

ELS PRINCIPIS DE COMBUSTIÓ EN ELS INCENDIS FORESTALS



Ramon Ferrer i Bolasell

En tota la problemàtica dels incendis en general hi ha tot un seguit de conceptes físico-químics que influeixen i són una mica desconeguts. Aquest article, que és una recopilació de diferents autors i en especial de L. Trabaud, intenta clarificar i explicar conceptes com focs de vegetació, el foc entès com una combustió —explicant-se els mecanismes de la mateixa— i terminologies, com per exemple la inflamabilitat, combustibilitat, ignició, etc.

1. CONCEPTE I NATURALESA DELS FOC DE VEGETACIÓ

El terme de foc es dona generalment al fenomen físic i químic corrent que és el resultat de la combinació ràpida de l'oxigen amb una substància combustible; es caracteritza per una emissió de calor, de llum, i ordinàriament de flames (Davis 1959; Kanury 1976). Un foc de vegetació (en la seva accepció més àmplia) és una combustió a l'aire lliure, que es propaga lliurement, que consumeix combustibles vegetals naturals, és a dir, l'humus, les herbes, els matolls i els arbres.

Tenint en compte aquesta definició, un foc encès al bosc, per fer coure els aliments o per escalfar-se, no és un foc de vegetació ja que, encara que no estigui en un lloc tancat i que cremi combustibles vegetals naturals, la font del combustible està localitzada i el foc no es pot propagar, almenys mentre continuï essent un foc de camp.

Els focs corrents, que es diuen erròniament d'artigatge, encesos per preparar les terres que estan sense conrear, són, estrictament parlant, focs de vegetació, però estan ben delimitats en un perímetre preestablert i no esdevenen veritables focs



Incendi de Montserrat,
estiu de 1986.

de vegetació si no franquegen els límits prescrits.

En la terminologia de la lluita contra incendis és freqüent utilitzar el terme de «foc de bosc» com a sinònim de foc salvatge o foc no autoritzat. De tota manera, seria més preferible d'utilitzar el terme «foc de vegetació», molt menys ambigu i més general. Cal recordar que la vegetació és un conjunt de comunitats vegetals i que un bosc seria una comunitat vegetal amb un determinat aspecte.

Els focs de vegetació es distingeixen fàcilment dels focs d'immobles o de substàncies químiques. En efecte, a la inversa d'aquests darrers, necessiten l'oxigen de l'aire per cremar. Els focs de vegetació cremen combustibles pertanyents a un grup perfectament homogeni, encara que hi hagi grans diferències de talla, de densitat i d'arranjament, contenen tots aproximadament les mateixes substàncies químiques, principalment de cel·lulosa. Tots els combustibles vegetals poseeixen més o menys la mateixa temperatura d'inflamació, i aquests són, generalment, els mateixos mitjans que s'utilitzen per apagar aquests focs.

El foc és alhora un fenomen químic i físic. Separa ràpidament els constituents químics de les substàncies vegetals, aquest fenomen va acompanyat per una emissió d'energia calorífica. En tant que reacció química, destrueix el que la fotosíntesi construeix. Globalment, aquests processos poden explicar-se així:

Fotosíntesi

diòxid de carboni + aigua + energia (que ve dels rajos solars) \rightarrow cel·lulosa + oxigen

Combustió

cel·lulosa (i altres substàncies vegetals) + oxigen + energia (calor necessària per obtenir la temperatura d'inflamació) \rightarrow diòxid de carboni + aigua + energia (calor dissipat).

Els organismes de descomposició obtenen el mateix resultat final que el foc, però d'una manera molt més lenta. La descomposició del material vegetal és tan essencial com

la formació i continuen així el cicle sense fi dels processos naturals. Sense ella, la Terra esdevindria irremeiablement sobrecarregada i envaïda per una acumulació de materials vegetals i animals. En aquest sentit, el foc ha estat, i pot ésser, un element natural, i fins a un cert grau essencial, del medi vegetal. És la creació de desequilibris en la vegetació i la destrucció dels béns comesos pel foc segons el moment, el lloc, l'amplada i la seva intensitat, que, des d'un punt de vista humà, inquieta i porta a la necessitat de combatre el foc.

Des d'un punt de vista més tècnic, el foc és un seguit de combustions que es podrien definir com uns fenòmens d'oxidació que necessiten una energia d'activació. Són irreversibles i duren per ells mateixos (lliurement) el temps necessari perquè la suma de les entalpies lliures dels productes finals de la combustió sigui més petita que el valor corresponent als productes de partida. L'equació següent ens mostra la relació entre l'entalpia lliure i les altres variables en el transcurs d'una reacció

$$\Delta G = \Delta H - \Delta S \cdot T$$

essent G = entalpia lliure
H = entalpia
S = entropia
T = temperatura.

Cada sistema de matèria posseeix un cert contingut entàlpic que pot ésser concebut com una espècie de reserva potencial. S'observa, per exemple, en el procés de combustió, l'alliberament de grans quantitats d'energia o d'entalpia en forma de calor i llum. La tendència vers el creixement del desordre es pot caracteritzar per una variable d'estat que és l'entropia.

D'una manera més senzilla, i a fi de poder entendre posteriorment els sistemes d'extinció del foc, es pot dir que un foc és susceptible de produir-se quan concorren aquests quatre elements:

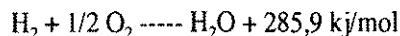
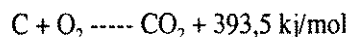
- combustible (reductor)
- comburent (oxidant. Oxigen)
- energia (calor)
- reacció en cadena.

El foc és, doncs, una reacció química

que produeix energia. Quan un material vegetal crema hi ha combinació química de l'oxigen de l'aire amb els elements combustibles que constitueixen els teixits vegetals. En un foc de vegetació, diversos estadis apareixen normalment en el curs de l'evolució del fenomen. Primer, l'espuma que dona la flama, després un període durant el qual el foc cova i, finalment, la combustió més ràpida dels combustibles. El fenomen del foc comporta, a vegades, una activitat violenta: flames molt altes que fan com bosts un fum molt dens, una calor intensa, sorolls forts i explosions intermitents. En el decurs de la seva existència, l'activitat del foc està influenciada per unes certes lleis naturals que comunament s'anomenen els principis de la combustió. El coneixement d'aquests principis és fonamental per jutjar l'efecte dels diferents factors del medi ambient sobre el comportament del foc.

