignició però ràpidament es va extingir. A més, NEXUS no té en compte ni les dimensions de la parcel·la ni l'efecte del pas del temps, considera una línia infinita, per això probablement prediu que propaga encara que realment ja es veu que ho fa en condicions molt marginals, tal com mostren els valors d'intensitat lineal.

Si es comparen els valors obtinguts en aquestes simulacions amb les de les parcel·les originals del Bages Z-6 i Z-40 es veu clarament que són molt diferents. Les causes són bàsicament dues, d'una banda les condicions meteorològiques simulades a les parcel·les originals i les que hi va haver en les cremes experimentals són molt diferents. Les cremes experimentals van tenir lloc en condicions pràcticament sense vent i amb humitats del combustible molt elevades, allunyades de les condicions típiques que experimenten les parcel·les originals durant els mesos d'estiu. D'altra banda el combustible no es va poder reproduir correctament, ni en quantitats i composició (el tipus de sòl no era el mateix, la capa d'humus era inexistent i la virosta completament diferent a les parcel·les originals), ni en la distribució. Es veu però que quan als simuladors se'ls introdueix les dades que hi havia a les parcel·les experimentals de Can Padró són capaços de reproduir amb prou fidelitat el que es va observar durant les cremes. Cal pensar doncs que les prediccions que aquests simuladors donen del que podria succeir en les parcel·les originals està força proper a la realitat. Són en aquest sentit eines prou valuoses per a poder estudiar l'efecte dels tractaments efectuats a les parcel·les sobre el comportament d'incendi que potencialment poden experimentar.

6.5. Discussió

En l'estudi de simulacions s'han emprat les eines NEXUS i WFDS. La primera és una eina semi-empírica, representativa de les eines que pertanyen a la família 'Behave'. Aquest grup d'eines són les més conegudes i emprades per gestors d'incendis arreu del món i NEXUS és l'eina òptima pel que fa a facilitat d'ús i quantitat d'informació gestionada. La segona és una eina teòrica, basada en les lleis físiques i químiques que determinen la propagació de l'incendi. D'entre totes les eines teòriques WFDS és la única que està disponible lliurement i

gratuïta i novament és òptima pel que fa al cost computacional que requereix, la facilitat d'utilització i la quantitat d'informació que gestiona.

En general els valors obtinguts tant de velocitats de propagació com d'intensitat lineals amb el simulador WFDS són més grans que amb el simulador NEXUS. El simulador NEXUS té una base empírica i no es va dissenyar en principi pel tipus de combustible que s'ha analitzat en el marc d'aquesta tesi, a més no permet contemplar les dimensions de les parcel·les ni l'evolució temporal de l'incendi, mentre que WFDS és un simulador dinàmic capaç de reproduir estats no estacionaris. Això fa pensar que els resultats de WFDS, que té una base més física, han d'estar més propers a la realitat. De tota manera els resultats obtinguts en les simulacions de les proves experimentals confirmen que ambdues eines són prou fiables.

D'altra banda els resultats obtinguts en les simulacions de les parcel·les originals del Bages, tant amb un simulador com amb l'altre, mostren en general que el comportament de l'incendi és més sever després d'1 mes i 6 mesos dels tractaments. És a dir, els efectes d'un incendi després d'efectuar el tractament serien pitjors que en la parcel·la control no tractada i que el pas del temps no millora aquesta situació, com a mínim en el període de temps considerat en l'estudi (l'estudi només està ben parametritzat fins a un període de 6 mesos després d'efectuat el tractament d'aclarida ja que cal recordar que els resultats de les parcel·les Z-26 i Z-40 no són comparables a la resta ja que partien d'una situació inicial diferent).

Si s'observen els resultats obtinguts amb l'eina de simulació NEXUS el pitjor escenari per tots els descriptors de comportament d'incendi és el percentil 99 de vent de ponent. La velocitat de propagació a les parcel·les Z-1 i a la Z-6 és un 47 % superior a la velocitat de propagació a Z-control. Pel que fa a la intensitat lineal del front, a la parcel·la Z-1 aquesta és un 328 % superior a la que hi hauria a la Z-control i a Z-6 la intensitat lineal és un 327 % superior a la que hi hauria a Z-control, amb la qual cosa es pot afirmar que no existeixen diferències significatives entre les parcel·les Z1 i Z6. Finalment, pel que fa a la longitud de flama, a la parcel·la Z-1 és un 443 % superior a la Z-control i a la Z-6 un 438 % superior a la Z-control (novament diferències entre Z-1 i Z-6 no significatives).

Si s'observen les dades generades amb el simulador WFDS, s'observen increments de velocitats de propagació d'entre el 10 % i 65 % per Z-1 quan es compara amb la situació inicial de Z-control, tots dos valors corresponen a situacions de vent de ponent. Nogensmenys, la calor alliberada total per l'incendi incrementa un 42-76 % per Z-1. En canvi, per la parcel·la Z-6 es registren velocitats de propagació semblants a la parcel·la control però

una calor alliberada molt superior (50-99 % més gran que Z-control). Per tant es podria afirmar que els resultats obtinguts amb WFDS mostren que passats sis mesos després del tractament disminueix la velocitat de propagació però augmenta la intensitat de l'incendi.

7. CONCLUSIONS/ CONCLUSIONS

El treball realitzat durant el desenvolupament d'aquesta tesi ha permès extreure les següents conclusions:

The work done during the development of this thesis has allowed extracting the following conclusions:

1. S'ha realitzat una extensa revisió bibliogràfica centrada bàsicament en aquells treballs que avaluaven l'efectivitat dels tractaments de combustible en la reducció de risc d'incendi forestal. S'ha vist que les eines de simulació són útils a tal efecte i que les variables més emprades per analitzar l'efectivitat dels tractaments han estat aquelles que avaluen la propagació dels incendis de capçada (*CI*) i de superfície (*R*). S'ha vist que els diferents estudis evidencien l'efectivitat de tractaments tals com les cremes prescrites o les aclarides. Tanmateix, aquests estudis no estan en consonància sobre quin tipus de tractament és el més efectiu i sobre la gestió de les restes originades pel tractament.

   An extensive literature review has been done, focused mainly on those works that assessed the effectiveness of fuel treatments in reducing wildfire risk. Simulation tools are useful for

this purpose and the variables most frequently used to analyze the fuel treatment effectiveness have been those that assess the spread of crown fires (CI) and surface fires (R).Several studies show the effectiveness of treatments such as prescribed burning or thinning. However, these studies are not consistent about what treatment and slash management technique are the most effective.

2. L'estudi bibliogràfic que s'ha realitzat en el marc d'aquesta tesi apunta que la millor manera de disminuir la vulnerabilitat davant del foc quan es fan tractaments d'aclarides és mitjançant l'eliminació de les restes generades (bé triturant-les, enretirant-les o cremant-les).

   The literature review conducted in the framework of this thesis suggests that the best way to reduce fire vulnerability after thinning treatments is by reducing the slash (either masticated, removed from the site or burned).

3. De l'estudi bibliogràfic també se'n desprèn que no existeix encara prou informació contrastable per determinar l'efectivitat al llarg del temps dels tractaments d'aclarida sense gestió de les restes. L'avaluació dels tractaments d'aclarida al llarg del temps no és senzilla, ja que existeixen múltiples factors que cal considerar com el tipus i la intensitat de l'aclarida, les característiques fisiològiques de les espècies vegetals afectades, el tipus de restes vegetals generades o el tipus de combustible eliminat (capçada, escala o superfície), entre d'altres. Queda palès que és necessari realitzar més investigació en aquest camp per tal de conèixer els efectes a llarg termini dels tractaments de combustible i determinar com pot afectar el comportament del foc en les diferents estacions que segueixen el tractament.

   The review also shows that there is not still enough verifiable information to determine the effectiveness of thinning treatments over time without slash management. The evaluation of thinning treatments over time is not easy as there are many factors to be considered such as the thinning type and intensity, physiological characteristics of plant species, characteristics of the slash generated or type of fuel (crown, ladder or surface), among others. Further research is needed in order to investigate the long-term effect of fuel treatments on fuel structure and determine how this may affect fire behavior in the fire seasons following the treatments.

4. S'han validat els mètodes de mostreig desenvolupats per caracteritzar diferents tipus de combustibles i la metodologia s'ha adaptat al mostreig de regenerats de pi blanc,

caracteritzat per elevades densitats de peus. Amb el conjunt de mètodes utilitzats s'ha conformat una sistemàtica per caracteritzar els regenerats de pi blanc, útil per obtenir els paràmetres necessaris per avaluar el comportament dels incendis. Amb els diferents mètodes de mostreig emprats s'ha pogut obtenir una caracterització de les propietats extrínseques i intrínseques del combustible amb un alt nivell de detall. Els mètodes utilitzats han resultat ser adequats i a més han estat complementaris els uns amb els altres.

Sampling methods developed to characterize different types of fuels have been validated and the methodology has been adapted to sample regenerated Aleppo pine stands, characterized with high tree densities. With the set of methods used, a systematic method has been developed in order to characterize the regenerated Aleppo pine stands, useful to obtain the parameters needed to evaluate fire behavior. The different sampling methods have been suitable to obtain intrinsic and extrinsic fuel properties with a high level of detail. The methods used have proved to be proper and complementary to each other.

5. Els resultats han permès obtenir un nou model de combustible per regenerats de pi blanc i diferents models per estructures de regenerats tractades en diferents moments i sense gestió de restes. Els nous models de combustible segueixen els patrons necessaris per resoldre les equacions de Rothermel (1972) i quantifiquen la càrrega del combustible per categoria (viu o mort) i per diàmetre de partícula (0-0,6 cm, 0,6-2,5 cm and 2,5-7,6 cm), la relació àrea superficial-volum també per categoria i diàmetre de partícula, el poder calorífic per categoria, l'altura del llit de combustible i la humitat d'extinció del combustible mort.

   Results have led to a new fuel model for regenerated aleppo pine stands and also fuel models for regenerated aleppo pine stands that have been thinned at different times and the slash has remained at the site. The new fuel models are suitable to solve Rothermel (1972) equations and quantify fuel load by category (live and dead) and particle size class (diameter between 0-0.6 cm, 0.6-2.5 cm and 2.5-7.6 cm), surface-area-to-volume ratio by component and size class, heat content by category, fuel bed depth and dead fuel moisture of extinction.

6. Els resultat obtinguts en l'estudi de l'estructura forestal de parcel·les tractades en diferents períodes han mostrat que la major part de les propietats determinades són similars per a les parcel·les mostrejades 1 i 6 mesos després del tractament, excepte l'altura de les restes de tala i el diàmetre dels arbres a l'altura del pit. Per a la parcel·la

mostrejada un mes després del tractament aquestes dues propietats són més elevades que per a la mostrejada 6 mesos després. La parcel·la Z-control té majoritàriament propietats similars a les de la parcel·la Z-40 o diferents a les de la resta de grups de parcel·les. Observant els resultats, es podria dir que 40 mesos després del tractament de la parcel·la Z-control s'assoleixen valors similars de diferents propietats extrínseques que els que s'observarien sense fer un tractament de la parcel·la (cobertura del combustible de superfície en peu, càrrega de combustible mort d'1h, altura dels arbres i diàmetre dels arbres a l'altura del pit). Ara bé, aquesta asserció s'ha de matisar en tant que la parcel·la Z-40 partia d'una densitat d'arbres inicial inferior a la de la Z-control. Així, tenint en compte que les parcel·les Z-26 i Z-40 partien de densitats inicials inferiors (15.000 peus ha^{-1}) a Z-control (30.000 peus ha^{-1}), es pot afirmar que els valors de les variables obtinguts també són inferiors als que correspondrien a unes parcel·les amb la mateixa densitat inicial que Z-control i que haguessin estat mostrejades 26 i 40 mesos després de l'aclarida. Per tant, d'aquí es dedueix que en parcel·les amb densitats de peus de l'ordre de 30.00 peus ha^{-1}, 40 mesos després del tractament encara no s'han assolit les condicions prèvies al tractament.

Results obtained in the study of the forest structure of plots treated at different times showed that most of the properties are similar for plots sampled 1 month and 6 months after the treatment, except the slash and the diameter at breast height. These two properties are higher for the plot sampled 1 month after the treatment than for the one sampled six months after the treatment. Z-control has properties largely similar to Z-40 or different from the other groups of plots. Noting the results, it could be said that 40 months after the treatment, the plot would reach values for different extrinsic properties of the fuel (coverage of surface fuel, 1h fuel load, tree height and diameter at breast height) very similar to those present without any treatment. However, this statement should be qualified as Z-40 had initial trees density lower than Z-control. Thus, considering that Z-26 and Z-40 started from lower initial densities (15,000 feet ha^{-1}) to Z-control (30,000 feet ha^{-1}), it can be said that the values of the variables obtained are lower than those that would correspond to plots with the same initial density as Z-control sampled 26 and 40 months after thinning. In summary, it can be concluded that in 30.000 feet ha^{-1} tree density plots, the pre-treatment conditions have not yet been reached 40 months after the treatment.

7. S'ha posat de manifest que l'experimentació ex-situ no és útil per a reproduir situacions reals d'incendi ja que és impossible repetir amb fidelitat l'estructura global de l'ecosistema que afecta el comportament d'incendi. Particularment és inviable reproduir les condicions de les capes de sòl, humus i virosta, totes elles de gran

incidència en la propagació del foc. A més, la dinàmica que experimenta la humitat del combustible viu en el seu estat original s'interromp una vegada aquest combustible ha estat extret del seu medi. D'altra banda, les condicions meteorològiques durant les proves experimentals tampoc van poder ser les adequades per tal de reproduir el comportament de foc que hi ha típicament a la Catalunya central en temporada d'incendis, afectada per ones de sud i ponentades. Per tot això es pot concloure que el comportament de foc observat durant les proves experimentals no és semblant al que hi podria haver en les parcel·les originals si s'esdevingués un incendi en època estival.

It has been exposed that ex-situ experimentation is not useful to reproduce actual fire situations because it is impossible to repeat faithfully the overall structure of the ecosystem that affect fire behavior. In particular it is impossible to reproduce the conditions of soil layers, humus and litter, all of great impact on the fire spread. In addition, live fuel moisture dynamics in their original state are interrupted once this fuel has been extracted from their environment. Moreover, weather conditions during the experimental tests could not be right to reproduce typical fire behavior that occurs in central Catalonia during the fire season, affected by heat south waves and westerly winds. Therefore the fire behavior observed during the experimental tests is different to what might be in the original plots if a summer fire occurs.

8. S'ha realitzat un estudi de sensibilitat de la velocitat de propagació respecte el domini de treball en WFDS prèviament a les simulacions. Els resultats mostren poca variabilitat en modificar les dimensions del domini (longitud, altura o amplada). En canvi, les dimensions de la malla tenen efectes importants en els resultats. Aquests resultats també evidencien la necessitat d'utilitzar les eines de simulació amb cautela i sempre anteposant el criteri expert.

   A sensibility analysis of the rate of spread with regard to the WFDS domain has been performed prior to the simulations. Little variability is shown when modifying the domain dimensions (length, height or width). However, the size of the mesh has important effects on the rate of spread. Simulation tools should be used with caution and always with the expert sound judgment.

9. Simulacions d'experiments a escala de laboratori han servit per detectar els paràmetres als que WFDS és sensible -essent aquests el poder calorífic inferior i la densitat aparent- i ajustar amb tècniques d'optimització els valors d'entrada més sensibles i menys coneguts. Alhora, la parametrització del model també ha estat útil per comparar els

resultats de les simulacions amb els dels experiments reals a laboratori i comprovar que el model (amb els ajusts incorporats) prediu amb una elevada fiabilitat els resultats experimentals.

Simulations of experiments at laboratory scale have been used to detect the parameters that WFDS is sensitive -these being the low heat of combustion and the bulk density- and to adjust with optimization techniques the more sensitive and less known input values. Also, model parameterization has been useful to compare the simulation results with the real laboratory experiments and check that the model (with the adjustments included) predicted with a high reliability the experimental results.

10. En general els valors obtinguts tant de velocitats de propagació com d'intensitat lineals amb el simulador WFDS són més grans que amb el simulador NEXUS. El simulador NEXUS té una base empírica i no es va dissenyar en principi pel tipus de combustible que s'ha analitzat en el marc d'aquesta tesi, a més no permet contemplar les dimensions de les parcel·les ni l'evolució temporal de l'incendi. Això fa pensar que els resultats de WFDS, que té una base més física, han d'estar més propers a la realitat. De tota manera els resultats obtinguts en les simulacions de les proves experimentals confirmen que ambdues eines són raonablement fiables.

In general values obtained in fireline intensity and rate of spread with WFDS are larger than with NEXUS. NEXUS has an empirical basis and initially was not designed by the type of fuel used in the context of this thesis, and do not allow to expect the plot dimensions nor the time evolution of the fire. This suggests that the results of WFDS, which has a more physical basis, should be closer to reality. However the simulation results of the experimental tests confirm that both tools are reasonably reliable.

11. Els resultats obtinguts en les simulacions de les parcel·les originals del Bages, tant amb un simulador com amb l'altre, mostren en general que el comportament de l'incendi és més sever després d'1 mes i 6 mesos dels tractaments. És a dir, els efectes d'un incendi després d'efectuar el tractament serien pitjors que en la parcel·la control no tractada i que el pas del temps no millora aquesta situació, com a mínim sis mesos després del tractament.

Results from simulations of Bages plots carried with both simulation tools generally show that fire behavior is more severe 1 month and 6 months after the treatment. That is, the

wildfire effects after the treatment would be worse than in the untreated control plot and time does not improve this situation, at least six months after treatment.

