FIREURISK - DEZVOLTAREA UNEI STRATEGII HOLISTICE, ADAPTATĂ RISCURILOR, PENTRU MANAGEMENTUL INCENDIILOR DE PĂDURE ÎN EUROPA

Numărul acordului de finanțare: 101003890 **Identificator apel:** H2020-LC-CLA-2018-2019-2020	
Subiect:	LC-CLA-15-2020 Reducerea riscului de incendii forestiere: către o abordare integrată a managementului incendiilor în UE
Instrument:	RIA

D2.6 Manual cu instrucțiuni pentru pompieri pentru a face față incendiilor extreme, incendiilor în zona de interfață natural -construit și incendiilor la latitudini/altitudini mari

Identificator livrabil:	D2.6
Data scadentă de livrare:	30.03.2024
Data trimiterii livrabilului:	29/05/2024
Versiune livrabilă:	final
Partener principal:	SAFE
Autori:	Sébastien Lahaye, Domingos Xavier Viegas, Luis Mario Ribeiro, Miguel Almeida, Tiago Rodrigues, Antonio Jorge Ferreira, Ana Isabel Miranda, Diogo Lopes, Tobias Osswald , Johan Sjöström, Rick McRae, Kiki Yunianti, Fanny Verhilac.
Pachet de lucru:	WP2
Task:	Task 2.3
Nivel de difuzare:	☒ PU: Public CO: confidențial, numai pentru membrii consorțiului (inclusiv serviciile Comisiei)

Drepturi de autor Consorțiul FirEURisk. Toate drepturile rezervate. 1

Istoricul revizuirilor

Versiune	Data	Editat de	Descriere
V0.1	25/01/2024	SAFE & ADAI	Contribuții inițiale
V0.2	23.02.2024	SAFE, ADAI, RISE & UAVR	Prima versiune schiță
V0.3	26/02/2024	SAFE	A doua versiune schiță
V0.4	18.03.2024	SAFE, ADAI	Versiunea finală pentru revizuire
V0.5	18/05/2024	SAFE	Final după revizuire internă
V0.5RO	29.01.2025	INCDS Adrian Lorenț Marius Petrila Bogdan Apostol Florin Capalb Gl.bg. Ion Burlui Lt.col. Claudiu Ionuț Bibarț	Traducere și adaptare în limba română Revizori de specialitate

Control de calitate

Tip	Data	Revizuite de	Aprobat/Comentariu
Intern & Peer	06.05.2024	Patricia OLIVA și Stefan DOERR	Aprobat cu modificări minore sugerate
Aprobare finală	28/05/2024	Stefan DOERR	Aprobat

Rezumat

Riscul de incendii de vegetație a evoluat rapid în Europa în ultimii ani, generând noi provocări pentru echipele de intervenție în ceea ce privește:

- Incendiile extreme și comportamentele extreme ale incendiilor;
- Incendiile în Zona de Interfață Natural-Construit (*Wildland-Urban Interface* - WUI);
- Incendiile la altitudini mai mari și la latitudini nordice, zone care anterior nu erau atât de afectate.

Oamenii de știință observă și anticipează astfel de evoluții, generând continuu noi cunoștințe despre acest risc. Cu toate acestea, transferul acestor cunoștințe către respondenți și transformarea în linii directoare este insuficientă din cauza decalajului de opinii dintre comunitățile de cercetare și cele operaționale. În plus, comunitatea pompierilor este foarte fragmentată în Europa – cu subordonări la autorități locale/departamentale/regionale/naționale – ceea ce duce la o diferență semnificativă în nivelurile de pregătire și formare. Ca urmare, respondenții sunt insuficient informați și pregătiți pentru a face față noilor provocări asociate incendiilor de vegetație. Aceasta afectează atât eficiența intervențiilor, cât și siguranța pompierilor.

Acest manual compilează rezultatele cercetării privind comportamentul incendiului realizate de partenerii din cadrul proiectului FirEUrisk. Această cercetare este prezentată într-o formă simplificată, astfel încât să fie accesibilă practicienilor. Primele capitole detaliază atât elementele fundamentale ale comportamentului incendiului cât și comportamentele extreme ale acestuia. Capitolele următoare descriu incendii în diverse zone specifice – zona de interfață natural-construit (*Wildland-Urban Interface* - WUI), altitudini mari și latitudini înalte; și mecanismul de emisie și dispersie a fumului.

Capitolele finale analizează metodologiile de stingere a incendiilor în diferite contexte și apoi oferă recomandări de siguranță pentru pompieri și studii de caz.

Pentru a maximiza rezultatele după livrarea acestui manual, consorțiul FirEUrisk va explora modul de traducere și transfer al acestuia în manuale și cursuri naționale.

Declinarea răspunderii

Conținutul publicației de aici este responsabilitatea exclusivă a editorilor și nu reprezintă neapărat opiniile exprimate de Comisia Europeană sau de serviciile acesteia.

Deși informațiile conținute în documente se consideră a fi corecte, autorii sau orice alt participant din consorțiul FirEUrisk nu oferă nicio garanție cu privire la acest material, inclusiv, dar fără a se limita la garanțiile implicite de valabilitate și adecvare pentru un scop special.

Nici Consorțiul FirEUrisk, nici vreunul dintre membrii săi, ofițerii, angajații sau agenții acestora nu vor fi responsabili sau răspunzători pentru neglijență sau în orice alt fel în ceea ce privește orice inexactitate sau omisiune din prezentul document.

Fără a deroga de la generalitatea celor de mai sus, nici Consorțiul FirEUrisk, nici oricare dintre membrii săi, ofițerii, angajații sau agenții acestora nu vor fi răspunzători pentru orice pierdere sau daune directe sau indirecte sau în consecință cauzate de sau care decurg din orice recomandare, inexactitate sau omisiune din prezentul document.

Mesaj privind drepturile de autor

© Consorțiul FireEUrisk, 2021-2025. Acest livrabil conține lucrări originale nepublicate, cu excepția cazului în care se indică în mod expres altfel. Recunoașterea materialului publicat anterior și a lucrărilor altora a fost făcută prin referințe corespunzătoare și citări adecvate. Reproducerea este autorizată cu condiția menționării sursei.

Cuprins

1. INTRODUCERE 11

1.1. TENDINȚE VIITOARE ALE RISCULUI DE INCENDIU ÎN EUROPA 11
1.2. NECESITATEA GHIDURILOR DE STINGERE A INCENDIILOR 11
1.3. CONTRIBUȚII 11

2. FUNDAMENTELE COMPORTAMENTULUI INCENDIILOR 13

2.1. FACTORII CARE AFECTEAZĂ PROPAGAREA INCENDIULUI 13
2.2. METEOROLOGIA INCENDIULUI 13
2.2.1. Factorii meteorologici 13
2.2.2. Pericolul de incendiu 14
2.2.3. Pericolul de incendiu și conținutul de umiditate al combustibililor morți 16
2.3. PROPRIETĂȚILE COMBUSTIBILULUI 18
2.3.1. Particule de combustibil 20
2.3.2. Paturi de combustibil și tipuri de combustibil 21
2.3.3. Modele de combustibil 24
2.4. ROLUL TOPOGRAFIEI 24
2.4.1. Gradul de înclinare a terenului 25
2.4.2. Expoziția terenului : lumina soarelui și expunerea la vânt 25
2.4.3. Altitudine: temperatură și tipuri de vânt 25
2.4.4. Curbura terenului 26
2.4.5. Crestele 26
2.4.6. Topografie complexă 26
2.5. TIPURI ȘI MODURI DE PROPAGARE A INCENDIULUI 27
2.5.1. Tipuri de incendii 27
2.5.2. Moduri de propagare a incendiului la suprafață 27

3. COMPORTAMENTUL EXTREM AL INCENDIILOR 28

3.1. CARACTERIZAREA COMPORTAMENTULUI EXTREM AL INCENDIILOR (EFB) 28
3.1.1. Comportamentul dinamic al incendiului 30
3.1.2. Intensitatea incendiului 30
3.2. EVOLUȚII NEFAVORABILE ALE EFB PENTRU RESPONDENȚII 31
3.2.1. Incendii secundare (prin focare izolate) 31
3.2.2.Incendiile de coronament 33
3.2.3. Incendiile eruptive 36
3.2.4. Incendiile de joncțiune 37
3.2.5. Incendiile devastatoare 37
3.2.6. Vârtejurile de foc 37
3.2.7. Incendiile explozive 38

4. PROVOCĂRI CAUZATE DE INCENDII SPECIFICE 41

4.1. INCENDII ÎN ZONA DE INTERFAȚĂ NATURAL-CONSTRUIT 42
4.1.1. Combustibili naturali – vegetație 43
4.1.2. Combustibili artificiali 43
4.1.3. Populația 44
4.2. INCENDII ÎN ZONE DE MARE ALTITUDINE 45
4.2.1. Comportament determinat de topografie 45
4.2.2. Problema de siguranță 45
4.2.3. Provocări de acces și răspuns 46
4.2.4 Impactul incendiilor la mare altitudine 46
4.3. INCENDII ÎN REGIUNI DE LATITUDINE MARE 46
4.3.1 Combustibili și peisaje 47

4.3.2 Demografie 47
4.3.3 Provocări și îmbunătățiri observate în ultimele decenii 48
4.3.4 Factori pentru viitor 49

5. EMISIA ȘI DISPERSIA FUMULUI 50

5.1. EMISIA DE FUM 50
5.2. DISPERSIA FUMULUI 52

6. METODOLOGII DE STINGERE A INCENDIILOR 54

6.1. STRATEGII ȘI TEHNICI DE STINGERE A INCENDIILOR 55
6.1.1 Strategia de stingere a incendiilor 55
6.1.2 . Tehnica de stingere a incendiilor 55
6.2. COMBATEREA INCENDIILOR LA WUI 56
6.2.1. Stingerea incendiilor în WUI 57
6.2.2. Protecția populației și a clădirilor 58
6.3. COMBATEREA INCENDIILOR EXTREME 58

7. SIGURANȚA LA INCENDIU 61

7.1. STAREA DE SĂNĂTATE ȘI PERFORMANȚA CU PE DIVERSE PALIERE 61
7.2. IMPACTUL FUMULUI ASUPRA VIZIBILITĂȚII ȘI SĂNĂTĂȚII 62
7.2.1. Etiopatogenie 62
7.2.2. Diagnosticare 63
7.2.3. Tratament 65
7.2.4. Concluzii 65
7.3. REGULI DE SIGURANȚĂ 66
7.3.1. Ordine standard FF și situații de vigilență 66
7.3.2. LCES - LACES 68
7.3.3. Recomandări suplimentare pentru incendii pe pante 71

8. STUDII DE CAZ 72

8.1. INCENDII DE AMPLOARE 72
8.1.1. Incendiul Pedrógão 72
8.1.2. Incendiul Garrocho (Serra da Estrela) 75
8.2. ACCIDENTE 78
8.2.1 - Accidentul Freixo de Espada a Cinta 78
8.2.2 - Accidentul Famalicão da Serra (Portugalia) 2006 80

BIBLIOGRAFIE 84

Tabel de ilustrații

Tabelul 1. Clasele de pericol de incendiu pentru FWI în Europa definite de EFFIS. Sursa: EFFIS/JRC (2023). 16

Figura 1. Conținutul de umiditate al combustibililor morți (m_f) în Lousã în luna iulie 2022. Legendă: Măsurătorile pe teren: m_f ale acelor Pinus pinaster în câmp; Tijă de combustibil: m_f măsurată de un senzor de umiditate a combustibilului (CS506 10 ore); Modelare: m_f estimat pentru ace de Pinus pinaster conform Lopes, 2014. Perioada evidenţiată (2/Iul-18/Iul): caniculă. (Ilustrația autorilor) 18

Figura 2. Reprezentarea schematică a straturilor patului de combustibil (credite imagine: ADAI) 22

Figura 3. Exemplu de simulări de comportament la incendiu, folosind BehavePlus 6, pentru 3 modele diferite de combustibil, în pante diferite și cu vânt în sus de 20 km/h. 25

Tabelul 2. Limite de stingere a incendiului în funcție de intensitatea incendiului. 31

Figura 4: Adierele din pantă și din vale în timpul zilei (stânga) și nopții (dreapta) (sursa: Meteo France) 45

Figura 5. Exemplu din Suedia 1996-2020. Densitatea populației (stânga), apariția incendiilor forestiere (≥1 ha), (mijloc), apariția incendiilor forestiere (≥100 ha), (dreapta) (Sjöström & Granström 2023a). 48

Figura 6 Unii dintre compușii fumului emiși în timpul unui incendiu de pădure. (Ilustrația autorilor) 50

Tabelul 3. Factori medii de emisie (g.kg-1 combustibil ars, pe bază uscată) a principalilor poluanți de fum, pe tip de vegetație (Fernandes și colab., 2002) 51

Figura 7 Schema unei abordări de modelare a calității aerului (ilustrarea autorilor). ... 52

Figura 8. Câmpul de concentrație (µg.m-3) al PM10 simulat printr-un model de dispersie locală (Valente și colab., 2007). 53

Figura 9. Colecție de cuvinte legate de strategia și tehnicile de stingere a incendiilor utilizate în Europa (ilustrarea autorilor) 54

Tabelul 4: Potențialul și limitele tehnicilor de stingere a incendiilor în WUI 57

Tabelul 5: Punctele forte și limitele diferitelor tehnici în fața comportamentului extrem al incendiului 60

Tabelul 6. 10 Ordine standard de stingere a incendiilor (NWCG, 2022) 67

Tabelul 7. 18 Situații de vigilență (NWCG, 2022) 67

Tabelul 8. Factor pantă-vânt (Δ) pentru a calcula SSD la diferite înălțimi de vegetație (Butler, 2018). 70

Figura 10. SSD pentru a) vânt slab, b) vânt moderat si c) vânt puternic, pentru cele 3 clase de pantă din formulare. (Butler, 2018) 70

Figura 11. Harta Portugaliei și a zonei incendiului din Pedrógão Grande cu punctele de aprindere a incendiului și răspândirea incendiului prezentate. (ilustrarea autorilor) 73

Figura 12. Vederi ale coloanei incendiului de la Escalos Fundeiros la ora 1800 și la ora 1815 , arătând interacțiunea cu fluxul descendent produs de fluxul convectiv de mezoscală. 73

Figura 13. Situație operațională la 11:30 pe 6aug23. (ilustrarea autorilor) 76

Figura 14. Situația operațională la 15Aug23. (ilustrarea autorilor) 77

Figura 15 Harta topografică a zonei incendiului Freixo. Nordul este indicat de săgeata albă din colțul din stânga sus al figurii 78

Figura 16 (a) Temperatura aerului și (b) umiditatea relativă la Freixo în 5 august 2003. 79
Figura 17 - (a) Presiunea atmosferică și (b) direcția vântului la Freixo în 5 august 2003. 79
Figura 18 - (a) Viteza medie a vântului pe zece minute și (b) viteza maximă a vântului la Freixo în 5 august 2003. 79
Figura 19. Vedere generală a zonei incendiului de la Famalicão. Originea incendiului a fost aproape de centrul de jos al imaginii. Accidentul a avut loc în canionul din centrul fotografiei. (Viegas și colab. 2009) 81

Tabelul abrevierilor

Abreviere	Definiție (*limba engleză* / limba română)
ABC	*Airway, Breathing, Circulation* / Căile respiratorii, Respirația, Circulația
ADAI	*Associacao para o Desenvolvimento da Aerodinamica Industrial*
ATSDR	*Agency for Toxic Substances and Disease Registry* / Agenția pentru Substanțe Toxice și Registrul Bolilor
BMI	*Body Mass Index* / Indicele de masa corporala
BUFE	*Blow-Up Fire Event*/ Eveniment de Incendiu Exploziv
CDC	*Centers for Disease Control and Prevention* / Centrele pentru Controlul și Prevenirea Bolilor
CFWIS	*Canadian Fire Weather Index System* / Sistemul Canadian de Indexare pentru a Vremii pentru Incendii
DC	*Drought Code* / Codul de Secetă
DMC	*Duff Moisture Code*/ Codul de Umiditate al Stratului Organic Superficial
EFB	*Extreme Fire Behaviour* / Comportament Extrem al Incendiului
EFB	*Eruptive Fire Behaviour* / Comportament Eruptiv al Incendiului
EFFIS	*European Forest Fire Information System* / Sistemul European de Informații pentru Incendiile de Pădure
EMC	*Equilibrium Moisture Content* / Conținutul de Umiditate în Echilibru
EPA	*Environmental Protection Agency* / Agenția de protecție a mediului
EWE	*Extreme Wildfire Event* / Incendiu de Vegetație Extrem
FDI	*Fire Danger Index* / Indicele de Pericol de Incendiu
FFDI	*Forest Fire Danger Index*/ Indicele de Pericol de Incendiu de Pădure
FFMC	*Fine Fuel Moisture Code* / Codul Umidității Combustibilului Fin
FWI	*Fire Weather Index* / Indicele de Prognoză a Vremii de Incendii
GFDI	*Grassland and Forest Fire Danger Index* / Indicele de Pericol de Incendiu pentru Pajiști și Păduri
HR	*Heart Rate* / Ritm Cardiac
IAP	*Incident Action Plan* / Planul de Acțiune pentru Incident
IAFC	*International Association of Fire Chiefs*/ Asociația Internațională a Șefilor de Pompieri din SUA
ISI	*Initial Spread Index* / Indicele de Propagare Inițială

LCES	*Lookouts, Communications, Escape routes, and Safety zones* / Observare, Comunicații, Căi de Evacuare și Zone de Siguranță
MSDS	*Material Safety Data Sheet* / Fișa cu Date de Securitate a Materialelor
NFDRS	*National Fire Danger Rating System* / Sistemul Național de Evaluare a Pericolului de Incendiu
NFFL	*Northern Forest Fire Laboratory* / Laboratorul Nordic pentru Incendii Forestiere
NIH	*National Institute of Standards and Technology* / Institutul Național pentru Standarde și Tehnologie
NIOSH	*National Institute for Occupational Safety and Health* / Institutul Național pentru Securitate și Sănătate în Muncă
NPR	*National Public Radio* / Radioul Public Național
NWCG	*National Wildfire Coordination Group* / Grupul Național de Coordonare pentru Incendii de Vegetație
OSHA	*Occupational Safety and Health Administration* / Administrația pentru Securitate și Sănătate în Muncă
PM	*Particulate Matter* / Particule în Suspensie
ROS	*Rate of Spread* / Viteza de Propagare
SAV	*Surface Area to Volume* / Raportul Suprafață la Volum
SDS	*Safety Data Sheet* / Fișa cu Date de Securitate
SSD	*Safe Separation Distance* / Distanța de Separare de Siguranță
TOS	*Time of Spread* / Timpul de Propagare
UNESCO	*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* / Organizația Națiunilor Unite pentru Educație, Știință și Cultură
USDA	*United States Department of Agriculture* / Departamentul pentru Agricultură al Statelor Unite
US	*United States* / Statele Unite
UFI	*Urban Forest Interface* / Zona de Interfață Forestier-Urban
UTC	*Coordinated Universal Time* / Timpul (Ora) Universal(ă) Coordonat(ă)
WUI	*Wildland-Urban Interface* / Zona de Interfață Natural-Construit

1. Introducere

1.1. Tendințele viitoare ale riscului de incendii de vegetație în Europa

În ultimii ani, frecvența și gravitatea incendiilor de pădure au crescut, ducând la consecințe devastatoare pentru comunități și ecosisteme.

Această tendință va continua și se va agrava în anii următori cu o traiectorie care este prezentată în cadrul activităților realizate prin pachetul de lucru 3 al proiectului FirEURisk (FIREURISK, 2024).

Cercetări recente au demonstrat deja că:

- Riscul se va extinde pe teritoriul european și va afecta zone mai largi (Jones și colab., 2022)
- Zona cea mai expusă, adică regiunea mediteraneeană, se va confrunta cu incendii din ce în ce mai extreme (Turco și colab., 2018).

Simultan, zona de interfață natural-construit (*Wildland-Urban Interface* - WUI) va fi din ce în ce mai vulnerabilă și expusă riscului (Almeida și colab., 2023; Zikeloglou și colab., 2023).