2. DEFINICIÓ I CLASSIFICACIÓ DE LES COMBUSTIONS

En sentit ampli una combustió és una reacció química d'oxidació, autocatalítica, és a dir, autopropagada. Els reaccionants són un oxidant (o comburent) i un reductor (o combustible). Les reaccions següents són exemples de combustions:



En totes elles, el primer reaccionant (el carboni, l'hidrogen) és el combustible, el reductor; el segon (l'oxigen) és l'oxidant, el comburent.

L'aplicació més important d'aquesta classe de reaccions és la producció (o millor, l'alliberament) d'energia.

L'autocatàlisi o autopropagació de les reaccions de combustió és generada pel caràcter exotermic de les reaccions, la qual cosa assegura l'aportació de l'energia d'activació, i per l'augment de l'entropia que, combinat amb l'exotermicitat, explica el desplaçament de la reacció cap a la dreta. Un cop iniciades (mit-

jançant una flama, una espurna, etc.), les reaccions de combustió es propaguen fins a l'esgotament dels reaccionants.

Des del punt de vista cinètic, es tracta sempre de reaccions molt ràpides (possibilitat de deflagracions i detonacions), la qual cosa s'ha de tenir en compte a l'hora de dissenyar els sistemes que permeten la manipulació dels reaccionants i la conducció de la combustió d'una manera controlada.

La classificació de les combustions pot ser diversa segons el punt de vista adoptat. Si es considera la natura del contacte dels reactius, es tindran:

- combustions en fase homogènia
- combustions en fase heterogènia

Com que, en general, el comburent és l'oxigen gasós, la classificació anterior dóna lloc a una classificació de combustibles en gasos, d'una banda (combustions homogènies), i líquids i sòlids, de l'altra (heterogènies).

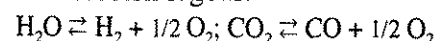
Una altra classificació té en compte la pressió a la qual té lloc la reacció:

- combustions a baixa pressió (de l'ordre de l'atmosfera): combustions en llars industrials, calderes, forns, etc.
- combustions a alta pressió: cambres de combustió de les turbines de gas, combustió en els cilindres dels motors de combustió interna.

Atenent el grau d'acabament de la reacció, les combustions poden ser:

- completes, si els productes de la combustió es troben al grau màxim d'oxidació.
- incompletes, si existeixen productes susceptibles d'oxidació ulterior.

En aquesta distinció s'ha de tenir en compte l'efecte del fenomen de dissociació, que apareix a temperatures per sobre dels 1.300 - 1.600°K: a aquestes temperatures, molècules totalment oxidades, com H₂O o CO₂, es dissocien segons:



reaccions tant més desplaçades a la dreta com més alta sigui la temperatura.

3. EL MECANISME DE LA COMBUSTIÓ

En tot foc de vegetació, els materials com per exemple les fulles, les herbes o la fusta, es combinen amb l'oxigen de l'aire per formar diòxid de carboni, vapor d'aigua i altres substàncies en menys quantitat. Aquest procés, conegut amb el nom de combustió, va acompanyat per l'emissió de grans quantitats d'energia. Com ja s'ha dit, la combustió és una reacció química en cadena semblant a la fotosíntesi, però en sentit invers. L'energia dels focs de vegetació prové així indirectament de l'energia donada per la llum del sol. Al llarg d'un foc en el bosc, la combustió pot emetre, en un espai curt de temps, una energia que estava emmagatzemada des de feia molts anys. L'estudi de la combustió forma part de l'estudi més general del comportament del foc; així doncs, tota discussió sobre la combustió dels combustibles vegetals ha de tenir en compte necessàriament el comportament del foc. El terme «comportament del foc» és una expressió descriptiva general utilitzada per designar el conjunt de les activitats i de les fases d'un foc. Els focs dels cims, els remolins del foc, la velocitat de propagació, els focs secundaris són manifestacions dels fenòmens del comportament del foc, que reben tota la seva energia del fenomen de combustió.

De tota manera, nosaltres només considerarem els principis fonamentals de la combustió.

3.1. Oxidació, combustió i calor de descomposició

La combustió és un tipus de fenomen d'oxidació generalment associat al desenvolupament de moltes reaccions químiques complexes i simultànies. Aquestes van acompanyades globalment per un allibera-

ment d'energia d'origen químic, l'efecte de la qual és d'eleva la temperatura del gas en reacció. La rapidesa a la qual aquestes reaccions són produïdes depèn no tan sols de la concentració dels elements que participen en aquestes reaccions sinó també, i de una manera molt sensible, de la temperatura.

Quan un combustible s'encén amb l'oxigen és la «combustió viva». En altres circumstàncies, l'oxidació pot ésser més lenta si no va acompanyada d'emissió de calor i de llum, normalment associades al fenomen de combustió. En el curs d'aquests processos, anomenat també «combustió lenta», la calor es dissipa molt ràpidament, de fet tan ràpidament com és alliberada, i no hi ha cap elevació apreciable de la temperatura. La combustió lenta no és pas freqüent en els combustibles vegetals. Així, els fenòmens d'oxidació com el rovell o l'enduriment d'una capa d'oli de llinosa («aceite de linaza») damunt d'una capa de pintura, apareixen en temperatures ordinàries. Al cap d'un cert temps, la capa d'oli, per exemple, es combina amb l'oxigen de l'aire i s'endureix al mateix temps que s'oxida. El fenomen és molt lent i la taxa de calor emesa és tan gradual que el creixement de la temperatura és menyspreable. Encara que els tres fenòmens s'assemblin químicament, l'aparició del rovell o de l'enduriment de la capa d'oli de llinosa s'assemblen molt poc a la combustió. En canvi, hi ha altres fenòmens que sí que s'hi assemblen, però que no són pas el mateix tipus de reacció d'oxidació. L'exemple típic és la descomposició tèrmica (piròlisi) de la fusta: reacció exotèrmica que apareix quan la substància de llenya està escalfada. En aquesta reacció, el material llenyós es fragmenta en productes secundaris i emet calor. Si el tros de fusta està ben aïllat, l'augment de temperatura que en surt augmenta alhora la taxa de reacció i la taxa d'emissió de calor. L'augment cada cop més elevat i més ràpid de la temperatura continua fins que el material volàtil estigui destil·lat i només quedi el carbó de fusta. És difícil de dir a partir de

quina temperatura comença la reacció exotèrmica. Els resultats depenen del mètode de mesura. Segons molts autors, aquesta fase se situa entre 280° i 500° C; segons Su-sott i altres, una gran part dels gasos combustibles han estat ja emesos a 300° C. En canvi, Byram (1959) pensa que la temperatura de la reacció exotèrmica pot ésser molt més baixa, probablement de l'ordre de 150° C o menys, si les mostres són escalfades dins d'una estufa on la diferència de temperatura entre l'estufa i la mostra es manté reduïda mentre que la temperatura de l'estufa es va augmentant d'una manera progressiva.