12. Els resultats obtinguts amb NEXUS mostren que el pitjor escenari per tots els descriptors de comportament d'incendi és el percentil 99 de vent de ponent (temperatura 28,4 °C; velocitat del vent 15,7 m s^{-1}; humitat del combustible mort d'1h, 10h, i 100h 6 %, 7 % i 8 %, respectivament; humitat del combustible viu herbaci i llenyós 90 % i 70 %, respectivament; humitat del combustible de capçades 90 %). La velocitat de propagació a les parcel·les Z-1 i a la Z-6 és un 47 % superior a la velocitat de propagació a Z-control. Pel que fa a la intensitat lineal del front, a la parcel·la Z-1 aquesta és un 328 % superior a la que hi hauria a la Z-control i a Z-6 la intensitat lineal és un 327 % superior a la que hi hauria a Z-control, amb la qual cosa es pot afirmar que no existeixen diferències significatives entre les parcel·les Z-1 i Z-6.

    NEXUS results show that the worst scenario for all fire behavior outputs is 99 percentile westerly wind (temperature 28.4 °C; wind velocity 15.7 m s^{-1}; 1h, 10h and 100h dead fuel moisture 6 %, 7 % and 8 %, respectively; live herbaceous and woody fuel moisture 90 % i and 70 %, respectively; canopy fuel moisture 90 %). The rate of spread in Z-1 and Z-6 plots is 47 % higher than the rate of spread in Z-control. Fireline intensity in Z-1 is 328 % higher than what it would be in Z-control and in Z-6 is 327 % higher than what it would be in Z-control, so it can be concluded that there are no significant differences between the Z-1 and Z-6 plots.

13. Les dades generades amb el simulador WFDS mostren increments de velocitats de propagació d'entre el 10 % i 65 % per Z-1 quan es compara amb la situació inicial de Z-control. Nogensmenys, la calor alliberada total per l'incendi incrementa un 42-76 % per Z-1. En canvi, per la parcel·la Z-6 es registren velocitats de propagació semblants a la parcel·la control però una calor alliberada molt superior (50-99 % més gran que Z-control). Els resultats obtinguts amb WFDS mostren que passats sis mesos després del tractament disminueix la velocitat de propagació però augmenta la intensitat de l'incendi.

    WFDS data show increases in rate of spread between 10 % and 65 % for Z-1 when compared with Z-control. However, the total heat released by a fire increases by 42-76 % for Z-1. Nevertheless, Z-6 recorded rates of spread similar to the control plot but also a heat released much higher (50-99 % greater than Z-control). WFDS results show that six

months after the treatment, the rate of spread is reduced but the fireline intensity increases.

14. Segons els resultats exposats i ateses les característiques del nostre país on el risc de patir incendis és molt elevat, l'efecte dels tractaments d'aclarida efectuat a la Catalunya central després dels incendis de 1994 comporta una vulnerabilitat major davant els incendis per a les estructures tractades, almenys durant els primers mesos de tractament. També es pot inferir que 40 mesos després del tractament la vulnerabilitat davant els incendis de les parcel·les aclarides encara és significativa degut a la presencia de restes.

According to the results and given the characteristics of our country where the risk of fires is very high, the effect of thinning treatments performed in central Catalonia after the1994 fire brings a great fire vulnerability in treated stands, at least during the first months of treatment. It can also be deduced that 40 months after the treatment the fire vulnerability of the thinned plots is still significant due to the presence of slash.

NOMENCLATURA

a	Factor de correcció de l'angle [-] (Brown, 1979)
A	Àrea cremada [ha]
$ACBD$	Densitat aparent del combustible disponible de capçades [kg m^{-3}]
$ACBD_t$	Densitat aparent del combustible disponible de capçada d'un arbre [kg m^{-3}]
$ACFL$	Càrrega de combustible disponible [t ha^{-1}]
AFS	Aparició de focus secundaris [-]
BSH	Altura de socarrimat dels troncs [m]
c	Factor de correcció del pendent [-] (Brown, 1979)
CBD	Densitat aparent del combustible de capçades [kg m^{-3}]
CBH	Altura de la base de la capçada [m]
CC	Cobertura de capçades [%]
CCH	Altura de capçada consumida [m]
CCP	Fracció de capçada consumida [%]
CDR	Índex de dany a les capçades [-]
CFB	Fracció de capçada cremada [%]
CH	Altura de les capçades [m]
CI	Índex de capçades [km h^{-1}]

C_p	Calor específica [kJ·kg^{-1}·K^{-1}]
CR	Ràtio de capçada [%]
CS	Cobertura de superfície [%]
CSH	Altura de capçada socarrimada [m]
CSP	Fracció de capçada socarrimada [%]
CW	Amplada de les capçades [m]
d	Diàmetre mitjà per a la classe diametral corresponent [polzades] (Brown, 1979)
D	Altura mitjana de la vegetació [m]
DBH	Diàmetre a l'altura del pit [m, cm]
DP	Densitat de peus [peus ha^{-1}, peus m^{-2}]
DV	Direcció del vent [graus]
EAT	Energia total alliberada durant l'incendi [kJ]
ETo	Evapotranspiració de referència [mm]
FSG	Distància entre estrats [m]
FSI	Índex de vulnerabilitat [-]
H	Altura de la flama [m]
HPUA	Calor emesa per unitat d'àrea [kJ m^{-2}]
HR	Humitat relativa [%]
HRR	Potència calorífica [kW]
I	Intensitat lineal del front [kWm^{-1}]
I_0	Intensitat crítica de l'incendi de superfície [kWm^{-1}]
k	Conductivitat tèrmica [W·m^{-1} K^{-1}]
L	Longitud de la flama [m]
M	Humitat del combustible [%]
M_a	Mortalitat d'arbres [%]
n_i	Nombre total d'interseccions trobades en el transsecte planar [-] (Brown, 1979)
N_ℓ	Longitud total dels plans de mostreig per a la classe diametral corresponent en els transsecte planar [peus] (Brown, 1979)
OIC	Ocurrència d'incendis de capçades [-]
P	Perímetre de l'incendi [m]
PCI	Poder calorífic inferior [kJ kg^{-1}]
PCS	Poder calorífic superior [kJ kg^{-1}]
PPt	Precipitació total [mm]
Q	Flux de calor de l'incendi [kJ m^{-2}]
R	Velocitat de propagació del front [m min^{-1}]
$\bar{r}^2$	Quadrat de la mitjana de les distàncies entre els arbres mostrejats i llurs punts de

	mostreig.
R_{actiu}	Velocitat de propagació d'un incendi actiu de capçades [m min^{-1}]
R_{final}	Velocitat de propagació final [m min^{-1}]
R_{supf}	Velocitat de propagació del front en superfície [m min^{-1}]
R_0	Velocitat de propagació crítica d'un incendi de superfície [m min^{-1}]
s	Densitat específica del combustible [-] (Brown, 1979)
S	Secció o diàmetre d'una partícula [mm^2]
SH	Altura de l'arbre [m]
T	Temperatura [°C]
TD	Distància mitjana entre els arbres [m]
TI	Índex de torxa [km h^{-1}]
t_r	Temps de residència de les flames [s]
VV	Velocitat del vent [m s^{-1}]
W	Càrrega de combustible [t ha^{-1}]
WRF	Factor de reducció del vent [-]

Lletres greques

α	Angle de la flama [graus]
ρ	Densitat [kg m^{-3}]
ρ_b	Densitat aparent [kg m^{-3}]
σ	Relació àrea superficial-volum [m^{-1}]

Subíndex

cap	Combustible foliar de capçades
d	Combustible mort
l	Combustible viu
Lh	Combustible viu herbaci
Lw	Combustible viu llenyós
s	Estrat de superfície
tx	Focs de torxa
1h	Combustible mort de superfície d'1h
10h	Combustible mort de superfície de 10h
100h	Combustible mort de superfície de 100h

Superíndex

obs	Observadors
IR	Imatges termogràfiques
ID	Imatges digitals

Abreviatures

CDS	Mostrejos del combustible dipositat al sotabosc
CS-MD	Mostrejos del combustible de superfície - mostrejos destructius
CS-TL	Mostrejos del combustible de superfície - transsectes lineals

BIBLIOGRAFIA

Agee, J. (1996). *The influence of forest structure on fire behavior*. A: Sherlock J. (Ed.) Proceedings of the 17th Annual forest Vegetation Management Conference. 16-18 de gener de 1996. Redding, EUA, 52-68.

Agee, J.K. (2000). *Fire and pine ecosystems*. A: Richardson, D.M. (Ed.). Ecology and Biogeography of Pinus. Cambridge University Press, Cambridge, Regne Unit, 193-218.

Agee, J., Skinner, C. (2005). *Basic principles of forest fuel reduction treatments*. Forest Ecology and Management, 211, 83-96.

Ager, A., McMahan, J., Barrett, J., McHugh, C. (2007). *A simulation study of thinning and fuel tratments in a wildland-urban interface in eastern Oregon, USA*. Landscape and Urban Planning, 80, 292-300.

Àgueda, A., Liodakis, S., Pastor, E., Planas, E. (2009). *Characterization of the thermal degradation and heat of combustion of Pinus Halepensis needles treated with ammonium-polyphosphate-based retardants.* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 98 (1), 235-243.

Albini, F. (1976). *Estimating wildfire behavior effects.* General Technical Report INT-30. Intermountain Forest and Range Experiment Station. USDA Forest Service. Ogden, EUA, 91 pp.

Alejano, M.R., Martínez, E., Tiscar, A. (2000). *Selvicultura en masas protectores de pino carrasco en la Cuenca del Guadiana Menor (Provincias de Granada y Jaen). Objetivos y criterios de gestión.* Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, 10, 111-116.

Alexander, M.E. (1982). *Calculating and interpreting forest fire intensities*. Canadian Journal of Botany, 60 (4), 349-357.

Alexander, M.E., Cruz, M., Lopes, A. (2006). *CFIS: A software tool for simulating crown fire initiation and spread.* A: Viegas, D.X. (Ed.). Proceedings of the V International Conference of Forest Fire Research. 27-30 de novembre de 2006. Figueira da Foz, Portugal, 13 pp.

Alexander, M.E., Stefner, C.N., Mason, J.A., Stocks, B.J., Hartley, G.R., Maffey, M.E., Wotton, B.M., Taylor, S.W., Lavoie, N., Dalrymple, G.N. (2004). *Characterizing the jack pine-black spruce fuel complex of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME)*. Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre. Information Report NOR-X-393, 49 pp.

Alexander, M.E., Stocks, B.J., Wotton, B.M., Flannigan, M.D., Todd, J.B., Butler, B.W., Lanoville, R.A. (1998). *The International Crown Fire Modeling Experiment: an overview and progress report.* 2nd Symposium on Fire and Forest Meterology. 11-16 de Gener 1998. Phoenix, EUA. American Meteorological Society, Boston, EUA.

Alvarez, A., Gracia, M., Retana, J. (2011). *Fuel types and crown fire potential in Pinus halepensis forests.* European Journal of Forest Research, 1-12.

Alvear, D., Rein, G., Capote, J., Torero, J., Lázaro, M., Abreu, O. (2007). *Modelado y simulación computacional de incendios en la edificación*. Editorial Díaz de Santos. Santander, 299 pp.

Anderson, H. (1982). *Aids to determining fuels models for estimating fire behaviour.* General Technical Report INT-122. Intermountain Forest and Range Experiment Station. USDA Forest Service. Ogden, EUA, 22 pp.

Andrews, P. (1986). *Behave: Fire behavior prediction and fuel modeling system- Burn subsystem. Part1.* General Technical Report INT-194. Intermountain Research Station. USDA Forest Service. Ogden, EUA, 130 pp.

Arnaldos, J., Navalón, X., Pastor, E., Planas, E., Zárate, L. (2004). *Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales.* Ediciones Mundi-Prensa. Barcelona, 414 pp.

Arroyo, L.A., Healey, S.P., Cohen, W.B., Cocero, D., Manzanera, J.A. (2006). *Using object-oriented classification and high-resolution imagery to map fuel types in a Mediterranean region.* Journal of Geophysical Research, 111, G04S04, 10 pp.

Arroyo, L.A., Pascual, C., Manzanera, J.A. (2008). *Fire models and methods to map fuel types: the role of remote sensing.* Forest Ecology and Management, 256 (6), 1239-1252.

Badia, A. (2000). *La incidència dels incendis a l'Àrea Metropolitana de Barcelona i a la comarca del Bages durant el període 1987-1998.* Tesi doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona., Barcelona, 232 pp.

Baeza, M.J., De Luís, M., Raventós, J., Escarré, A. (2002). *Factors influencing fire behaviour in shrublands of different stand ages and the implications for using prescribed burning to reduce wildfire risk.* Journal of Environmental Management, 65, 199-208.

Barbéro, M., Loisel, R., Quézel, P., Richardson, D.M, Romane, F. (2000). *Pines of the Mediterranean Basin*. A: Richardson, D.M. (Ed.). Ecology and Biogeography of Pinus. Cambridge University Press. Cambridge, Regne Unit, 153-170.

Bartelink, H.H. (1998). *A model of dry matter partitioning in trees.* Tree Physiology, 18, 91-101.

Beverly, J.L., Herd, E.P.K., Conner, J.C.R. (2009). *Modeling fire susceptibility in west central Alberta, Canada.* Forest Ecology and Management, 258 (7), 1465-1478.

Box, G.E.P., Hunter, W.G., Hunter, J.S. (1989). *Estadística para experimentadores*. Ed. Reverté S.A. Barcelona.

Brose, P.H., Wade, D.D. (2002). *Potential fire behavior in pine flatwood forests following three different fuel reduction techniques*. Forest Ecology and Management, 163 (1-3), 71-84.

Brown, J. K. (1971). *A planar intersect method for sampling fuel volume and surface area.* Forest Science, 17, 96-102.

Brown, J. K. (1974). *Handbook for inventorying downed woody material.* General Technical Report INT-16. Intermountain Forest and Range Experiment Station. USDA Forest Service. Ogden, EUA, 24 pp.

Brown, J. K. (1978). *Weight and density of crowns of Rocky Mountains conifers*. General Research Paper INT-197. Intermountain Forest and Range Experiment Station. USDA Forest Service. Ogden, EUA, 56 pp.

Brown, J.K., Reinahrdt, E.D. (1991). P*redicting and managing fuel consumption in the Interior West.* A: Andrews, P.L., Potts, D.L. (Eds.). Proceedings of the 11th Conference on Fire and Forest Meteorology. 16-19 Abril 1991. Missoula, EUA. Society of American Foresters Publication, 91-04, 419-429.

Burriel, J.A., Gracia, C., Ibàñez, J.J., Mata, T., Vayreda, J. (2000). *Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya*. CREAF. Bellaterra, volum 4.

Byram, G.M. (1959). *Combustion in forest fuels.* A: Davis, K.P. (Ed.). Forest Fire: Control and Use. McGraw-Hill. NewYork, EUA, 61-89.

Cabanillas, A.M. (2010). *Bases para la gestión de masas naturales de Pinus halepensis Mill. en el Valle del Ebro.* Tesi Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 199 pp.

Call, P., Albini, F. (1997). *Aerial and surface fuel consumption in crown fires.* International Journal of Wildland Fire, 7 (3), 259-264.

Canfield, R. (1941). *Application of the Line Interception Method in sampling range vegetation.* Journal of Forestry, 39, 388-394.

Carlton, D. (2004). *Fuels Management Analyst Plus Software, Version 3.8.19.* Fire Program Solutions. Oregon, EUA.

Castellnou, M., Pagès, J., Miralles, M., Piqué, M. (2009). *Tipificación de los incendios forestales de Cataluña. Elaboración del mapa de incendios de diseño como herramientas para la gestión forestal.* A: V Congreso forestal español. Sociedad Española de Ciencias Forestales - Junta de Castilla y León, Ávila (5CFE-453), 15 pp.

Catchpole, W.R., Catchpole, E.A., Rothermel, R.C., Morris, G.A., Butler, B.W., Latham, D.J. (1998). *Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel.* Combustion Science and Technology, 131, 1-37.

Cheney, N.P., Gould, J.S., Catchpole, W.R. (1993). *The influence of fuel, weather, and fire shape variables on fires-spread in grasslands.* International Journal of Wildland Fire, 3(1), 31-44.

Cohen, M., Cuiñas, P., Diez, C., Fernandes, P., Guijarro, M., Moro, C. (2003). *Wildland Fuel Particles Characterisation: Database Content*. Firestar a decision support system for fuel management and fire hazard reduction in Mediterranean wildland - urban interfaces. Document D6-03-A1, 23 pp.

Cottam, G., Curtis, J. (1956). *The use of distance methods in phytosociological sampling*. Ecology, 37, 451-460.

Covington, W.W., Fulé, P.Z., Moore, M.M., Hart, S.C., Kolb, T.E., Mast, J.N., Sackett, S.S., Wagner, M.R. (1997). *Restoration of ecosystem health in southwestern ponderosa pine forests*. Journal of Forestry, 95 (4), 23-29.

Cram, D., Baker, T., Boren, J. (2006). *Wildland fire effects in silviculturally treated vs. untreated stands of New Mexico and Arizona.* Research Paper RMRS-RP-55. Rocky Mountain Research Station. USDA Forest Service. Fort Collins, EUA, 28 pp.

CREAF. (2000-2001). *Sistema d'Informació dels Boscos de Catalunya (SIBosC).* (2ª edició, ampliada). Consultat el 18 de març de 2009, a Mapa de Models d'Inflamabilitat, http://www.creaf.uab.es/mmci/index.htm.

CREAF. (2003). *Sistema d'Informació dels Boscos de Catalunya (SIBosC)*. (2ª edició ampliada). Consultat el 18 de març de 2009, a Mapa de Models de Combustibilitat, http://www.creaf.uab.es/mmci/index.htm

Cruz, M., Alexander, M.E. (2010). *Assessing crown fire behaviour potential in conifer forests of western North America: a critical review of modelling approaches used in recent simulation studies.* International Journal of Wildland Fire, 19, 377-398.