La nivel european, toate aceste tendințe converg spre expunerea pompierilor din echipele de intervenție la noi provocări. Este posibil să nu aibă cunoștințele necesare, strategiile și tacticile adaptate noilor cerințe pentru a face față incendiilor în unele zone noi predispuse la incendiu, comportamente extreme ale incendiilor și incendii în WUI. Foarte important, aceste carențe le-ar putea pune în pericol siguranța și le-ar putea expune viața.

1.2. Nevoia de ghiduri de bune practici de stingere a incendiilor

Dintr-o perspectivă operațională, agențiile responsabile cu răspunsul la incendiile de vegetație constituie un sistem fragmentat în Europa și nu numai (Lahaye și colab., 2018a). În funcție de state, serviciile forestiere și de pompieri naționale, regionale sau subregionale își gestionează resursele conform propriilor proceduri. Aceste proceduri pot fi aliniate cu standardele naționale, dar se bazează, în general, pe contextul local și pe experiența de gestionare a incendiilor. Această experiență este foarte variabilă de la o regiune la alta. Resursele economice și umane sunt și ele variabile, astfel încât nivelul de cunoaștere și de reglementare diferă de la un serviciu la altul.

În ceea ce privește cercetarea, mai multe echipe lucrează deja în Europa și în lume pentru a dezvolta cele mai bune cunoștințe și pentru înțelegerea comportamentului incendiului și a întregului ciclu de management al riscului de incendiu. Punctul forte al proiectului FirEURisk este de a aduna laolaltă multe dintre aceste echipe de cercetare și de a oferi o punte de comunicare cu respondenții operaționali.

Scopul acestui document este de a colecta un set de concepte și linii directoare care ar trebui să facă parte din programa de instruire a pompierilor și a altor agenții care trebuie să se ocupe de problema incendiilor de vegetație (inclusiv a incendiilor de pădure) pentru a gestiona riscul de incendiu în toate componentele sale. Având în vedere urgența și relevanța necesității asigurării unui nivel de instruire a pompierilor în acest domeniu al incendiilor forestiere, se va pune un accent deosebit în cazul stingerii incendiilor extreme. O pregătire mai bună și o mai mare conștientizare a situației operaționale sunt aspecte cheie în ceea ce privește siguranța în timpul intervenției la incendiu, contribuind în mod semnificativ la scăderea deceselor cauzate de incendii și a pierderilor umane cauzate de incendiile de vegetație.

Lupta împotriva incendiilor extreme implică pericole excepționale pentru pompieri. Aceste situații sunt adesea caracterizate de căldură ridicată, flăcări intense, focare multiple, incendii secundare generate de scântei și jar, schimbare rapidă și comportament imprevizibil al incendiului, toate acestea generând condiții periculoase pentru personalul de intervenție. Incendiile din WUI generează, de asemenea, situații provocatoare. Pompierii trebuie să se organizeze pentru a proteja vieți, indiferent de nivelul de risc și de comportamentul incendiului, care este adesea neregulat. Acest comportament este influențat de dispunerea vegetației și a așezărilor umane, incluzând benzinării, cisterne și conducte de gaz, autovehicule și alte materiale foarte inflamabile sau explozive.

Conceptul de impact asupra zonei de interfață WUI a fost investigat pe scară largă de către proiectul FirEUrisk: analiza evenimentelor din trecut, evaluarea expunerii populației și a activelor, cuantificarea vulnerabilității comunităților, construcțiilor și infrastructurii. Prin urmare, documentul pune în evidență și rezultatele acestor cercetări pentru a ghida procedurile operaționale în WUI.

În cele din urmă, autorii au contactat rețeaua lor de respondenți pentru a investiga ce tehnici specifice de răspuns s-ar putea potrivi cel mai bine în diferite situații, inclusiv în contextul extinderii riscului către latitudini mai nordice din Europa precum și la altitudini mai mari.

Conținutul acestui document se bazează pe programa utilizată de unii dintre autori la instruirea pompierilor și a altor agenți operaționali pentru combaterea incendiilor de vegetație în condiții de comportament extrem al incendiului, având ca obiectiv obținerea unei siguranțe sporite pe timpul intervențiilor.

Principalele contribuții ale acestui document au fost prioritizate pentru a crea un „manual european pentru pompieri”. Acest manual ar putea fi esențial pentru creșterea gradului de conștientizare pe timpul intervențiilor, folosind o abordare simplificată, dar explorând aspecte cheie ale incendiilor de vegetație. Toți agenții de protecție civilă ar beneficia rapid de aceste concepte și informații. Acest lucru este valabil mai ales din perspectiva siguranței, deoarece majoritatea cercetărilor care au produs perspectivele inovatoare prezentate aici privind comportamentul extrem al incendiilor au fost inspirate și motivate din analiza accidentelor reale și a unor incendii de mari proporții care au cauzat pierderi semnificative de vieți omenești.

1.3. Contribuții

Acest document valorifică contribuțiile mai multor echipe din cadrul proiectului.

Lucrarea se bazează în primul rând pe experiența vastă a echipei ADAI în investigarea accidentelor legate de incendiu care implică atât civili, cât și agenți operaționali (Viegas și colab., 2001; Viegas şi colab., 2005; Viegas şi colab., 2008; Viegas, 2004, 2009, 2013, 2017; Ribeiro și colab., 2020) și asupra studiului incendiilor mari care a fost elaborat la cererea autorităților naționale (Viegas și colab., 2012 ; Viegas și colab., 2013; Viegas și colab., 2017 ; Viegas și colab., 2019). Cercetările asupra comportamentului extrem al incendiului includ câteva concepte inovatoare despre comportamentul incendiilor, care sunt prezentate și menționate în acest ghid și care sunt rezumate aici, pentru consecvență: (i) Conceptul de comportament dinamic al incendiului (Viegas, 2004; Viegas & Pita, 2004); (ii) Conceptul de incendiu eruptiv (Viegas, 2006; Viegas & Simeoni, 2011); (iii) Conceptul de incendiu de joncțiune (Raposo și colab. 2018); (iv) comportamentul oscilator al incendiului (Viegas și colab. 2021).

Aici nu sunt oferite detalii despre diferitele aspecte, mai ales dacă acestea corespund unor materiale standard care pot fi găsite în documente binecunoscute.

Primul autor al acestui document a reprodus aici și materiale extrase din studiile sale privind siguranța pompierilor (Lahaye și colab., 2018a; Lahaye și colab. 2018b; Lahaye și colab. 2018c) și din cursurile de instruire curente utilizate pentru a forma capacitățile de analist al comportamentului incendiului în Franța.

Capitolul despre metodologiile de stingere a incendiilor se bazează pe rezultatele interviurilor și întrebărilor adresate respondenților europeni, realizate de către cercetătorii din cadrul SAFE Cluster.

În final, cercetători seniori de la Institutul RISE (Suedia), Universitatea din Aveiro (Portugalia) și Universitatea din New South Wales (Australia) au oferit contribuții specifice în cadrul documentului.

2. Fundamentele comportamentului incendiilor

2.1. Factorii care afectează propagarea incendiilor

Propagarea unui incendiu depinde de diverși factori care pot fi grupați, pentru simplificare, conform lui Viegas (2004), în următoarele patru categorii de factori: 1) Topografie, 2) Vegetație, 3) Meteorologie și 4) Timp.

Deși factorii de mai sus nu sunt independenți unul de celălalt, este posibil să se analizeze fiecare dintre ei separat pentru a înțelege mai bine rolul lor în propagarea incendiului. Rolul topografiei, combustibililor și meteorologiei va avea un tratament dedicat mai jos. Factorul „timp" corespunde timpului cronologic și sporește caracterul dinamic al proceselor de propagare a incendiului în cazul general, dar și luând în considerare incendiile extreme.

În capitolele 3 până la 6, acești factori vor fi analizați pentru a oferi un fundal comun de concepte și idei pentru a înțelege mai bine Comportamentul Extrem al Incendiilor (*Extreme Fire Behaviour* - EFB).

În această lucrare, operațiunea de stingere a incendiului nu este luată în considerare în mod expres, dar, după cum vom vedea, cu cât condițiile sunt mai favorabile pentru răspuns, cu atât sunt mai mari șansele ca acțiunile de stingere a incendiului să limiteze propagarea incendiului.

2.2. Meteorologia incendiilor

2.2.1. Factorii meteorologici

Meteorologia este starea atmosferei care înconjoară Pământul și este descrisă de o serie de parametri sau proprietăți care se schimbă constant atât în timp, cât și în spațiu. Aceste proprietăți, atunci când sunt descrise în moduri legate de influențele lor asupra incendiilor de vegetație, constituie meteorologia incendiului. Factorii meteorologici care afectează direct sau indirect comportamentul incendiului pot fi împărțiți în două grupe: i) factori de condiționare și ii) factori determinanți.

i) **Factori de condiționare** – favorabili aprinderii prin condiționarea încărcăturii și a conținutului de umiditate al combustibililor fini. Acest grup include următorii factori: precipitații, temperatura aerului și umiditatea relativă.

Precipitațiile, exprimate în milimetri (litri de precipitații care cad pe sol pe metru pătrat), afectează conținutul de apă al solului și, de asemenea, conținutul de umiditate al combustibililor forestieri (vii și morți). Persistența precipitațiilor la începutul anului hidrologic (octombrie în emisfera nordică) favorizează creșterea vegetației fine, care poate fi disponibilă pentru a susține propagarea incendiului vara. Cu toate acestea, absența precipitațiilor în lunile premergătoare verii, cu valori mult mai mici decât normalul climatic (valori medii ale precipitațiilor care caracterizează o regiune pe o perioadă de 30 de ani), poate duce la o situație cu secetă sau deficit de apă care favorizează uscăciunea generală a combustibililor forestieri, care sunt disponibili pentru a favoriza propagarea incendiului și contribuie la dezvoltarea acestuia pe suprafețe mai mari în cazul incendiilor de vară (Viegas & Viegas, 1994).

Temperatura aerului se modifică într-un ciclu diurn din cauza efectului radiației solare, dar se poate modifica și din cauza intrării unor mase de aer mai calde sau mai reci. De obicei, temperatura crește în timpul zilei și scade la sfârșitul zilei. Acest ciclu diurn este de mare

importanță în incendiile de vegetație deoarece afectează în mod direct inflamabilitatea combustibililor forestieri, întrucât cantitatea de căldură necesară pentru a ridica temperatura combustibililor până la punctul de aprindere depinde de temperatura lor inițială și de cea a aerului înconjurător cât și de conținutul de umiditate al combustibililor care depinde la rândul său în mare măsură de temperatura aerului (Schroeder & Buck, 1970).

Umiditatea relativă a aerului (*RH*) este procentul din masa de vapori de apă din aer în raport cu masa de vapori necesari pentru a satura mediul. O valoare *RH* egală cu 100% corespunde unei atmosfere saturate, în care există condensare, în timp ce o valoare de 30% sau mai puțin corespunde aerului foarte uscat, care favorizează și uscarea combustibililor. *RH* are, de asemenea, un ciclu diurn, dar tinde să scadă pe parcursul zilei și să crească la sfârșitul zilei – practic, se modifică în raport invers cu ciclul de temperatură.

ii) **Factori determinanți** – cei care afectează direct propagarea incendiului. Această grupă include stabilitatea vântului și a atmosferei.

Vântul este definit în general ca mișcarea orizontală a aerului atmosferic (vânt atmosferic) caracterizată de următoarele componente: viteza vântului (sau intensitatea) în *m/s* și direcția (de unde vine vântul) orientată față de Nordul Geografic în *grade*. Viteza și direcția vântului se schimbă de la un punct la altul, iar la un punct dat se modifică continuu în timp (variație lentă). Există o altă variație datorată turbulenței fluxului vântului, care se manifestă prin variații bruște ale vitezei vântului într-o perioadă scurtă de timp (rafale). Aceste variații au o influență directă asupra condițiilor de propagare a incendiului.

Profilul vitezei vântului crește odată cu altitudinea (este zero în apropierea solului și crește până când atinge o valoare maximă în vârful acestui strat). Cu toate acestea, într-un incendiu de vegetație, acest profil poate fi modificat din cauza vântului indus de incendiu, care poate duce la dezvoltarea rapidă a incendiului chiar dacă vântul atmosferic este scăzut. Prin urmare, într-un incendiu, vântul poate fi definit ca suma vântului *atmosferic* și a *vântului indus de incendiu*.

Stabilitatea atmosferică se caracterizează prin variația temperaturii aerului în direcția verticală, măsurată prin gradientul său de temperatură sau rata de variație, *dT/dz* , [ºC/m], care determină dacă atmosfera este stabilă, neutră sau instabilă. Stabilitatea atmosferică poate încuraja sau suprima mișcarea verticală a aerului. Căldura produsă de incendiu generează mișcare verticală, cel puțin în apropierea suprafeței terenului, dar circulația convectivă astfel stabilită este afectată direct de stabilitatea aerului (Schroeder & Buck, 1970). La rândul său, atracția de aer proaspăt către incendiu la niveluri joase este afectată, având un impact semnificativ asupra intensității incendiului. De asemenea, în multe moduri indirecte, stabilitatea atmosferică va afecta comportamentul incendiului, de exemplu vânturile tind să fie turbulente și în rafale atunci când atmosfera este instabilă, iar acest tip de flux de aer face ca incendiile să se comporte neregulat (Schroeder & Buck, 1970). Furtunile cu curent ascendent și descendent se dezvoltă atunci când atmosfera este instabilă și conține suficientă umiditate (Schroeder & Buck, 1970). Fulgerele produse de acestea pot provoca incendii de vegetație, iar curenții lor de aer distincți pot avea efecte adverse asupra comportamentului incendiului (Schroeder & Buck, 1970); mai multe informații în Capitolul 3.

2.2.2. Pericolul de incendiu

Pericolul de incendiu de vegetație indică probabilitatea fizică ca un incendiu să declanșeze și să se propage într-o anumită locație (UNISDR, 2009). Pericolul de incendiu este exprimat sub formă de indici de pericol de incendiu care sunt estimați în sistemele

meteorologice de prognoză la incendiu sau sistemele de pericol de incendiu. Aceste sisteme se bazează pe factori meteorologici și pe efectul acestora asupra conținutului de umiditate al combustibililor forestieri.

Sisteme de alertare a pericolului de incendiu sunt utilizate în multe părți ale lumii pentru a integra informațiile meteorologice și despre combustibili într-o măsură unică sau un număr redus de măsuri (Dowdy și colab., 2009). Aceste măsuri pot fi apoi aplicate regional pentru a emite avertismente, sau local pentru a estima dificultatea de stingere a unui singur incendiu sau complex de incendii (Dowdy și colab., 2009) .

Sistemele principale de prognoză la pericol de incendiu, utilizate de obicei în planurile de prevenire și evaluare a incendiilor din întreaga lume, sunt:

- **Sistemul Australian McArthur de Indexare a Pericolului de Incendiu Forestier** (*Forest Fire Danger Index* **- FFDI)** (McArthur, 1967) ; în Australia, FFDI este utilizat pe scară largă pentru a prognoza influența vremii asupra comportamentului incendiului, iar Biroul Australian de Meteorologie emite în mod obișnuit previziuni ale Indicelui de Pericol de Incendiu pentru Pajiști și Păduri (*Grassland and Forest Fire Danger Index* - GFDI și FFDI) pentru a fi utilizate de autoritățile responsabile cu intervențiile la incendiu (Dowdy și colab., 2009);
- **Sistemul Național de Evaluare a Pericolului de Incendiu** al Statelor Unite (*National Fire Danger Rating System* - NFDRS) (Deeming și colab., 1978 ; Bradshaw și colab., 1984) ; introdus pentru prima dată în 1964, a fost actualizat în 1972, 1978, 1988 și în 2016 pentru a integra știința mai nouă și procesarea îmbunătățită (NWCG, 2021a) ; combină efectele stărilor existente și așteptate ale factorilor de pericol de incendiu selectați într-unul sau mai mulți indici calitativi sau numerici care reflectă nevoile de protecție împotriva incendiilor din anumite zone (USDA/Forest Service, 2023).
- **Sistemul Canadian de Indexare pentru a Vremii pentru Incendii** (*Canadian Fire Weather Index System* - CFWIS) (Van Wagner, 1987); este rezultatul anilor de cercetări aplicate desfășurate în Canada, dezvoltate în 1970 cu versiuni revizuite publicate în 1976, 1984 și 1987 (Dowdy și colab., 2009). CFWIS este un sistem cuprinzător de instrumente concepute pentru a evalua factorii de mediu care influențează aprinderea, propagarea și comportamentul incendiilor de vegetație (NWCG, 2021a) și este suficient de adaptabil pentru a fi implementat în țări cu clime foarte diferite față de Canada (Dowdy și colab 2009).

Vom prezenta succint CFWIS deoarece constituie un limbaj comun pentru comunitatea operațională europeană în abordarea pericolului de incendiu.

Sistemul Canadian de Indexare a Vremii pentru Incendii (CFWIS), bazat pe versiunea din 1987 (Van Wagner, 1987), estimează conținutul de umiditate al combustibilului vegetal mort folosind o combinație de date meteorologice zilnice, înregistrate la ora 12 locală (temperatură, umiditate relativă, precipitații și vânt). Sistemul calculează trei coduri de umiditate a combustibilului, fiecare având rate de uscare diferite, adâncimi și cantități nominale de combustibil diferite: i) **FFMC -** ***Fine Fuel Moisture Code*** (Codul de Umiditate al Combustibilului Fin): reprezintă conținutul de umiditate al combustibilului fin și al materialului de suprafață de pe solul pădurii. ii) **DMC -** ***Duff Moisture Code*** (Codul de Umiditate al Stratului Organic Superficial): reprezintă conținutul de umiditate al materialului organic descompus, slab compactat. iii) **DC -** ***Drought Code*** (Codul de Secetă): reprezintă conținutul de umiditate al materialului organic adânc și compact, de adâncime moderată. Fiecare dintre aceste coduri este calculat cu o frecvență zilnică și include valoarea din ziua precedentă ca intrare pentru calculul valorii din ziua curentă (Dowdy și colab., 2009). Aceasta permit estimări mai precise ale riscului de incendiu, bazate pe umiditatea combustibilului.

Combinația acestor coduri produce următorii indici de comportament al incendiilor: iv) **ISI - *Initial Spread Index*** (Indicele de Propagare Inițială): estimează influența combinată a vitezei vântului și a codului FFMC asupra propagării incendiului. v) **BUI - *Build-Up Index*** (Indicele de Acumulare): este o combinație între DMC și DC, reprezentând disponibilitatea combustibilului mai adânc sau de dimensiuni mai mari pentru ardere. vi) **FWI - *Fire Weather Index*** (Indicele Vremii pentru Incendii): este principala ieșire a sistemului și combină ISI și BUI, reprezentând intensitatea maximă zilnică a propagării incendiului, măsurată ca rată de producere a energiei pe unitatea de lungime a frontului de incendiu (Van Wagner, 1987). Creșterea valorii FWI corespunde unui pericol de incendiu mai mare și, în general, este clasificată în cinci clase de risc: **Scăzut, Moderat, Ridicat, Foarte Ridicat** și **Extrem**.

Indicele FWI a fost adoptat în multe țări europene deoarece s-a dovedit a fi eficient în reprezentarea condițiilor de pericol de incendiu comparativ cu alte sisteme de evaluare a pericolului de incendiu (Viegas și colab., 1999). Totuși, adoptarea FWI de către alte țări necesită uneori modificarea practicilor existente (de ex. Alexander, 2008) fiind necesară o calibrare cu date locale, de obicei realizată prin analiza datelor istorice despre starea vremii pe timpul incendiului și a înregistrărilor istorice ale incendiilor (de ex. De Groot şi colab., 2005; Viegas şi colab., 2004; Alves și colab., 2018).

Tabelul 1 prezintă clasele FWI definite de rețeaua EFFIS (*European Forest Fire Information System* - Sistemul European de Informații pentru Incendiile de Pădure) ca metodă de evaluare a nivelului de pericol de incendiu într-un mod armonizat în toată Europa (EFFIS/JRC, 2023). Cu toate acestea, având în vedere condițiile climatice diferite din Europa, EFFIS publică doi indicatori care oferă informații despre variabilitatea locală/temporală a FWI în comparație cu o serie istorică de aproximativ 30 de ani (EFFIS/JRC, 2023).

Tabelul 1. Clasele de pericol de incendiu pentru FWI în Europa definite de EFFIS. Sursa: EFFIS/JRC (2023).