3.2. Física de la combustió

En els focs de vegetació hi ha dos tipus freqüents de combustió: la combustió amb flames i la combustió sense flames, que pot estar subdividida en: foc rogent o vermellós i foc covat.

El primer tipus és una combustió gasosa (les reaccions exotèrmiques són principalment en fase de gas) en la qual el combustible i l'oxidant (el comburant) són gasos. La combustió sense flames és una reacció que es fa a la superfície del combustible sòlid amb el carburant gas (l'oxigen de l'aire): en el foc rogent, la reacció és heterogènia, confinada a la superfície del combustible; en el foc covat, la reacció heterogènia està situada en les capes que estan sota del combustible porós. Normalment, l'absència de flames és deguda a la insuficiència d'oxigen o al grau elevat d'humiditat del combustible. En aquest cas, tots els elements del triangle del foc hi són presents però no en la proporció convenient per permetre una combustió ràpida. Pràcticament, tots els focs de vegetació pertanyen al primer tipus. De tota manera, el segon tipus no és pas estrany, bé tot sol, bé en combinació amb el primer. Per exemple, un foc que cova en un munt de fulles mortes il·lustra perfectament bé el foc que és rogent. Passa el mateix amb el foc de carbó de fusta utilitzat a les barbacoes.

Les diferències entre aquests dos

tipus de combustió provenen de la natura i de l'estat del combustible, així com de la disponibilitat de l'oxigen. Si el munt de fulles es remou, el foc pot prendre ràpidament i produir flames. Perquè les flames apareguin, és necessari que el combustible estigui en forma de gas. Si el combustible està en l'estat sòlid o líquid, primer ha de passar a la forma de gas, és a dir, per la destil·lació destructiva (la piròlisi), sigui per la vaporització purament física. Produïts d'aquesta manera, els vapors combustibles, per convecció i difusió, es barregen amb l'aire ambient per formar una barreja que reacciona. Aquesta breu descripció ensenya que la difusió, la convecció, la barreja i la cinètica química són algunes de les fases importants entre les que influeixen sobre el comportament del foc.

Perquè un foc aparegui és necessari que reuneixi diferents condicions. Es poden anunciar de la següent manera:

- a) Presència de combustible.
- b) Presència d'un oxidant (o carburant, per exemple l'oxigen de l'aire) en quantitat suficient.
- c) Presència d'una ventilació convenient.
- d) Presència de mitjans d'inflamació per produir la calor.

Per mantenir-se, el foc ha de produir calor suficient per compensar les pèrdues degudes a l'acció combinada de la conducció, de la convecció i dels rajos emesos, a més a més de tots els altres mecanismes exteriors de pèrdua de calor. Per fer-se més gran, el foc ha de donar calor al combustible que no s'ha cremat encara; com més gran és la quantitat de calor, més gran és el creixement.

3.2.1. La combustió amb flames

El tipus de foc més comú és caracteritzat per les flames. La flama és llavors realment el foc. Quan el foc és una reacció d'oxidació, la flama és enterament gasosa.

Quan els combustibles estan escalfats fins a una temperatura determinada, hi ha emissió de gasos que s'inflamen si es combinen amb l'oxigen. Quan algú mira el foc dels troncs, les flames sembla que provinguin

directament del combustible. De fet, les flames vénen del gas inflammat que prové dels troncs escalfats. Aquest fenomen pot ésser demostrat si escalfem agulles seques de pi posades dins d'un pot tancat, foradat només per un forat petit de la talla d'un clau sobre la tapa per permetre l'alliberament del gas. Els gasos emesos poden estar encesos amb un llumí. Les flames no apareixen pas a l'interior del pot; però si la calor que escalfa el pot continua durant prou temps, les agulles de pi es consumeixen i només queden cendres.

El que és més corrent és que els combustibles vegetals cremin donant foc amb flames; de tota manera, algunes vegades el foc pot ésser covat. Així, la fusta tendeix a cremar fent flames, sobretot al llarg dels primers estadis del foc. Més tard, el carbó de fusta format pel foc inicial continuarà consumint-se com un foc covat.

Quan un foc fa flames, tots els elements del triangle del foc —la calor, l'oxigen i el combustible— estan en proporció convenient per tal que aparegui una ràpida oxidació. Així, la flama, per ella mateixa, dóna totes les indicacions que permeten d'apreciar el comportament del foc.

En els focs molt intensos, les flames apareixen de manera intermitent dins del fum a una distància considerable per sobre del foc. En alguns casos, l'oxigen es consumeix tan ràpidament prop de la base del foc que la combustió dels gasos és incompleta. Llavors, quan el gas que està sobreescalfat s'eleva, hi arriben els corrents d'aire frescos d'oxigen i tornen a fer flama. És així com de vegades els fums de certs focs sembla que tinguin flames.

3.2.2. La combustió sense flama

Un foc que és rogent és caracteritzat per l'absència de flama, però per la presència de materials calents, que estan portats fins al vermell profund i a la superfície dels quals té lloc la combustió. Un foc de carbó de fusta n'és una bona il·lustració; passa el mateix que amb el carbó que està en curs de cremar-se. Fa temps, era freqüent de veure el ferrer que escalfava objectes de ferro en un foc

de carbó a través del qual circulava un corrent d'aire forçat. Aquests focs mostraven molt poques flames, però el foc rogent creat pel corrent d'aire tenia una calor intensa, molt més forta que la majoria de focs que tenen flama.

Un foc que cova crema lentament sense flames i produeix poc fum; en canvi, un foc rogent emet algunes petites flames.

Quan un foc cova, allibera calor i la temperatura del combustible creix. De tota manera, la flama hi és absent o present d'una manera només intermitent. És la insuficiència d'oxigen o la humitat dels combustibles el que normalment provoca aquesta absència de flames. La manca d'oxigen o el grau d'humitat del combustible fan alentir el procés d'oxidació. Quan un foc s'està covant, tots els elements del triangle del foc hi són presents, però les seves proporcions no permeten una combustió ràpida.