Cruz, M., Alexander, M. E., Wakimoto, R. (2003). *Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of western North America*. International Journal of Wildland Fire, 12, 39-50.

Cruz, M., Alexander, M. E., Wakimoto, R. (2004). *Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands.* Forest Science, 50 (4), 640-658.

Cruz, M., Alexander, M. E., Wakimoto, R. (2005). *Development and testing of models for predicting crown fire rate of spread in conifer forest stands.* Canadian Journal of Forest Research, 35, 1626-1639.

Cruz, M., Matthews, S., Gould, J., Ellis, P., Henderson, M., Knight, I., Watters, J. (2010). *Fire Dynamics in mallee-heath. Fuel, weather and fire behaviour prediction in south Australian semi-arid shrublands.* CSIRO Sustainable Ecosystems, Bushfire Cooperative Research Centre Report 1.10.01. Canberra, Austràlia.

Cubells, M. (2009). *Desenvolupament d'una metodologia basada en termografia infraroja per a l'anàlisi quantitativa de l'eficàcia de productes químics en l'extinció d'incendis forestals*. Projecte Final de Carrera. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 72 pp.

Daskalakou, E.N., Thanos, C.A. (1996). *Aleppo pine (Pinus halepensis) postfire regeneration: the role of canopy and soil seed banks*. International Journal of Wildland Fire, 6 (2), 59-66.

Deeming, J.E., Burgan, R.E., Cohen, J.D. (1977). *The National Fire-Danger Rating System, 1978*. General Technical Report INT-39. Intermountain Forest and Range Experiment Station. USDA Forest Service. Ogden, EUA, 66 pp.

De Groot, W.J. (1993). *Examples of fuel types in the Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System.* Poster amb text. Northern Forestry Centre. Forestry Canada. Edmonton, Alberta, Canadà.

De las Heras, J., González-Ochoa, A., López-Serrano, F., Simarro, M.E. (2004). *Effects of silviculture treatments on vegetation after fire in Pinus halepensis Mill. Woodlands (SE Spain).* Annals of Forest Science, 61 (7), 661-667.

De las Heras, J., Moya, D., López-Serrano, F.R., Condes, S. (2007). *Reproduction of postfire Pinus halepensis Mill. stands six years after silvicultural treatments.* Annals of Forest Science, 64, 59-66.

Dimitrakopoulos, A. (2002). *Mediterranean fuel models and potential fire behavior in Greece.* International Journal of Wildland Fire, 11, 127-130.

Dimitrakopoulos, A., Panov, P. (2001). *Pyric properties of some dominant Mediterranean vegetation species.* International Journal of Wildland Fire, 10, 23-27.

Doat, J., Valette, J.C. (1981). Le pouvoir calorifique supérieur d'espèces forestières méditerranéennes. Annales des Sciences Forestières, 38 (4), 469-486.

Duguy, B., Alloza, J., Röder, A., Vallejo, R. (2007). *Modelling the effects of landscape fuel treatments on fire growth and behaviour in Mediterranean landscape (eastern Spain).* International Journal of Wildland Fire, 16, 619-632.

Dupuy, J.L. (1997). *Mieux comprendre et prédire la propagation des feux de forêts: expérimentation, test et propagation de modèles*. Tesi Doctoral. Université Claude Bernard_Lyon I. Centre National de la Recherche Scientifique. Lyon, França, 272 pp.

Dupuy, J.L., Morvan D. (2005). *Numerical study of a crown fire spreading toward a fuel break using a multiphase physical model.* International Journal of Wildland Fire, 14, 141-151.

Elizondo, I. (2006). *Avaluació dels efectes i idoneïtat de l'ús del foc prescrit en aclarides de plançoneda de pi blanc.* Treball pràctic tutorat. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària. Universitat de Lleida. Lleida, 99 pp.

Elvira, L.M., Hernando, C. (1989). *Inflamabilidad y energía de las especies de sotobosque*.. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Colección monografías INIA, 68. Madrid, 99 pp.

Espelta, J.M. (2004). *Els incendis forestals*. A: Els boscos de Catalunya. Estructura, dinàmica i funcionament. Quaderns de Medi Ambient, 11. Departament de Medi ambient i Habitatge. Generalitat de Catalunya, 124-136.

Eugenio, M., Verkaik, I., Lloret, F., Espelta, J.M. (2006). *Recruitment and growth decline in Pinus halepensis populations after recurrent wildfires in Catalonia (NE Iberian Peninsula).* Forest Ecology and Management, 231, 47-54.

Farriol, R., Mascort, F. (2010). *Terminologia forestal en els instruments d'ordenació forestal.* Departament de Medi Ambient i Habitatge. Generalitat de Catalunya. Barcelona, 179 pp.

Fensham, R.J. (1992). *The management implications of fine fuel dynamics in bushlands surrounding Hobart, Tasmania.* Journal of Environmental Management, 36, 301-320.

Fernandes, P. (2009). *Combining forest structure data and fuel modelling to classify fire hazard in Portugal*. Annals of Forest Science, 66 (4), 415-419.

Fernandes, P., Botelho, H. (2003). *A review of prescribed burning effectiveness in fire hazard reduction.* International Journal of Wildland Fire, 12, 117-128.

Fernandes, P., Botelho, H., Loureiro, C. (2002). *Models for the sustained ignition and behaviour of low-to-moderately intense fires in maritime pine stands*. A: Viegas, D.X. (Ed.). Proceedings of the IV International Conference on Forest Fire Research and Wildland Fire Safety. 18-23 de novembre de 2002. Coimbra, Portugal, 11 pp.

Fiedler, C., Keegan, C. (2003). *Reducing crown fire hazard in fire-adapted forests of New Mexico.* A: Omi, P.N., Joyce, L.A. (Eds.). Fire, fuel treatments, and ecological restoration. 16-18 d'abril de 2002. Fort Collins, EUA. Proceedings RMRS-P-29. Rocky Mountain Research Station. USDA Forest Service. Fort Collins, EUA, 39-48.

Fiedler, C., Keegan, C., Woodall, C., Morgan, T. (2004). *A strategic assessment of crown fire hazard in Montana: Potential effectiveness and costs of hazard reduction treatments.* General Technical Report PNW-GRT-622. Pacific Northwest Research Station. USDA Forest Service. Portland. Oregon, EUA, 48 pp.

Finney, M. (1998). *Farsite: Fire area simulator-Model development and evaluation.* Research Paper RMRS-RP-4. Rocky Mountain Research Station. USDA Forest Service. Ogden, EUA, 47 pp.

Finney, M. (2006). *An overview of FlamMap modeling capabilities*. A: Andrews, P.L., Butler, B.W. (Eds.). Fuels Management-How to Measure Success. 28-30 de març de 2006. Portland, EUA. Proceedings RMRS-P-41. Rocky Mountain Research Station USDA Forest Service. Fort Collins, EUA, 213-220.

Forestry Canada Fire Danger Group (1992). *Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System*. Info. Rep. ST-X-3.Canadian Forest Service. Ottawa, Canadà, 63 pp.

Forney, G.P. (2007). *User Guide for SmokeView Version 5 - A tool for visualizing Fire Dynamics Simulation data.* NIST Special Publication 1017-1. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, EUA, 134 pp.

Fosberg, M. (1970). *Drying rates of heartwood below fiber saturation*. Forest Science, 16, 57-63.

Frandsen, W.H. (1971). *Fire spread through porous fuels from the conservation of energy*. Combustion and Flame, 16, 9-16.

Fulé, P.Z., Covington, W.W., Smith, H.B., Springer, J.D., Heinlein, T.A., Huisinga, K.D., Moore, M.M. (2002). *Comparing ecological restoration alternatives: Grand Canyon, Arizona*. Forest Ecology and Management, 170, 19-41.

Fulé, P.Z., McHugh, C., Heinlein, T.A., Covington, W.W. (2001a). *Potential fire behavior is reduced following forest restoration treatments* A: Vance, R.K., Edminster, C.B., Covington, W.W., Blake, J.A. (Eds.). Ponderosa pine ecosystems restoration and conservation: steps towards stewardship. 25-27 d'abril de 2000. Flagstaff, EUA. Proceedings RMRS-22. Rocky Mountain Research Station. USDA Forest Service, Ogden, EUA, 28-35.

Fulé, P.Z., Waltz, A.E.M., Covington, W.W., Heinlein, T.A. (2001b). *Measuring forest restoration effectiveness in reducing hazardous fuels*. Journal of Forestry, 99 (11), 24-29.

Gaur, S., Reed, T. (1998). *Thermal Data for Natural and Synthetic Fuels*. Consultat el 20 de setembre de 2011, a http://www.woodgas.com/proximat.htm.

Gillon, D., Hernando, C., Valette, J.C., Joffre, R. (1997). *Fast estimation of the calorific values of forest fuels by near-infrared reflectance spectroscopy.* Canadian Journal of Forest Research, 27, 760-765.

González-Ochoa, A.I., López-Serrano, F.R., De las Heras, J. (2004). *Does post-fire forest management increase tree growth and cone production in Pinus halepensis?* Forest Ecology and Management, 188, 235-247.

Gould, J.S., Cheney, N.P., McCaw, L. (2001). *Fire behaviour and fire danger rating: Project Vesta-research into the effects of fuel structure and fuel load on fire behaviour of moderate to high-intensity fires in dry eucalypt forest: progress report.* A: Proceedings of Bushfire 2001. Australasian Bushfire Conference. 3-6 de juliol de 2001. Christchurch, Nova Zelanda, 13-21.

Graham, R.T., Harvey, A.E., Jain, T.B., Tonn, J.R. (1999). *The effects of thinning and similar stand treatments on fire behavior in western forest.* Pacific Northwest Research Station. General Technical Report PNW-GRT-463. USDA Forest Service. Portland, EUA, 27 pp.

Grishin, A. (1997). *A mathematical model of forest fires and new methods of fighting them.* Publishing house of the Tomsk State University. Tomsk, Rússia, 139 pp.

Guijarro, M., Hernando, C., De los Santos, J.A., Díez, C. (1997). *EFAISTOS. Experiments and simulations for improvement and validation of behaviour models of forest fires*. European Contract ENV4-CT96-0299. Intermediate report.

Guijarro, M., Hernando, C., Díez, C., Martínez, E., Madrigal, J., Lampin, C., Blanc, L., Colin, P.Y., Pérez-Gorostiaga, P., Vega, J.A., Fonturbel, M.T. (2002*). Flammability of some fuel beds common in the South-European ecosystems*. A: Viegas, D.X. (Ed.). Proceedings of the IV International Conference on Forest Fire Research and Wildland Fire Safety. 18-23 de novembre de 2002. Coimbra, Portugal, p. 152.

Habrouk, A. (2001). *Regeneración natural y restauración de la zona afectada por el gran incendio del Bages y Berguedà de 1994*. Tesi Doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona, 125 pp.

Hanley, M.E., Fenner, M. (1997). *Seedling growth of four fire-following Mediterranean plant species deprived of single mineral nutrients*. Functional Ecology, 11, 398-405.

Hernando, C., Elvira, L. (1989). *Inflamabilidad y energía de las especies de sotobosque*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA). Madrid, 99 pp.

ICC (Institut Cartogràfic de Catalunya). (2009). *Mapa geològic de Catalunya.* Consultat el 18 de març de 2009, a http://www.icc.es/web/content/ca/prof/cartografia/productes.html.

Jenkins, B., Baxter, L., Miles, T.Jr., Miles, T. (1998). *Combustion properties of biomass*. Fuel Processing Technology, 54, 17-46.

Kalabokidis, K.D., Omi, P.N. (1998). *Reduction of fire hazard through thinning/residue disposal in the urban interface.* International Journal of Wildland Fire, 8, 29-35.

Kobziar, L.N., McBride, J.R., Stephens, S.L. (2009). *The efficacy of fire and fuels reduction treatments in a Sierra Nevada pine plantation.* International Journal of Wildland Fire, 18, 791-801.

Lemmon, P. (1956). *A spherical densitometer for estimating forest overstory density*. Forest science, 2 (1), 314-320.

Lindner, M., Garcia-Gonzalo, J., Kolström, M., Green, T., Reguera, R., Maroschek, M., Seidl, R., Lexer, M.J., Netherer, S., Schopf, A., Kremer, A., Delzon, S., Barbati, A., Marchetti, M., Corona, P. (2008). *Impacts of climate change on European forests and options for adaptation.* European Commission. Luxemburg, Bèlgica, 173 pp.

Linn, R. R. (1997). *A transport model for prediction of wildfire behaviour*. Tesi doctoral. Science Report LA-13334-T. New Mexico State University. Los Alamos National Laboratory. Los Alamos, EUA, 195 pp.

Linn, R.R., Harlow, F.H. (1998). *Use of transport models for wildfire behaviour simulations*. A: Viegas, D.X. (Ed.). Proceedings of the III International Conference on Forest Fire Research and 14th Conference on Fire and Forest Meteorology. 16-20 de novembre de 1998. Luso, Portugal, volum I, 363-372.

Linn, R., Reisner, J., Colman, J.J., Winterkamp, J. (2002). *Studying wildfire behavior using FIRETEC.* International Journal of Wildland Fire, 11 (3-4), 233-246.

Llobet, S. (2008). *Proposta de model silvícola per a boscos de pi blanc (Pinus halepensis).* A: Models silvícoles en boscos privats mediterranis. Diputació de Barcelona. Sèrie Territori, 5, 109-144.

Main, W.A., Paananen, D.M., Burgan, R.E. (1990). *Fire Family Plus.* General Technical Report NC- 138. North Central Forest Experiment Station. USDA Forest Service, 35 pp.

Manson, G., Baker, T., Cram, D., Boren, J., Fernald, A., VanLeeuwen, D. (2007). *Mechanical fuel treatment effects on fuel loads and indices of crown fire potential in a south central New Mexico dry mixed conifer forest.* Forest Ecology and Management, 251, 195-204.

Martinson, E.J., Omi, P.N. (2008). *Assessing mitigation of wildfire severity by fuel treatments- an example from the Coastal Plain of Mississippi.* International Journal of Wildland Fire, 17, 415-420.

McArthur, A. (1967). *Fire behaviour in eucaliptus forests.* Commonw. Aust., Dep. Nat. Devel., Forest and Timber Bureau. Leaflet 107. Canberra, Austràlia, 36 pp.

McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., Baum, H., Rehm, R., Mell, W., McDermott, R. (2008a). *Fire Dynamics Simulator (version 5). Technical reference Guide. Volum 1: Mathematical model.* NIST special publication 1018-5. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, EUA, 92 pp.

McGrattan, K., Klein, B., Hostikka, S., Floyd, J. (2008b). *Fire Dynamics Simulator (Version 5). User's Guide.* NIST special publication 1019-5. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, EUA, 188 pp.

Mell, W., Jenkins, M., Gould, J., Cheney, P. (2007a). *A physics-based approach to modelling grassland fires.* International Journal of Wildland Fire, 16, 1-22.

Mell, W., Maranghides, A., Rehm, R., Manzello, S.L., Forney, G., Jenkins, M.A., Sun, R., Krueger, S. (2007b). *Wildland-Urban Interface and Wildland Fires.* Consultat el 21 de juliol de 2011, a http://www2.bfrl.nist.gov/userpages/wmell/public.html.

Mell, W., Maranghides, A., McDermott, R., Manzello, S.L. (2009). *Numerical simulation and experiments of burning Douglas Fir trees.* Combustion and Flame, 156, 2023-2041.

Mitchell, K. (2007). *Quantitative analysis by the point-centered quarter method*. Consultat l'1 d'agost de 2010, http://people.hws.edu/mitchell/PCQM.pdf.

Mitsopoulos, I., Dimitrakopoulos, A. (2007a). *Allometric equations for crown fuel biomass of Aleppo pine (Pinus halepensis Mill.) in Greece*. International Journal of Wildland Fire, 16, 642-647.

Mitsopoulos, I., Dimitrakopoulos, A. (2007b). *Canopy fuel characteristics and potential crown fire behavior in Aleppo pine (Pinus halepensis Mill.) forests*. Annals of Forest Science, 64, 287-299.

Morvan, D., Dupuy, J. (2001). *Modeling fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation.* Combustion and Flame, 127, 1981-1984.

Morvan, D., Dupuy, J. (2004). *Modelling the propagation of a wildfire through a mediterranean shrub using a multi-phase formulation*. Combustion and Flame, 138, 199-210.

Morvan, D., Dupuy, J., Rigolot, E., Valette, J. (2006). *FIRESTAR: a physically based model to study wildfire behaviour.* A: Viegas, D.X. (Ed.). Proceedings of the V International Conference of Forest Fire Research. 27-30 de novembre de 2006. Figueira da Foz , Portugal, S114.

Morvan, D., Méradji, S., Accary, G. (2009). *Physical modelling of fire spread in grasslands.* Fire Safety Journal, 44, 50-61.

Moya, D., De las Heras, J., López-Serrano, F.R., Condes, Q., Alberdi, I. (2009). *Structural patterns and biodiversity in burned and managed Aleppo pine stands*. Plant Ecology, 200, 217-228.

Müller-Dombois, D., Ellenberg, H. (1974). *Aims and methods of vegetation ecology*. John Wiley. New York, EUA, 547 pp.

Naveh, Z. (1990). *Fire in the Mediterranean- a landscape ecological perspective.* A: Goldammer, J.C., Jenkins, M.J. (Eds.). Fire in ecosystem dynamics: Mediterranean and Northern perspectives. SPA Academic Publishing. La Haia, Països Baixos, 1-12.

Ninyerola, M., Pons, X., Roure, J.M., Martín Vide, J., Raso, J.M., Clavero, P. (2003). *Atlas Climàtic de Catalunya*. Servei de Meteorologia de Catalunya i Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya.

Oliveras, I., Bell, T. (2008). *An Analysis of the Australian Literature on Prescribed Burning.* Journal of Forestry, 106 (1), 31-37.