Clasele de pericol de incendiu	FWI
Scăzut	<11.2
Moderat	11.2 - 21.3
Ridicat	21,3 – 38,0
Foarte Ridicat	38,0 – 50,0
Extrem	>50,0

O clasă de pericol de incendiu „Foarte Extrem” a fost introdusă în iunie 2021 pentru a diferenția nivelul de pericol de incendiu în zone extinse, care inițial erau clasificate ca având pericol de incendiu „Extrem” în regiunea mediteraneeană, în timpul lunilor de vară. Clasa „Foarte Extrem” include zone cu valori FWI peste 70 (EFFIS/JRC, 2023).

2.2.3. Pericolul de incendiu și conținutul de umiditate al combustibililor vegetali morți

Schimbările meteorologice influențează puternic conținutul de umiditate al combustibililor vegetali morți (materialele care se află pe solul pădurii), deoarece acestea își modifică conținutul de apă în concordanță cu condițiile atmosferice (Chuvieco și colab., 2010). În consecință, combustibilii morți sunt mai uscați și mai predispuși la aprindere. Conținutul de umiditate al combustibililor morți este un element esențial al comportamentului incendiilor și unul dintre cei mai utilizați și mai vechi indicatori în prognoza pericolului de incendiu (Carmo și colab., 2022). Conținutul de umiditate al combustibilului din vegetația vie nu este inclus în mod obișnuit în sistemul de pericol de incendiu, deoarece este

mai dificil de estimat din datele meteorologice decât umiditatea combustibililor vegetali morți (Chuvieco et al., 2014). Relevanța tot mai mare a bilanțului hidric pe termen scurt în dezvoltarea incendiilor severe poate fi observată în cazul indicelui de umiditate a combustibilului fin (FFMC, componenta cu cea mai rapidă uscare din cadrul Sistemului FWI) (Carmo și colab., 2022). Acest cod de umiditate este un indicator al sensibilității relative de aprindere și al incidenței incendiilor de tip „*spot*" (incendii secundare propagate la distanță prin scântei, particule aprinse sau jar – incendii "prin salturi"), deoarece este direct legat de conținutul de umiditate al combustibililor morți (m_f) conform Ecuația 1definită de Van Wagner (1987).

$$FFMC = 59.5 \times \frac{250.0 - m_f}{147.2 + m_f} \qquad \text{Ecuația 1}$$

Conținutul de umiditate al combustibililor fini morți (de ex. frunzele de *Pinus pinaster*) se modifică invers proporțional față de FFMC. Aceste modificări FFMC sunt încorporate în ISI și, în consecință, în FWI, care este parametrul final de ieșire al sistemului legat de potențialul de pericol de incendiu. Atunci când conținutul de umiditate al combustibililor morți este scăzut (și FFMC este ridicat), incendiile se declanșează cu ușurință, iar vântul și alte forțe motrice pot provoca propagarea rapidă și intensă a incendiului (corespunzător unui FWI ridicat). Conținutul de umiditate al combustibililor morți variază de obicei între 3% și 30% (Ribeiro, 2011). Lucrări recente au descoperit că un conținut scăzut de umiditate a combustibilului fin poate determina apariția unor incendii mari, susținând relații strânse între pragurile de umiditate și tranzițiile comportamentului incendiului (Carmo et al., 2022). Când valoarea sa este mai mică de 5%, există o posibilitate puternică ca un incendiu să prezinte caracteristici extreme de comportament al incendiului (Viegas și colab., 2017). Variația m_f în timpul incendiilor mari este fundamentală pentru înțelegerea evenimentelor extreme (Viegas și colab., 2017). Chiar și în timpul nopții, când eficiența stingerii incendiilor este favorizată în mod tradițional de creșterea umidității relative și scăderea temperaturii aerului, este important să se știe dacă conținutul de umiditate este în creștere sau în scădere. Tendința de creștere a perioadelor cu nopți mai uscate și mai calde (determinată, de exemplu, de valurile de căldură) și, în consecință, lipsa recuperării umidității combustibililor morți, poate duce la incendii de vegetație mai intense pe timp de noapte, al căror comportament poate fi subestimat în această perioadă.

Conținutul de umiditate al combustibililor morți poate fi măsurat pe teren (de ex. MCFIRE/ADAI, 2022 ; NWCG, 2021b), poate fi estimat cu ajutorul tijelor indicatoare de umiditate a combustibilului (de ex. van der Kamp și colab., 2017) și poate fi estimat indirect de mai multe modele (Viney, 1991). Combustibilii morți fini pot fi în echilibru aproximativ cu mediile lor imediate (de ex. Lopes și colab., 2014). Conținutul de umiditate de echilibru (EMC) al unui element de combustibil în condiții constante de mediu date este conținutul de umiditate pe care elementul îl va atinge dacă este lăsat suficient timp în acele condiții (Viney, 1991). Cu excepția perioadelor de după ploaie, o estimare rezonabil de precisă a conținutului de umiditate și, prin urmare, a inflamabilității lor, poate fi obținută din EMC corespunzătoare temperaturii și umidității imediate a aerului înconjurător (Schroeder & Buck, 1970).

Prezentăm în Figura 1variația combustibililor morți fini în Lousã – o regiune centrală a Portugaliei – pentru luna iulie 2022. Această perioadă a fost marcată de un val de căldură extins care a lovit țara (2/iul. - 18/iul.) și vestul Țărilor europene și de un sezon de incendii extreme. Ca exemplu de variație m_f măsurat prin diferite metode, figura prezintă: m_f pentru frunze de *Pinus pinaster* măsurate pe teren prin metoda gravimetrică, m_f măsurată într-un

senzor tip tijă indicatoare de umiditate a combustibilului (CS506 10 ore) și, m_f estimat pentru frunzele *de Pinus pinaster* conform modelării realizate de Lopes și colab. (2014) pe baza datelor meteorologice (temperatura și umiditatea relativă a aerului).

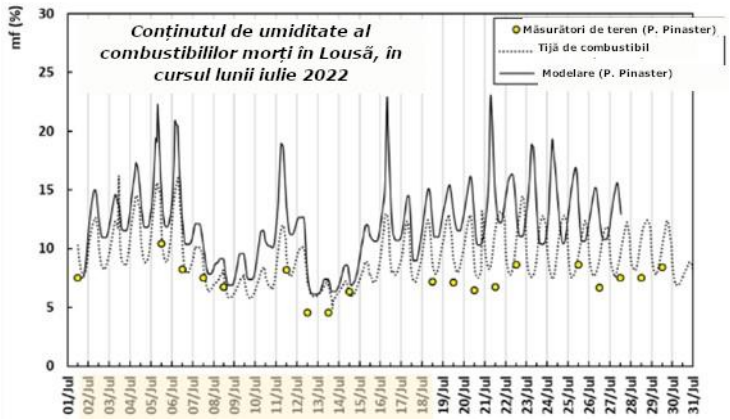


Figura 1. Conținutul de umiditate al combustibililor morți (m_f) în Lousã în cursul lunii iulie 2022. Legendă: Măsurători pe teren: m_f pentru ace de Pinus pinaster din teren; Tijă de combustibil: m_f măsurată de un senzor de umiditate a combustibilului (CS506 10 ore); Modelare: m_f estimat pentru ace Pinus pinaster conform Lopes, 2014. Perioada evidențiată (2/Iul-18/Iul): val de căldură. (ilustrarea autorilor)

2.3. Proprietățile combustibililor

În cazul incendiilor de vegetație, vegetația naturală este de obicei considerată „combustibilul" necesar proceselor de ardere. Proprietățile fizice și chimice ale oricărui combustibil specific determină ușurința sa de aprindere și de susținere a arderii. Această secțiune descrie principalele proprietăți care caracterizează particulele de combustibil și complexele de combustibili.

Specificul combustibililor care se regăsesc în zona de interfață natural-construit (*Wildland-Urban Interface* - WUI) va fi descris în secțiunea corespunzătoare (4.1).

Într-o abordare mai generală, combustibilii sunt de obicei clasificați în funcție de doi parametri:

i. Starea vegetativă, împărțindu-i în combustibili vii (ierburi, arbuști, arbori) și combustibili morți (frunze uscate sau căzute, ierburi, ramuri căzute etc.). Se consideră că combustibilii morți (uscați) au o influență mai mare asupra propagării incendiilor de suprafață.
ii. Stratul, având în vedere distribuția lor verticală, și anume, combustibili de sol, combustibili de suprafață și combustibili aerieni. Tipul de propagare a incendiului este legat de stratul, sau nivelul, în care se află combustibilii: incendii de sol (subterane), de suprafață[1] și de coronament. Particulele de combustibil din cele trei straturi pot avea proprietăți similare sau echivalente.

Atunci când este necesar să se cuantifice combustibilii pentru modelarea și evaluarea comportamentului focului, este nevoie de o descriere mai detaliată. Această descriere se realizează în principal la două niveluri: particulele și stratul de combustibil.

2.3.1. Particulele de combustibil

[1] În terminologia utilizată în România, incendiile de suprafață corespund incendiilor de litieră

Particulele individuale de combustibil, care formează orice tip de combustibil, au câteva caracteristici distincte care contribuie în mod diferit la procesele de aprindere și ardere. La nivel de particule, cele mai importante proprietăți ale combustibililor forestieri sunt:

i. Clasa de mărime a particulelor

Aceasta este una dintre proprietățile combustibilului care afectează cel mai mult arderea și comportamentul incendiului (Byram, 1959), deoarece particulele mai mici necesită o cantitate mai mică de energie sau timp pentru a se aprinde. Relația dintre dimensiunea particulelor și conținutul de umiditate a combustibilului este foarte pronunțată. În urma clasificării inițiale nepublicate a lui George Byram din 1963 (Byram & Nelson, 2015), adoptată ulterior pentru Sistemul Național de Evaluare a Pericolului de Incendiu al Statelor Unite (*National Fire Danger Rating System* - NFDRS) (Bradshaw și colab., 1984), combustibilii sunt împărțiți în funcție de **„intervalul de decalaj**". Acesta este definit ca „timpul necesar pentru ca combustibilii să piardă aproximativ două treimi din conținutul inițial de umiditate". În termeni simpli, dacă umiditatea unei particule de combustibil este în echilibru cu mediul înconjurător (EMC, deja menționată în secțiunea 0), adică fără câștiguri sau pierderi, intervalul de decalaj al acelei particule corespunde timpului mediu necesar să ajungă din nou la acel echilibru în cazul în care ar exista o schimbare a condițiilor de mediu.

Clasele luate în considerare sunt denumite după intervalul mediu de timp necesar: 1 oră (*Hr*), 10 ore, 100 ore și 1000 ore. Raționamentul din spatele conceptului este că, în condiții ambientale constante, viteza de uscare a combustibilului depinde de grosimea particulelor (Byram & Nelson, 2015): particulele mai subțiri pierd umiditatea mai repede decât particulele mai groase. Aceste clase reprezintă următoarele dimensiuni de combustibil, respectiv: 1Hr) subțire sau ușor, cu diametrul mai mic de 6 mm (ace, frunze, ierburi); 10Hr) regulat, cu diametrul cuprins între 6 și 25 mm (ramuri subțiri și tulpini de arbuști); 100Hr) mediu, cu diametrul cuprins între 25 și 75 mm (ramuri); 1000Hr) gros sau greu, cu un diametru mai mare de 75 mm (ramuri și trunchiuri groase).

ii. Forma particulelor

Această proprietate este exprimată ca raport suprafață-volum (*surface area-to-volume* - SAV), adică raportul dintre suprafața exterioară a unei particule și volumul acesteia, de obicei în cm^2/cm^3 (cm^{-1}) sau în m^2/m^3 (m^{-1}). Reflectă caracterul adecvat al unei particule pentru ardere, deoarece cantitatea de energie pe care o poate primi pe unitatea de timp crește odată cu suprafața expusă (Rothermel, 1972) .

Particulele de combustibil cu SAV mare se vor aprinde mai ușor decât cele cu SAV relativ mic. De exemplu, bușteni mari au valori scăzute ale SAV, iar acele de pin sau ierburi au valori ridicate ale SAV.

iii. Compoziția chimică

Procesul de ardere poate fi influențat de compoziția chimică a combustibililor, într-o măsură mai mare sau mai mică, accelerând sau încetinind arderea. Bradshaw şi colab. (1984) iau în considerare trei proprietăți chimice importante: a) conținutul de căldură, sau energia disponibilă pe unitatea de masă de combustibil prin ardere; b) conținutul total de minerale, fracția dintr-o masă de combustibil compusă din substanțe anorganice (numai substanțele organice pot susține arderea); și c) conținutul mineral efectiv, sau conținutul mineral activ dintr-o particulă de combustibil, care interferează cu procesele chimice ale arderii, în special cu eliberarea gazelor volatile.

iv. Densitatea

Densitatea afectează aprinderea și viteza de propagare (Countryman, 1982). Împreună cu conținutul de umiditate, are un impact puternic asupra conductivității termice a unui combustibil (Chandler și colab., 1983). Combustibilii cu o densitate mai mică se aprind în mai puțin timp pentru aceeași cantitate de căldură sau necesită mai puțină căldură pentru aceeași perioadă de timp.

v. Conținutul de umiditate

Acesta reprezintă cantitatea de apă raportat la masa uscată a combustibilului și influențează direct posibilitatea aprinderii și arderii unui combustibil. În ceea ce privește evaluarea comportamentului la incendiu, trebuie făcută distincție între umiditatea combustibilului viu și a celui mort.

Umiditatea combustibilului mort depinde în esență de condițiile de mediu (Bradshaw și colab., 1984), iar diferitele clase de mărime pot avea un conținut diferit de umiditate în același moment. După cum este de așteptat, viteza de propagare a incendiului (Viegas și colab., 2013) și probabilitatea de aprindere (Viegas și colab., 2014) cresc pe măsură ce umiditatea combustibilului scade. Conținutul foarte scăzut de umiditate a combustibililor fini morți (sub 5-7%) indică o probabilitate mare de a avea un comportament extrem de incendiu (incendii de coronament, „*spotting*" [incendii secundare propagate la distanță prin scântei, particule aprinse sau jar], viteză foarte ridicată de propagare și intensitate mare de manifestare a frontului de incendiu). Mai multe informații despre acest parametru pot fi găsite în secțiunea 2.2.3.

Combustibilii vii au conținut de umiditate care rezultă din interacțiunea proceselor fizice și fiziologice (Pyne și colab., 1996), prin urmare variabilitatea lor temporală este foarte diferită de cea a combustibililor morți (Rego și colab., 2021). Conținutul de umiditate a combustibilului viu este în general mai mare decât conținutul de umiditate a combustibilului mort, pentru aceleași condiții de mediu, depășind adesea 100%.

2.3.2. Paturi de combustibil și tipuri de combustibil

Atunci când descriem combustibilii vegetali dintr-o anumită zonă, aranjamentul tuturor particulelor de combustibil în diferitele straturi verticale (combustibili din sol, de suprafață și aerieni) este denumit pat de combustibil (*fuelbed*). Fiecare strat, sau stratificație, poate conține diferite tipuri de combustibili naturali. Un pat de combustibil poate avea unul, două sau toate cele trei straturi. O zonă de pășune conține, de obicei, un singur strat (iarbă și/sau plante erbacee). Zonele de arbuști pot avea două straturi (vegetație erbacee, litieră/resturi vegetale și arbuști). O pădure matură poate include toate cele trei straturi (strat de humus, litieră/resturi vegetale, vegetație erbacee, arbuști și arbori).

Delimitarea fiecărui strat în profilul vertical este oarecum subiectivă, dar în general respectă reprezentarea schematică din Figura 2.

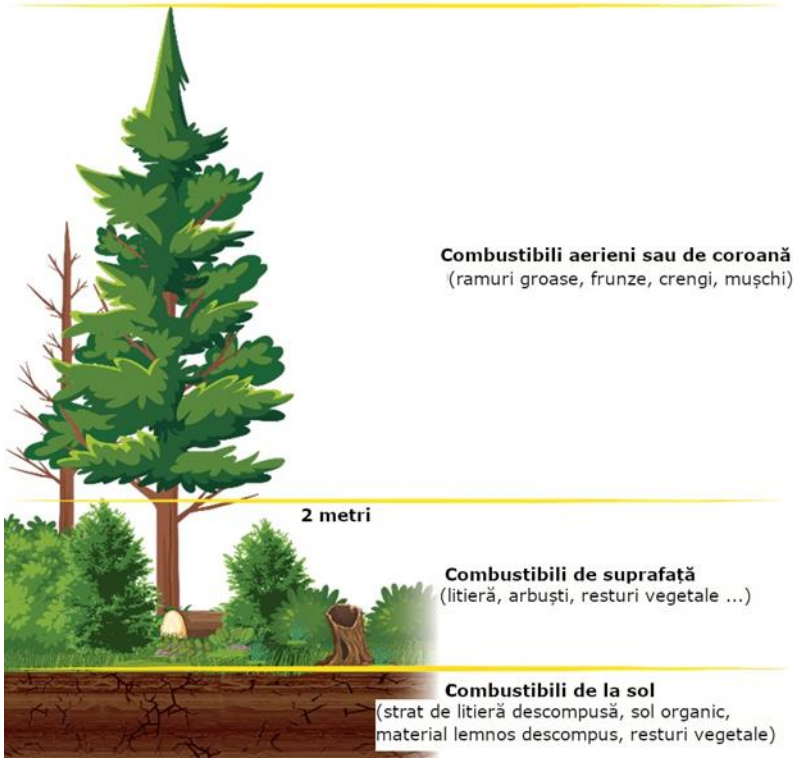


Figura 2. Reprezentarea schematică a straturilor de combustibil (credit imagine: ADAI)

Această caracterizare este direct legată de cerințele modelelor de comportament la foc, fiecare dintre ele putând susține un tip specific de propagare a incendiului: incendiu de sol (subteran), de suprafață și de coronament. Mai multe detalii găsiți în secțiunea de propagare a incendiilor.

În anii 1930, Hornby (1936) a introdus termenul „tip de combustibil", pe baza unor criterii calitative, care a stabilit patru tipuri în funcție de potențialul lor de propagare a incendiului și rezistența la stingere. În zilele noastre, termenul este aplicat pentru a descrie în mod generic vegetația predominantă în patul de combustibil sau chiar în fiecare strat. De exemplu, un strat de combustibil poate fi un arboret de pin, dacă pinii sunt predominanți în general, dar stratul de suprafață poate fi considerat ca fiind format din arbuști sau litieră, dacă predomină în acel strat specific. Selectarea stratului responsabil pentru propagarea incendiului este esențială în modelarea comportamentului incendiului.

În ceea ce privește managementul incendiului, compoziția speciilor din covorul vegetal nu este foarte relevantă, întrucât aceeași specie poate prezenta un comportament foarte diferit la foc atunci când patul de combustibil și caracteristicile particulelor sunt diferite (Anderson, 1982 ; Riaño și colab., 2002).

Cele mai importante caracteristici ale stratului de combustibil care trebuie luate în considerare în evaluarea comportamentului la foc sunt:

i. Cantitatea de combustibil

Cantitatea de combustibil exprimă masa de material vegetal combustibil pe unitatea de suprafață și este de obicei exprimată în kg/m^2 sau t/ha. În funcție de nevoile de modelare a comportamentului incendiului, acest parametru poate fi prezentat ca valoare totală sau împărțit pe straturi (sol, suprafață, coronament), clasa de mărime (fină, regulată, medie și grea) sau stare vegetativă (viu și mort).

Pentru un anumit pat de combustibil, încărcarea cu combustibil și conținutul de umiditate determină cantitatea de combustibil consumată și căldura eliberată în timpul arderii.

Cantitatea de combustibil care este consumată influențează direct efectele incendiului asupra vegetație și solului (Rego și colab., 2021), propagarea și intensitatea incendiului (Alexander & Cruz, 2020), potențialele emisii ale incendiului și impactul fumului (Miranda, 2004; Fernandes și colab., 2022).

ii. Înălțimea combustibilului

Denumită și adâncime, aceasta este o estimare a dimensiunii verticale a zonei de ardere și este necesară pentru a estima compactitatea patului de combustibil (Cruz & Viegas, 1995). Deși poate necesita o anumită pregătire în definirea vârfului patului de combustibil, acest parametru poate fi măsurat ușor și rapid și, prin urmare, este utilizat în mod obișnuit în tehnicile de dublă eșantionare pentru a estima încărcătura de combustibil.

iii. Compactitatea

Compactitatea unui pat de combustibil se referă la combustibilul disponibil pe unitate de volum și este încorporată în predicția comportamentului la foc ca densitate în vrac (kg/m ^{3}).