Ja que un foc que és rogent comprèn dues fases, l'una sòlida i l'altra gasosa, no hi ha pas relació directa entre el carburant (l'oxidant) i el combustible, encara que la química de la reacció comporti la consumació completa de tots dos. En aquest cas, a la inversa de la combustió amb flames, els dos elements no estan prebarrejats o barrejats en el moment de la combustió, però reaccionen a la superfície del sòlid sobre el qual passa el gas oxidant. Com que els combustibles vegetals són materials orgànics que es redueixen en carbó de fusta després que els productes volàtils hagin estat destil·lats i cremats, la major part dels focs presenta un estadi de vermellor en els curs de les seves últimes fases. S'ha de recordar que el material que vermelleja no és, llavors, el combustible original, sinó un combustible derivat, generalment, del carbó de fusta, provinent d'una fase anterior del foc.

La característica important d'un foc roent, sobretot quan hi ha un corrent d'aire forçat, és que la flama reduïda que l'acompanya prové sobretot de monòxid de carboni (CO), que cremant es transforma en diòxid de carboni (CO₂). El monòxid de

carboni prové de la reacció de l'oxigen de l'aire en quantitat reduïda amb un excés de carbó calent. Ulteriorment, el monòxid de carboni s'oxida produint una petita flama calenta, generalment blavosa.

Ordinàriament, al llarg de la lluita contra el foc, la fase roent no té una gran importància ja que representa generalment la fase final del procés químic. Els esforços s'han de fer principalment contra les fases anteriors, on hi ha les flames. Tot i això, el combatent del foc també ha de prestar atenció i apagar tot allò que és roent, puix que aquest pot tornar a encendre el material combustible que no ha cremat.

En canvi, la persona que fa de patrulla contra els focs s'ha de preocupar més d'un petit foc que comença i que té el risc de fer-se més grans després.

Igualment, és important d'observar si un foc que aparentment ja està apagat pot tornar-se a encendre. La calor és l'element capital per aquesta reinflamació. Encara que no puguem detectar ni flames ni fum, un foc es pot tornar a reanimar violentament si queda prou calor. Si els combustibles han estat escalfats durant un temps llarg, la inflamació (que es torni a encendre) encara és més fàcil. Per evitar aquesta reinflamació, el combatent del foc ha de tocar amb les seves mans els combustibles abans de marxar de la zona. Si encara sent que hi ha calor, ja sap que la lluita contra l'incendi encara no ha acabat.

Molts focs actius poden presentar un període de combustió relativament lent. Quan un foc és encès en un lloc on la ventilació és molt limitada, no desprèn prou calor per fer esclatar les flames. Aquesta combustió relativament lenta, dura un temps considerable abans que el foc comenci o bé sigui descobert. Els focs dels piròmans pertanyen, algunes vegades, a aquesta categoria. Això s'explica perquè el foc està encès en un espai on l'aprovisionament d'oxigen disponible és insuficient, la fase de flames hi està suprimida, però hi ha prou aire per permetre que el foc que es cova, duri.

L'acció de llençar materials que ja no fan flama, i que suposem que ja estan apagats però encara estan vermellosos, constitueix una font de focs que coven; així, els llumins, les cigarretes encara són vermells durant molt temps després que la flama ha estat apagada. Són brases calentes, són aparells per encendre, són barbacoes i altres nombroses fonts d'aquest mateix tipus que poden engendrar grans focs si hi ha combustible disponible.

3.2.3. La combustió explosiva

Aquesta combustió no és freqüent en els focs de vegetació. Se'n diu explosiva perquè apareix de cop i volta un creixement de l'energia emesa.

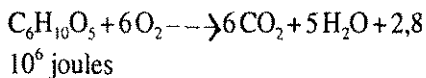
La combustió explosiva apareix només quan hi ha vapors, pols o gasos que s'inflamen en presència d'una quantitat d'aire convenient. La combustió, llavors, no és diferent d'aquella que és produeix normalment, excepte que apareix en un període de temps molt curt. La calor engendra productes de combustió i la seva expansió, que demana normalment un temps considerable, esdevé una situació instantània: hi ha una explosió. Aquesta explosió pot ser plena d'energia i ocasionar danys importants o, per contra, pot ser una petita explosió que no se senti. El crec-crec de les flames i les petites explosions que se senten en el foc als boscos que cremen o bé a la xemeneia són d'aquest tipus, encara que la causa no sigui la mateixa.

Pot passar que en el curs d'una enquesta sobre l'origen d'un incendi, que un objecte tancat com ara una ampolla o un bidó que contenia un líquid inflamable, sigui descobert. Escalfat el líquid s'ha vaporitzat molt ràpidament produint com un explosiu just abans d'inflamar-se. Per la persona que fa l'enquesta, aquesta situació té dues significacions: això prova que el recipient estava inicialment tancat i que no és la causa del foc, però que ha pogut participar en la seva extensió; això prova també que un foc intens rodejava el recipient i que aquesta situació sigui el fet d'un tipus inhabitual d'accident,

sigui un piròman. Aquestes constatacions poden aportar informacions precioses per interpretar la causa d'un cert nombre de focs.

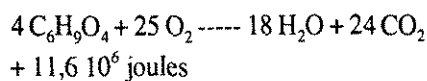
3.3. Química de la combustió

En la seva més simple expressió, l'equació química de la combustió pot ésser representada per l'equació completa d'una substància com la cel·lulosa:



La significació d'aquesta equació és que una molècula de cel·lulosa es combina amb 6 molècules d'oxigen per donar 6 molècules de diòxid de carboni i 5 molècules d'aigua. Aquesta reacció va acompanyada per una emissió d'energia. La calor de combustió de la cel·lulosa i de les hemicel·luloses és de 16.093 j.g (és a dir 3.850 calories per gram); el de la lignina és de 24.495 j.g (5.860 calories per gram). La calor de combustió d'un combustible pot ésser definida com la quantitat de calor emesa per aquest combustible quan crema totalment. Químicament, el material vegetal és una substància molt complexa: la cel·lulosa i la lignina en són els principals constituents. Però el pes molecular exacte del material vegetal és poc conegut. De tota manera, la fórmula C H O correspon aproximadament a la proporció dels àtoms de carboni, d'hidrogen i d'oxigen que componen el vegetal. Aquesta fórmula no representa pas la molècula de material vegetal, però en els càlculs de la combustió pot ésser considerada com a correcta. El seu pes, doncs, pot ésser considerat com el pes molecular equivalent.