Omi, P., Kalabokidis, K. (1991). *Fire damage on extensively versus intensively managed forest stands within the North Fork fire, 1988*. Northwest Science, 65, 149-157.

Padilla, M. (2004). *Caracterització del model de combustible d'un regenerat de Pinus Halepensis.* Treball pràctic tutorat. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària. Universitat de Lleida. Lleida, 136 pp.

Papió, C. (1994). *Ecologia del foc i regeneració en garrigues i pinedes mediterrànies. Barcelona.* Institut d'Estudis Catalans. Secció de Ciències Biològiques, 292 pp.

Pasquill, F. (1961). *The estimation of the dispersion of windborne material*. The Meteorological Magazine, 90, 33-49.

Pastor, E. (2004). *Contribució a l'estudi dels efectes dels retardants en l'extinció d'incendis forestals.* Tesi Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 304 pp.

Pastor, E., Àgueda, A., Andrade-Cetto, J., Muñoz, M., Pérez, Y., Planas, E. (2006). *Computing rate of spread of linear flame fronts by thermal image processing*. Fire Safety Journal, 41 (8), 569-579.

Pausas, J.G., Bladé, C., Valdecantos, A., Seva, J.P., Fuentes, D., Alloza, J.A., Vilagrosa, A., Bautista, S., Cortina, J., Vallejo, R. (2004). *Pines and oaks in the restoration of Mediterranean landscapes in Spain: New perspectives for an old practice - a review*. Plant Ecology, 171, 209-220.

Pérez, Y. (2010). *Contribució a l'estudi de l'efecte del canvi d'escala en l'experimentació en incendis forestals*. Tesi Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 308 pp.

Piqué, M., Valor, T., Castellnou, M., Pagès, J., Larrañaga, A. (2011*). Orientacions de gestió sostenible i multifuncional per als boscos de Catalunya (ORGEST . Eines per a la integració de la*

vulnerabilitat a GIF en la gestió forestal. Centre de la Propietat Forestal (CPF), Departament de Medi Ambient i Habitatge (DMAH) i Generalitat de Catalunya.

Pollet, J., Omi, P. (2002). *Effect of thinning and prescribed burning on crown fire severity in ponderosa pine forests.* International Journal of Wildland Fire, 11, 1-10.

Porterie, B., Morvan, D., Loraud, J., Larini, M. (2000). *Fire spread through fuel beds: modeling of wind-aided fires and induced hydrodynamics.* Physics of Fluids, 12 (7), 1762-1782.

Prévosto, B., Bousquet-Mélou, A., Ripert, C., Fernandez, C. (2011a). *Effects of different site preparation treatments on species diversity, composition and plant traits in Pinus halepensis woodlands.* Plant Ecology, 212 (4), 627-638.

Prévosto, B., Monnier, Y., Ripert, C., Fernandez, C. (2011b). *Diversification of Pinus halepensis forests by sowing Quercus ilex and Quercus pubescens acorns: testing the effects of diferent vegetation and soil treatments.* European Journal of Forest Research, 130, 67-76.

Pyne, S., Andrews, P., Laven, R. (1996). *Introduction to wildland fire.* John Wiley & Sons. New York, EUA, 769 pp.

Quézel, P. (2000). *Taxonomy and biogeography of Mediterranean pines (Pinus halepensis and Pinus brutia).* A: Néeman, G., Trabaud, L. (Eds.). Ecology, biogeography and management of *Pinus halepensis* and *P. Brutia* forest ecosystems in the Mediterranean basin. Backhuys Publishers. Leiden, Països Baixos, 1-12.

Ravindran, A., Ragsdell, K.M., Reklaitis, G.V. (2006). *Engineering Optimization: methods and applications*. 2na edició. John Wiley and Sons. New Jersey, EUA, 688 pp.

Raymond, C.L., Peterson, D.L. (2005). *Fuel treatments alter the effects of wildfire in a mixed-evergreen forest, Oregon, EUA.* Canadian Journal of Forest Research, 35, 2981-2995.

Reiner, A.L., Vaillant, N.M., Fites-Kaufman, J., Dailey, S.N. (2009). *Mastication and prescribed fire impacts on fuels in a 25-year old ponderosa pine plantation, southern Sierra Nevada.* Forest Ecology and Management, 258 (11), 2365-2372.

Reinhardt, E., Crookston, N.L. (2003). *The Fire and Fuels Extension to the Forest Vegetation Simulator.* General Technical Report RMRS-GTR-116. Rocky Mountain Research Station USDA Forest Service. Ogden, EUA, 209 pp.

Reinhardt, E., Scott, J., Gray, K., Keane, R. (2006). *Estimating canopy fuel characteristics in five conifer stands in the western United States using tree and stand measurements.* Canadian Journal of Forest Research, 36, 2803-2814.

Reisner, J.M., Wynne, S., Margolin, L., Linn, R.R. (2002). *Coupled atmospheric-fire modeling employing the method of averages.* Monthly Weather Review, 128, 3683-3691

Richardson, D.M., Rundel, P.W. (1998). *Ecology and biogeography of Pinus: an introduction.* A: Richardson, D.M. (Ed.). Ecology and biogeography of Pinus. Cambridge University Press. Cambridge, Regne Unit, 3-40.

Rigolot, E. (2004). *Predicting postfire mortality of Pinus halepensis Mill. and Pinus pinea L*. Plant Ecology, 171, 139-151.

Ritchie, S.J., Steckler, K.D., Hamins, A., Cleary, T.G., Yang, J.C., Kashiwagi, T. (1997).*The effect of sample size in the Heat release rate of charring materials*. A: Hasemi, Y. (Ed.). 5th International Symposium. 3-7 de marc de 1997. Melbourne, Austràlia. International Association for Fire Safety Science, 177-188.

Roccaforte, J.P., Fulé, P.Z., Covington, W.W. (2008). *Landscape-scale changes in canopy fuels and potential fire behaviour following ponderosa pine restoration treatments.* International Journal of Wildland Fire, 17, 293-303.

Rothermel, R. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels.* Research Paper INT-115. Intermountain Forest and Range Experiment Station. USDA Forest Service. Ogden, EUA, 40 pp.

Rothermel, R. (1983). *How to predict the spread and intensity of forest and range fires*. General Technical Report INT-143. Intermountain Forest and Range Experiment Station. USDA Forest Service. Ogden, EUA, 161 pp.

Rothermel, R. (1991). *Predicting behaviour and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains.* Intermountain Research Station. General Technical Report INT-438. USDA Forest Service. Ogden, EUA, 46 pp.

Ryan, K.C., Noste, N.V. (1985). *Evaluating prescribed fires.* A: Lotan, J.E. (Ed.). Workshop on Wildness Fires. 15-18 de novembre de 1983. Missoula, EUA. General Technical Report INT-182. Intermountain Forest and RangeExperiment Station. USDA Forest Service. Ogden, EUA, 230-238.

Sackett, S.S. (1975). *Scheduling prescribed burns for hazard reduction in the Southeast*. Journal of Forestry, 73, 143-147.

Safford, H.D., Schmidt, D.A., Carlson, C.H. (2009). *Effects of fuel treatments on fire severity in an area of wildland-urban interface, Angora Fire, Lake Tahoe Basin, California.* Forest Ecology and Management, 258, 773-787.

Santoni, P. (1998). *Elaboration of an evolving calculation domain for the resolution of a fire spread model.* Numerical Heat transfer, Part A: Applications, 33 (3), 279-298.

Scherl, T. (2005). *At the crossroads: A comparison of current social, scientific and political influences on fire management in Australia and the USA.* World Forest Institute, Portland, EUA, 67 pp.

Schmidt, D., Taylor, A., Skinner, C. (2008). *The influence of fuels treatment and landscape arrangement on simulated fire behavior, Southern Cascade range, California.* Forest Ecology and Management, 255, 3170-3184.

Schroeder, M., Buck, C. (1970). *Fire weather: a guide for application of meteorological information to forest fire control operations.* Agricultural Handbook 360. USDA Forest Service, US Government Printing Office, Washington, EUA, 18 pp.

Scott, J.H. (1998a). *Sensitivity analysis of a method for assessing crown fire hazard in the northern Rocky Mountains, USA*. A: Viegas, D.X (Ed.). Proceedings of the III International Conference on Forest Fire Research and 14th Conference on Fire and Forest Meteorology. 16-20 de novembre de 1998. Luso, Portugal, volum II, 2517-2532.

Scott, J.H. (1998b). *Using the Fire and Fuels Extension to the Forest Vegetation Simulator to assess long-term changes in crown fire hazard*. A: Viegas, D.X. (Ed.). Proceedings of the III International Conference on Forest Fire Research and 14th Conference on Fire and Forest Meteorology. 16-20 de novembre de 1998. Luso, Portugal, volum II, 2621-2629.

Scott, J.H. (1999). *NEXUS: A system for assessing crown fire hazard.* Fire Management Notes, 59 (2), 20-24.

Scott, J.H. (2006). *Comparison of crown fire systems used in three fire management applications.* Research Paper RMRS-RP-58. Rocky Mountain Research Station. USDA Forest Service. Fort Collins, EUA, 25 pp.

Scott, J.H., Burgan, R.E. (2005). *Standard Fire Behaviour Fuel Model: A Comprehensive Set for use with Rothermel´s Surface Fire Spread Model.* General Technical Report RMRS-GTR-153. Rocky Mountain Research Station. USDA Forest Service. Fort Collins, EUA, 72 pp.

Scott, J.H., Reinhardt, E.D. (2001). *Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire potential*. Research Paper RMRS-29. Rocky Mountain Research Station. USDA Forest Service. Fort Collins, EUA, 59 pp.

Scott, J.H., Reinhardt, E.D. (2002). *Estimating canopy fuels in conifer forests*. Fire Management Today, 62, 45-50.

Scott, J.H., Reinhardt, E.D. (2007). *Effects of alternative treatments on canopy fuel characteristics in five conifer stands.* A: Powers, R. F. (Ed.). Restoring fire-adapted ecosystems. Proceedings of the 2005 National Silviculture Workshop. 6-10 de juny de 2005. Tahoe City, EUA. General Technical Report GTR-203. Pacific Southwest Research Station. USDA Forest Service. Albany, EUA, 193-209.

Serrada, R. (2003). *Regeneración natural. Situaciones, conceptos y evaluación*. Cuadernos de la Sociedad de Ciencias Forestales, 15, 11-16.

Skinner, C.N., Ritchie, M.W., Hamilton, T., Symons, J. (2004). *Effects of thinning and prescribed fire on wildfire severity*. A: Cooper, S. (Ed.). Proceedings of the 25th Annual Forest Vegetation Management Conference. 20-22 de gener de 2004. Redding, EUA, 80-91.

Stage, A. (1973). *Prognosis Model for stand development.* Research Paper INT-137. Intermountain Forest and Range Experiment Station. USDA Forest Service. Ogden, EUA, 32 pp.

Stephens, S. (1998). *Evaluation of the effects of silvicultural and fuel treatments on potential fire behaviour in Sierra Nevada mixed-conifer forests.* Forest Ecology and Management, 105, 21-35.

Stephens, S., Moghaddas, J. (2005a). *Experimental fuel treatment impacts on forest structure, potential fire bahavior, and predicted tree mortality in a California mixed conifer forest.* Forest Ecology and Management, 215, 21-36.

Stephens, S., Moghaddas, J. (2005b). *Silvicultural and reserve impacts on potential fire behavior and forest conservation: 25 years of experience from Sierra Nevada mixed conifer forests.* Biological Conservation, 125, 369-379.

Stephens, S., Moghaddas, J., Edminster, C., Fiedler, C., Haase, S., Harrington, M. (2009). *Fire treatment effects on vegetation structure, fuels, and potential fire severity in western U.S. forests.* Ecological Applications, 19, 305-320.

Stratton, R. (2004). *Assessing the effectiveness of landscape fuel treatments on fire growth and behavior*. Journal of Forestry, 102, 32-40.

Strom, B.A., Fulé, P.Z. (2007). *Pre-fire fuel treatments affect long-term ponderosa pine forest dynamics.* International Journal of Wildland Fire, 16, 128-138.

Sullivan, A. (2009). *Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 1: Physical and quasi-physical models*. International Journal of Wildland Fire, 18, 349-368.

Taylor, S.W., Pike, R.G., Alexander, M.E. (1997). *Field guide to the Canadian forest fire behavior prediction (FBP) system.* Special Report 11. Northern Forestry Centre. Canadian Forest Service. Edmonton, Canadà. 60 pp.

Terradas, J. (1996). *Els incendis del 1994, un problema mundial*. A: Terradas, J. (Ed.). Ecologia del foc. Edicions PROA. Barcelona, 11-14.

Thomas, P.H. (1963). *The size of flames from natural fires.* A: Proceedings of the ninth Symposium on Combustion. Academic Press, 9 (1), 844-859.

Trabaud, L. (2000). *Post-fire regeneration of Pinus halepensis forests in West Mediterranean.* A: Néeman, G., Trabaud, L. (Eds.). Ecology, biogeography and management of *Pinus halepensis* and *P. Brutia*. Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin. Backhuys Publishers. Leiden, Països Baixos, 257-268.

Torras, O., Saura, S. (2008). *Effects of silvicultural treatments on forest biodiversity indicators in the Mediterranean*. Forest Ecology and Management, 255, 3322-3330.

Tsitsoni, T. (1997). *Conditions determining natural regeneration after wildfires in the Pinus halepensis (Miller, 1768) forests of Kassandra Peninsula (North Greece).* Forest Ecology and Management, 92, 199-208.

Tymstra, C., Bryce, R.W., Wotton, B.M., Armitage, O.B. (2009). *Development and structure of Prometheus: the Canadian wildland fire growth simulation model.* Information Report NOR-X-417. Natural Resource Canada. North Forestry Centre. Canadian Forest Service. Edmonton, Canadà, 88 pp.

Zavala, M.A., Espelta, J.M., Retana, J. (2000). *Constraints and tradeoffs in Mediterranean plant communities: the case of holm oak (Quercus ilex L.)-aleppo pine (Pinus halepensis Mill.) forests.* The Botanical Review, 66, 119-149.

Vaillant, N.M., Fites-Kaufman, J., Reiner A.L., Noonan-Wright, E.K., Dailey S.N. (2009). *Effect of fuel treatments on fuels and potential fire behavior in California National Forests*. Fire Ecology, 5 (2), 14-29.

Vaillant N.M., Fites-Kaufman, J., Stephens, S.L. (2006). *Effectiveness of Prescribed Fire as a Fuel Treatment in Californian Coniferous Forests.* A: Andrews, P.L., Butler, B.W. (Eds.). Fuels Management-How to Measure Success. 28-30 de març de 2006. Portland, EUA. Proceedings RMRS-P-41. Rocky Mountain Research Station USDA Forest Service. Fort Collins, EUA, 465-476.

Valette, J.C. (1988). *Inflammabilité, teneur en eau et turgenscence relative de quatre espèces forestières méditerranéennes*. Documentos del Seminario sobre Métodos y Equipos para la Prevención de Incendios Forestales. ICONA. Madrid, 98-107.

Valette, J.C., Clements, A., Delabraze, P. (1979). *Inflammabilité d'espèces mediterranéennes*. INRA, 29 pp.

Vallejo, R., Aronson, J., Pausas, J.G., Cortina. J. (2006). *Restoration of Mediterranean woodlands.* A: Van Andel, J., Aronson, J. (Eds.). Restoration ecology: the new frontier. Blakwell Science. Massachusetts, EUA, 193-209.

Van Wagner, C.E. (1971*). Two solitudes in forest fire research*. PS-X-29. Petawawa Forest Experiment Station. Canadian Forestry Service. Ontario, Canadà,7 pp.

Van Wagner, C.E. (1977). *Conditions for the start and spread of crown fires.* Canadian Journal of Forest Research, 7, 23-34.

Van Wagtendonk, J. (1996). *Use of a deterministic fire growth model to test fuel treatments.* Sierra Nevada Ecosystem Project, Final Report to Congress, volum II. Assessments and Scientific Basis for Management Options. Centers for Water and Wildland Resources, Universtiyt of California. Davis, EUA, 1155-1197.

Van Wagtendonk, J. W., Sydoriak, C.A. (1987). *Fuel accumulation rates after prescribed fires in Yosemite National Park.* A: Proceedings 9th Conference on fire and forest meteorology. American Meteorological Society. Boston, EUA, 101-105.

Vélez, R. (2000). *La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencia.* McGraw Hill, Madrid.

Viegas, D.X. (2005). *A mathematical model for forest fires blowup.* Combustion Science and Technology, 177, 27-51.

Viegas, D.X., Cruz, M.G., Ribeiro, L.M., Silva, A.J., Ollero, A., Arrue, B., Dios, R., Gómez-Rodríguez, F., Merino, L., Miranda, A.I., Santos, P. (2002). *Gestosa fire spread experiments.* A: Viegas, D.X. (Ed.). Proceedings of the IV International Conference on Forest Fire Research and Wildland Fire Safety. 18-23 de novembre de 2002. Coimbra, Portugal, 13 pp.

Verkaik, I., Espelta, J.M. (2004). *Efecto del aclareo sobre las características reproductivas de Pinus halepensis Mill. en masas con diferente edad de regeneración postincendio.* IV Congreso forestal español, 337-343.

Wakimoto, R.H., Pfister, R.D., Kalabokidis, K.D. (1988). *Evaluation of alternative fire hazard reduction techniques in high-hazard, high-value, and high-use forests.* A: Schmidt, W.C. (Ed.) Proceedings Future forest of the mountain west: a stand culture symposium. 29 de setembre-3 d'octubre de 1986. Missoula, EUA. General Technical Report INT-243. Pacific Northwest Research Station. USDA Forest Service. Portland, EUA, 401-402.