Gradul de compactitate reflectă disponibilitatea aerului pentru arderea particulelor individuale și ușurința transferului de căldură către particulele aflate imediat în fața focului (Chandler și colab., 1983) . În cazul combustibililor din sol, compactitatea influențează semnificativ variația conținutului de umiditate, deoarece combustibilii foarte compactați limitează evaporarea.

Mai puțină compactitate înseamnă mai mult oxigen disponibil pentru ardere. Cu toate acestea, dacă particulele de combustibil sunt prea îndepărtate, nu mai există suficientă apropiere pentru schimbul de căldură necesar și aprinderea ulterioară a particulelor adiacente. Toate clasele de mărime au un punct de compactitate ideal care maximizează transferul de căldură și prezența oxigenului și, prin urmare, arderea.

iv. Continuitatea

Continuitatea combustibilului exprimă „gradul sau amploarea distribuției continue sau neîntrerupte a particulelor de combustibil într-un pat de combustibil, afectând astfel capacitatea unui incendiu de a susține arderea și propagarea” (Drury, 2020). Continuitatea există atunci când combustibilii se află unul în zona de ardere a celuilalt, adică atunci când arderea unuia are un efect de preîncălzire asupra celuilalt.

Acest termen este folosit pentru combustibilii de suprafață (continuitate orizontală) și combustibili în scară (continuitate verticală). Combustibilii în scară desemnează stratul de combustibil mai mult sau mai puțin continuu care poate susține propagarea incendiului de la combustibilii de suprafață la combustibilii din coronament.

v. Umiditatea de stingere

Această proprietate reprezintă conținutul de umiditate al unui pat de combustibil la care un incendiu nu mai poate continua arderea și propagarea. Este un parametru esențial pentru aplicarea modelului lui Rothermel, care inițial a presupus că acest nivel de umiditate este constant pentru toate tipurile de combustibil (30%). S-a descoperit curând că poate varia în funcție de compactitatea stratului de combustibil, dimensiunea particulelor de combustibil,

viteza vântului și panta terenului (Bradshaw și colab., 1984) sau chiar de locația din perimetrul incendiului (Fernandes și colab., 2008).

Valorile umidității de stingere utilizate în modelele de combustibil pentru comportamentul incendiilor pot varia de la 12% până la 40%, în funcție de condițiile menționate anterior. În cazul combustibililor vii, valorile pot fi chiar mai ridicate.

2.3.3. Modele de combustibil

Publicarea modelului de propagare a incendiului de către Rothermel (1972) a adus cu sine necesitatea descrierii cantitative a combustibililor naturali folosind un număr relativ mic de parametri, care să permită prezicerea comportamentului incendiilor de suprafață. Modelul presupune că vegetația este omogenă într-o anumită zonă, la fel ca și condițiile meteorologice și topografia, ceea ce permite incendiului să mențină caracteristici constante, care pot fi apoi prezise (Ribeiro și colab., 2021).

Rothermel a definit modelul de combustibil ca „un set complet de intrări [de date de combustibil] pentru modelul matematic de propagare a incendiului" și a enumerat parametrii pentru 11 modele de combustibil (Scott & Burgan, 2005). Albini (1976) a rafinat în continuare acele modele de combustibil și a adăugat alte două, creând ceea ce se numește acum cele 13 modele originale de combustibil pentru comportamentul incendiilor sau cele 13 modele de combustibil NFFL (*Northern Forest Fire Laboratory*). Acest set, utilizat pe scară largă la nivel mondial, grupează combustibilii în 4 clase (ierburi, arbuști, lemn și resturi vegetale), în funcție de vectorul principal de propagare a incendiului, și a fost descris în detaliu de Anderson (1982). Mai recent, Scott & Burgan (2005) au extins acest set la 40 de modele pentru a caracteriza un număr mai mare de situații și pentru a ilustra mai precis efectul gestionării combustibilului, utilizând instrumente de simulare a comportamentului incendiilor.

În Europa, au existat unele încercări de a crea modele de combustibil adaptate, cum ar fi sistemul Prometheus (PROMETHEUS, 2000), proiectul FUELMAP (FUELMAP, 2011) care a dezvoltat clasificarea combustibililor europeni utilizați de Sistemul European de Informații privind Incendiile Forestiere - *European Forest Fire Information System* (EFFIS, 2017) sau proiectul FirEUrisk, care a elaborat o clasificare a tipurilor de combustibil cu o corespondență directă către modelele de combustibil ale lui Scott & Burgan (Aragoneses și colab., 2023).

Modelul Rothermel (1972) prezice propagarea incendiilor de suprafață, prin urmare, modelele de combustibil descriu de obicei stratul de combustibili de suprafață. Caracteristicile care sunt descrise cantitativ într-un model de combustibil au fost deja menționate mai sus și sunt:

- Cantitatea de combustibil în funcție de starea vegetativă (viu sau mort) și clasa de mărime (1 oră, 10 ore, 100 ore).
- Înălțimea stratului de combustibil.
- Raportul suprafață-volum al particulelor de combustibil în funcție de starea vegetativă (viu sau mort).
- Conținutul caloric al combustibilului.
- Umiditatea de stingere a combustibililor morți.

Instrumentele de simulare a comportamentului incendiului, cum ar fi BehavePlus (Andrews, 2014) sau FlamMap (Finney, 2006), au încorporate deja seturile de 13 și 40 de modele de combustibil, permițând utilizatorilor să simuleze cu ușurință comportamentul incendiilor. Figura 3 ilustrează rezultatele calculului ratei de propagare a incendiilor în BehavePlus 6 pentru diferite pante, cu vânt care suflă în amonte cu 20 km/h în 3 modele diferite de combustibil din setul NFFL.

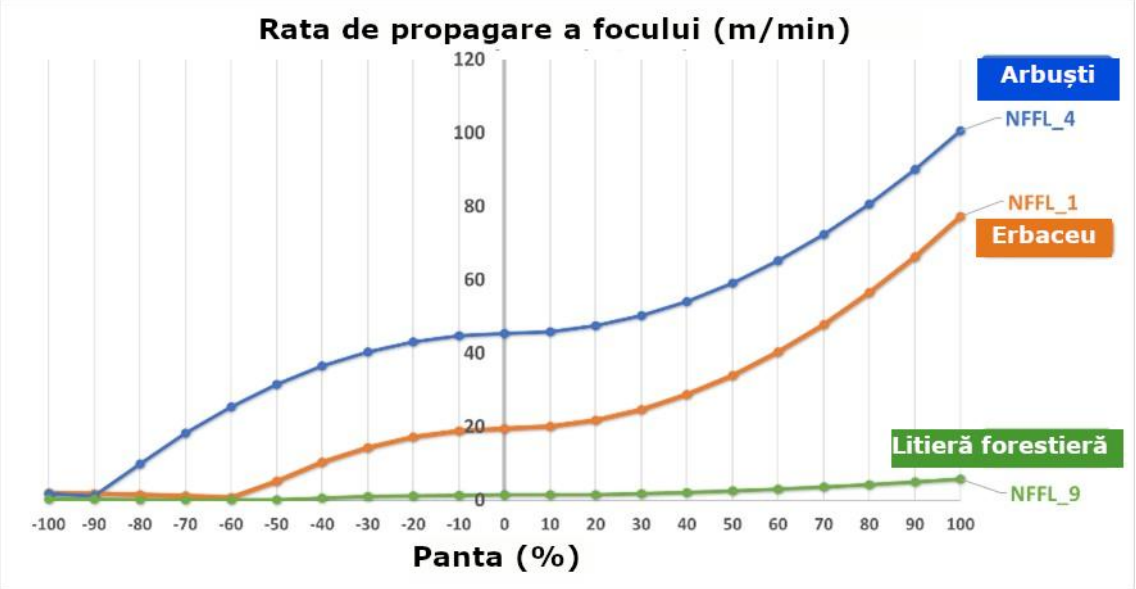


Figura 3. Exemplu de simulări de comportament al incendiului, folosind BehavePlus 6, pentru 3 modele diferite de combustibil, cu pante diferite și cu vânt în amonte de 20 km/h.

Modelele de combustibil personalizate sunt adesea necesare pentru anumite regiuni, de exemplu, setul de 14 modele de combustibil dezvoltat pentru Portugalia Centrală de către Cruz (2005) sau setul de 18 dezvoltat de către Fernandes și colab. (2009) pentru Portugalia continentală. Această dezvoltare include cuantificarea proprietăților patului de combustibil și ale particulelor de combustibil identificate anterior, dar, mai important, calibrarea modelelor de combustibil în funcție de comportamentul real al incendiilor observate (Rego și colab., 2021)

În ceea ce privește aplicarea practică, pe langă utilizarea instrumentelor de simulare a incendiilor, modelele de combustibil sunt de obicei însoțite de estimări ale variațiilor comportamentului incendiilor pentru o evaluare facilă pe teren, de multe ori cu ghiduri fotografice care permit o corespondență vizuală între modelele de combustibil și complexele de combustibil observate (Anderson, 1982; Cruz, 2005; Patrick, 2009).

2.4. Rolul topografiei

Topografia este un factor determinant în ceea ce privește intensitatea și comportamentul propagării incendiilor. Topografia include mai multe caracteristici ale terenului, cunoscute și sub denumirea de peisaj. Aici prezentăm câteva perspective generale, precum și secțiuni dedicate unor aspecte care influențează semnificativ comportamentul incendiilor. În anumite condiții, propagarea incendiului poate fi dominată de efectul topografiei, implicând și modele convective specifice.

Pe scurt, topografia poate influența mai mulți factori importanți pentru comportamentul incendiilor, inclusiv:

- Modelele de vânt – Caracteristicile peisajului sau locațiile specifice, cum ar fi canioanele, zonele montane sau prezența mării, pot crea zone cu vânt canalizat.
- Acumularea și localizarea combustibilului – Regiunile din peisaj care beneficiază de mai multă umbră sau umiditate, cum ar fi canioanele, pot favoriza producția și acumularea crescută de combustibil. Pe de altă parte, zonele mai uscate, cum sunt versanții expuși

și crestele, pot avea combustibil mai rar, dar continuu și mai uscat, ceea ce determină o propagare mai rapidă și intensă a incendiilor.

- Benzi izolatoare de incendiu naturale și artificiale – Corpurile mari de apă și lanțurile muntoase extinse pot acționa ca benzi izolatoare împotriva incendiilor din cauza lipsei de combustibil. Modificările provocate de om care afectează panta sau topografia, ar putea fi și ele luate în considerare, de exemplu, instalațiile eoliene pentru producerea de energie amplasate pe creste sau versanți terasați.

2.4.1. Gradul de înclinare a terenului

Gradul de înclinare a terenului în raport cu referința orizontală, sau panta, este un parametru major care caracterizează topografia. Aceasta poate fi măsurată ca unghi sau procent de înclinare (indicând numărul de metri urcați pentru o anumită distanță parcursă pe orizontală). Pantele mai abrupte sunt bine cunoscute ca un factor cheie de amplificare al propagării și intensității incendiului. Pe pantele abrupte, flăcările devin mai apropiate de combustibil, ceea ce, din cauza unghiului redus, favorizează semnificativ procesele de transfer de căldură, conducând la o progresie mai rapidă a incendiului în amonte.

Cu toate acestea, dacă frontul de incendiu progresează în aval, aceste fenomene sunt mai puțin eficiente, iar propagarea incendiului este redusă datorită unghiului mai mare al flăcărilor. Incendiile care se propagă în josul pantei vor avea o viteză de propagare (*rate of spread*, ROS) apropiată sau mai mică decât cea pe un teren orizontal. Înțelegerea rolului topografiei și, în special, a unei anumite caracteristici a peisajului este crucială pentru a înțelege comportamentul propagării incendiilor, a modela și a aplica mai bine măsurile de stingere a acestora.

Pantele cu unghiuri peste 20º (36%) până la 25º (47%) pot avea un efect semnificativ asupra propagării și accelerării incendiilor. Acest aspect este deosebit de important pentru pantele de peste 30º (58%) pentru care deplasarea personalului pe jos sau chiar în vehicule devine dificilă și periculoasă. Unghiurile de înclinație de peste 40º (84%) nu sunt obișnuite, deoarece solul nu rămâne stabil la astfel de unghiuri, dar acestea pot apărea în anumite regiuni, cum ar fi dealurile vulcanice.

2.4.2.Expoziția terenului: expunerea la soare și vânt

Expozițiile orientate spre sud din emisfera nordică (și invers, în emisfera sudică) sunt în mod normal mai uscate din cauza expunerii crescute la soare și vânt. Se știe că expozițiile însorite au un conținut mai scăzut de umiditate a combustibilului, ceea ce duce la creșterea vitezei de propagare a incendiilor în comparație cu alte direcții de expunere a terenului.

2.4.3. Altitudinea: modele de temperatură și vânt

În condiții normale, altitudinea poate influența temperatura și modelele de vânt. De asemenea, tipologia și creșterea vegetației, precum și conținutul de umiditate a combustibilului pot fi modificate în consecință. În mod obișnuit, temperatura scade odată cu creșterea altitudinii, ceea ce poate încetini ritmul de evaporare și modifica umiditatea combustibilului. Pe de altă parte, altitudinile mai mari pot avea modele de vânt mai intense și variabile, amplificând propagarea flăcărilor și influențând direcția incendiului. În ansamblu, modificările cauzate de elevația față de nivelul mării și de regimul eolian pot avea o influență majoră asupra comportamentul incendiilor.

2.4.4. Curbura terenului

Curbura terenului poate modifica propagarea incendiului, modificând viteza acestuia prin schimbarea unghiului flăcărilor și a eficienței transferului de căldură către combustibilii nearși. Pe scurt, pantele drepte au un comportament la foc mai previzibil, în timp ce pantele concave sau convexe sunt, de obicei, asociate cu o propagare crescută a incendiilor, mai aproape de vârf sau de bază, în funcție de locația pantelor mai abrupte în peisaj.

Un caz relevant este terenul în formă de canion, în care forma concavă a terenului amplifică fluxul convectiv către zona de ardere, provocând un efect de „tunel" sau „coș de fum" care produce creșterea vitezei incendiului.

2.4.5. Crestele

Crestele sunt în mod normal asociate cu modele complexe ale vântului, și anume schimbări de direcție cauzate de separarea fluxului, recirculare și formarea de vârtejuri. Vântul poate avea caracteristici suplimentare atunci când bate peste sau în jurul crestelor, creând modele complexe de comportament al incendiilor care pot fie să accelereze, fie să încetinească propagarea acestora.

Dacă incendiul este alimentat de vânt, acesta se poate propaga rapid lateral de-a lungul crestei și își poate lărgi dimensiunea transversală, intrând astfel pe panta descendentă cu un front mult mai larg. Aceste zone pot fi, de asemenea, asociate cu o probabilitate crescută de formare a vârtejurilor (tornadelor) de foc sau de extindere orizontală a incendiului, ambele fiind descrise mai jos ca trăsături specifice ale comportamentului incendiilor.

Pe de altă parte, în condiții speciale, crestele pot acționa ca bariere naturale, reducând propagarea incendiilor din cauza efectelor generate de vânt sau de pantă.

2.4.6. Topografie complexă

Topografia complexă este un termen care integrează prezența mai multor caracteristici ale peisajului, care sunt în mod normal asociate cu pante accentuate și caracteristici particulare ale terenului. Topografia complexă afectează în mod semnificativ comportamentul incendiilor și operațiunile de lichidare, deoarece este mai greu de estimat cât mai precis comportamentul incendiului și de a stabili strategii sigure de acțiune.

Pantele complexe, caracteristicile terenului și expunerea acestuia vor duce la caracteristici multiple ale combustibililor și direcției vântului sau fluxului de aer, rezultând modele alternative de propagare a incendiului care sunt dificil de anticipat și simulat. Acest scenariu din ce în ce mai dificil este, în general, asociat și cu o probabilitate crescută de apariție a comportamentului de tip „*spotting*" (formarea de focare izolate la distanță – propagarea în salturi).

Caracteristicile complexe ale topografiei incendiului sunt asociate cu interacțiuni complexe cu fluxul vântului și, prin urmare, cu potențial dificil de prezis al comportamentul incendiului. De exemplu, pe crestele înclinate (cf. Abouali și colab., 2021), incendiul se poate propaga mai repede în jos decât în sus, în unele părți ale terenului.

Prezența canioanelor înglobate în pante relativ plane trebuie, de asemenea, considerată ca un factor de risc crescut, întrucât comportamentul incendiului este complet modificat în pantă atunci când acesta intră în canionul apropiat, dacă acesta este puțin adânc.

Când incendiile sunt influențate în principal de topografie, viteza de propagare și comportamentul acestora sunt amplificate de modelele induse de teren, inclusiv de intensitatea mai mare sau direcția cauzate de pantele abrupte, expunerea la lumina soarelui

sau modelele locale ale vântului. Altitudinea poate modifica condițiile locale, conducând la schimbări în propagarea incendiilor.

Curburile și crestele terenului pot aduce modificări suplimentare în progresia incendiului asociate cu pante, modele ale vântului și moduri specifice de comportament la foc, adică vârtejurile de foc și vorticitatea orizontală. Topografia complexă adaugă multiple caracteristici greu de integrat, ceea ce potențează intensitatea incendiilor și gradul de incertitudine.

2.5. Tipuri și moduri de propagare a incendiului

2.5.1. Tipuri de incendii

În funcție de straturile de acoperire de vegetație în care se propagă, putem distinge următoarele tipuri de incendii:

1. **Incendiile de sol (subterane)** – Acestea se propagă, de obicei, prin ardere fără flacără, sub suprafața solului, consumând materialul organic existent în humus sau în straturile de turbă.
2. **Incendii de suprafață** – Acestea se propagă, de obicei, cu un front de incendiu cu flacără, consumând combustibilii care se află deasupra solului, cum ar fi resturi vegetale, iarbă, arbuști și arbori de dimensiuni mici.
3. **Incendiile de coronament** - Acestea se propagă consumând frunzișul coroanelor arborilor, de obicei cu sprijinul incendiului de suprafață aflat sub coronament și propagându-se de la un arbore la altul.
4. **Incendiile secundare (prin focare izolate sau prin salturi)** – Acestea se propagă prin particule aprinse, scântei sau jar, eliberate de unele dintre tipurile de incendiu menționate anterior, care sunt transportate de vântul atmosferic sau de cel indus de incendiu. Atunci când aceste particule ajung pe materiale combustibile, pot genera noi focare de incendiu.

Lucrarea de față se referă în mod special la **incendiile de suprafață**, care sunt prezente în toate incendiile majore și sunt responsabile pentru o mare parte din suprafețele incendiate. Este necesar să se ia în considerare particularitățile incendiilor subterane atunci când se urmărește operațiunea de lichidare a focarelor ascunse și în cazul particular al **incendiilor de turbă**. În acest stadiu, acestea nu sunt luate în considerare în lucrare. **Incendiile de coronament** și **incendiile prin focare izolate** sunt tratate ca cazuri particulare de comportament extrem al incendiilor în secțiunile corespunzătoare.

2.5.2. Moduri de propagare a incendiilor de suprafață

În funcție de comportamentul lor, putem lua în considerare următoarele moduri de propagare a incendiilor de suprafață:

1. **Comportament marginal** – Acest model corespunde situațiilor unui incendiu în faza de inițiere sau în faza de stingere, când incendiul poate să se extindă sau nu.
   - Apare atunci când condițiile de aprindere sau propagare nu sunt favorabile, de exemplu, din cauza unui conținut ridicat de umiditate al combustibilului sau a unei distribuții foarte rare a acestuia în spațiu.
   - Acest model este important pentru analizarea eficienței agenților de stingere, precum apa sau substanțele retardante, și a procesului eventual de reaprindere. Cerințele pentru stingerea incendiilor (cantitatea minimă de apă sau retardant

necesară pentru a stinge un incendiu) se încadrează în acest tip de comportament al incendiilor.