Tots els combustibles vegetals contenen aigua; però si aquesta aigua és químicament inerta, no participa en la reacció de combustió; així doncs, no s'ha pas de tenir en compte a l'equació de la combustió. L'equació de la combustió completa del material vegetal és doncs:



La calor de combustió del material vegetal equival, doncs, a 19.980 j.g (4.780 calories per gram). Una part d'aquesta calor es deixa anar en forma de calor latent de vaporització de l'aigua perquè després de la combustió l'aigua inicial del combustible i l'aigua formada per la reacció estan sota forma de vapor.

Per als materials que tenen poques quantitats d'aigua, la part més gran d'aquest vapor d'aigua prové de la reacció de combustió; però, per a aquells en què l'aigua és superior al 36% del pes de la matèria verda, l'aigua inicial del combustible constitueix la quantitat més gran de vapor de l'aigua emesa.

3.4. Fases de la combustió

Al llarg de la seva combustió, els combustibles vegetals passen per diferents fases (vegeu fig. núm 1) que a vegades s'encavalquen i existeixen totes simultàniament en un foc de vegetació que es propaga. Browne (1958), Wagner (1971) i Hall (1972) han donat una descripció d'aquestes fases.

3.4.1. La piròlisi

La piròlisi altera la capa superficial del combustible si és prou sec per cremar. Correspon a la fase de degradació tèrmica de les molècules que apareixen abans de la combustió pròpiament dita.

Zona A: per sota dels 200° C; la capa de la superfície del combustible es deshidrata; apareix gas no combustible, sobretot vapor d'aigua, i restes de diòxid de carboni, d'àcids fòrmics i acètics, i glioxal.

Zona B: 200° a 280° C; la zona A penetra a l'interior del combustible i és reemplaçada per la zona B en la qual la piròlisi hi queda d'una manera molt feble.

Hi ha producció dels mateixos gasos que a la zona A, però en proporció una mica més gran. Les reaccions són endotèrmiques i els productes gasosos són encara no inflamables.

El combustible comença a carbonitzar-se (a tornar-se negre). La pèr-

dua al voltant del 35% del pes total del combustible té lloc abans que la temperatura sigui de 280° C.

Zona C: de 280° a 500° C; les zones A i B penetren cap a l'interior i estan reemplaçades per la zona C, en la qual la piròlisi activa comença de cop i volta en condicions exotèrmiques que comporten reaccions secundàries entre els productes. La temperatura s'eleva ràpidament, tret que la calor que es desprèn no sigui dissipada. Els gasos i els vapors combustibles (en particular el monòxid de carboni, el metà, el formaldehid, els àcids fòrmic i acètic, el metanol, i ulteriorment l'hidrogen), diluïts per entremig del diòxid de carboni i del vapor d'aigua, són emesos amb tanta força que transporten gotes de quitrans altament inflamables que apareixen sota forma de fum. Cremarien en una flama suficientment calenta. Hi ha producció de petites quantitats d'hidrocarburs de feble pes molecular que es combinen de manera intermolecular i participen en la formació de quitrans.

Zona D: per sobre dels 500° C; si la temperatura de superfície continua fent-se més gran abans que no aparegui la carbonització completa, la zona D, que és composta de residus carbonosos, esdevé el lloc de les reaccions secundàries extremament actives, al llarg de les quals els productes gasosos i els quitrans són pirolitzats posteriorment en productes altament combustibles. Així, el diòxid de carboni i el vapor d'aigua poden reaccionar amb el carboni per formar el monòxid de carboni, l'hidrogen i el formaldehid.

Aquests processos han de continuar per produir gasos combustibles que, barrejats amb l'oxigen suficient, mantenen la combustió. Si hi ha una absència de provisió suficient d'oxigen, la major part del material destil·lat es condensa sota la forma de quitrans; aquests fan tornar més lent el moviment de penetració de la calor en les capes més profundes del combustible impedit la inflamació.

3.4.2. La combustió -

Els estadis del començament de la combustió s'assemblen a aquells

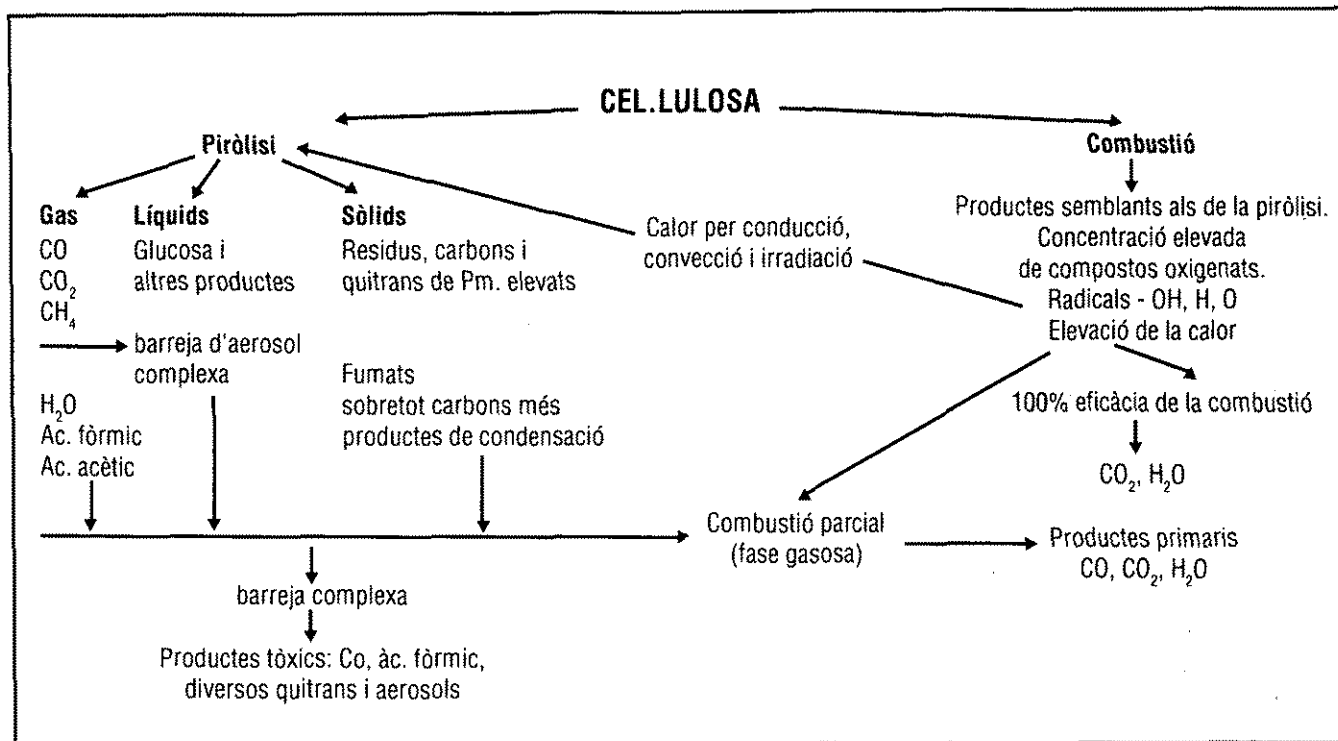


Figura núm. 1: Diagrama de la piròlisi i de la combustió dels combustibles vegetals.

de la piròlisi, però és modifiquen per l'oxidació.