Winterkamp, J.L., Linn, R. R., Sauer, J. A. (2009). *Influence of coupled topographic- atmospheric effects on the effectiveness of fuel treatments in complex topography. A:* Eighth Symposium on Fire and Forest Meteorology. 12-15 d'octubre de2009. Montana, EUA, 1 pp.

Wykoff, W., Crookston, N., Stage, A. (1982). *User's guide to the stand Prognosis Model.* Research Paper INT-133. USDA Forest Service, 112 pp.

Annex I

Materials, mètodes i càlculs per determinar les propietats del combustible i resultats obtinguts

En aquest annex s'inclou el procediment metodològic utilitzat per obtenir les propietats extrínseques i intrínseques del combustible. A la última part es detallen els resultats obtinguts amb cadascun dels procediments utilitzats.

En primer lloc per caracteritzar el combustible va ser necessari fer una anàlisi bibliogràfica per recollir aquelles tècniques més utilitzades i a continuació es va fer una valoració de les que podrien adequar-se millor als objectius de la tesi. Els procediments escollits que es detallen en aquest annex s'han adaptat a les necessitats i objectius de la tesi.

S'ha cregut convenient incloure tot els procediments, càlculs i resultats obtinguts en aquest Annex perquè s'han utilitzat moltes metodologies diferents i formes de càlcul diverses per cadascuna d'elles. Alhora, el recull de tot el procediment ha de permetre aplicar aquesta metodologia en altres casos d'estudi referents a la vulnerabilitat dels boscos de pi blanc davant els incendis forestals.

I.1. Mètodes de mostreig i càlculs pel determinar les propietats extrínseques del combustible

I.1.1. Mostreig del combustible dipositat al sotabosc

Metodologia

El procediment seguit es va adaptar a partir del dissenyat per Brown (1974) i va constar dels següents passos:

1. Es va situar el punt d'inici del pla de mostreig. Es va evitar alterar la vegetació al voltant d'aquest punt.
2. Es va posicionar el pla de mostreig estirant una cinta mètrica fins a la longitud corresponent. Des del punt d'inici de cada pla, en els primers 5 m es van mesurar les restes de diàmetre inferior a 2,5 cm, en els primers 10 m es van mesurar totes les restes entre 2,5 i 7,6 cm i al llarg dels 20 m totes les restes de més de 7,6 cm.
3. Es va mesurar el pendent del pla de mostreig mitjançant un clinòmetre.
4. Es van comptar el nombre de partícules que interceptaven amb el pla de mostreig distingint mitjançant galgues dissenyades a tal efecte les següents classes diametrals: 0–0,6 cm; 0,6–2,5 cm i 2,5–7,6 cm.

Càlculs associats al combustible dipositat al sotabosc

Una vegada finalitzat l'inventari a camp es van realitzar els càlculs corresponents per obtenir les càrregues de cada fracció diametral del combustible dipositat al sotabosc. Per això es van aplicar les equacions proposades per Brown (1974) per determinar la càrrega del combustible de diàmetre de 0-0,6 cm, de 0,6 a 2,5 cm i de 2,5 a 7,6 cm (Eq. I.1) i superior a 7,6 cm (Eq. I.2).

$$\left(\frac{tones}{hectàrea}\right) = 2{,}47\left(\frac{11{,}64 \cdot n_i \cdot d^2 \cdot s \cdot a \cdot c}{N_\ell}\right) \qquad \text{Eq. I.1}$$

$$\left(\frac{tones}{hectàrea}\right) = 2{,}47\left(\frac{11{,}64 \cdot (\sum d^2) \cdot s \cdot a \cdot c}{N_\ell}\right) \qquad \text{Eq. I.2}$$

On, n és el nombre total d'interseccions trobades, d és el diàmetre mitjà per a la classe diametral corresponent (en polzades), s és la densitat relativa del combustible (adimensional), a és el factor de correcció de l'angle (adimensional), c és el factor de correcció del pendent (adimensional) i N_ℓ és la longitud total dels plans de mostreig per a la classe diametral corresponent (en peus).

Per tal de determinar cada un dels paràmetres de les equacions anteriors els càlculs es van realitzar seguint els passos que es detallen a continuació.

1. Es va calcular el factor de correcció del pendent mitjà (c) per tal d'anular l'efecte del pendent, a partir de l'Eq. I.3.

$$c = \sqrt{1 + \left(\frac{pendent\ en\ \%}{100}\right)^2} \qquad \text{Eq. I.3}$$

2. Es van comptar el nombre total d'interseccions (n_i) corresponents a cada una de les tres classes diametrals de menys de 7,6 cm, per a tots els punts de mostreig.
3. Es va determinar la densitat relativa del combustible a partir de la bibliografia. A la Taula I.1 es donen alguns valors aproximats per a coníferes (Brown, 1974).

Taula I.1. Valors aproximats de la densitat relativa per a coníferes.

Classe diametral [cm]	Densitat relativa
0 – 0,6	0,48
0,6 – 2,5	0,48
2,5 – 7,6	0,40
> 7,6, en bon estat	0,40
> 7,6, en descomposició	0,30

4. Es va determinar el factor de correcció de l'angle, a. Aquest paràmetre té en compte el fet que no totes les partícules dipositades en el sotabosc es troben en posició completament horitzontal i vertical tal com pressuposa la teoria del transsecte planar. Per a les restes degudes a operacions de tala es van utilitzar els valors de la Taula I.2.
5. Es va calcular la longitud total del transsecte, N_ℓ, per a cada classe diametral, calculant el producte del nombre de plans de mostreig per la longitud dels plans de mostreig de la classe diametral corresponent.

6. Per als combustibles de més de 7,6 cm de diàmetre, es va determinar el valor del diàmetre al quadrat per a cada peça i es va fer la suma de les que les que estaven en bon estat i les que estaven en descomposició per separat. Després es va calcular el diàmetre mitjà per cada un d'aquests grups.
7. Es va calcular el valor mitjà de la profunditat de la capa de virosta i de la del combustible dipositat al sotabosc.

Taula I.2. Factor de correcció de l'angle per a restes originades en operacions de tala (Brown, 1974).

Classe diametral [cm]	Factor de correcció de l'angle (a) (*)	
	Restes recents	Restes de més d'un any
0–0,6	1,40	1,15
0,6–2,5	1,13	1,13
2,5–7,6	1,10	1,10
> 7,6	1,00	1,00

(*) Aquests valors corresponen a una mitjana per als següents combustibles: *Douglas-fir*, *Lodgepole pine*, *Engelmann spruce*, *Western redcedar*, *Western larch* i *Grand-fir*.

I.1.2. Mostreig del combustible de superfície en peu

Metodologia

El mostreig del combustible de superfície es va basar en la metodologia de Canfield (1941) (Figura I.1). Els passos seguits en el mostreig van ser els següents:

1. Primer es va situar el punt d'inici del transsecte.
2. Des del punt d'inici es va estirar una cinta mètrica ben tensada al llarg de 20 m fins al punt final.
3. A continuació es va retornar a l'inici i es va anar anotant al full de presa de dades el tipus de vegetació, segons si era herbaci, arbustiu, arbori o sense vegetació, la distància que ocupava de la cinta, la seva altura mitjana i la fracció de combustible mort que se n'observava. En el cas dels arbusts i els arbres a més se'n va indicar l'espècie. Pels arbres amb una altura superior a 1,3 m en lloc de l'altura es va mesurar el seu diàmetre a l'altura del pit (*DBH*).

A l'hora de fer el transsecte lineal es van tenir en compte algunes regles bàsiques:

- En mesurar la distància d'intersecció, en cas de superposició d'espècies es van comptabilitzar totes.
- Si es detectava que hi havia capçades superposades, si es tractava d'una mateixa espècie no es distingien i es mesurava la distància com si en fos una de sola. Si es tractava de dues espècies diferents, aleshores es mesurava la distància de cada una.
- L'altura es va mesurar només per a la zona que interceptava amb la cinta, no per a la planta sencera, i corresponia al valor mitjà d'aquest tram.

Figura I.1. Mostreig de superfície.

I.1.3. Mostreig del combustible arbori

Mètodes indirectes per determinar d'*ACFL* i *ACBD*

Una vegada dut a terme el treball a camp es van realitzar els càlculs que es detallen a continuació per obtenir la càrrega de combustible i la densitat aparent.

Càrrega de combustible disponible de capçades (ACFL)

La càrrega del combustible vegetal [t ha^{-1}] sovint es determina relacionant la massa amb paràmetres estructurals i fàcilment mesurables a través de relacions al·lomètriques (Eq. I.4) (e.g. Mitsopoulos i Dimitrakopoulos, 2007a).

$$Y = a\ (X)^b \qquad \text{Eq. I.4}$$

On Y és la variable dependent (massa de combustible) i X la variable independent, i a i b són constants.

Les variables independents mesurades van ser *DBH*, *SH*, *CBH*, *CH i CW* (Taula I.3). Per cada variable independent es va realitzar una regressió lineal, l'Eq. I.4 es va ajustar mitjançant logaritmes. El valor de R^2 de l'ajust va determinar que l'altura de l'arbre (*SH*) era la que tenia una correlació més elevada amb la càrrega de combustible de capçada i es va utilitzar com a variable independent (Taula I.4).

Taula I.3. Variables mesurades en el mostreig destructiu de capçades [cm].

	DBH	***SH***	***CBH***	***CH***	***CW***
Mitjana	3,67 (2,24)	307,86 (118,46)	90,29 (39,76)	217,57 (82,00)	209,29 (57,23)
Valor màxim	7,00	490,00	141,00	349,00	278,50
Valor mínim	0,90	165,00	44,00	121,00	137,00

Desviació estàndard entre parèntesi.

Taula I.4. Valors obtinguts per les regressions per cada variable independent.

Paràmetre	**Paràmetres de la regressió**	**Acícules**	**Branques 0-0,6 cm**
DBH	a	0,353	0,307
	b	0,872	0,745
	R^2	0,857	0,776
SH	a	$7{,}91\ 10^{-5}$	$1{,}64\ 10^{-4}$
	b	1,654	1,474
	R^2	0,863	0,865
CBH	a	$1{,}77\ 10^{-3}$	$3{,}56\ 10^{-3}$
	b	1,419	1,196
	R^2	0,908	0,813
CH	a	$1{,}53\ 10^{-4}$	$2{,}29\ 10^{-4}$
	b	1,636	1,507
	R^2	0,777	0,831
CW	a	$4{,}16\ 10^{-6}$	$2{,}19\ 10^{-5}$
	b	2,319	1,953
	R^2	0,924	0,826

L'anàlisi de regressió va permetre també obtenir els paràmetres *a* i *b* de l'Eq. I.5 (Taula I.5). Un cop estimats aquests paràmetres i a partir de l'altura dels arbres de les parcel·les es va calcular la càrrega de combustible total (*W*) per cada parcel·la separant-la per classes diametrals.

Per estimar la càrrega de combustible de capçada disponible (*ACBD*) es va realitzar la suma de la massa total de fullatge i la meitat de la del combustible d'1h per a cada arbre (Reinhardt *et al.*, 2006). Aleshores la massa disponible de tots els arbres es va dividir per l'àrea de la parcel·la. En el cas de la parcel·la Z-control la massa disponible es va dividir pel nombre de peus mostrejats. Tot seguit, es va multiplicar per la densitat d'arbres.

$$W = a\,(SH)^b \qquad \text{Eq. I.5}$$

Taula I.5. Equacions al·lomètriques pel fullatge i les branques de diàmetre 0-0,6 cm pel pi blanc (P*inus halepensis*).

Tipus de combustible	Equació	R^2
Acicules	Biomassa= $7{,}91\ 10^{-5}\ (SH)^{1{,}654}$	0,86
Branques de 0-0,6 cm	Biomassa= $1{,}64\ 10^{-4}\ (SH)^{1{,}474}$	0,86

Biomassa [kg]. *SH* [cm].

Densitat aparent del combustible disponible de capçades (ACBD)

L'*ACBD* [kg m^{-3}] és la massa de combustible disponible sec per unitat de volum de l'estrat de capçades. El mètode utilitzat va ser el de càrrega per altura *(Load over depth method)* que considera una distribució vertical uniforme del combustible de capçades. Es va dividir la càrrega total de combustible disponible de capçades (*ACFL*) per l'altura mitjana de l'estrat de capçades (*CW*) (Eq. I.6).

$$ACBD = \frac{ACFL}{CW} \qquad \text{Eq. I.6}$$

L'altura mitjana de l'estrat de capçades es va estimar com la mitjana de l'altura de les capçades de tots els arbres mesurats. Aquest paràmetre es va calcular com la diferència entre l'altura de l'arbre (*SH*) i l'altura de la base de la capçada (*CBH)* (Cruz *et al.*, 2003).

Densitat aparent del combustible disponible de capçada d'un arbre ($ACBD_t$)

L'$ACBD_t$ [kg m^{-3}] es va calcular com la mitjana de les densitats aparents de cadascuna de les capçades dels arbres mostrejats. La densitat aparent de la capçada de cadascun dels arbres es va determinar com el quocient entre la massa disponible de la capçada i el volum de la capçada. El volum de la capçada es va calcular considerant l'equació pel volum d'un con, on l'altura i l'amplada de la capçada s'utilitzen com a altura i diàmetre del con, respectivament.

I.2. Mètodes de mostreig per determinar les propietats intrínseques del combustible

I.2.1. Metodologia per determinar la calor de combustió

La informació referent a la calor de combustió (o poder calorífic superior, *PCS*) es va extreure a partir d'un estudi bibliogràfic exhaustiu, ja que la quantificació d'aquesta propietat requereix l'ús d'equipament molt especialitzat (com ara bombes calorimètriques, calorímetres cònics, o equips de termogravimetria) i queda fora de l'abast d'aquesta tesi. A la Taula I.6 es recullen els valors trobats a la bibliografia.

Tots els valors recollits a la taula precedent han estat calculats a partir de procediments estandarditzats amb mostres preses en diferents estructures forestals de la mediterrània (Espanya, França, Grècia i Portugal). Per a moltes de les espècies d'estudi, es disposa de valors de poder calorífic superior per diferents classes de partícules (fulles, branques fines i branques més gruixudes) i estats (viu o mort), amb la qual cosa es poden advertir certes tendències en la variació del *PCS* per a les diferents classes. D'aquesta manera, observant particularment els valors de *PCS* del pi blanc, es pot deduir que el poder calorífic dels combustibles forestals morts és superior al poder calorífic dels combustibles vius. Així mateix, també es pot notar com el *PCS* presenta una certa tendència decreixent amb l'increment de la grandària de partícula, observació tanmateix contrastada Dimitrakopoulos i Panov (2001). En l'anàlisi bibliogràfica realitzada no s'han trobat valors que facin referència a partícules gruixudes de les espècies presents en les parcel·les.

A partir de la bibliografia es va obtenir el poder calorífic superior pel combustible vegetal existent a les parcel·les. A continuació els valors es van ponderar per tal de tenir en compte les espècies amb més pes en el cas concret de l'àrea estudiada. Finalment es va calcular el

poder calorífic inferior restant al *PCS* la calor alliberada en la vaporització de l'aigua (Alexander, 1982) (Eq. I.7).

Taula I.6. Poder calorífic superior (*PCS*, kJ kg^{-1}) de les espècies presents en les parcel·les d'estudi.

Espècie	Acícules mortes			Acícules vives			Branques vives <2mm			Fulles i branques vives		
	PCS	**Font**	**Lloc**	***PCS***	**Font**	**Lloc**	**PCS**	**Font**	**Lloc**	***PCS***	**Font**	**Lloc**
Pi Blanc (*Pinus halepensis*)	22.331	[1]	França	21.130	[9]	França	20.587	[1]	Madrid			
	22.075	[1]	Madrid	21.914	[2]	n.e.	21.512	[2]	n.e.			
	22.094	[2]	n.e.	21.100	[5]	Sud França	20.600	[6]	Sud França			
	22.074	[3]	Grècia	22.200	[9]	Sud França						
	22.500	[4]	Sud França									
	23.000	[5]	Sud França									
	22.300	[6]	Sud França									
	21.200	[6]	Sud França									
	21.200	[4]	Grècia									
	21.600	[7]	Albacete									
	22.700	[8]	España									
Gatosa (*Ulex parviflorus*)										20.902	[10]	França
										20.900	[9]	França
Romaní (*Rosmarinus officinalis*)							19.997	[2]	n.e.	22.669	[2]	n.e.
										24.800	[11]	València
										22.700	[11]	València
										23.300	[11]	València
										23.500	[11]	València
										21.700	[11]	València
										22.600	[11]	Madrid
										20.400	[11]	Madrid
										22.500	[11]	Madrid
										22.700	[11]	Madrid
										22.900	[11]	Madrid
Cirerer d'arboç (*Arbutus unedo*)										19.900	[8]	Espanya
										21.403	[2]	n.e.
Garric (*Quercus coccifera*)							19212	[10]	França	20.285	[2]	n.e.
							19.545	[2]	n.e.			
Alzina (*Quecus ilex*)							18.400	[6]	Sud França	20.300	[9]	Sud França
							18.500	[6]	França	20.400	[11]	Madrid
										19.800	[11]	Madrid
										18.900	[11]	Madrid
										21.800	[11]	Madrid

n.e. no especificat. [1] Hernando (2002) (citat a Cohen *et al.*, 2003), [2] Elvira i Hernando (1989), [3] Àgueda *et al.* (2009), [4] Guijarro (1997) (citat a Cohen *et al.*, 2003), [5] Guijarro (1999) (citat a Cohen *et al.*, 2003), [6] Guijarro *et al.* (2002), [7] Hernando (1996) (citat a Cohen *et al.*, 2003), [8] Gillon *et al.* (1997), [9] Valette (1988), [10] Doat i Valette (1981), [11] Hernando (1989) (citat a Cohen *et al.*, 2003).

$$PCI\ (\text{kJ kg}^{-1}) = PCS\ (\text{kJ kg}^{-1}) - 1.263 \qquad \text{Eq. I.7}$$

I.2.2. Metodologia per determinar la densitat i la geometria de les partícules

Per obtenir dades sobre la densitat i la geometria de les partícules combustibles es va dur a terme treball de mesura i pesatge d'alta precisió al laboratori. Aquest treball va implicar l'execució de les següents tasques:

1. *Es va fer una selecció aleatòria de les mostres de partícules representatives de cada classe i subclasse de combustible.* De tot el material recollit in situ es van escollir mostres aleatòries composades per 20 partícules de les següents categories de combustible: combustible mort de superfície d'1h (acícules en virosta, acícules en restes de tala, branques en virosta, branques en restes de tala, herbaci mort i material fi en estrat arbustiu), combustible mort de superfície de 10h (branques en virosta, branques en restes de tala), combustible herbaci viu, i combustible llenyós viu (arbustiu inferior a 0,3 cm, arbustiu de 0,3 a 0,6 cm, arbori jove inferior a 0,3 cm, arbori jove de 0,3 a 0,6 cm).