- Unele tehnici de tratare a combustibilului (modificarea compactității stratului de combustibil sau crearea de bariere împotriva incendiilor) se încadrează, de asemenea, în acest tip de comportament.
- Condițiile necesare pentru a declanșa și controla un incendiu prescris necesită cercetări specifice.
- Condițiile pentru reaprinderea unui incendiu nominal stins corespund **comportamentului marginal al incendiului** (Marginal FB).
- Incendiile de turbă care ard cu combustie mocnită – fără flacără – pot fi considerate în acest model de comportament marginal.

2. **Comportament static** – Acest tip de comportament al incendiului corespunde unui regim în care proprietățile de propagare sunt considerate constante în timp. Dacă condițiile limită nu se schimbă pe o anumită perioadă, caracteristicile de propagare ale incendiului, în special viteza , rămân constante.

În acest caz, procedura obișnuită de estimare a proprietăților medii de propagare a incendiului pentru fiecare interval de timp este acceptabilă, deoarece acestea corespund valorilor reale ale acelei caracteristici pe întreaga durată a intervalului respectiv. În această abordare, presupunem că comportamentul incendiului depinde de cei trei factori comuni descriși mai jos (topografie, vegetație și condiții meteorologice) sau de modul cel mai comun de comportament al incendiului.

După cum vom vedea, acest mod de comportament al incendiului este unul foarte particular și apare numai în condiții foarte restrânse. În ciuda acestui fapt, acesta este modelul obișnuit sau mai comun de comportament al incendiului luat în considerare în majoritatea studiilor.

3. **Comportament dinamic** – În cazul general, interacțiunea incendiului cu mediul înconjurător modifică proprietățile de propagare a incendiului în timp, chiar dacă condițiile limită (topografia, vegetația și condițiile meteorologice) rămân constante sau uniforme.

Descrierea proprietăților incendiului implică în mod explicit variabilitatea temporală, iar procesul de calculare a valorilor medii ale proprietăților de propagare a incendiului poate să nu fie valid.

Acest model de comportament al incendiului este cel mai frecvent întâlnit, fiind deosebit de relevant în cazul incendiilor de amploare și în analiza accidentelor. Așa cum se va detalia în capitolele următoare, **comportamentul extrem al incendiilor** este esențial în aceste contexte.

3. Comportament extrem al incendiilor

3.1. Caracterizarea comportamentului extrem al incendiilor (EFB)

În lucrarea lui Tedim și colab (2018), conceptul de „ **Incendiu de vegetație extrem”** (*Extreme Wildfire Event* - EWE) a fost definit folosind diferite criterii a fiind un eveniment în care mai mulți parametri ce caracterizează propagarea, dimensiunea sau impactul incendiului depășesc anumite praguri. Trebuie remarcat că un EWE și un EFB (comportament extrem al incendiului - *Extreme Fire Behavior*) nu sunt același lucru. Un EWE va avea cu siguranță unul sau mai multe episoade de EFB, dar putem observa EFB chiar și în incendii relativ mici care nu sunt clasificate ca EWE.

Pentru siguranța în activitățile de stingere a incendiilor, folosim următoarea definiție a EFB (Viegas, 2012): ”*Comportamentul extrem al incendiului este ansamblul de caracteristici*

și proprietăți ale propagării incendiilor de pădure care exclud posibilitatea controlării acestora în siguranță, utilizând resursele tehnice și cunoștințele disponibile în prezent".

3.1.1. Comportamentul dinamic al incendiului

În mod tradițional, comportamentul unui incendiu este influențat de următorii trei factori:

1. **Topografie**
2. **Vegetație**
3. **Meteorologie**

Aceștia formează bine cunoscutul **„triunghi al factorilor de incendiu"**. Rolul fiecăruia dintre acești factori a fost descris anterior.

Cu toate acestea, cercetările extinse și observațiile asupra propagării incendiilor au arătat că, în multe cazuri, chiar și atunci când aceste trei seturi de factori rămân constante, comportamentul incendiului se modifică. Aceasta se datorează interacțiunii sale cu mediul, iar **viteza de propagare a incendiului (ROS)** nu rămâne constantă.

Aceste observații au determinat propunerea conceptului de **„pătrat al factorilor de incendiu"** (Viegas, 2005), adăugând la cei trei factori tradiționali un al patrulea factor: **„timpul cronologic"**.

Este esențial să recunoaștem caracterul dinamic al propagării incendiului. Procesele convective generate de interacțiunea dintre incendiu și mediul său înconjurător (cunoscute sub numele de **„cuplaj incendiu-atmosferă"**) induc modificări semnificative asupra comportamentului incendiului, astfel încât **ROS-ul devine explicit dependent de timp**.

Există cazuri particulare în care variația ROS în timp poate avea consecințe grave asupra **siguranței la incendiu**.

- **Incendiile care se manifestă la partea din spate** și **pe flancuri**, în absența pantei sau a vântului, sunt singurele situații în care ROS rămâne practic constantă și egală cu **„viteza de propagare de referință"**.
- În toate celelalte cazuri, ROS va varia în timp, chiar dacă ceilalți factori (combustibil, pantă, vânt) rămân constanți.

Deoarece comportamentul unui incendiu variază în timp, pentru siguranța la incendiu este crucial să reținem următoarea regulă:

„**Ceea ce face incendiul acum poate fi foarte diferit de ceea ce va face în următoarele minute**".

3.1.2. Intensitatea incendiului

Este important de menționat că, în definiția comportamentului extrem al incendiilor (EFB) oferită de Viegas (2012), nu sunt specificați factori cantitativi, deoarece conceptul de „extrem" are un caracter relativ, depinzând de condițiile și circumstanțele în care o persoană se confruntă cu un incendiu.

Siguranța personalului de intervenție este evaluată în funcție de proprietățile propagării incendiului – în special intensitatea frontului de incendiu – și de resursele și cunoștințele disponibile acestuia. Se presupune că, cu cât antrenamentul personalului este mai bun, cu atât acesta este mai bine pregătit pentru a face față incendiilor mai intense.

Se recunoaște implicit că, utilizând tehnologia actuală, atacul direct asupra unui front de incendiu care depășește 10 MW/m nu este fezabil. Cu toate acestea, în funcție de resursele disponibile, limitele de răspuns sunt de multe ori chiar mult mai mici (vezi Tabelul 2).

Tabelul 2. Limite de stingere a incendiului în funcție de intensitatea focului.

Resurse de stingere a incendiilor	Intensitatea maximă a incendiului (kW/m)
Unelte de mână	350
Autospeciale de apă și pompieri	1700
Mijloace aeriene ușoare	3500
Mijloace aeriene grele	10000

3.2. Evoluții adverse ale EFB pentru respondenți

3.2.1. Incendiile secundare (prin focare noi, izolate de incendiul inițial)

Un incendiu secundar (tip "*spot*") constă într-un nou focar de incendiu rezultat dintr-un front de incendiu inițial care se aprinde și dezvoltă în afara perimetrului său, pe baza scânteilor, particulelor incandescente sau jarului, deplasate de curenții de aer sau gravitațional, cunoscut și sub denumirea "prin salturi". Printre numeroasele clasificări existente, cea mai comună este cea care clasifică incendiile secundare în funcție de distanța lor față de frontul de incendiu original, și anume:

- **Focare izolate pe distanțe scurte** – Apar la câțiva metri de frontul inițial și sunt de obicei rapid integrate de acesta. Ele contribuie în principal la creșterea ratei de propagare a incendiului, surprinzând deseori pe cei care anticipau o sosire mai târzie a frontului principal.
- **Focare izolate pe distanțe medii** – Apar la câteva zeci de metri de frontul original, determinând avansarea intermitentă a acestuia, pe măsură ce interacționează cu noul focar. Pe lângă faptul că accelerează propagarea incendiului, acestea sunt extrem de periculoase, deoarece pot surprinde persoane prinse între cele două fronturi de incendiu, în special în timpul fazei de interacțiune.
- **Focare izolate pe distanțe lungi** – Apar la câteva sute de metri și sunt inițial considerate incendii separate în cadrul aceluiași scenariu de incendiu. Acestea pot interacționa cu frontul inițial pe măsură ce distanța dintre ele scade, iar intensitatea incendiului este suficientă pentru a cauza o astfel de interacțiune.
- **Focare izolate pe distanțe foarte lungi** – Apar la câțiva kilometri distanță și sunt, de obicei, considerate evenimente noi față de incendiul inițial. Acestea duc la dispersarea resurselor de intervenție pentru stingere în aceeași zonă și pot interacționa și fuziona cu frontul inițial în incendii extinse și de lungă durată.

Mecanismul de formare a unui focar izolat

Formarea unui focar izolat implică mai multe etape:

- **Eliberarea particulelor incandescente** – Particulele sunt generate de materialul combustibil aprins în frontul de incendiu.
- **Ridicarea particulelor în coloana convectivă de fum** – Particulele sunt transportate ascendent de fluxul convectiv generat de incendiu.

- **Transportul particulelor pe direcția vântului** – După părăsirea coloanei ascendente de fum, particulele sunt purtate de vânt către alte locații.
- **Depunerea particulelor pe un strat combustibil inflamabil** – Particulele incandescente aterizează pe un strat combustibil suficient de uscat pentru a se aprinde.

Deși este dificil de estimat locația exactă unde poate apărea un focar izolat, analiza condițiilor evenimentului de incendiu, luând în considerare aceste patru etape, poate oferi indicii despre momentul, modul și locația probabilă a acestora.

Factori de influență asupra formării focarelor izolate

- **Localizarea frontului de incendiu** – Poate indica potențialul de producere a particulelor incandescente la un moment și loc specific. De exemplu, dacă frontul de incendiu ajunge la marginea unei păduri mature supuse stresului hidric, probabilitatea producerii particulelor incandescente este foarte mare.
- **Intensitatea incendiului** – Este asociată cu transportul particulelor în coloana convectivă. Combinația dintre intensitatea incendiului și vânturile locale puternice poate duce la focare izolate pe distanțe lungi sau foarte lungi.
- **Tipul de combustibil** – Tipul de vegetație din zona incendiului influențează probabilitatea formării focarelor izolate. Zonele cu pajiști uscate sau tufișuri sunt mai predispuse la aprindere decât terenurile agricole.

Eucaliptul și alte specii predispuse la focare izolate

Speciile de eucalipt sunt considerate specii cu cel mai mare potențial pentru formarea focarelor izolate, din cauza comportamentului aerodinamic al frunzelor și scoarței lor, precum și inflamabilității ridicate. Aceste caracteristici le permit să genereze focare izolate pe distanțe lungi.

Totuși, alte specii, cum ar fi stejarul și stejarul de plută, deși au o inflamabilitate mai redusă, pot produce focare izolate, în special pe distanțe medii.

Studiul realizat de Almeida și colab. (2021) a evidențiat eliberarea semnificativă de particule incandescente din coronamentele arborilor de plută și de stejar. Exemple relevante din trecut includ:

- **Accidentul Cicouro (Portugalia, 2013)** – Doi pompieri și-au pierdut viața din cauza unui „duș” de particule incandescente provenite din frunzele stejarilor, care au generat mai multe focare izolate în jurul lor (Viegas et al., 2013).
- **Incendiul Regadas (Pedrógão Grande, Portugalia, 2017)** – Pierderea controlului incendiului s-a produs când coronamentul unui stejar de plută a luat foc, generând numeroase focare izolate în apropiere (Viegas și colab., 2017).

Stingerea incendiilor secundare este deosebit de dificilă deoarece acestea nu apar de obicei izolat. Sursele de particule incandescente eliberează numeroase astfel de particule pe măsură ce frontul incendiului avansează, iar aceste particule se confruntă cu condiții de mediu similare. Prin urmare, este frecvent ca focarele izolate să apară în grupuri, separate de câteva zeci de metri unele de altele. Această proximitate promovează interacțiunea lor și poate duce la formarea unui nou incendiu mare care, în funcție de distanță, poate interacționa cu frontul inițial al incendiului. Ca urmare, numărul mare de incendii secundare și intensitatea acestora pot afecta sau chiar împiedica stingerea incendiilor, asociind acest mecanism cu un comportament extrem al incendiului.

Focarele izolate: mecanisme și pericole

Focarele izolate sunt în mod obișnuit asociate cu transportul particulelor incandescente de către vânt, fiind așteptate să apară pe direcția vântului față de frontul de incendiu. Cu toate acestea, este important de menționat că focarele izolate pot rezulta și din alte mecanisme, cum ar fi:

- **Un con de pin care se rostogolește pe o pantă** și declanșează o nouă aprindere.
- **Un animal în flăcări**, care, încercând să scape de incendiu, provoacă o nouă aprindere.

Pericolul asociat cu focarele izolate nu derivă doar din efectul lor asupra frontului inițial de flăcări, pe care îl accelerează, ci și din:

- Posibilitatea de a încercui/surprinde oameni și/sau animale, în special din cauza apariției lor neașteptate, care provoacă surpriză și panică.
- Capacitatea lor de a compromite siguranța pe teren:
    - **Blochează căile de evacuare**, făcând imposibilă ieșirea în siguranță.
    - **Compromit punctele de ancorare/de asigurare logistică**, esențiale pentru gestionarea incendiului.
    - **Invalidează locațiile de manevre/refugiu** existente în scenariul incendiului, punând în pericol echipele de intervenție.

Astfel, focarele izolate reprezintă un risc semnificativ în gestionarea incendiilor, prin impactul lor direct asupra dinamicii incendiului și a măsurilor de siguranță.

3.2.2. Incendiile de coronament

Pe lângă faptul că reprezintă un tip distinct de incendiu, alături de incendiile de sol și de suprafață, incendiile de coronament sunt, de asemenea, o manifestare a **comportamentului extrem al incendiilor**. Energia ridicată asociată acestora și capacitatea de a genera coloane convective puternice, precum și particule incandescente cu potențial de aprindere la distanțe variabile, fac din acest mecanism unul dintre cele mai dificile incendii de controlat.

Tipuri de incendii de coronament

Incendiile de coronament sunt clasificate în trei categorii:

1. **Incendiu de coronament pasiv**
    - Apare atunci când un arbore sau un grup mic de arbori se aprinde, generând o intensitate ridicată, dar pe o durată scurtă.
2. **Incendiu de coronament activ**
    - Se manifestă atunci când incendiul se propagă activ între coroane, fiind susținut de incendiul de suprafață care se propagă în vegetația de sub coronament.
    - Acest tip de incendiu eliberează energie într-un mod mai intens și de durată mai lungă decât incendiul pasiv de coronament.
3. **Incendiu de coronament independent**

- Este caracterizat prin propagarea susținută a incendiului între coroanele arborilor, fără a fi susținut de incendiul de suprafață din stratul de subarboret.
- În acest caz, incendiul trece între coroane independent de existența unui incendiu la suprafață.

Provocări în controlul incendiilor de coronament

- **Energie ridicată și propagare rapidă** – Aceste incendii generează intensități ridicate care fac intervențiile directe extrem de periculoase.
- **Generarea de focare izolate** – Incendiile de coronament produc particule incandescente care pot aprinde combustibilul la distanțe mari, complicând operațiunile de stingere.
- **Coloane convective puternice** – Acestea pot destabiliza atmosfera locală, favorizând comportamente extreme, cum ar fi vârtejurile de foc.

Din cauza acestor caracteristici, incendiile de coronament reprezintă unul dintre cele mai complexe și periculoase tipuri de incendii, necesitând strategii avansate de gestionare și resurse semnificative.

Spre deosebire de incendiile de suprafață, în incendiile de coronament oxigenul/comburantul (substanțe care întreține arderea) intră și de jos, deoarece coroanele arborilor sunt de obicei la înălțime. În incendiile de suprafață, aerisirea are loc doar din lateral, deoarece combustibilii sunt limitați de prezența solului.

Într-un **incendiu de coronament activ**, incendiul de suprafață preîncălzește coronamentul, făcându-l mai susceptibil să ardă. Astfel, disponibilitatea simultană a unei cantități mari de comburant și combustibil conduce la **combustii foarte intense**, cu eliberări semnificative de energie. Totuși, dacă disponibilitatea mare de combustibil nu este acompaniată de o disponibilitate ridicată de comburant, reacția de combustie devine dezechilibrată și se întrerupe/se autostinge.

Din acest motiv, incendiile independente de coronament sunt rare și apar în principal în condiții în care:

- Conținutul de umiditate al coronamentului este extrem de scăzut.
- Densitatea coronamentului este favorabilă combustiei.

Aceste episoade sunt atât de rare încât nu vor fi dezvoltate în detaliu în acest capitol.

Tranziția de la incendiul de suprafață la incendiul de coronament ("tranziția verticală")

Tranziția verticală este procesul prin care un incendiu de suprafață trece la un incendiu de coronament. Această tranziție poate fi rapidă, surprinzând pe cei care consideră că se confruntă cu un incendiu de intensitate redusă.

Conform lui Van Wagner (1977), tranziția verticală depinde de:

Intensitatea incendiului de suprafață.

Intensitatea critică[2],, care este o funcție a:

- Înălțimii de la baza coronamentului (*crown base* height).
- Conținutului de umiditate al frunzelor.

Criterii de tranziție verticală

[2] $I_c = (0.010 \times z \times 400 + 26 \times m)^{3/2}$, cu I_c – Intensitatea critică (minimă) a frontului, care va aprinde frunzișul (kW/m); z – înălțimea bazei coroanei (m) și; m – conținut de umiditate foliar (%): 100% prin simplificare [Philpot și Mutch 1971].

- Dacă **intensitatea critică** este mai mică decât intensitatea incendiului de suprafață, probabilitatea ca incendiul să treacă la coronament este ridicată (incendiu pasiv sau activ).
- Dacă **intensitatea critică** este mai mare decât intensitatea incendiului de suprafață, este puțin probabil ca incendiul să ajungă la coronament.
- Tranziția poate avea loc și prin combustibili fini (de exemplu, licheni) de pe trunchiul arborilor, ceea ce poate duce la un episod de incendiu de coronament, de obicei de tip pasiv.

Consecințe și siguranță

Energia eliberată de incendiile de coronament este atât de mare și înspăimântătoare încât accidentele sunt rare după ce un astfel de incendiu este bine dezvoltat, deoarece instinctul uman determină retragerea din fața unei scene atât de impresionante. Totuși, tranziția rapidă de la un incendiu de suprafață la un incendiu de coronament este un pericol major, mai ales pentru cei care se apropie presupunând că luptă împotriva unui incendiu de intensitate mai mică, survenind fenomenul de surprindere.

Tranziția orizontală a incendiilor în coronament și factori determinanți

Tranziția orizontală a incendiilor în coronament, adică trecerea de la un incendiu de coronament pasiv la unul activ, necesită o densitate a coronamentului care să asigure o distanță favorabilă între combustibili pentru propagarea focului.

În acest context, se definește un **parametru limită** denumit „**viteza critică de propagare după atingerea coronamentului**" (*critical after-crowning rate of spread*)[3], care este invers proporțională cu densitatea coronamentului (Van Wagner, 1977). Dacă viteza de propagare a incendiului de suprafață depășește viteza critică, poate avea loc o tranziție către un incendiu de coronament activ. În caz contrar, incendiul rămâne pasiv.

Conform lui Rothermel (1972), viteza de propagare a incendiilor în coronament este de **3,34 ori mai mare** decât viteza de propagare prezisă pentru **Modelul de combustibil 10** (lemn/uscat și subarboret – Anderson, 1982), utilizând un factor de reducere a vântului de 0,4, indiferent de combustibilii de suprafață sau de factorul de reducere a vântului real.

Condiții necesare pentru apariția unui incendiu de coronament

1. **Încărcătura mare de combustibil de suprafață** – Aceasta conduce la o intensitate ridicată a incendiului de suprafață, necesară pentru a susține tranziția verticală.
2. **Distanța mică între baza coronamentului și flăcările incendiului de suprafață** – Tranziția verticală are loc doar dacă flăcările ating coronamentul.
3. **Densitatea coronamentului** – Proximitatea coronamentelor trebuie să permită trecerea incendiului de la un copac la altul, pentru a susține un incendiu activ de coronament.

Importanța gestionării subarboretului și a coronamentului

Aceste definiții subliniază importanța gestionării subarboretului și a efectuării lucrărilor de **conducere și îngrijire** ale arboretelor pentru:

- **Reducerea probabilității apariției incendiilor de coronament**.
- **Asigurarea siguranței intervenției pompierilor** în pădure.
  Aceste aspecte reprezintă factori esențiali care trebuie evaluați înainte de a începe o operațiune de stingere a incendiilor într-o pădure.