Zona A: per sota de 200°C; en els primers estadis de la combustió, l'energia absorbida pel combustible canvia la seva temperatura i la seva quantitat d'aigua. Els gasos emesos per una piròlisi lenta no són inflamables. Alguns fenòmens d'oxidació apareixen.

Zona B: de 200° a 280°C; a mesura que l'escalfament del combustible progressa, el segon estadi, el de la descomposició endotèrmica, apareix alliberant els gasos inflamables i els no inflamables. La ignició real del gas pot començar, però la inflamació efectiva no apareix fins a temperatures elevades. La reacció exotèrmica primària té lloc sense inflamació.

Zona C: de 280° a 500°C; el tercer estadi apareix quan la descomposició exotèrmica hi esdevé, és a dir, quan l'energia emesa sobrepassa l'energia absorbida. La barreja de gasos emesos a la zona C és el principi: massa rica en diòxid de carboni i aigua per mantenir una flama, però els gasos combustibles produïts per la piròlisi secundària esdevenen inflamables. En aquest estadi, els gasos inflamables alliberats estan en

concentració suficient; la combustió amb flama apareix fora del combustible, completament en la fase gasosa, perquè els gasos alliberats ràpidament tenen manca d'oxigen de tal manera que no es barregen en proporció suficient amb l'aire dins els límits superiors i inferiors de la inflamabilitat crítica. Això permet d'explicar, de vegades, la violència explosiva de fortes concentracions de gasos emesos quan hi ha uns grans incendis.

La calor de la flama contribueix a accelerar la combustió; la taxa depèn de la geometria, del combustible, així com de l'oxigen disponible.

Zona D: per damunt de 500°C; el residu carbonós continua emetent energia, cova i es consumeix; si la temperatura és superior a 1.000°C, la combustió de l'hidrogen i del monòxid de carboni mantenen flames no lluminoses.

Quan els combustibles vegetals cremen, tots aquests processos apareixen al mateix temps. Quan els gasos volàtils combustibles queden en contacte de la quantitat d'oxigen suficient i durant prou temps, la combustió completa es realitza, els residus carbonosos es cremen covant-se fins que el residu final apareix en

forma de cendra inorgànica, probablement el 0,2 - 0,3% del combustible original.

Les fases que acabem de descriure existeixen simultàniament en tot foc de vegetació que progressa. Primer apareix la fase de piròlisi en el curs de la qual els combustibles que són situats davant del front de les flames estan primer escalfats, ressecats i pateixen una destil·lació parcial: les herbes i les fulles es recargolen i es ressequen a mesura que són pre-escalfades pel foc. Després els productes destil·lats s'inflamen; és al llarg d'aquesta fase que apareix l'oxidació.

Les flames aparegudes en els focs provenen dels gasos destil·lats que es cremen. Si la combustió no és completa, algunes substàncies destil·lades es condensen sense ser cremades i queden suspeses en forma de fines gotetes líquides o sòlides per sobre del foc. Aquestes substàncies condensades constitueixen el fum. El vapor d'aigua que es condensa participa d'aquesta manera en el fum. Finalment, quan les flames han desaparegut, no hi queda més que la zona en la qual es carbonitzen els últims residus (restes) del combustible.

3.5. Inflamabilitat i combustibilitat

Les fases descrites al llarg de la piròlisi i de la combustió corresponen a aquelles de la cel·lulosa (un dels principals constituents del teixit vegetal); aquestes fases també es retroben quan conjunts complexos com els combustibles vegetals s'inflamen i cremen. Tot i amb això, factors deguts a la constitució mateixa del vegetal influenciaran aquesta piròlisi i aquesta combustió comportant inflamabilitats i combustibilitats diferents. La inflamabilitat és la propietat d'encendre's que posseeix un vegetal des del moment en què una font de calor entra en contacte amb ell, mentre que la combustibilitat és la manera en què crema el vegetal una vegada ja és encès.

Diferents elements intervenen en la inflamabilitat i la combustibilitat d'una espècie: la quantitat de calor que rep, la forma del material vegetal, la composició química, la quantitat d'aigua.

Segons Martin (1963), un combustible s'inflama quan rep una «irradiació crítica» de més o menys 2,1 w.cm i una temperatura de 300° C. Simms (1960/63) troba que la temperatura d'ignició s'estén de 300° a 410° C segons la distància entre la mostra i la font de calor. Anderson (1970) constata que la temperatura mitjana mínima d'inflamació rebuda per una mostra combustible és de 350° C i, com més elevades són les temperatures, més curt és el temps d'inflamació.

La forma del material combustible correspon a la seva talla i a la seva espessor; es defineix quantitativament per la relació de l'àrea de la superfície del combustible i el seu volum (cm²/cm³). D'aquesta manera Brown (1970) precisa que el temps d'inflamació decreix quan decreix la talla del combustible. D'altra banda, McArthur (1967) diu que la velocitat de combustió i la velocitat de propagació d'un foc varien de manera inversament proporcional a l'espessor de la partícula combustible. Això ho confirmen les experiències d'Anderson (1970) i de Montgomery i Cheo

(1971), en les quals els temps d'inflamació varien directament amb l'espessor de les mostres estudiades. En efecte, generalment les fulles cremen més ràpidament que les branques i els branquillons, i les fulles fines cremen més ràpidament que les fulles espesses.

L'efecte de la composició química també juga un paper important. Les dues categories de compostos químics que influencien la inflamabilitat i la combustibilitat són els extractes d'èter, amb potencial energètic elevat (ceres, olis, terpens i greixos) i les sals minerals que influeixen sobre la piròlisi dels glúcids (o hidrats de carboni).