   Tal i com es pot observar, aquesta classificació no inclou combustible mort de 100h. Tot i que en les parcel·les es va trobar aquest tipus de combustible durant l'etapa de mostreig, la seva presència fou puntual de manera que la mostra a prendre no hauria tingut la grandària mínima per ser estadísticament representativa.

2. *Es va mesurar la longitud, secció, volum, perímetre i àrea superficial de la partícula.* La caracterització geomètrica de cada partícula de cada mostra (Figura I.2) es va realitzar amb eines bàsiques de metrologia i es va complementar amb la utilització del programari Global LabImage®. D'aquesta manera es va poder donar valor a la longitud, la secció, el perímetre, el volum, l'àrea superficial i la relació àrea superficial-volum a cada partícula per a cadascuna de les categories definides en el punt anterior.

3. *Es va realitzar el pesatge de partícula.* Les partícules es van assecar a l'estufa (60 °C, 24 h) i posteriorment pesar en una balança de precisió (Sartorius MA45) per tal d'extreure la densitat de partícula en base seca.

4. *Es va processar la informació i es va fer el tractament de les dades.* Amb les dades generades en els apartats 2 i 3, finalment es van computar les propietats intrínseques tot realitzant-ne el tractament estadístic. D'aquesta manera es va obtenir el perfil d'una

partícula tipus per cada subclasse i atesos els resultats de distribució de càrregues es van poder ponderar els valors de partícules tipus per extreure el perfil equivalent de partícula per a cada estrat (mort en superfície d'1h, mort en superfície de 10h, herbaci viu, i llenyós viu) i parcel·la.

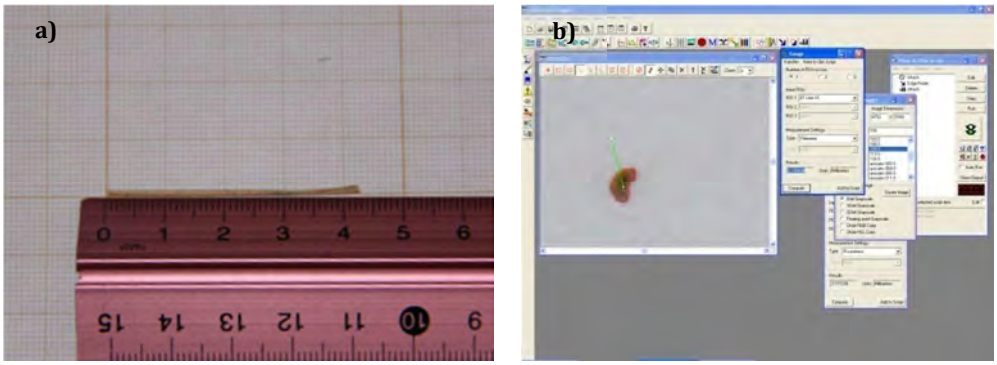

Figura I.2. Tècniques de mesura de les propietats geomètriques. a) Metrologia. b) Utilització del software global labimage®.

Per tal de donar un valor representatiu per cada estrat de combustible, un cop trobada la partícula tipus, es va ponderar el valor de les seves característiques tenint en compte el pes relatiu de cada tipologia de partícula dins el seu estrat. Això es realitzà a partir de les dades de càrrega de combustible obtingudes en els mostrejos. A partir d'aquesta informació, s'aconseguí la següent taula de valors de ponderació per parcel·la, obtinguda a partir de l'anàlisi percentual de càrregues de combustible (fraccions màssiques) (Taula I.7).

Taula I.7. Fraccions màssiques de partícules tipus per als diferents estrats presents en les parcel·les.

Estrat	Classe de partícula	Z-control	Z-1	Z-6	Z-26	Z-40
Combustible mort de superfície d'1h	Acícules en virosta	0,38	0,12	0,08	0,08	0,02
	Branques 1h en virosta	0,38	0,19	0,25	0,38	0,39
	Herbaci mort	0,07	0,00	0,01	0,09	0,09
	Acícules en restes	0,00	0,24	0,16	0,08	0,03
	Branques 1h en restes	0,00	0,39	0,48	0,36	0,46
	Material fi 1h en arbustiu	0,16	0,06	0,01	0,01	0,01
Combustible mort de superfície de 10h	Branques 10h en virosta	1,00	0,01	0,17	0,01	0,07
	Branques 10h en restes	0,00	0,99	0,83	0,99	0,93
Combustible herbaci viu	Herba en estat viu	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Combustible llenyós viu	Arbustiu, < 3 mm	0,63	0,32	0,61	0,88	0,71
	Arbustiu, de 3 a 6 mm	0,15	0,68	0,39	0,12	0,18
	Arbori jove, < 3 mm	0,18	0,00	0,00	0,00	0,08
	Arbori jove, de 3 a 6 mm	0,04	0,00	0,00	0,00	0,03

El total d'algunes fraccions màssiques no suma exactament 1 a causa de l'arrodoniment dels decimals.

I.3. Resultats per a les propietats extrínseques

Tot seguit es detallen els valors resultants dels diferents mostrejos efectuats a camp per tal de donar valor a les propietats extrínseques. Aquestes es mostren en funció del tipus de combustible: de superfície i arbori. Els resultats referents al combustible de superfície obtinguts a partir de tres metodologies diferents (mostreig del combustible dipositat al sotabosc, mostreig destructiu i transsectes lineals) es presenten a la Taula I.8, Taula I.9, Taula I.10. A la Taula I.11 es presenten els resultats pel combustible de capçades.

Taula I.8. Resultats obtinguts seguint la metodologia de Brown (1974) pel combustible dipositat al sotabosc.

Paràmetre		**Parcel·la**			
		Z-1	**Z-6**	**Z-26**	**Z-40**
Pendent mitjà de la parcel·la [%]		14	9	10	26
Nombre d'interseccions	1h (0-0,6 cm)	1.892	2.873	1.781	1.463
	10h (0,6-2,5 cm)	310	428	315	368
	100h (2,5-7,6 cm)	52	40	53	31
Càrrega de restes de tala [t ha^{-1}]	1h (0-0,6 cm)	3,8	5,1	2,6	2,5
	10h (0,6-2,5 cm)	9,6	11,8	8,7	11,6
	100h (2,5-7,6 cm)	6,2	4,3	5,7	3,8
	> 7,6 cm en bon estat	0,3	0,0	0,0	0,0
	> 7,6 cm en descomposició	0,6	0,1	0,0	0,0
	Total	20,5	21,3	17,0	17,9
Altura mitjana [m]	Virosta	0,04 (0,02)	0,06 (0,04)	0,04 (0,03)	0,02 (0,02)
	Restes de tala	0,32 (0,14)	0,24 (0,14)	0,25 (0,09)	0,14 (0,08)
Diàmetre mitjà [m]	> 7,6 cm en bon estat	0,08	0,00	0,00	0,00
	> 7,6 cm en descomposició	0,09	0,08	0,00	0,00

Desviació estàndard entre parèntesi.

Taula I.9. Resultats de càrrega de combustible obtinguts a partir dels mostrejos destructius.

Paràmetre		Z-control	Z-1	Z-6	Z-26	Z-40
Càrrega total [kg m^{-2}]	*MD*1	0,59	4,21	4,95	3,76	2,05
	*MD*2	1,45	7,07	3,15	1,25	1,47
	*MD*3	1,73	-	4,02	3,00	1,76
	Mitjana	1,25 (0,61)	5,64 (2,02)	4,04 (0,90)	2,67 (1,29)	1,76 (0,29)
Càrrega total segons el tipus de combustible (Mort: 1h - 10h - 100h; Viu: Lh - Lw) [kg m^{-2}]	1h *MD*1	0,45	2,02	3,10	0,96	1,20
	1h *MD*2	0,73	3,41	1,67	0,65	0,48
	1h *MD*3	0,68	-	2,04	0,98	0,93
	1h mitjana	0,62 (0,15)	2,71 (0,98)	2,27 (0,74)	0,86 (0,18)	0,87 (0,36)
	10h *MD*1	0,05	1,87	1,64	1,05	0,53
	10h *MD*2	0,19	2,10	1,45	0,26	0,42
	10h *MD*3	0,23	-	1,37	1,22	0,63
	10h mitjana	0,16 (0,10)	1,99 (0,16)	1,49 (0,14)	0,85 (0,51)	0,53 (0,11)
	100h *MD*1	0,02	0,30	0,17	1,56	0,11
	100h *MD*2	0,17	1,54	0,02	0,01	0,00
	100h *MD*3	0,04	-	0,53	0,63	0,00
	100h mitjana	0,08 (0,09)	0,92 (0,88)	0,24 (0,26)	0,73 (0,78)	0,04 (0,06)
	Lh *MD*1	0,03	0,00	0,01	0,13	0,13
	Lh *MD*2	0,11	0,01	0,01	0,11	0,05
	Lh *MD*3	0,03	-	0,07	0,11	0,06
	Lh mitjana	0,05 (0,04)	0,01 (0,00)	0,03 (0,04)	0,12 (0,01)	0,08 (0,04)
	Lw *MD*1	0,04	0,01	0,03	0,06	0,07
	Lw *MD*2	0,25	0,01	0,00	0,22	0,52
	Lw *MD*3	0,75	-	0,00	0,06	0,13
	Lw mitjana	0,35 (0,37)	0,01 (0,01)	0,01 (0,01)	0,11 (0,09)	0,24 (0,25)
Càrrega total per estrats (virosta - herbaci – arbustiu+ arbori jove) [kg m^{-2}]	Virosta *MD*1	0,49	0,49	0,60	0,44	0,36
	Virosta *MD*2	0,84	1,27	0,67	0,36	0,27
	Virosta *MD*3	0,78	-	2,25	0,41	0,67
	Virosta mitjana	0,70 (0,19)	0,88 (0,55)	1,17 (0,94)	0,40 (0,04)	0,43 (0,21)
	H *MD*1	0,04	0,02	0,01	0,23	0,25
	H *MD*2	0,21	0,01	0,02	0,18	0,08
	H *MD*3	0,04	-	0,14	0,17	0,14
	H mitjana	0,10 (0,10)	0,01 (0,01)	0,05 (0,07)	0,19 (0,03)	0,16 (0,09)
	a + aj *MD*1	0,06	0,01	0,09	0,06	0,08
	a + aj *MD*2	0,40	0,62	0,05	0,24	0,54
	a + aj *MD*3	0,90	-	0,00	0,07	0,14
	a + aj mitjana	0,45 (0,42)	0,32 (0,43)	0,05 (0,04)	0,12 (0,10)	0,25 (0,25)

Taula I.9. Resultats de càrrega de combustible obtinguts a partir dels mostrejos destructius (continuació).

Paràmetre		Z-control	Z-1	Z-6	Z-26	Z-40
Càrrega de restes de tala segons la classe diametral (sense comptar acícules) [kg m^{-2}]	1h *MD*1	0,00	0,96	2,17	0,38	0,78
	1h *MD*2	0,00	1,18	0,63	0,16	0,19
	1h *MD*3	0,00	-	0,49	0,40	0,24
	1h mitjana	0,00 (*)	1,07 (0,16)	1,10 (0.93)	0,31 (0,13)	0,40 (0,33)
	10h *MD*1	0,00	1,84	1,63	1,05	0,53
	10h *MD*2	0,00	1,80	1,42	0,26	0,39
	10h *MD*3	0,00	-	0,67	1,20	0,55
	10h mitjana	0,00 (*)	1,82 (0,03)	1,24 (0,50)	0,84 (0,50)	0,49 (0,09)
	100h *MD*1	0,00	0,30	0,17	1,56	0,00
	100h *MD*2	0,00	1,49	0,00	0,01	0,00
	100h *MD*3	0,00	-	0,04	0,63	0,00
	100h mitjana	0,00 (*)	0,90 (0,84)	0,07 (0,09)	0,73 (0,78)	0,00 (*)
Càrrega total de restes de tala (sense comptar acícules) [kg m^{-2}]	Total restes *MD*1	0,00	3,10	3,97	2,99	1,31
	Total restes *MD*2	0,00	4,47	2,05	0,44	0,57
	Total restes *MD*3	0,00	-	1,21	2,23	0,79
	Total restes mitjana	0,00 (*)	3,79 (0,97)	2,41 (1,42)	1,89 (1,31)	0,89 (0,38)
Cobertura mitjana dins el quadrat [%]	Virosta	93 (3)	100 (*)	100 (0)	100 (0)	98 (3)
	Restes 1h	0 (0)	85 (21)	38 (24)	20 (15)	9 (4)
	Restes 10h	0 (0)	70 (42)	11 (4)	9 (1)	3 (2)
	Restes 100h	0 (0)	53 (67)	2 (1)	1 (1)	1 (1)
	Herbaci	32 (24)	4 (2)	47 (23)	68 (16)	78 (16)
	Arbustiu	34 (27)	28 (32)	6 (8)	28 (20)	23 (15)
	Arbori jove	12 (20)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	9 (14)
Altura mitjana màxima [m]	Virosta	0,03 (0,02)	0,05 (*)	0,08 (0,02)	0,04 (0,01)	0,02 (0,00)
	Restes 1h	0,00 (0,00)	0,35 (0,07)	0,25 (0,00)	0,18 (0,03)	0,15 (0,09)
	Restes 10h	0,00 (0,00)	0,28 (0,18)	0,18 (0,03)	0,12 (0,03)	0,12 (0,08)
	Restes 100h	0,00 (0,00)	0,18 (0,11)	0,09 (0,02)	0,05 (0,04)	0,07 (0,08)
	Herbaci	0,28 (0,14)	0,07 (0,05)	0,27 (0,03)	0,35 (0,05)	0,27 (0,08)
	Arbustiu	0,62 (0,20)	0,24 (0,08)	0,27 (0,31)	0,43 (0,06)	0,42 (0,25)
	Arbori jove	0,40 (0,69)	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)	0,32 (0,30)
	Restes mitjana	0,00 (0,00)	0,27 (0,13)	0,17 (0,07)	0,12 (0,07)	0,11 (0,08)

Desviació estàndard entre parèntesis. *MD*: mostreig destructiu. (*) No es pot calcular la desviació estàndard. H:herbaci. a: arbustiu. aj: arbori jove.

Taula I.10. Resultats obtinguts seguint la metodologia Canfield (1941) dels transsectes lineals.

Paràmetre		Parcel·la				
		Z-control	Z-1	Z-6	Z-26	Z-40
Cobertura [%]	Herbaci (H)	51 (16)	23 (8)	37 (21)	82 (11)	75 (10)
	Arbustiu (a)	85 (7)	14 (6)	15 (6)	29 (8)	40 (15)
	Arbori jove (aj)	16 (11)	0 (0)	1 (2)	1 (1)	7 (4)
	a+ aj	87 (6)	14 (6)	16 (6)	30 (8)	45 (12)
	H + a + aj	97 (1)	34 (11)	49 (17)	90 (8)	88 (10)
Altura mitjana [m]	Herbaci (H)	0,29 (0,05)	0,07 (0,03)	0,14 (0,02)	0,37 (0,02)	0,23 (0,05)
	Arbustiu (a)	0,75 (0,12)	0,21 (0,06)	0,17 (0,06)	0,41 (0,10)	0,51 (0,12)
	Arbori jove (aj)	0,93 (0,18)	0,00 (*)	0,30 (0,19)	0,37 (0,05)	0,48 (0,20)
	a+ aj	0,87 (0,13)	0,21 (0,06)	0,19 (0,09)	0,41 (0,10)	0,52 (0,08)
	H + a + aj	0,65 (0,15)	0,12 (0,04)	0,14 (0,02)	0,38 (0,02)	0,33 (0,07)
Grau de mortalitat [%]	Herbaci (H)	57,7 (7,23)	83,5 (9,39)	67,3 (5,86)	35,2 (13,94)	47,1 (14,36)
	Arbustiu (a)	12,4 (6,54)	33,7 (16,75)	23,7 (14,22)	1,9 (3,61)	4,9 (5,36)
	Arbori jove (aj)	2,7 (4,01)	0,0 (*)	56,7 (40,41)	12,3 (17,41)	6,8 (11,67)
	a+ aj	11,9 (6,48)	33,7 (16,75)	23,6 (13,87)	2,0 (3,53)	4,3 (3,73)
	H + a + aj	24,7 (7,33)	68,7 (5,82)	52,6 (13,94)	28,0 (11,15)	32,7 (10,63)

Desviació estàndard entre parèntesis. (*) No es pot calcular la desviació estàndard. Els valors d'altura mitjana i grau de mortalitat es van ponderar. H:Herbaci. a: arbustiu. aj: arbori jove.

Taula I.11. Resultats obtinguts a partir del mostreig del combustible arbori.