Influența vântului, pantei și speciilor de arbori

- **Vântul** și **panta terenului** sunt factori suplimentari care contribuie la creșterea vitezei de propagare a incendiilor de suprafață, facilitând tranziția verticală și orizontală.
- **Speciile forestiere** joacă, de asemenea, un rol important.

[3] $R_c = 3.0/d$, cu R_c – Viteza critică de propagare după urcarea în coronament (m/min) și d – c densitatea în vrac (kg/m ^{3})

- Speciile de **foioase** (de exemplu, stejari sau castani) au o probabilitate mai redusă de a susține incendiile de coronament datorită inflamabilității[4] scăzute.
- Speciile de **conifere** (cum ar fi pinii sau eucalipții) prezintă un risc mai mare de incendii de coronament, din cauza inflamabilității ridicate.

3.2.3. Incendiile eruptive

Incendiile eruptive sunt caracterizate de o accelerare extrem de rapidă a incendiului, care poate fi comparată cu o erupție. Puterea distructivă a acestor incendii este foarte mare și poate surprinde oamenii aflați în zonă. Majoritatea accidentelor asociate incendiilor sunt legate de acest tip de comportament extrem al incendiilor (EFB).

Caracteristici și terminologie

- Incendiile eruptive sunt deseori asociate cu **canioane** și **pante abrupte**, deși procesele fizice implicate pot apărea și în condiții mai obișnuite.
- În literatură, aceste incendii sunt,de asemenea, denumite și **„blow-up"** sau **incendii explozive**, deși termenul „explozie" nu este corect, deoarece,în cazul acestora, creșterea vitezei de propagare a incendiului (ROS) este un **proces continuu**, nu unul instantaneu.

Studii și mecanism

- Acest tip de EFB a fost studiat sistematic pentru prima dată de **Viegas și Pita (2002)**, care au descoperit că:
- Comportamentul este asociat cu fluxul de oxigen indus de incendiu, care este amplificat de **forma concavă a unui canion**.
- În experimentele de laborator, s-a utilizat o **masă în formă de canion** compusă din două suprafețe plane înclinate, pentru a analiza sistematic acest comportament.
- Forma canionului a fost determinată de **unghiurile de pantă ale celor două fețe** ale mesei și de **unghiul bazei acesteia**.
    - Valori mai mari ale acestor unghiuri induc **accelerări mai mari ale incendiului**.

Dinamica și influența combustibililor

- Creșterea ROS este determinată de **dinamica incendiului**, independent de:
    - Vântul ambiental.
    - Condițiile particulare ale stratului de combustibil.
- **Timpul necesar** pentru ca incendiul să atingă valori foarte mari de accelerare depinde de **compactitatea stratului de combustibil**:
    - Este mai scurt pentru combustibili mai puțin compacți, precum vegetația ierboasă.
    - Este mai lung pentru combustibili mai grei, precum arbuștii sau resturile vegetale (*slash*).

Observații în cazurile reale

- În cazul combustibililor din arbuști (*shrubland*), **timpul necesar pentru accelerarea completă este de aproximativ 20 de minute**.
- Această durată a fost observată în multe accidente reale și incendii experimentale.

Concluzii

[4] Potrivit lui Pausas et al. (2017) asociat cu patru componente (Anderson, 1970; Martin și colab., 1994): 1) aprindere, facilitatea de a produce aprindere; 2) durabilitate, capacitatea unui material de a menține arderea și de a produce energie; 3) combustibilitatea, viteza cu care are loc arderea; și 4) consumabilitate, proporția de biomasă consumată în timpul arderii.

Incendiile eruptive reprezintă unul dintre cele mai periculoase tipuri de comportament al incendiilor, având potențialul de a pune vieți în pericol și de a complica semnificativ operațiunile de stingere. Înțelegerea acestui fenomen și identificarea factorilor favorizanți, cum ar fi forma terenului și tipul de combustibil, este esențială pentru prevenirea și gestionarea eficientă a acestor situații extreme.

3.2.4. Incendiile de joncțiune

În timpul unui incendiu de vegetație, se întâmplă uneori ca două sau mai multe fronturi de incendiu care se propagă în aceeași zonă să interacționeze, ceea ce poate duce la formarea unui incendiu mai mare, cu o viteză de propagare rapidă (ROS). Acest tip de situație apare frecvent în operațiunile de stingere a incendiilor sau în focurile controlate și este important de înțeles, deoarece poate prezenta caracteristici de **comportament extrem al incendiilor (EFB)**.

Mecanismul interacțiunii fronturilor de incendiu

1. **Interacțiunea pe teren plat și fără vânt**
    - În cel mai simplu caz, două fronturi de incendiu identice și/sau paralele se propagă pe un teren orizontal și plat.
    - La distanță mare, viteza lor de propagare este egală cu ROS-ul de bază.
    - Pe măsură ce se apropie, viteza de propagare crește treptat din cauzaintensificării curenților de convecție generați de cele două fronturi.
    - Când fronturile se întâlnesc, intensitatea propagării crește brusc, atingând valori foarte mari.
2. **Interacțiunea în prezența vântului sau a pantei**
    - Frontul care avansează împotriva vântului sau în josul pantei va progresa inițial mai lent.
    - Când ajunge la frontul nou, comportamentul incendiului se schimbă, iar în faza finală a interacțiunii intensitatea propagării crește din nou.
    - Dacă focarele se formează aproape de frontul principal, acestea tind să fie atrase spre acesta. În cazul vânturilor puternice sau al distanțelor mai mari, focarele izolate se pot propaga independent, contribuind la dezvoltarea mai rapidă a incendiului.
3. **Fronturi de incendiu în formă de „V”**
    - O situație specială apare când două fronturi de incendiu formează un unghi între ele, creând o **formă de „V”**.
    - Spațiul dintre cele două fronturi este consumat nu prin avansul unui front către celălalt, ci prin avansul apexului/vârfului formei de „V”, unde cele două fronturi interacționează.

Fenomenul de „Incendiu de joncțiune”

Acest fenomen a fost investigat sistematic de **Viegas și colab. (2012)**, care au studiat interacțiunea și fuziunea a două fronturi de incendiu oblice și simetrice ce formează o linie a frontului în formă de „V”.

Inițial, acest fenomen a fost denumit **„Jump Fire”** din cauza creșterii bruște a ROS-ului, dar ulterior termenul a fost schimbat în „**Junction Fire**” (**Incendiu de joncțiune)**.
Rezultatele au arătat că viteza fronturilor și ROS-ul cresc brusc de la zero la valori de ordinul **de o sută de ori mai mari** decât ROS-ul de bază.

Studii recente și efectele pantei

- În ultimul deceniu, fenomenul „Incendiu de joncțiune” a fost analizat de mai mulți autori (Sharples et al., 2013; Raposo et al., 2015; Hilton et al., 2016; Ribeiro et al., 2023).
- Recent, **Ribeiro et al. (2023)** au investigat efectul pantei asupra incendiilor de joncțiune în cazul fronturilor de incendiu nesimetrice, evidențiind modul în care geometria terenului influențează accelerarea și intensitatea incendiului.

Implicații pentru gestionarea incendiilor

- Intensificarea interacțiunii dintre fronturile de incendiu, chiar dacă durează relativ puțin, poate duce la dezvoltarea unui incendiu major.
- Planificarea operațiunilor de stingere trebuie să ia în considerare locul unde fronturile de incendiu vor interacționa, pentru a evita formarea de focare izolate sau propagarea necontrolată.
- Cunoașterea acestui fenomen este esențială pentru a anticipa și gestiona situațiile de risc ridicat în timpul incendiilor.

3.2.5. Incendiile devastatoare

Incendiile devastatoare sunt acele incendii care au loc în condiții meteorologice de vânt puternic, care durează relativ mult timp – ore sau zile – pe suprafețe mari, ducând la propagarea pe scară largă/în masă a incendiilor cu valori ridicate ale ROS și alte manifestări ale EFB cum ar fi incendiile de coronament, incendiile secundare ș.a. , chiar și pe teren relativ plat.

Incendiile care au avut loc în Portugalia în 15 octombrie 2017 au fost un exemplu de incendii devastatoare. În această zi, au fost înregistrate peste 400 de focare de incendiu și din acestea au rezultat nouă incendii majore care au ars în total peste 200.000 ha de vegetație și au provocat moartea a 52 de persoane.

3.2.6. Vârtejurile de foc

O altă manifestare a **comportamentului extrem al incendiilor (EFB)** sunt vârtejurile de foc, cunoscute și sub denumirea de tornade de foc. Acestea sunt structuri cu o înălțime verticală de câteva zeci până la sute de metri, caracterizate de o mișcare de rotație foarte puternică, având în centrul lor o coloană de flăcări.

Formare și caracteristici

- Vârtejurile de foc sunt generate de un flux ascendent provocat de incendiu sau de zonele de sol încălzite.
- Sunt asociate, în general, cu o mișcare de rotație cauzată de **asimetriile fluxului de aer** sau ale terenului înconjurător.
- Mișcarea de rotație se desfășoară în jurul unui **ax vertical**, asemănător mișcărilor aerului din cicloni, dar la o scară mult mai mică. În nucleul vârtejului de foc, aproape de axul rotației, aerul se rotește și atinge viteza maximă a vântului la marginea acestui nucleu. Presiunea este cea mai scăzută în această zonă și, prin urmare, efectul de aspirație al vârtejului de foc este cel mai puternic. Acest fapt explică de ce un vârtej de foc produce flăcări sau o coloană de foc de mare înălțime.

Comportamentul vârtejurilor de foc

- Vârtejul poate rămâne relativ static, având un ax fix, sau se poate deplasa, transportând focul cu el.
- Mișcarea sa este greu de prezis, cu o traiectorie aparent imprevizibilă, în care axul își poate schimba direcția și viteza fără o cauză evidentă.

Pericole și dificultăți

- **Vârtejurile de foc sunt foarte greu de combătut**, justificând clasificarea lor drept cazuri de comportament extrem al incendiilor.
- Atunci când un vârtej de foc se deplasează dintr-o zonă arsă către una situată în afara perimetrului incendiului, poate deveni extrem de periculos, favorizând propagarea necontrolată a incendiului.
- Din cauza mișcării sale imprevizibile, vârtejul poate intra în zone unde provoacă propagarea periculoasă a incendiului, iar în unele cazuri poate surprinde pompierii între vârtej și incendiul principal, creând o situație extrem de riscantă.

Vârtejuri în incendiile de mari dimensiuni

- Incendiile de vegetație mari pot genera multiple vârtejuri de foc din cauza curenților de convecție puternici creați.
- Instabilitatea atmosferică favorizează formarea acestor vârtejuri.
- **Vitezele vântului** din vârtej pot atinge **100-200 km/h**, oferindu-le o putere distructivă semnificativă.
- Aceste viteze pot doborî arbori sau părți din clădiri, sporind astfel efectul distructiv al incendiului (Viegas și colab., 2017).

Tornadele în zonele arse

- Tornadele sunt uneori observate în zonele arse, deoarece vântul vârtejului aspiră praf și cenușă.
- Formarea acestora este rezultatul creșterii ratei de absorbție a radiației solare de către solul întunecat din aceste zone arse, ceea ce generează curenți ascendenți care conduc la formarea tornadelor.

Concluzie

Vârtejurile de foc reprezintă o amenințare semnificativă în gestionarea incendiilor de vegetație, atât prin impactul lor asupra propagării incendiilor, cât și prin riscurile suplimentare pe care le generează pentru echipele de intervenție și mediul înconjurător.

3.2.7. Incendiile explozive

Incendiile explozive (”blow-up fire event” - BUFE) sunt situații extreme în care interacțiunea dintre foc, teren și atmosferă determină o escaladare bruscă și intensă a incendiului, cu caracteristici de comportament extrem. Aceste evenimente implică o accelerare rapidă și necontrolabilă a incendiului, ducând la distrugeri masive și pericole semnificative pentru echipele de intervenție și populație.

După cum s-a descris mai înainte, incendiul „normal” se propagă prin fronturi principale și prin incendii secundare. Pentru aceasta trebuie cunoscute terenul, combustibilul și condițiile meteorologice din timpul incendiului.

Comportamentul dinamic al incendiului caracteristic unui BUFE necesită existența unui incendiu necontrolat anterior și anumite condiții de teren și de profil atmosferic, care toate împreună permit formarea unor reacții în lanț. Încărcarea cu combustibil nu are un rol explicit.

Condițiile necesare pentru apariția unui BUFE sunt:

1. Un incendiu activ în combustibili adecvați, cum ar fi pădurile sau arbuștii; vegetația ierboasă arde prea repede pentru a susține un BUFE.
2. Condiții care pot provoca flăcări foarte puternice. Există 7 cauze cunoscute pentru un de tip BUFE:
   - Vânturi puternice (frontul incendiului avansează rapid pe o distanță mare în timpul perioadei de ardere completă)

• Schimbarea direcției vântului – transformă un flanc într-o parte frontală de incendiu, mai mare
• Creștere eruptivă
• Propagarea laterală determinată de vorticitate (*Vorticity-driven lateral spread* - VLS), principala cauză a daunelor majore ale incendiului
• Utilizarea inadecvată a pistoletului (torței) de incendiere prin picurare (în cazul utilizării ca procedeu de stingere)
• Focare dense de incendii secundare
• Aprindere interioară, unde insulele cu combustibil nears devin ulterior inflamabile, iar căldura lor se adaugă la căldura frontului principal.

Unele, cum ar fi VLS, necesită ca incendiul să fie localizat în anumite forme de relief în momente critice (adică în perioade de vânt puternic și cu umiditate scăzută a combustibilului).

Condiții atmosferice favorabile dezvoltării piro-convecției violente :

Formarea **convecției violente** este influențată de condițiile atmosferice de deasupra terenului afectat. Este important să se cunoască ce se întâmplă în atmosferă deasupra zonei incendiului – observare nori, lansare baloane meteorologice, folosire resurse de aviație, utilizare aeronave fără pilot.

"Capacul convectiv" are un rol critic. Inversiuni termice cauzate de procese precum subsidența pot bloca convecția. Dacă capacul convectiv este sub **4°C,** s-ar putea forma un nor piro-cumulonimbus (piroCb) sau dacă capacul este peste **8°C**, atunci s-ar putea produce un incendiu alimentat de vânturi tip Foehn. BUFE nu tind să apară la valori intermediare.

Este posibil ca ciclul meteo zilnic dominant să fie perturbat - 30% din BUFE apar peste noapte. Apariția lor poate necesita amestecarea aerului uscat din straturile superioare și coborârea lui spre sol, fenomen ce poate fi amplificat de terenul accidentat.

Există instrumente predictive pentru BUFE, bazate pe studii ale multor evenimente – vezi http://www.highfirerisk.com.au/hpf/bufo_2.xlsx sau vezi:
http://www.highfirerisk.com.au/hpf/bufo.pptx

Consecințele potențiale ale BUFE:

Un eveniment de escaladare a incendiului pe o durată de două sau trei ore, pe unul sau mai multe sectoare, ar trebui considerat incontrolabil – dacă nu imposibil de monitorizat. În acel timp, BUFE-urile ard în mod curent 7.000 ha, avansează pe o distanță de 16 km și au o lățime de 7 km. Ele pot fi mult mai mari. Ele nu pot fi stinse. Adesea, intensitatea incendiului scade după aceea, permițând începerea intervenției atunci când condițiile devin sigure pe terenul incendiat (cum ar fi îndepărtarea arborilor periculoși sau a liniilor electrice). Este cel mai bine să nu existe nimeni în proximitatea unui BUFE, dacă predicțiile pot fi făcute cu suficient timp înainte.

Pentru un incendiu mic, BUFE va implica întreaga zonă afectată de incendiu. În cazul incendiilor mai mari, unul sau mai multe grupuri de intervenție pot fi implicate, în timp ce complexele de incendii pot necesita implicare la nivel superior și prin cooperare.

Probleme de siguranță :

Obiectivul principal: În procesul de raționament tactic (*Incident Action Plan* - IAP), prioritatea trebuie să fie **salvarea vieților**.

Provocări și pericole specifice:

- **Flancuri fără front principal**, necesită strategii noi de conștientizare a situației.
- **Focare izolate dense**, crescând intensitatea în zonele de fuziune.

- **Combustie cu oxigen scăzut**, generând fenomene neobișnuite.
- **Creșteri eruptive**, extind incendiul rapid în canioane.
- **Acces periculos**: Pierderea rapidă a căilor sigure de evacuare.
- **Vânturile foehn**, care pot schimba fluxul din laminar în turbulent,modificând comportamentul incendiilor.

Sectoarele fără BUFE ar trebui să fie reevaluate în mod continuu pentru siguranță. Problemele nu apar din incendiile explozive în jos (deoarece norii piro-cumulonimbus se formează de obicei în josul direcției vântului, în aval de terenul incendiat), ci reflexiile de pe capacul convectiv, în special acolo unde terenul aduce incendiul aproape de acest capac.

Cum să gestionezi un BUFE?

Țineți incendiul departe de formele de relief cheie în momente critice. Înțelegeți când incendiul ar putea intra în zone predispuse la VLS sau la creșteri eruptive. Aflați când vântul va crește în intensitate sau când umiditatea combustibilului va scădea sub 5%. Structurile responsabile de planificare au nevoie de abilități speciale pentru a face acest lucru. *Puteți efectua o ardere controlată într-o astfel de zonă atunci când condițiile sunt mai favorabile?*

Restricționați utilizarea torțelor cu picurare în momentele critice. Anumite modele de aprindere pot crea BUFE-uri în astfel de momente. Acest lucru trebuie să fie inclus în Planul de acțiune pentru incidente.

Evacuați zonele predispuse înainte de inițierea unui BUFE, dacă se așteaptă unul. Când un BUFE se inițiază, echipele/echipajele de pompieri pot fi la fel de expuse riscurilor ca și populația.

Mulți membri ai Echipei de Management al Incidentelor au un rol esențial în menținerea în siguranță a echipajelor:

- **Ofițerul de siguranță:** Asigură instruirea echipelor. Se asigură că toată lumea știe ce să facă.
- **Analistul Comportamentului Incendiului** sau specialistul tehnic: Realizează previziuni detaliate.
- **Ofițerul de situație/planificare**: Monitorizează și evaluează informațiile.
- **Ofițerul de operațiuni/Comandantul operațiunii**: Se ocupă de aplicarea Planului de Acțiune pentru Incidente (IAP).
- **Observatorii de teren și aerieni** (inclusiv personal operațional superior): Identifică semnele precursoare, inițierea, durata și faza de regresie a BUFEs.
- **Instructorii/formatorii de pompieri**: trebuie să ofere formare care să acopere terminologia și conștientizarea comportamentului dinamic al incendiilor. Un mesaj de siguranță legat de riscuri neobișnuite de securitate necesită ca toți cei implicați să înțeleagă termenii folosiți (de exemplu, VLS). Același lucru este valabil și pentru personalul operațional implicat în procesul de luare a deciziilor.

4. Provocări cauzate de incendii specifice

4.1. Incendii la Interfața Natural-Construit (WUI)

Interfața Natural-Construit (*Wildland Urban Interface* - WUI) reprezintă zonele unde vegetația și infrastructurile sunt semnificativ prezente, cu prezența temporară sau permanentă a oamenilor. În aceste zone, pe lângă vegetație, se află diverse tipuri de

infrastructuri, de obicei ocupate sau utilizate de oameni, ceea ce conferă caracteristici distincte care necesită o abordare specifică.

Din cauza activităților umane din aceste zone, probabilitatea de izbucnire a incendiilor în WUI este mai ridicată comparativ cu zonele exclusiv sălbatice. Mai mult, valoarea elementelor expuse este ridicată, incluzând posibilele pierderi de vieți umane și animale, precum și potențiala distrugere a infrastructurilor cu valoare economică, socială și/sau culturală ridicată.

Clasificări ale WUI

Clasificare după coexistenta vegetației și infrastructurilor:

- **Tipul „interfață”**: Există o delimitare clară între zona cu infrastructuri și zona cu vegetație. De exemplu, o zonă construită înconjurată de pădure. În această tipologie există situații speciale, cum ar fi clădiri izolate înconjurate de vegetație.
- **Tipul „ocluzional”**: Un petic de pădure înconjurat de clădiri, precum parcurile urbane.
- **Tipul „intermix”**: Vegetația și infrastructurile sunt amestecate în aceeași zonă.