Els extractes d'èter semblen influenciar el temps d'inflamació; Mutch (1964) troba que el temps d'inflamació pot ésser retardat si es treuen aquests extractes. Philpot (1969) troba que la velocitat de combustió de les fulles de pollancre es redueix si els extractes d'èter són eliminats. King i Vines (1969) conclouen que els olis essencials continguts en les fulles d'eucaliptus no influencien la inflamació, però influencien la combustió. Això confirmaria la hipòtesi de Traubaud (1976), segons la qual els olis essencials o els terpens afavoreixen més aviat l'alçada de la flama que no pas la inflamabilitat de la mateixa. En efecte, els extractes d'èter tenen, sovint, un valor calorífic molt més elevat que els altres constituents del vegetal. Si hi són presents en quantitats sensibles, poden influenciar de manera notable el valor calorífic d'un combustible.

Treballs sobre la piròlisi de la cel·lulosa contaminada per compostos inorgànics, han portat a la conclusió que la inflamabilitat del material vegetal és influenciada per la presència de materials inorgànics (Broido i Nelson 1964; Shafizadeh 1968). Philpot (1970) troba que distints combustibles vegetals que tenen diferents continguts minerals mostren propietats pirolítiques diferents. Els vegetals que posseeixen cendres en quantitats elevades presenten les mateixes característiques pirolítiques que la cel·lulosa tracta-

da amb productes retardants. Però, a l'interior de les cendres, és necessari tenir en compte la quantitat en silici i, per la inflamabilitat només, s'han de considerar els compostos minerals sense silici (Mutch i Philpot 1970); són els vegetals, les cendres dels quals tenen la quantitat mineral sense silici més feble, els que agafen flama més ràpidament.

El contingut d'aigua dels vegetals determina també la inflamabilitat i la combustibilitat dels vegetals (Ching i Stewart 1962; Montgomery i Cheo 1969; Traubaud 1976; Gill i altres 1978). Segons Chadler i altres (1983), la quantitat d'aigua influeix la inflamació fent créixer principalment la calor específica i la conductivitat tèrmica del combustible de tal manera que, perquè la temperatura d'inflamació arribi, la capa de superfície ha d'absorbir més calor. Un cop la inflamació ha aparegut i la combustió activa ja és en curs, l'efecte principal de la humitat és de diluir els gasos combustibles que són emesos per la piròlisi pel combustible que s'està cremant. La quantitat d'aigua màxima que permet la combustió amb flama i que un combustible pot posseir s'anomena «humitat d'extinció». Els valors mesurats de la humitat d'extinció varien (en percentatge de pes de matèria seca) del 12% per les gramínies fins prop del 200% per les agulles de les coníferes (Chandler i altres 1983). Per a molts dels combustibles vegetals morts, la humitat d'extinció està situada entre el 25 i 40%, i per a molts combustibles vius entre el 120 i 160% (Van Wagner 1983). Generalment, aquesta humitat d'extinció és més elevada en els combustibles vius, els que són més gruixuts i en els focs intensos.

Els fenòmens descrits a partir de les experiències de Traubaud (1976) il·lustren bé les diferents fases de la piròlisi i de la combustió del material vegetal.

Hi ha, al començament, l'aparició de fum al cap d'alguns segons després que la mostra hagi estat posada sota la font de calor. En primer lloc, la mostra perd l'aigua que es troba a la superfície de les fulles i als amplis espais intercel·lulars. Hi ha exuda-

ció d'aigua pels estomes. Al mateix temps apareixen unes bombolles inflades d'aigua que esclaten. Generalment, i de manera simultània, apareixen unes taques negres. Aquestes taques es fan més grans, tendeixen a recobrir la totalitat de la superfície de la mostra. Se senten lleugers espurnejos. Hi ha destrucció de l'estructura tisular (trencament dels teixits) a causa de la calor. Al nivell de les bombolles apareixen unes taques de color vermell viu que es fan més grans i cremen el material vegetal sense produir flama; aquest és l'estadi de combustió sense flama. La insuficiència dels gasos combustibles, o la humitat del combustible, o una barreja inadequada de l'oxigen i dels gasos, fan que la flama no pugi aparèixer encara.

Durant aquesta fase, hi ha també gasificació de les essències volàtils de combustible i emissió de gas que s'acumulen. Quan aquests gasos estan en la proporció convenient hi ha explosió i aparició d'una flama. Com a conseqüència de la descomposició del combustible deguda als efectes tèrmics, les substàncies volàtils que cremen en l'aire són alliberades: el combustible i el comburant (oxigen) estan aleshores tots dos sota la forma gasosa. Són els gasos sortits de la piròlisi del material vegetal els que cremen. Aquest és l'estadi on apareix la flama.

El temps d'inflamabilitat, que respon al lapsus de temps que transcorre entre l'exposició de la mostra a la font de calor i l'aparició de la flama, és important ja que per a una espècie donada, com més curt sigui el temps més possibilitats hi ha perquè aquesta espècie s'inflami ràpidament. L'espècie més inflamable és aquella que agafa la flama en el temps d'exposició més curt. El temps d'inflamabilitat de les espècies correspon a una funció hiperbòlica del tant per cent d'aigua; com més aigua hi ha en els teixits, més llarg és el temps d'inflamació, fins a un cert llindar on ja no pot haver-hi inflamació (vegeu fig. núm 2). La funció és de la forma:

$$I_{ft} = \frac{\alpha}{H_{max} - h}$$

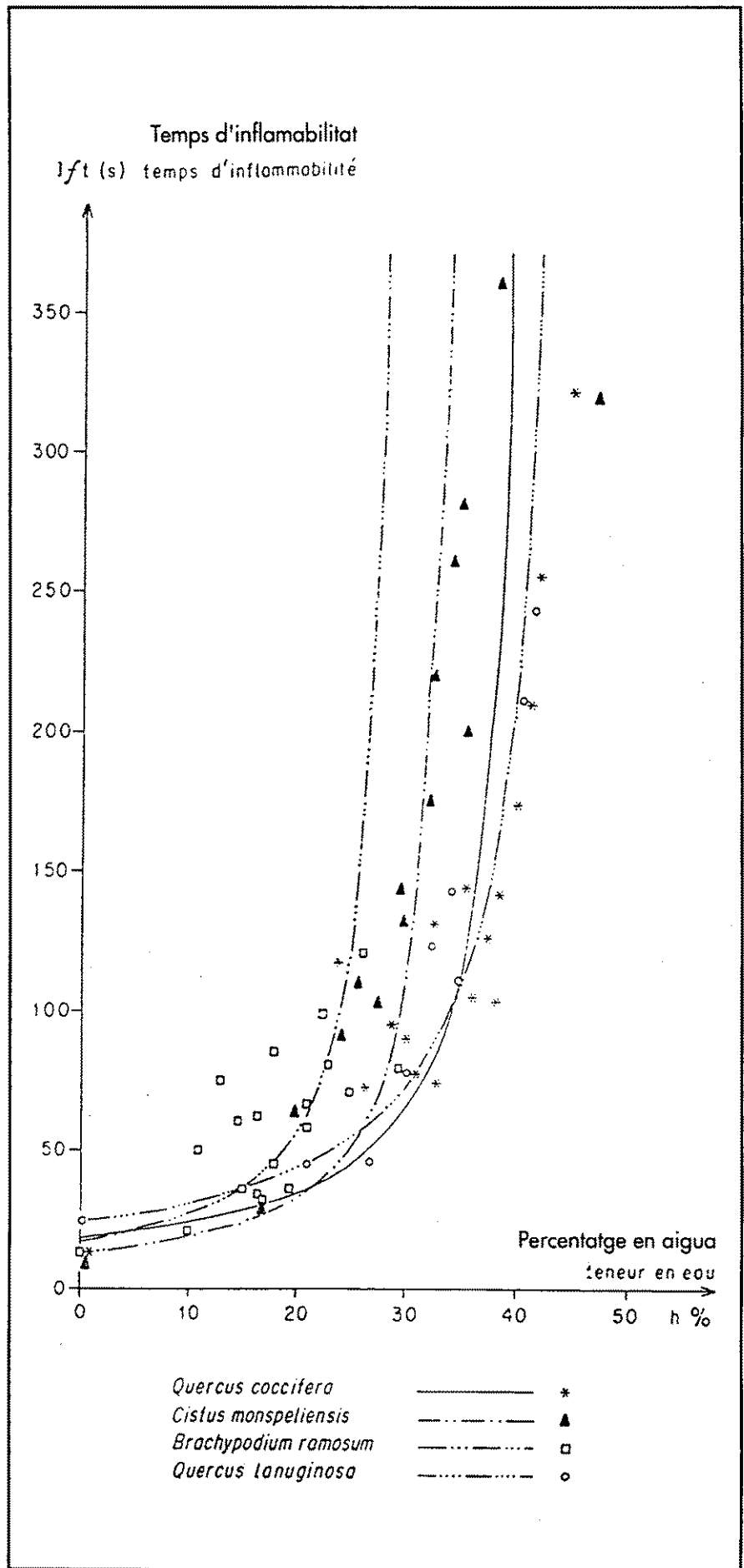


Figura núm. 2: Temps d'inflamabilitat de certes espècies, corbes teòriques i punts observats (Trabaud 1976).

on t_f és el temps d'inflamabilitat en segons,

h el % d'aigua de la mostra, en percentatge del pes de matèria fresca;

H_{max} el % d'aigua maximal més enllà de la qual no pot haver-hi inflamació;

α és un coeficient inherent a cada combustible.

El temps que transcorre entre l'aparició i l'extensió de la flama correspon a la persistència, o durada, de la flama. Com més temps un combustible conservi la flama, més perill hi ha de transmetre aquesta a altres combustibles; igualment la seva energia calorífica és més important i permet, consegüentment, una inflamabilitat més ràpida dels combustibles veïns. El temps de la persistència segueix també una funció hiperbòlica semblant a la precedent.

El temps durant el qual el combustible vegetal es carbonitza després de l'extinció de la flama correspon a la durada de la calcinació, és a dir, quan el foc cova. En aquell moment hi ha deficiència de pirolizats gasosos pel que fa a l'oxigen de l'aire per mantenir la flama. La durada de la calcinació és una funció hiperbòlica del tant per cent d'aigua

semblant a la presentada pel temps d'inflamabilitat.

L'alçada de la flama, estudiada al llarg d'aquestes experiències, és una funció complexa inversa del tant per cent d'aigua; com més alt sigui el percentatge d'aigua d'un vegetal, la flama ha d'ésser menys alta. Els elements combustibles que tenen l'alçada màxima de la flama més gran són les espècies que posseeixen olis essencials d'alts valors energètics.

De fet, aquestes diferents fases de l'experimentació constitueixen diverses fases de la combustió comparables a les descrites per Anderson (1970). Per aquest autor, la inflamabilitat d'un combustible correspon al conjunt de tres paràmetres: la ignitibilitat, la remanència i la combustibilitat. Defineix la ignitibilitat dels combustibles com essent el termini d'inflamació. La remanència expressa les característiques d'un foc que continua cremant amb o sense font de calor: aquest és un concepte pròxim del de la persistència de la flama. La combustibilitat correspon a la rapidesa amb la qual crema un foc.

La interpretació d'aquests resultats permet de definir millor termes, sovint utilitzats de manera confusa; així, la ignició d'un material com-

combustible correspon a l'estadi que es manifesta des que apareix un principi de combustió sense flama (punts incandescents, foc rogent), mentre que la inflamació correspon a l'estadi on hi ha realment aparició de la flama.

BIBLIOGRAFIA

Bolòs, O. de i Trabaud, L. (1976). «Alteració de la vegetació per incendi» en *Llibre Blanc de la Gestió de la Natura als Països Catalans*. Mem. Inst. Cat. Hist. Nat., 9. Barcino, Barcelona.

Cuadernos de Biología. *Las plantas y la temperatura*. James Sutchiffe. 1978.

Diputació de Barcelona, 1987. *Ecosistemes terrestres: la resposta als incendis i a d'altres perturbacions*. Quaderns d'Ecologia Aplicada, 10. Barcelona.

Diputació de Barcelona, 1976. Cuadernos de ecología aplicada. *Los incendios forestales*.

Institut d'Estudis Catalans. *Plasmes i focs*. Monografies de les Seccions de Ciències, 6. 1991.

Margalef, R. (1974). *Ecología*. Omega. Barcelona.

Ministerio de Agricultura. *Manual de prevención y lucha contra los incendios forestales*. ICONA.

Trabaud, L. *Les Feux de Forêts*. France-Selection.

Ramon Ferrer Bolasell

Biòleg

Membre de la Institució Catalana de Ciències Naturals