Paràmetre	Z-control	Z-1	Z-6	Z-26	Z-40
Densitat d'arbres [peu m^{-2}]	3,29	0,12	0,14	0,26	0,21
ACFL [kg m^{-2}]	3,238	0,162	0,202	0,342	0,183
Densitat aparent del combustible disponible de capçades [kg m^{-3}]	2,418	0,090	0,112	0,179	0,121
Densitat aparent del combustible disponible de capçada d'un arbre [kg m^{-3}]	11,06 (0,34)	4,10 (0,29)	7,97 (0,14)	3,83 (0,14)	6,47 (0,10)
Cobertura de les capçades [%]	63 (42)	31 (38)	19 (19)	48 (26)	21 (32)
Altura mitjana arbres [m]	2,27 (0,75)	3,01 (0,75)	3,02 (0,58)	2,93 (0,68)	2,17 (0,50)
Altura de la base de la capçada [m]	0,93 (0,36)	1,21 (0,36)	1,21 (0,27)	1,02 (0,34)	0,66 (0,28)
Diàmetre a l'altura del pit [m]	0,015 (0,012)	0,032 (0,012)	0,025 (0,009)	0,030 (0,012)	0,017 (0,012)
Altura mitjana de les capçades [m]	1,34 (0,57)	1,80 (0,57)	1,81 (0,43)	1,91 (0,46)	1,51 (0,41)
Mitjana ràtio capçada [%]	59 (13)	60 (13)	60 (6)	66 (8)	70 (12)
Amplada mitjana de les capçades [m]	0,79 (0,39)	0,91 (0,39)	1,04 (0,23)	1,02 (0,34)	1,15 (0,33)

Desviació estàndard entre parèntesis. *ACFL*: Càrrega de combustible disponible de capçades.

I.3.1. Anàlisi dels paràmetres obtinguts per duplicat

Alguns dels paràmetres necessaris per caracteritzar les propietats extrínseques del combustible de les parcel·les d'estudi es van obtenir per duplicat. Aquests s'indiquen a la Taula I.12, on s'hi especifica també en quin tipus de mostreig es van obtenir, com es van calcular i el nombre aproximat d'observacions per parcel·la. A continuació es comenten les possibles causes de les diferències obtingudes i els valors escollits per realitzar posteriorment l'anàlisi dels resultats.

Taula I.12. Paràmetres determinats per duplicat durant la caracterització del combustible de les parcel·les d'estudi.

Paràmetre	Tipus de mostreig	Mètode d'obtenció	Nombre d'observacions per parcel·la
Altura de la virosta	*CDS*	Experimental	27
	CS-MD	Experimental	3 (1 Z-1)
Altura mitjana màxima de les restes de tala	*CDS*	Experimental	30 (27 Z-1 i Z-40)
Altura mitjana de les restes de tala	*CS-MD*	Experimental	9 (6 Z-1)
Altura mitjana del combustible de superfície en peu -per estrats-	*CS-TL*	Experimental	En funció de la presència; 5 transsectes lineals (4 Z-1 i Z-40)
	CS-MD	Experimental	3 (2 Z-1)
Cobertura -per estrats-	*CS-TL*	Experimental	En funció de la presència; 5 transsectes lineals (4 Z-1 i Z-40)
	CS-MD	Estimació visual	3 (2 Z-1)
Càrrega de restes de tala -per classe diametral-	*CDS*	Experimental i resolució d'equacions	En funció de la presència; 10 plans de mostreig (9 Z-1)
	CS-MD	Experimental	3 (2 Z-1)

Tipus de mostreig: combustible dipositat al sotabosc (*CDS*); combustible de superfície - transsectes lineals (*CS-TL*); combustible de superfície - mostrejos destructius (*CS-MD*).

A la Figura I.3 es representen els valors obtinguts per a l'altura de la virosta i per a l'altura de les restes de tala per a les parcel·les tractades. Les dades de la parcel·la Z-control obtingudes aplicant la metodologia dels mostrejos destructius no es representen aquí perquè no es poden comparar amb altres valors, ja que en aquesta parcel·la no es va aplicar la metodologia de mostreig del combustible dipositat al sotabosc (*CDS*).

Es pot observar que els valors obtinguts per a l'altura de la virosta no depenen del tipus de mostreig aplicat ja que en els dos casos es va determinar l'altura màxima de la capa de

virosta. Per a l'anàlisi dels resultats s'han utilitzat els valors del mostreig de combustible dipositat al sotabosc ja que la mostra és més gran.

Per a l'altura de les restes de tala s'observen diferències en els valors obtinguts mitjançant les dues metodologies. En les quatre parcel·les en què hi havia restes de tala l'altura mitjana obtinguda seguint la metodologia *CDS* és major que l'altura mitjana obtinguda durant la realització dels mostrejos destructius. Això és lògic ja que amb els mostrejos *CDS* es determinava l'altura màxima de les restes de tala per a cada punt de mostreig (entre 27 i 30 per parcel·la), en canvi, quan es feien els mostrejos *CS-MD* es determinava una altura mitjana per a cada tipus de resta (1h, 10h i 100h) i la mitjana d'aquests valors per parcel·la és el valor que s'ha representat a la Figura I.3 Per a l'anàlisi dels resultats s'han utilitzat els valors del mostreig de combustible dipositat al sotabosc ja que presentava una grandària de la mostra superior.

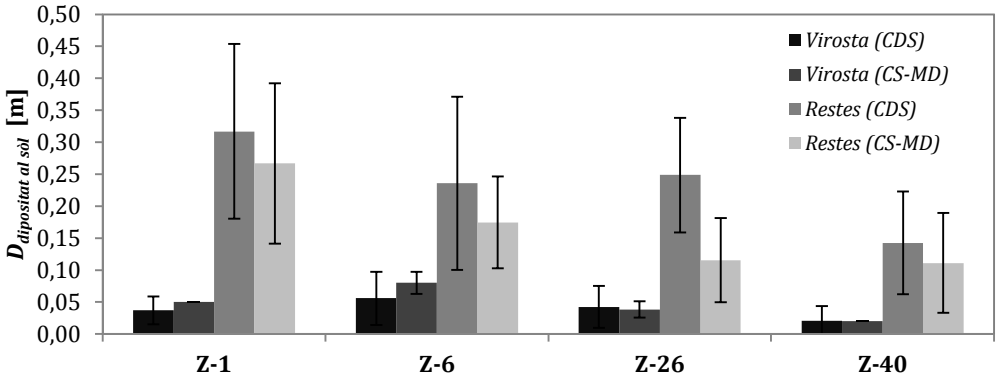

Figura I.3. Altura de la virosta (mitjana màxima i mitjana) i altura de les restes de tala (mitjana) per a cada parcel·la d'estudi segons el tipus de mostreig aplicat. *CDS:* mostreig del combustible dipositat al sotabosc; *CS-MD*: mostreig destructiu pel combustible de superfície. L'amplada de les barres d'error correspon a dues desviacions estàndards.

A la següent figura (Figura I.4) es representen els valors d'altura mitjana del combustible de superfície en peu (herbaci, arbustiu i arbori jove) presents en les parcel·les d'estudi. Es pot observar que les diferències més significatives entre els valors mitjans d'altura afecten el combustible arbori jove: els valors obtinguts seguint la metodologia de mostreig dels transsectes lineals (*CS-TL*) són sempre superiors als obtinguts a partir de mostrejos destructius (*CS-MD*). Això és així perquè, mentre que amb els transsectes lineals els plans de mostreig es van distribuir per tota la parcel·la, la distribució de les àrees on es van realitzar els mostrejos destructius es va aleatoritzar i, per tant, hi havia la possibilitat de trobar o no

arbres joves als quadrats a mostrejar. Per exemple, els resultats del mostreig *CS-TL* indiquen que a les parcel·les Z-6 i Z-26 el combustible arbori jove tenia una altura mitjana de 0,30 i 0,37 m, respectivament; ara bé, segons els mostrejos *CS-MD* no hi havia combustible arbori jove en aquestes parcel·les. Així doncs, s'ha cregut convenient realitzar l'anàlisi dels resultats amb els valors obtinguts a partir del mostreig dels transsectes lineals.

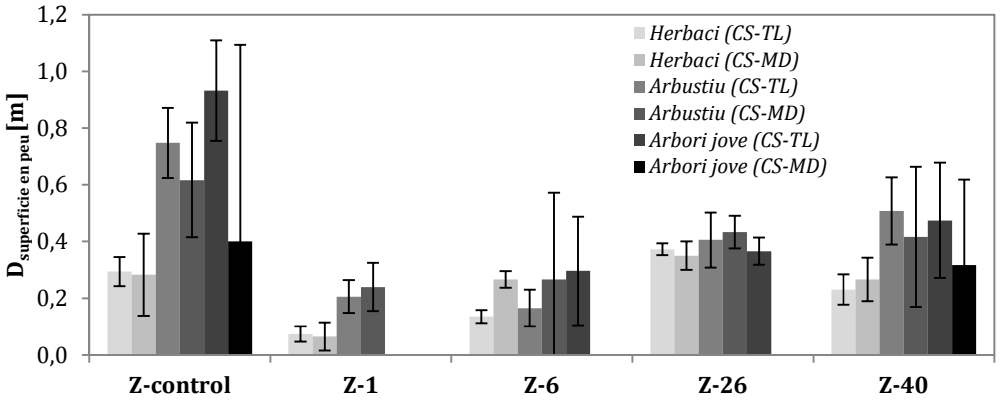

Figura I.4. Altura mitjana del combustible de superfície en peu per a cada parcel·la d'estudi segons el tipus de mostreig aplicat. *CS-TL*: transsectes lineals pel combustible de superfície en peu; *CS-MD*: mostreig destructiu pel combustible de superfície. L'amplada de les barres d'error correspon a dues desviacions estàndards.

La cobertura de la vegetació també es va determinar pel combustible herbaci, arbustiu i arbori jove seguint dues metodologies de mostreig diferents: *CS-TL* i *CS-MD* (Figura I.5). En el cas dels mostrejos destructius, tal i com s'indica a la Taula 4.12, el valor de cobertura es va estimar visualment per a cadascuna de les àrees de les parcel·les on es van fer els mostrejos destructius. Això suposa un total de 3 observacions per parcel·la per tipus de combustible (excepte per a la Z-1, en què només es van fer 2 mostrejos destructius). Això podria explicar les diferències en les desviacions estàndards calculades; en general, aquestes són més grans per als valors de cobertura associats als mostrejos destructius. A la vegada, el nombre reduït d'observacions i el fet d'haver-les determinat visualment podria explicar les importants diferències que s'observen per als valors de cobertura en alguns casos, per exemple, a la parcel·la Z-control la cobertura determinada a partir dels mostrejos *CS-TL* pel combustible arbustiu és aproximadament 2,5 vegades més gran que la cobertura estimada visualment (34%). Per aquesta raó s'ha cregut convenient utilitzar les dades obtingudes a partir dels transsectes lineals.

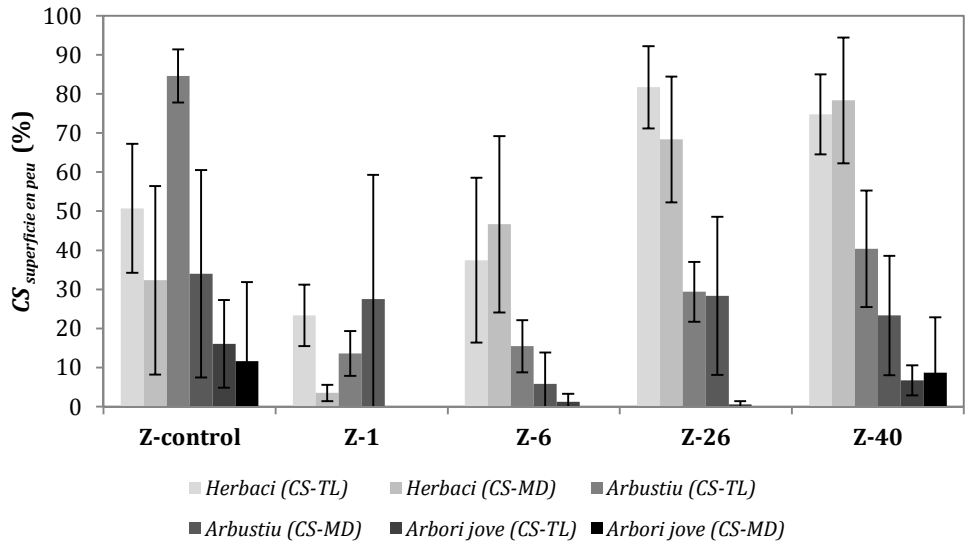

Figura I.5. Cobertura mitjana del combustible de superfície en peu per a cada parcel·la d'estudi segons el tipus de mostreig aplicat. *CS-TL*: transsectes lineals per a combustible de superfície en peu; *CS-MD*: mostreig destructiu pel combustible de superfície. L'amplada de les barres d'error correspon a dues desviacions estàndards.

El darrer paràmetre que es va determinar per duplicat va ser la càrrega de les restes de tala. Novament, es va obtenir en dos mostrejos diferents: *CDS* i *CS-MD*. A la Figura I.6 es pot observar que els valors de càrrega mitjana obtinguts pel combustible d'1h a partir de mostrejos destructius van ser sempre superiors als obtinguts aplicant les equacions proposades per Brown (1974). Aquesta diferència pot estar relacionada amb la pròpia metodologia *CDS*, segons la qual s'han de comptar les interseccions del combustible amb el pla de mostreig (Taula I.13) i per a aquest tipus de combustible és fàcil deixar-se interseccions en el comptatge, la qual cosa porta directant a una subestimació de la càrrega de combustible. Per això, seria més representatiu el valor obtingut a partir dels mostrejos destructius.

En el cas del combustible de 10h, es pot observar a la Figura I.6 que les principals diferències es van obtenir en la parcel·la que tenia la càrrega total de restes més alta (Z-1) i en la que en tenia menys (Z-40). En la primera, el valor obtingut segons el mètode *CDS* fou inferior al valor obtingut amb *CS-MD*. Això pot ser degut novament al fet que es van deixar de comptar algunes interseccions, ja que n'hi havia un gran nombre. A la parcel·la Z-40 la tendència és contrària, és a dir, el valor mitjà obtingut amb *CDS* fou més gran que el de *CS-MD*. En aquest cas, al haver-hi pocs troncs d'aquestes dimensions, les diferències podrien ser degudes a

l'aleatorització en la distribució de les àrees dels mostrejos destructius i en el nombre reduït d'aquests. Per tant, pel combustible de 10h de la parcel·la Z-1 és més representatiu el valor obtingut amb *CS-MD*, mentre que per a la parcel·la Z-40 el valor obtingut amb *CDS* és més representatiu. Per a la resta de parcel·les es proposa utilitzar els valors obtinguts aplicant la metodologia associada al mètode de mostreig *CDS*, ja que es disposa de més observacions i es cobreix tota la parcel·la.

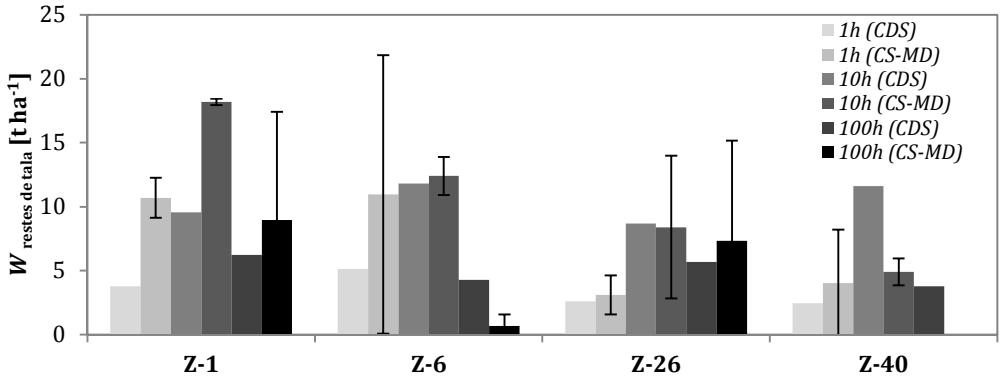

Figura I.6. Càrrega de restes de tala per a cada parcel·la d'estudi segons el tipus de mostreig aplicat. *CDS*: mostreig del combustible dipositat al sotabosc; *CS-MD*: mostreig destructiu pel combustible de superfície. L'amplada de les barres d'error correspon a dues desviacions estàndards.

Taula I.13. Nombre d'interseccions per unitat lineal mostrejada [m^{-1}].

Classe diametral	Z-1	Z-6	Z-26	Z-40
1h	42,0	57,5	35,6	32,5
10h	3,4	4,3	3,2	4,1
100h	0,3	0,2	0,3	0,2

Finalment, pel que fa la càrrega de combustible de 100h, l'explicació de les diferències poden ser degudes, novament, a l'aleatorització en la distribució de les àrees dels mostrejos destructius i en el nombre reduït d'aquests. Per tant, seria més representatiu el valor obtingut amb *CDS*.

Tot i que en els anteriors paràgrafs s'ha apuntat quins valors de càrrega de restes de tala s'haurien de considerar per a cada parcel·la tenint en compte el tipus de mostreig realitzat, en l'anàlisi estadística que s'inclou en el capítol 4 no es fa aquesta apreciació. Això és així perquè s'han incorporat les restes de tala dins els valors de càrrega de combustible mort d'1h, 10h o 100h.

Annex II

Fitxers d'entrada per WFDS

En aquest annex es recopilen dos dels arxius de text amb el codi utilitzat per les simulacions amb WFDS. El primer correspon a la parametrització del model basada en el treball de Pérez (2010) en el que es van realitzar diferents proves experimentals a laboratori en una taula de combustible sobre un llit de combustible de palla d'ordi. Concretament es detalla el fitxer de text per realitzar la simulació predictiva de la prova experimental W50. El segon arxiu correspon a una de les simulacions de les parcel·les del Bages, concretament a la parcel·la Z-1 pel percentil 85 en situació meteorològica de ona de calor de sud.