Clasificare după tipul de infrastructură prezentă:

- **Interfața urban-pădure (standard):** Vegetația coexistă cu clădiri tipic urbane (case rezidențiale, clădiri comerciale sau de servicii).
- **Interfața industrial-pădure:** Vegetația coexistă cu clădiri industriale.
- **Interfața liniară:** Elemente de infrastructură extinse pe linie, cum ar fi căile ferate, autostrăzile sau rețelele de distribuție a energiei electrice.

Provocările asociate incendiilor la WUI

Din cauza caracteristicilor unice, eterogenității și complexității acestor scenarii, provocările generate de incendiile din WUI sunt semnificativ diferite față de cele întâlnite în incendiile din zonele sălbatice.

Principalele provocări

1. **Protecția vieților omenești și a animalelor**:
   - Evacuări rapide și sigure din zonele afectate.
   - Planificarea adecvată pentru a minimiza pierderile de vieți.
2. **Protejarea infrastructurii valoroase**:
   - Protejarea clădirilor și altor elemente esențiale (de ex. rețele electrice).
   - Reducerea distrugerilor economice, sociale și culturale.
3. **Gestionarea complexității scenariului**:
   - Integrarea rapidă a datelor despre teren, vegetație și infrastructură.
   - Coordonarea intervenției între echipe diverse.

Având în vedere caracteristicile unice, eterogenitatea și complexitatea scenariilor, provocările asociate cu incendiile de vegetație din WUI sunt semnificativ diferite de cele întâlnite în cazul incendiilor din zonele sălbatice. Principalele provocări asociate celor trei componente principale ale WUI sunt evidențiate mai jos.

4.1.1. Combustibili naturali – vegetația

Vegetația prezentă în WUI este de obicei clasificată în vegetație spontană și vegetație gestionată/ornamentală. În WUI tip „interfață”, în special în zonele mai îndepărtate de clădiri, vegetația este de obicei spontană și similară cu vegetația găsită în zonele sălbatice. În WUI liniar, vegetația este, de asemenea, spontană datorită naturii sale extinse.

În interfața de tip ocluzional, vegetația poate fi fie spontană, fie ornamentală (specii selecționate), de obicei mai atent gestionată decât în WUI tip „interfață".

În clădiri izolate (caz specific de „interfață" sau într-un scenariu „intermix"), vegetația ornamentală bine întreținută este frecvent întâlnită. Întreținerea vegetației implică de obicei irigare, care are un impact pozitiv semnificativ pentru reducerea riscului de incendiu, deoarece crește umiditatea combustibilului.

Specii de plante și inflamabilitate

1. **Plante ornamentale cu proprietăți benefice:**
    - **Hortensiile** (genul Hydrangea): Prezintă caracteristici foarte favorabile pentru reducerea riscului de incendiu.
2. **Plante ornamentale cu inflamabilitate ridicată:**
    - **Dafinul** *(Laurus nobilis*): Are valori de inflamabilitate mult mai mari decât multe specii spontane (Almeida și colab., 2022).
3. **Garduri vii în grădini:**
    - Pot reprezenta un risc semnificativ de incendiu dacă nu sunt selectate și întreținute corespunzător:
        - **Specii cu risc ridicat:**
            - *Cupressus arizonica***:** Când sunt tăiate pentru a menține o formă specifică, acumulează mult material uscat în interior, devenind extrem de inflamabile.
        - **Specii mai sigure:**
            - *Prunus laurocerasus***:** Elimină materialul uscat, prezentând un comportament mai favorabil pentru gestionarea riscului de incendiu.

Studii privind inflamabilitatea vegetației

- **Ribeiro & Almeida (2020):** Au realizat un studiu detaliat despre caracteristicile de inflamabilitate ale diferitelor specii utilizate în garduri vii, evidențiind impactul selecției și întreținerii vegetației asupra riscului de incendiu.

Așadar, gestionarea corespunzătoare a vegetației, inclusiv irigarea regulată și selectarea atentă a speciilor, joacă un rol esențial în reducerea riscului de incendiu în scenariile WUI. Alegerea unor specii mai puțin inflamabile și eliminarea materialului uscat din vegetație sunt măsuri practice care contribuie semnificativ la diminuarea pericolelor de incendiu.

4.1.2. Combustibili artificiali

Combustibilii de origine artificială includ toate materialele combustibile care nu sunt de origine vegetală, cum ar fi:

- **Infrastructuri**: Elementele cele mai inflamabile ale clădirilor sau structurilor.
- **Echipamente**: Vehicule, cabluri electrice, utilaje industriale exterioare etc.
- **Alți combustibili**: Lemne de foc, butelii de gaz etc.

Caracteristici și provocări

1. **Diversitate ridicată:**
    - Combustibilii artificiali sunt extrem de variabili, ceea ce complică înțelegerea, caracterizarea și modelarea comportamentului incendiilor în **interfața natural-construit (WUI)**.
    - Caracteristicile de inflamabilitate ale acestor combustibili sunt foarte eterogene, ceea ce face dificilă estimarea impactului lor în timpul incendiilor.

2. **Surse de pericol asociate:**
    - **Deflagrații sau explozii:**
        - Ex. butelii de gaz care pot provoca explozii devastatoare.
    - **Prăbușiri structurale:**
        - Ex. căderea structurilor care poate duce la prăbușiri și striviri .
    - **Electrocutări:**
        - Ex. cabluri electrice expuse sau deteriorate în timpul incendiilor.

Combustibilii artificiali reprezintă un factor major de complexitate în gestionarea incendiilor din zonele WUI. Pe lângă contribuția lor la intensificarea incendiilor, aceștia cresc riscurile pentru echipele de intervenție și pentru populație prin pericole suplimentare, cum ar fi explozii, prăbușiri sau alte evenimente periculoase. Gestionarea eficientă a acestor riscuri necesită planificare atentă și măsuri de precauție sporite în timpul operațiunilor de intervenție.

4.1.3. Populația

Prezența civililor la locul incendiilor adaugă multiple dificultăți, nu doar din cauza responsabilității sporite de a proteja aceste persoane, ci și din cauza faptului că oamenii sunt adesea stresați, manifestând un comportament determinat de panică. În plus, în rândul populației, pot exista persoane cu nevoi speciale, cum ar fi copii, vârstnici sau persoane cu probleme de sănătate (de ex., afecțiuni cardio-respiratorii), limitări fizice sau psihologice, printre altele. Prin urmare, decizia de evacuare sau adăpostire la fața locului, care va fi abordată în Secțiunea 6.2, necesită o analiză echilibrată, care ia în considerare o varietate de factori.

În ciuda faptului că riscul de incendiu în WUI este adesea asociat cu manifestarea flăcărilor, mecanismul de propagare al incendiilor secundare („*spotting*”, care este descris în Secțiunea 3.2.1) este cel care aduce cele mai multe dificultăți. În studiile efectuate de Ribeiro și colab. (2020) pe 963 de clădiri afectate de incendiile de pădure din Pedrógão Grande din Portugalia în 2017, 61% au fost aprinse de focare secundare, în timp ce 21% au început să ardă din cauza contactului direct cu flacăra. Este de remarcat faptul că acoperișurile (62% din cazuri) și ferestrele (16%) au fost componentele structurale care au arătat cea mai mare vulnerabilitate la incendiu.

În raportul privind incendiile din 15 octombrie 2017, în Portugalia, Viegas și colab. (2019) au descris că, din 140 de unități industriale avariate de incendiile din acea zi, 53% s-au aprins din cauza fenomenului de propagare prin salturi (”*spotting”)*, față de 27% care au fost aprinse prin impactul direct al flăcărilor. În acest caz, deschiderile (29%), pereții (19%) și acoperișurile (17%) au fost componentele structurale care au compromis pentru prima dată integritatea structurii.

În concluzie, WUI prezintă un cadru dinamic și complex care introduce provocări distincte în gestionarea incendiilor de pădure. Coexistența combustibililor naturali și a combustibililor cu origine artificială, inclusiv a diferitelor infrastructuri și echipamente, creează un comportament al incendiului complex, care este dificil de prezis și modelat. Prezența oamenilor complică și mai mult situația, deoarece reacțiile instinctive de panică, protejarea bunurilor cu orice preț sau chiar dorința irațională de a ajuta îngreunează operațiunile de intervenție în caz de incendiu. Incendiile secundare cauzate de fenomenul de „*spotting*” apare ca un mecanism critic în incendiile WUI, contribuind semnificativ la propagarea incendiului și prezentând o amenințare majoră pentru structuri. Studiile arată că propagarea

prin salturi este o cauză majoră a aprinderii clădirilor în timpul incendiilor de vegetație, subliniind susceptibilitatea acoperișurilor și ferestrelor de a declanșa aprinderile. Eterogenitatea și caracteristicile unice ale WUI necesită abordări cuprinzătoare pentru prevenirea și atenuarea eficientă a incendiilor.

4.2 Incendii în zone de mare altitudine

Incendiile la mare altitudine, adică în zona muntoasă, se caracterizează printr-un comportament specific, care poate fi foarte diferit de comportamentul normal în zonele mai plate. Problematica și impactul acestor incendii la mare altitudine, atât asupra populației, cât și asupra ecosistemelor, prezintă, de asemenea, caracteristici foarte specifice (Mayer și colab. 2020).

4.2.1. Comportamentul determinat de topografie

Prima specificitate este modul de propagare a incendiilor. Panta abruptă a versanților și prezența văilor induc brize, adică vânturi locale, care influențează semnificativ modul de propagare a incendiilor. Aceste brize sunt induse de radiația termică care variază de la creste la văi. Este un fenomen diurn, prin urmare comportamentul incendiului, și chiar direcția de propagare, se modifică de-a lungul ciclului diurn (Figura 4).

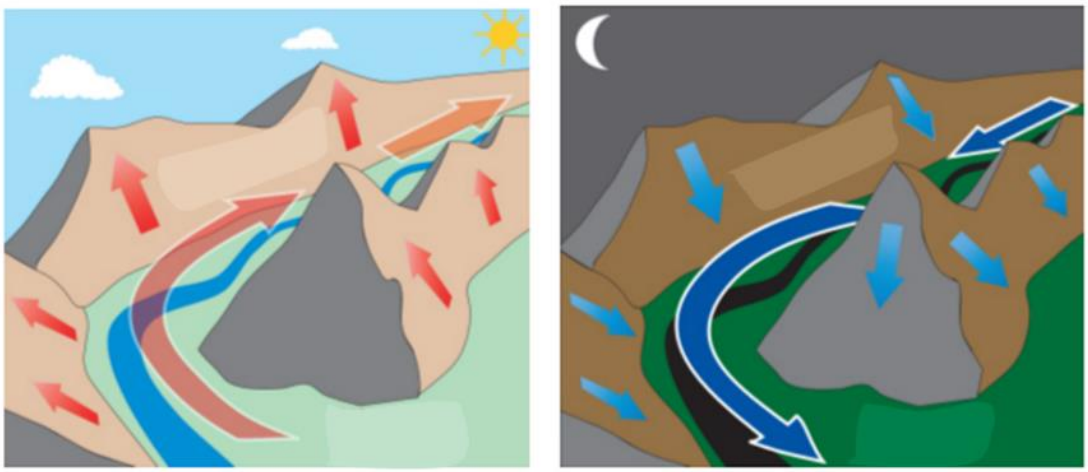


Figura 4: Brizele de pantă și de vale pe parcursul zilei (stânga) și al nopții (dreapta) (sursa: Meteo France)

Când briza de vale crește, de-a lungul după-amiezii, incendiul se deplasează în sus foarte rapid, cu o formă îngustă. Odată ajuns în vârful crestei, propagarea frontală se oprește, iar incendiul începe să se lărgească lent. Această lărgire se intensifică pe parcursul nopții.

4.2.2. Problema de siguranță

Când panta este mai abruptă decât o valoare prag de aproximativ 20°, flacăra se poate „atașa” de pantă (Edgar și colab. 2016). Acest lucru are ca rezultat o escaladare dramatică a vitezei de propagare a incendiului, astfel încât întreaga pantă ar putea fi aprinsă în câteva minute, uneori zeci de secunde. Acest fenomen a condus la producerea a mai multor capcane pentru pompieri, așa cum este descris în capitolele următoare.

4.2.3. Provocări de acces și răspuns

Din cauza topografiei, accesul la incendiile la altitudine mare este în general dificil. Drumurile și potecile sunt înguste și nu pot fi folosite pentru stingere autospecialele de pompieri cu apă. Pentru echipele de intervenție terestre, este necesară uneori parcurgerea unei distanțe de câteva ore de mers pe jos, încărcate cu echipament pentru a ajunge la linia frontului, pornind din cel mai apropiat punct accesibil cu vehiculul motorizat.

Ca urmare, aceste teritorii nu pot fi acoperite de echipe de autospeciale, ca în zonele plane. Responsabilii trebuie să investească mai degrabă în:

- Resurse aeriene, în special elicoptere cu capacitate flexibilă de a arunca apă și de a îmbarca echipe de pompieri cu echipamentul lor.
- Vehicule ușoare cu tracțiune integrală.
- Echipe specializate de pompieri cu:
    - Antrenament solid (inclusiv în ceea ce privește siguranța) și experiență în gestionarea incendiilor,
    - Condiție fizică bună pentru a se deplasa pe teren montan,
    - Abilitatea de a folosi unelte de mână,
    - Capacitatea de a colecta apă din surse îndepărtate,
    - Abilitatea de a utiliza opțiuni de ardere controlată (a se consulta în acest sens Livrabilul 2.2 al proiectului FirEUrisk - *Raport privind sesiunea de antrenament pentru incendierile controlate*),
    - Autonomie și flexibilitate de adaptare la schimbările de comportament ale incendiului.

Echipele specializate descrise mai sus ar putea merge pe jos până la linia frontului sau ar putea fi transportate cu elicoptere atunci când sunt disponibile.

4.2.4 Impactul incendiilor la mare altitudine

În zonele muntoase, chiar și incendiile mici pot avea consecințe devastatoare. Arderea vegetației care stabilizează solul poate induce efecte în cascadă:

- Căderi ale stâncilor
- Alunecări de teren
- Pante predispuse la avalanșă
- Eroziune a solului

Din cauza ciclului lung de dezvoltare al pădurilor la altitudini mari, incendiile de coronament care afectează arboretele modifică pentru o perioadă lungă de timp și funcția de protecție a pădurii asupra solului (Mayer și colab. 2020)

4.3. Incendii în regiunile de latitudine înaltă

Regiunea de latitudine înaltă a Europei (insulele britanice, Norvegia, Suedia, Finlanda și statele baltice) nu atrage de obicei multă atenție în legătură cu incendiile de vegetație. Anii cu secete extinse apar frecvent, dar uneori sunt urmate de mai multe sezoane ploioase între ele (Sjöström & Granström 2024). Majoritatea Suediei, Finlandei și statelor baltice aparține zonelor boreale sau hemiboreale, unde predomină coniferele puternic gospodărite silvicultural, cu mici incluziuni de foioase. Norvegia și nordul Regatului Unit au numeroși munți înalți, în plus față de terenurile ierboase de coastă și pădurile de conifere de coastă, în timp ce restul Regatului Unit este dominat de teren arabil și pajiști (Morton și colab. 2020).

4.3.1 Combustibili și peisaje

Când vremea este suficient de uscată, pădurile boreale au paturi de combustibil foarte inflamabile. Amestecul predominant de pin silvestru și molid favorizează existența unui strat adânc de mușchi, străpuns adesea de arbuști pitici, constituind un combustibil excelent pe vreme uscată. Plantele nevasculare, precum mușchii, schimbă umiditatea direct cu aerul și devin la fel de uscate ca resturile vegetale fine în timpul unei zile uscate de vară. Înainte de debutul silviculturii industriale (mijlocul secolului al XIX $^{-lea}$), pădurile boreale prezentau o suprafață arsă de 100 de ori mai mare decât regimurile moderne de incendiu (Niklasson & Granström 2000). O infrastructură bine stabilită pentru accesibilitatea forestieră și stimulente ridicate pentru protejarea pădurilor productive au condus la o reducere remarcabilă a suprafețelor arse. În schimb, în zonele îndepărtate din America de Nord și Siberia, incendiile ard adesea în zone exclusiv sălbatice cu accesibilitate slabă și prezență umană limitată în ceea ce privește clădirile sau infrastructura.

Pentru Regatul Unit și Norvegia, incendiile ard în cea mai mare parte peisajele deschise dominate de tufărișuri și plante erbacee (Davies și colab. 2013). Incendiile din aceste regiuni sunt concentrate în principal primăvara, înainte ca indicii tradiționali de pericol de incendiu să devină ridicați. Motivul este că faza fenologică latentă a arbuștilor și pajiștilor nordice oferă cantități ample de combustibil uscat ușor care devine rapid inflamabil la umiditate scăzută, în ciuda unui sol saturat cu apă. Acest lucru poate provoca incendii cu mișcare rapidă în perioadele secetoase ocazionale fără zăpadă ale iernii, cum ar fi incendiile norvegiene Lærdal și Frøya din ianuarie 2014 (Log 2016) și mai multe incendii pe insulele de pe coasta Scoției (Fulton 2024). În perioada de vegetație (care coincide cu posibilitatea unui pericol ridicat de incendii forestiere), aceste peisaje sunt mai puțin predispuse la incendiu datorită vegetației vasculare verzi care păstrează un conținut ridicat de umiditate în patul de combustibil.

4.3.2 Demografie

Ca și în majoritatea regiunilor, modelele de aprindere a incendiilor urmează densitatea populației, însă cele mai mari și mai intense incendii din Europa de Nord au loc în zone slab populate (Figura 5). Deși în zonele boreale există o acoperire extinsă cu păduri de conifere, există deficiențe în gestionarea acestui tip de risc, astfel că, în mai multe zone rurale (i) detectarea incendiilor se face după un timp îndelungat, (ii)) se înregistrează un timp îndelungat pentru a localiza și a ajunge la incendiu și (iii) există constrângeri fiscale care au ca rezultat lipsa resurselor și deficitul de personal (Sjöström & Granström 2023a).

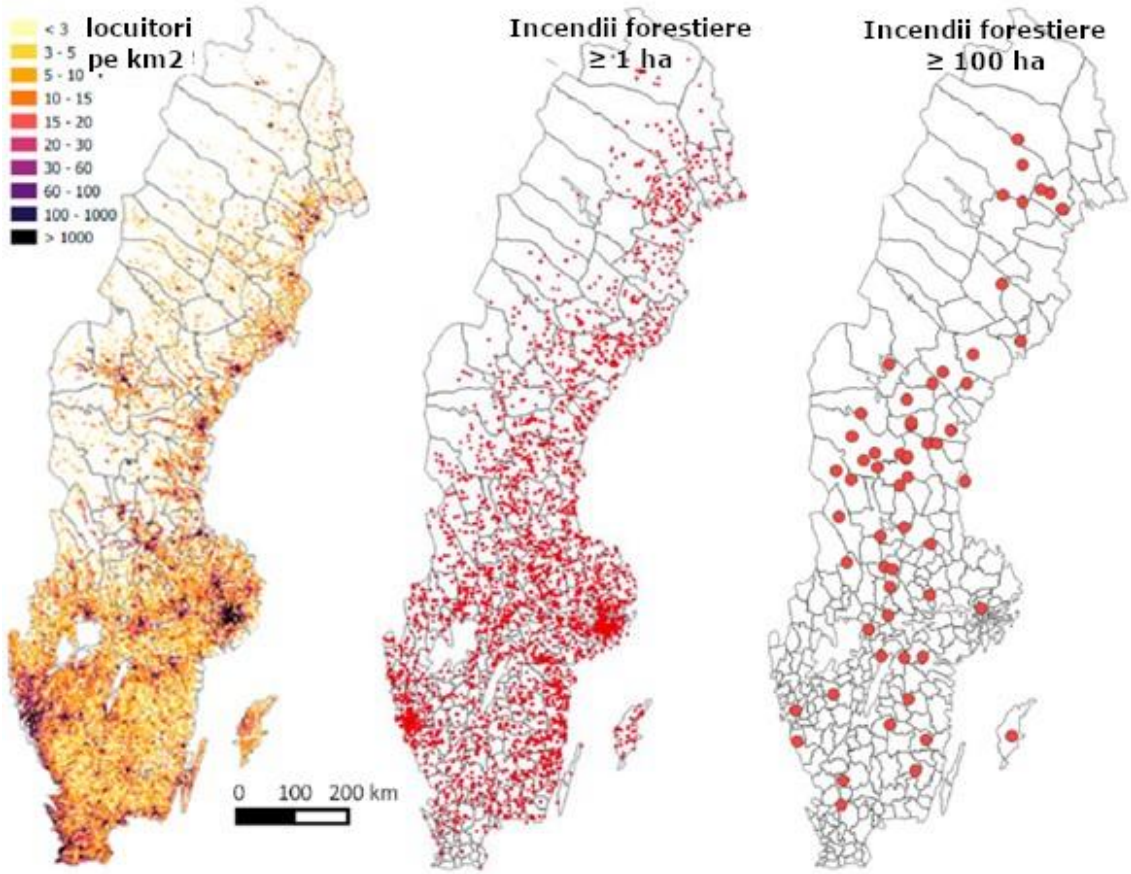


Figura 5. Exemplu din Suedia 1996-2020. Densitatea populației (stânga), apariția incendiilor forestiere (≥1 ha), (mijloc), apariția incendiilor forestiere (≥100 ha), (dreapta) (Sjöström & Granström 2023a).