II.1. Parametrització del model

```
&HEAD CHID='W50',TITLE='G035_L5_W36_H4' /
&MESH IJK=144,100,108 XB=0.0,5.0,0.0,3.6,0.0,4.0 /
&TIME TWFIN=150./
&DUMP DT_RESTART=2.
&MISC TMPA=21.85
&REAC ID='STRAW'
    SOOT_YIELD = 0.02
    O        = 2.4627
    C        = 3.5967
    H        = 4.9603
    HEAT_OF_COMBUSTION = 16148 /
&MATL ID = 'STEEL'
              EMISSIVITY = 1.0
              DENSITY = 7850.0
              CONDUCTIVITY = 45.8
              SPECIFIC_HEAT = 0.46 /
&SURF ID ='combustion chambre'
COLOR = 'RED'
MATL_ID = 'STEEL'
BACKING = 'EXPOSED'
THICKNESS = 0.10 /
&SURF ID ='hood'
COLOR = 'GRAY'
MATL_ID = 'STEEL'
BACKING = 'EXPOSED'
THICKNESS = 0.10 /
&OBST XB= 1.0,4.0,1.0,1.0,0.0,0.8, SURF_ID='combustion chambre'/
&OBST XB= 1.0,4.0,2.6,2.6,0.0,0.8, SURF_ID='combustion chambre'/
&OBST XB= 4.0,4.0,1.0,2.6,0.15,0.8, SURF_ID='combustion chambre' /
&OBST XB= 1.0,1.0,1.0,2.6,0.2,0.8, SURF_ID='combustion chambre'/
&OBST XB= 0.7,4.3,0.7,0.85,1.2,1.35, SAWTOOTH = .FALSE.,SURF_ID='hood'/
&OBST XB= 0.85,4.15,0.85,1.0,1.35,1.50, SAWTOOTH = .FALSE.,SURF_ID='hood'/
&OBST XB= 1.0,4.0,1.0,1.15,1.50,1.65, SAWTOOTH = .FALSE.,SURF_ID='hood'/
&OBST XB= 1.15,3.85,1.15,1.3,1.65,1.80, SAWTOOTH = .FALSE.,SURF_ID='hood'/
&OBST XB= 1.3,3.70,1.3,2.3,1.8,1.80,SURF_ID='hood'/
&OBST XB= 0.7,4.3,2.9,2.75,1.2,1.35, SAWTOOTH = .FALSE., SURF_ID='hood'/
&OBST XB= 0.85,4.15,2.75,2.60,1.35,1.50, SAWTOOTH = .FALSE.,SURF_ID='hood'/
&OBST XB= 1.0,4.0,2.6,2.45,1.50,1.65, SAWTOOTH = .FALSE.,SURF_ID='hood'/
&OBST XB= 1.15,3.85,2.45,2.30,1.65,1.80, SAWTOOTH = .FALSE.,SURF_ID='hood'/
&OBST XB= 4.3,4.15, 0.7,2.9,1.2,1.35, SAWTOOTH = .FALSE., SURF_ID='hood'/
&OBST XB= 4.15,4.00,0.85,2.75,1.35,1.50, SAWTOOTH = .FALSE.,SURF_ID='hood'/
&OBST XB= 4.0,3.85,1.0,2.6,1.50,1.65, SAWTOOTH = .FALSE.,SURF_ID='hood'/
&OBST XB= 3.85,3.70,1.15,2.45,1.65,1.80, SAWTOOTH = .FALSE.,SURF_ID='hood'/
&OBST XB= 0.7,0.85, 0.7,2.9,1.2,1.35, SAWTOOTH = .FALSE.,SURF_ID='hood'/
&OBST XB= 0.85,1.00,0.85,2.75,1.35,1.50, SAWTOOTH = .FALSE.,SURF_ID='hood'/
&OBST XB= 1.0,1.15,1.0,2.6,1.50,1.65, SAWTOOTH = .FALSE.,SURF_ID='hood'/
&OBST XB= 1.15,1.3,1.15,2.45,1.65,1.80, SAWTOOTH = .FALSE.,SURF_ID='hood'/
&HOLE XB=2.37,2.63,1.67,1.93,1.7,1.9 /
&OBST XB=2.37,2.63,1.67,1.67,1.8,4.0, SURF_ID='hood' /
&OBST XB=2.37,2.63,1.93,1.93,1.8,4.0, SURF_ID='hood' /
&OBST XB=2.37,2.37,1.67,1.93,1.8,4.0, SURF_ID='hood' /
&OBST XB=2.63,2.63,1.67,1.93,1.8,4.0, SURF_ID='hood' /
&PART ID='STRAW',TREE=.TRUE.,QUANTITIES='VEG_TEMPERATURE',
    VEG_INITIAL_TEMPERATURE=21.85,
    VEG_SV=16339.,VEG_MOISTURE=0.0504,VEG_CHAR_FRACTION=0.07,
```

```
    VEG_DRAG_COEFFICIENT=0.375,VEG_DENSITY=595.,VEG_BULK_DENSITY=7.2776,
    VEG_BURNING_RATE_MAX=0.3574,VEG_DEHYDRATION_RATE_MAX=0.3574,
    VEG_REMOVE_CHARRED=.TRUE. /
&TREE XB=1.60,3.25,1.55,2.05,0.0,0.04,PART_ID="STRAW",FUEL_GEOM="RECTANGLE" /
&SURF ID='IGN FIRE',HRRPUA=260.,RAMP_Q='RAMPFIRE' /
&RAMP ID='RAMPFIRE',T=0.0,F=0.0 /
&RAMP ID='RAMPFIRE',T=1.0,F=0.0 /
&RAMP ID='RAMPFIRE',T=1.5,F=1.0 /
&RAMP ID='RAMPFIRE',T=9.5,F=1.0 /
&RAMP ID='RAMPFIRE',T=10.0,F=0.0 /
&VENT XB=1.65,1.75,1.55,2.05,0.0,0.0,SURF_ID='IGN FIRE'/
&VENT XB=5.,0.,0.,0.,4.0, SURF_ID='OPEN' /
&VENT XB=0.,5.,3.6,3.6,0.,4.0, SURF_ID='OPEN' /
&VENT XB=5.,5.,3.6,0.,0.,4.0, SURF_ID='OPEN' /
&VENT XB=0.,0.,0.,3.6,0.,4.0, SURF_ID='OPEN' /
&VENT XB=5.,0.,0.,3.6,4.0,4.0, SURF_ID='OPEN' /
&DUMP DT_SLCF=0.1,DT_PART=0.1,DT_BNDF=0.1,DT_PL3D=20. /
&DEVC ID='Point 0.25,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.25,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 0.50,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.50,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 0.75,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.75,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 1.00,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.00,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 1.25,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.25,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 1.50,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.50,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 1.75,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.75,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 1.80,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.80,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 1.85,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.85,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 1.90,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.90,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 1.95,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.95,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.00,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.00,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.05,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.05,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.10,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.10,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.15,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.15,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.20,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.20,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.25,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.25,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.30,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.30,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.35,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.35,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.40,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.40,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.45,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.45,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.50,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.50,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.55,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.55,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.60,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.60,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.65,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.65,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.70,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.70,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.75,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.75,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.80,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.80,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.85,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.85,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.90,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.90,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 2.95,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.95,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 3.00,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=3.00,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 3.05,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=3.05,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 3.10,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=3.10,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 3.15,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=3.15,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 3.20,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=3.20,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 3.25,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=3.25,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 3.50,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=3.5,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 3.75,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=3.75,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 4.00,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=4.00,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 4.25,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=4.25,1.8,0.10/
&DEVC ID='Point 4.50,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=4.50,1.8,0.10/
```

```
&DEVC ID='Point 4.75,1.8,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=4.75,1.8,0.10/
&SLCF PBY= 1.8, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX= 1, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY= 1.8, QUANTITY='U-VELOCITY'/
&SLCF PBY= 1.8, QUANTITY='V-VELOCITY'/
&SLCF PBY= 1.8, QUANTITY='W-VELOCITY'/
&TAIL /
```

II.2. Simulació de Z-1, percentil 85, situació ona de calor de sud

```
&HEAD CHID='Z1P85S', TITLE='Z1P85S'/
&MISC TMPA=32.8
&DUMP DT_RESTART=5.
&MESH IJK=162,150,54, XB=-7,27,-15.5,15.5,0,11,/
&TIME TWFIN=100. /
&REAC ID='WOOD'
    FYI='Ritchie, et al., 5th IAFSS, C_3.4 H_6.2 O_2.5'
    SOOT_YIELD = 0.02
    O       = 2.5
    C       = 3.4
    H       = 6.2
    HEAT_OF_COMBUSTION = 17898 /
&PART ID='UNDERSTORY',TREE=.TRUE.,QUANTITIES='VEG_TEMPERATURE',
      VEG_INITIAL_TEMPERATURE=32.8, VEG_SV=3779.,VEG_MOISTURE=0.05,VEG_CHAR_FRACTION=0.25,
      VEG_DRAG_COEFFICIENT=0.375,VEG_DENSITY=481,VEG_BULK_DENSITY=4.6,VEG_BURNING_RATE_MAX=0.35
      74,VEG_DEHYDRATION_RATE_MAX=0.3574,VEG_REMOVE_CHARRED=.TRUE. /
&TREE XB=-3,20,-10,10,0,0.23,PART_ID="UNDERSTORY",FUEL_GEOM="RECTANGLE" /
&PART ID='CROWN',TREE=.TRUE.,QUANTITIES='VEG_TEMPERATURE',
      VEG_INITIAL_TEMPERATURE=32.8, VEG_SV=4546.,VEG_MOISTURE=1.3,VEG_CHAR_FRACTION=0.25,
      VEG_DRAG_COEFFICIENT=0.375,VEG_DENSITY=478.,VEG_BULK_DENSITY=4.10,
      VEG_BURNING_RATE_MAX=0.3574,VEG_DEHYDRATION_RATE_MAX=0.3574, VEG_REMOVE_CHARRED=.TRUE./
&PART ID='TRUNK',TREE=.TRUE.,QUANTITIES='VEG_TEMPERATURE',
VEG_SV=3.,VEG_MOISTURE=1.0, VEG_DRAG_COEFFICIENT=0.375,VEG_DENSITY=520., VEG_BULK_DENSITY=520 /
&SPEC ID='WATER VAPOR' /
&TREE XYZ=0.929,-8.725, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 0.929,-8.725, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=0.872,-5.931, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 0.872,-5.931, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=1.770,-2.777, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 1.770,-2.777, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=0.892,-0.321, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 0.892,-0.321, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=2.134,3.550, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 2.134,3.550, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=0.969,5.278, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
```

&TREE XYZ= 0.969,5.278, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=0.933,9.196, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 0.933,9.196, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=4.861,-8.968, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 4.861,-8.968, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=4.921,-5.045, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 4.921,-5.045, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=4.246,-2.675, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 4.246,-2.675, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=4.758,0.556, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 4.758,0.556, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=3.630,2.307, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 3.630,2.307, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=4.052,5.591, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 4.052,5.591, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=3.845,8.142, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 3.845,8.142, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=7.419,-8.712, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 7.419,-8.712, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=6.839,-6.219, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 6.839,-6.219, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=6.966,-3.073, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 6.966,-3.073, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=6.597,0.002, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 6.597,0.002, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=6.762,2.328, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 6.762,2.328, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=6.556,6.337, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 6.556,6.337, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /

```
&TREE XYZ=7.690,8.197, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 7.690,8.197, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=10.104,-8.598, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 10.104,-8.598, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=10.444,-6.346, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 10.444,-6.346, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=10.630,-3.427, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 10.630,-3.427, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=9.965,-0.212, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 9.965,-0.212, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=9.304,3.254, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 9.304,3.254, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=9.705,5.504, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 9.705,5.504, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=9.750,8.067, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 9.750,8.067, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=12.728,-9.188, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 12.728,-9.188, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=12.573,-5.971, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 12.573,-5.971, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=12.210,-2.619, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 12.210,-2.619, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=12.511,-0.268, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 12.511,-0.268, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=13.403,2.212, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 13.403,2.212, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=13.049,6.200, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 13.049,6.200, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=12.501,8.587, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
```

```
&TREE XYZ= 12.501,8.587, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=15.019,-9.219, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 15.019,-9.219, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=16.350,-5.837, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 16.350,-5.837, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=16.005,-2.168, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 16.005,-2.168, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=16.205,0.097, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 16.205,0.097, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=15.918,3.274, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 15.918,3.274, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=15.942,5.548, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 15.942,5.548, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=16.389,8.652, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 16.389,8.652, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=19.224,-8.490, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 19.224,-8.490, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=17.997,-5.032, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 17.997,-5.032, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=17.917,-3.507, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 17.917,-3.507, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&TREE XYZ=17.870,-0.034, 0.0 ,PART_ID="CROWN",FUEL_GEOM="CONE",CROWN_WIDTH=
0.910,CROWN_BASE_HEIGHT= 1.210,TREE_HEIGHT= 3.010/
&TREE XYZ= 17.870,-0.034, 0.0 ,PART_ID="TRUNK",FUEL_GEOM="CYLINDER",CROWN_WIDTH=
0.032,CROWN_BASE_HEIGHT= 000,TREE_HEIGHT= 1.210 /
&SURF ID='IGN FIRE',HRRPUA=250.,RAMP_Q='RAMPFIRE' /
&RAMP ID='RAMPFIRE',T=00.0,F=0.0 /
&RAMP ID='RAMPFIRE',T=31.00,F=0.0 /
&RAMP ID='RAMPFIRE',T=31.50,F=1.0 /
&RAMP ID='RAMPFIRE',T=45.5,F=1.0 /
&RAMP ID='RAMPFIRE',T=46.0,F=0.0 /
&VENT XB=-3,-1,-10,10,0.0,0.0,SURF_ID='IGN FIRE' /
&SURF ID='INFLOW', PROFILE = 'ATMOSFERIC', Z0=2.0, PLE=0.143, VEL=-9/
&VENT XB=-7,-7,-15.5, 15.5, 0,11,SURF_ID='INFLOW' /
&VENT XB=27,27,-15.5, 15.5, 0,11, SURF_ID='OPEN' DYNAMIC_PRESSURE=-41/
&VENT XB=-7,27,-15.5,-15.5, 0,11,SURF_ID='OPEN' /
&VENT XB=-7,27, 15.5, 15.5, 0,11,SURF_ID='OPEN' /
&VENT XB=-7,27,-15.5, 15.5,11,11,SURF_ID='OPEN' /
```

```
&DEVC ID='Point 1.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 1.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 1.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 1.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.75,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 2.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 2.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 2.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 2.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.75,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 3.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=3.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 3.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=3.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 3.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=3.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 3.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=3.75,0.0,0.10/
&DEVC ID='Point 4.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=4.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 4.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=4.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 4.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=4.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 4.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=4.75,0.0,0.10/
&DEVC ID='Point 5.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=5.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 5.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=5.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 5.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=5.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 5.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=5.75,0.0,0.10/
&DEVC ID='Point 6.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=6.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 6.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=6.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 6.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=6.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 6.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=6.75,0.0,0.10/
&DEVC ID='Point 7.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=7.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 7.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=7.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 7.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=7.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 7.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=7.75,0.0,0.10/
&DEVC ID='Point 8.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=8.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 8.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=8.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 8.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=8.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 8.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=8.75,0.0,0.10/
&DEVC ID='Point 9.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=9.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 9.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=9.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 9.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=9.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 9.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=9.75,0.0,0.10/
&DEVC ID='Point 10.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=10.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 10.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=10.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 10.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=10.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 10.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=10.75,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 11.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=11.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 11.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=11.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 11.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=11.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 11.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=11.75,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 12.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=12.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 12.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=12.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 12.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=12.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 12.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=12.75,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 13.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=13.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 13.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=13.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 13.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=13.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 13.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=13.75,0.0,0.10/
&DEVC ID='Point 14.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=14.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 14.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=14.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 14.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=14.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 14.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=14.75,0.0,0.10/
&DEVC ID='Point 15.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=15.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 15.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=15.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 15.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=15.50,0.00,0.10/
```

```
&DEVC ID='Point 15.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=15.75,0.0,0.10/
&DEVC ID='Point 16.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=16.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 16.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=16.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 16.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=16.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 16.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=16.75,0.0,0.10/
&DEVC ID='Point 17.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 17.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 17.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 17.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.75,0.0,0.10/
&DEVC ID='Point 18.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=18.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 18.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=18.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 18.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=18.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 18.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=18.75,0.0,0.10/
&DEVC ID='Point 19.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=19.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 19.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=19.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 19.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=19.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 19.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=19.75,0.0,0.10/
&DEVC ID='Point 20.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=20.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 20.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=20.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 20.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=20.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 20.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=20.75,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 21.00,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=21.00,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 21.25,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=21.25,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 21.50,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=21.50,0.00,0.10/
&DEVC ID='Point 21.75,0.00,0.10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=21.75,0.00,0.10/
&DUMP DT_SLCF=0.1,DT_PART=0.1,DT_BNDF=0.1,DT_PL3D=20. /
&SLCF PBY= 0.0, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY= 0.0, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&SLCF PBY= 0.0, QUANTITY='VELOCITY' /
&SLCF PBY= -3.5, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY= -3.5, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&SLCF PBY= 3.0, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY= 3.5, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&SLCF PBY=-5.5, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&SLCF PBY= 5.5, QUANTITY='U-VELOCITY' /
&SLCF PBZ= 3.0, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ= 3.0, QUANTITY='VELOCITY' /
&SLCF PBZ= 7.0, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ= 7.0, QUANTITY='VELOCITY' /
&SLCF PBZ= 10., QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ= 10., QUANTITY='VELOCITY' /
&BNDF QUANTITY='HEAT_FLUX' /
&BNDF QUANTITY='RADIATIVE_FLUX' /
&BNDF QUANTITY='CONVECTIVE_FLUX' /
&TAIL /
```