Există probabilitatea ca incendiul să scape de sub control de la inițial inițierea sa și să crească exponențial odată cu timpul necesar începerii atacului, distanțele mari de parcurs sunt o provocare, amplificată de o populație în scădere începând cu anii 1970. Acest lucru a condus la distanțe mai mari între stațiile de pompieri și timpi de răspuns mai lungi pentru pompieri (în principal angajați cu normă parțială sau voluntari). În urmă cu cincizeci de ani, cunoștințele privind combaterea incendiilor de vegetație erau răspândite în rândul populației, dar acum este o abilitate cunoscută doar de câțiva, ceea ce duce la dificultăți în sezonul de vârf al incendiilor.

4.3.3 Provocări și îmbunătățiri observate în ultimele decenii

- Pe parcursul anilor 1990 și începutul anilor 2000, disponibilitatea resurselor în Europa boreală a scăzut, având ca și consecință o creștere a timpului de răspuns la incendii.
- Potențialul de propagare a flăcărilor în pădurile de producție comercială este foarte mare, dar adesea este subestimat în timpul atacului inițial.
- Lipsa resurselor și curățarea insuficientă a focarelor ascunse după incendiu (care este responsabilitatea proprietarului terenului) au fost doi factori majori pentru incendiile mari din toată Scandinavia în anul 2018.
- Combaterea incendiilor în condiții de frig, întuneric și vânt necesită o pregătire suplimentară față de cea existentă în timpul incendiilor de iarnă din Norvegia din 2014, unde aproape 100 de clădiri (unele aparținând listei patrimoniului mondial UNESCO) au fost distruse. Vremea a oprit utilizarea elicopterelor și folosirea furtunurilor, care s-au înfundat cu gheață din cauza temperaturilor scăzute (Log 2016).

- Sistemul de management al incendiilor din Marea Britanie nu ia în considerare aspectul fenologic și nu poate oferi un pronostic adecvat pentru majoritatea incendiilor.

Ultimii cinci ani au venit cu unele îmbunătățiri.

- Programele finanțate de stat și UE pentru stingerea incendiilor pe cale aeriană (Suedia și Norvegia) au sporit utilizarea avioanelor sau a elicopterelor în stadiile incipiente ale incendiului, spre deosebire de deceniile anterioare când resursele aeriene au fost dislocate numai după eșecul atacului inițial.
- O reorganizare a serviciilor de pompieri într-un sistem de comandă și control mai centralizat facilitează accesul la resurse în zonele profund rurale.
- Alocări mai mari de resurselor de la alarmare măresc rata de succes a lichidării incendiului apropiat de limitele găsite.
- Majoritatea clădirilor ard în incendii de primăvară, de obicei în incendii foarte mici, care se declanșează adeseori pornind direct în afara (sau în interiorul) grădinilor. Potențialul de îmbunătățire a acestor lacune este mare folosind conștientizarea riscurilor și metode simple de curățare.
- Un model de avertizare pentru incendiile de vegetație erbacee din primăvară este operațional în Suedia din 2021 (Sjöström & Granström 2023b).

4.3.4 Factori pentru viitor

- Depopularea continuă a zonelor rurale va agrava dificultățile de recrutare.
- Instrumente simple de gestionare a terenurilor. Acestea includ (i) limitarea plantărilor de *Pinus contorta,* care este mai inflamabil decât *Pinus sylvestris* nativ și (ii) limitarea răririi agresive pre comerciale a arborilor de foioase (predominant mesteacăn sau plop tremurător). Includerea arborilor de foioase în speciile de împădurire pentru a reduce inflamabilitatea stratului de mușchi (Vermina Plathner și colab 2022).
- Instruirea pompierilor după mai multe sezoane cu condiții nefavorabile pentru incendii. Stingerea incendiilor trebuie să fie coordonată și finalizată de la sol și nu din aer. Știind că cunoștințele despre tactici și metode se estompează rapid fără practică, se impun efectuarea de exerciții de stingere la păduri.
- Practicile simple de îngrijire a grădinii cresc în mod semnificativ șansele de supraviețuire a clădirilor în incendiile de pădure din nord: (1) un gazon îngrijit în jurul clădirii, (2) reducerea stocurilor de combustibil în apropierea fațadelor și (3) arbori din specii de foioase plantați în jurul grădinii (Vermina Plathner și colab. 2023).

5. Emisia și dispersia fumului

5.1. Emisia de fum

Fumul degajat de incendiile de pădure conține cantități semnificative de dioxid de carbon (CO2), monoxid de carbon (CO), metan (CH4), oxizi de azot (NOx), amoniac (NH3), particule (PM) (denumite în mod obișnuit particule cu un diametru aerodinamic echivalent mai mic de 2,5 µm sau PM2,5 și particule cu un diametru aerodinamic echivalent mai mic de 10 µm sau PM10), hidrocarburi nemetanice (NMHC) și alți compuși chimici. Figura 6 ilustrează diferiți compuși care compun fumul. Acești compuși pot avea consecințe grave asupra calității aerului local și regional (ex. Valente și colab., 2007; Miranda și colab., 2009; Carvalho și colab., 2011; Martins și colab., 2012; Keywood și colab., 2015; Osswald și colab., 2023), reducând vizibilitatea, contribuind la producerea de smog fotochimic și deteriorarea calității aerului în general, afectând astfel sănătatea umană (ex. Miranda și colab., 2010, 2012; Johnston și colab., 2012; Dennekamp și colab., 2015; Reid și colab., 2016; Haikerwal și colab., 2016, Sebastião și colab., 2019).

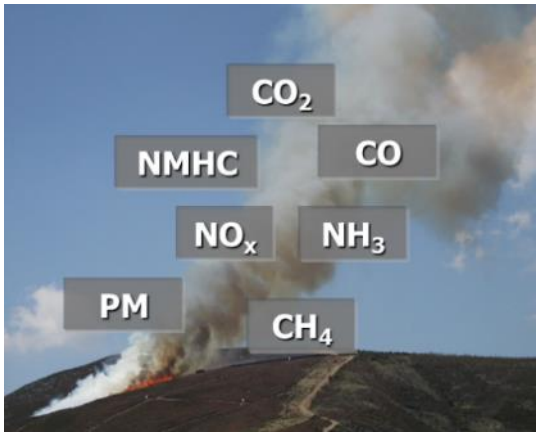


Figura 6 Unii dintre compușii fumului emiși în timpul unui incendiu de pădure. (Ilustrația autorilor)

Este posibil să se estimeze valorile emisiilor atmosferice ale incendiilor de pădure luând în considerare diferiții factori inter-relaționați de care depind: caracteristicile combustibilului, randamentul arderii, faza de ardere, tipul incendiului, starea vremii și localizarea geografică. Estimarea valorii emisiilor incendiilor de pădure presupune și cunoașterea suprafeței incendiate și a duratei incendiului.

Tipul de vegetație și încărcătura de combustibil (sau încărcarea de biomasă) sunt doi dintre cei mai importanți factori pentru estimarea emisiilor de produși ai arderii provenite de la incendiile de pădure. Variațiile în caracteristicile combustibilului pot contribui cu 80% la incertitudinile în estimarea valorii emisiilor din incendiile de pădure (Ottmar și colab., 2009).

Atunci când se estimează valorile emisiilor, ar trebui luate în considerare diferitele faze ale arderii, și anume pre-aprinderea, flacăra sau arderea intensă, mocnirea și arderea incandescentă. Durata sau predominanța diferitelor faze depinde de tipul/amestecul de combustibil, de umiditatea acestuia și de condițiile atmosferice. Potrivit Lobert și Warnatz (1993), în timpul arderii cu flăcări, cei mai abundenți compuși emiși sunt CO2 și vaporii de apă, iar în cantitate mică, NOx, dioxidul de sulf (SO2), azot (N2) și particule cu conținut ridicat de carbon. Cele mai oxidate emisii sunt predominante datorită randamentului ridicat al arderii. În faza de ardere mocnită, predomină emisiile de compuși parțial oxidați sau reduși,

și anume CO și altele, precum CH4, NMHC și hidrocarburi aromatice policiclice (PAH), NH3, compuși cu sulf și particule cu conținut scăzut de carbon. CO este, totuși, principalul compus asociat cu această fază.

Eficiența arderii este, de asemenea, relevantă atunci când se calculează valorile emisiilor provenite din incendii. De obicei, aceasta este definită ca raportul dintre carbonul eliberat sub formă de CO2 și carbonul total din combustibil. Este frecvent utilizată și eficiența modificată, care constă în raportul dintre carbonul eliberat sub formă de CO2 și suma de CO2 și CO. În medii experimentale, de teren sau de laborator, eficiența arderii este exprimată ca fracțiunea de combustibil disponibil care este consumată și depinde direct de tipul de vegetație și de conținutul său de umiditate.

În cele din urmă, factorul de emisie constă în masa de poluant emis per masă de combustibil consumat sau per suprafață arsă. Factorii de emisie variază în funcție de poluant, combustibil și eficiența arderii (și faza de combustie). De exemplu, incendiile care au loc în principal în faza de ardere mocnită pot emite o masă de poluanți (excluzând dioxidul de carbon) de câteva ori mai mare decât un incendiu în care combustibilul este consumat în faza de flacără (Peterson, 1987).

Factorii de emisie pentru condițiile din Europa de Sud au fost selectați (Fernandes și colab., 2022) pe baza unei analize bibliografice, luând în considerare tipurile de utilizare a terenului, precum și valorile selectate de studii anterioare (Miranda 2004; Alves și colab. 2011; Martins și colab. 2012, Van Der Werf și colab. 2017; Vicente și colab. 2017, 2012). Tabelul 3 prezintă factorii de emisie medii (în g/kg combustibil ars, pe bază uscată) pentru poluanții atmosferici relevanți. Toate valorile raportate au fost obținute din incendii forestiere experimentale.

Tabelul 3. Factorii de emisie medii (g/kg combustibil ars, pe bază uscată) ai principalilor poluanți din fum, pe tipuri de vegetație (Fernandes et al., 2002)

Specie	Eucalipt [c, d, e]	Alte răşinoase [b]	Stejar, castan, stejar plută [b]	Salcâm [c, d, e]	Alte foioase [a]	Pinus pinaster [c, d, e]	Pinus pinea[b]
PM10	21	10	13	11	8.3	13	10
PM2.5	19	9	11	10	6.3	11	9
NOx	5	3	3	5	3.11	3	5
CO	170	100	128	232	102	204	91
SO_2	0,8	0,8	0,8	0,8	0,4	0,8	0,8
NH3	0,6	0,6	0,6	0,6	2.17	0,6	0,6
CO2	1408	1497	1393	1561	1585	1398	1487
CH_4	6	6	6	4.7	5,82	6	5

a Van Der Werf et al. (2017)
b Miranda (2004)
c Vicente şi colab. (2012)
d Vicente și colab. (2017)
e Alves et al. (2011)

În prezent, comunitatea științifică depune eforturi considerabile pentru a cuantifica impactul incendiilor de vegetație prin metode de teledetecție, pentru a îmbunătăți estimările valorilor emisiilor (Monteiro și colab. 2013; Ichoku și Ellison 2014; Darmenov și da Silva 2015; Chuvieco și colab. 2016; Van Der Werf și colab. 2017). În plus, puterea radiativă instantanee a incendiului (FRP) este utilizată ca o modalitate de măsură a ratei de emisie a energiei

radiante din incendiu, pentru a determina direct cantitatea de combustibil ars, în special pentru a facilita aplicațiile în timp real (Sofiev și colab. 2009; Kaiser și colab. 2012; Nguyen și colab. 2023).

5.2. Dispersia fumului

Gazele și particulele emise suferă procese de dispersie și transformări chimice în atmosferă pe măsură ce sunt transportate, iar efectele lor pot fi resimțite la distanțe mari de sursă, adică de la incendiu. Deși majoritatea incendiilor sunt limitate la câteva sute de hectare, impacturile lor, fără limite naturale sau administrative, pot fi resimțite și raportate la distanțe considerabile față de limitele fizice ale progresiei incendiului; în funcție de condițiile meteorologice, norii de fum pot rămâne în atmosferă pentru perioade lungi de timp, schimbându-i caracteristicile fizico-chimice.

Calitatea aerului dintr-o anumită regiune, exprimată adesea în termeni de concentrație a poluanților, depinde, pe lângă emisiile acestora, de fenomenele fizice care reglează dinamica atmosferei și anume transportul sau advecția și dispersia; transformările chimice suferite de poluanți (ex. procese fotochimice); mecanismele de eliminare a acestor poluanți din atmosferă (depunere uscată și umedă).

Evaluarea efectelor incendiilor de pădure asupra calității aerului se poate baza pe măsurători și/sau rezultate din modele numerice. În ciuda unor campanii speciale de monitorizare (ex. Miranda și colab. 2005; Valente și colab. 2007; Miranda și colab. 2010), măsurătorile calității aerului nu sunt de obicei efectuate în mod specific pentru situații care implică incendii forestiere, iar datele monitorizate provin în principal din datele disponibile privind calitatea aerului din rețelele de monitorizare existente. Aplicarea modelelor de calitate a aerului pentru evaluarea contribuției incendiilor de pădure la episoadele de poluare a aerului este o tehnică utilizată din ce în ce mai frecvent (ex. Rea și colab. 2016; Turquety și colab. 2020; Osswald și colab. 2023).

Un model numeric de calitate a aerului are ca scop estimarea câmpurilor de concentrație C(x,y,z,t) ale unui poluant atmosferic specific, cauzate de emisia acestuia în atmosferă. Figura 7 prezintă o schemă a unui model de calitate a aerului în relație cu ceea ce intenționează să simuleze. Modelul simulează interacțiunile poluanților în atmosferă și impactul rezultat asupra calității aerului, utilizând informații despre emisii și valori meteorologice, printre alte date.

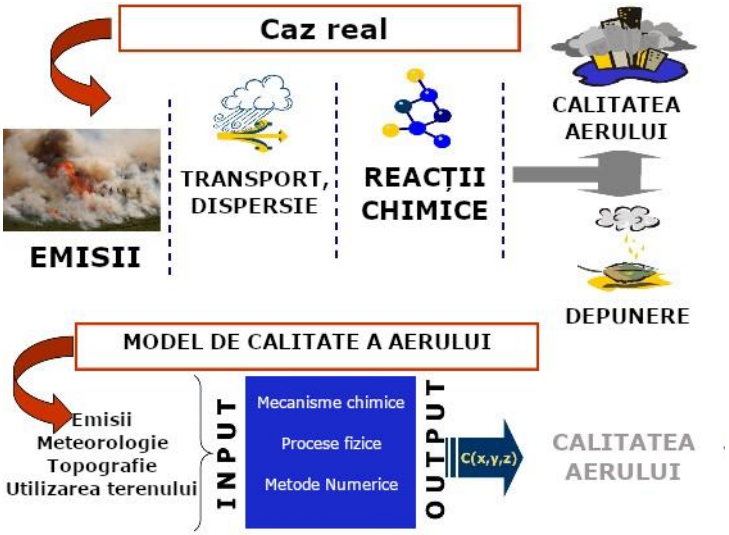


Figura 7 Schema unei abordări de modelare a calității aerului (ilustrarea autorilor).

Există mai multe modele numerice de calitate a aerului, în funcție de scara procesului care urmează să fie analizat și de tipul de abordare sau formulare utilizată. Luând în considerare scara spațială, modelele globale sau planetare se disting de cele macroscalare, mesoscalare și locale sau microscalare. Din punct de vedere temporal, modelele pot fi clasificate ca pe termen scurt sau pe termen lung. Scările spațiale și temporale sunt strâns legate; de exemplu, un model la scară locală este, în general, pe termen scurt.

Un exemplu de model de dispersie la scară locală este DISPERFIRE (Miranda și colab. 1994; Valente și colab. 2007), care se bazează pe o abordare lagrangeană pentru modelarea dispersiei. Acesta a fost aplicat unui incendiu experimental desfășurat în teren și validat cu date monitorizate care au fost obținute explicit în timpul experimentelor. Figura 8 prezintă câmpul de concentrație PM10 estimat de DISPERFIRE pentru arderea unor parcele experimentale.

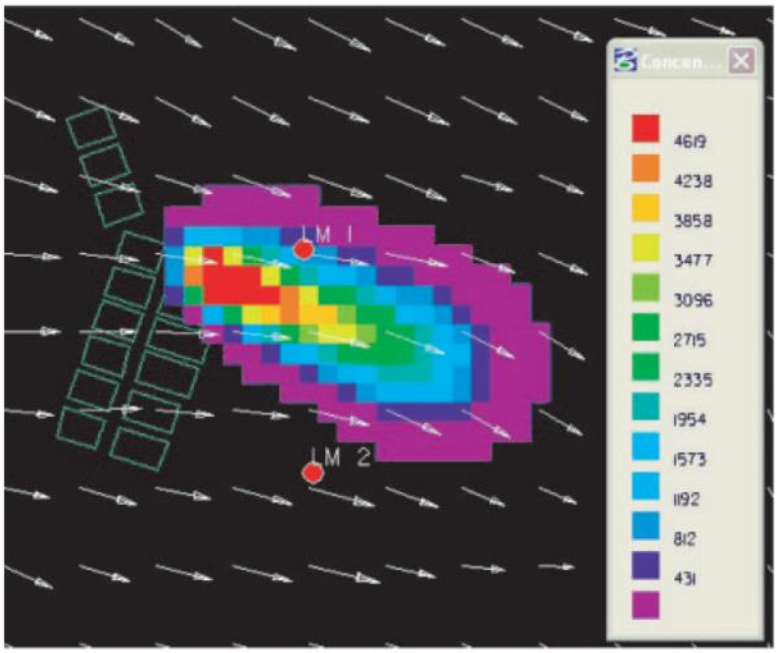


Figura 8. Câmpul de concentrație (µg.m-3) al PM10 simulat printr-un model de dispersie locală (Valente și colab. 2007).

Valorile simulate au fost comparate cu măsurătorile efectuate de echipamente dintr-o autoutilitară de laborator mobil (LM1 în Figura 8), iar intervalul valorilor estimate (431-812 µg/m³) a fost în acord rezonabil cu valoarea monitorizată pentru aceeași perioadă de timp (486 µg/m³).

În concluzie, înțelegerea producerii și dispersiei fumului este esențială pentru protejarea oamenilor, în special a pompierilor și a populațiilor, de efectele acestuia asupra sănătății umane. În prezent, cunoștințele solide, datele și instrumentele disponibile pot ajuta la instruirea părților interesate pentru a anticipa și a reacționa adecvat la emisiile de fum.

6. Metodologii de stingere a incendiilor

Un sondaj realizat prin interviuri privind strategia și tehnicile de stingere (i.e. de localizare și lichidare) a incendiilor de vegetație a fost efectuat de SAFE în aprilie-mai 2023 pentru a dezvolta acest capitol. Sondajul și interviurile s-au concentrat pe următoarele aspecte:

- Atacul inițial pentru a menține incendiile nou-apărute cât în limitele găsite
- Combaterea incendiilor extreme
- Combaterea incendiilor în zona de interfață Natural-Construit (WUI)

Sondajul a primit răspunsuri de la 27 de pompieri din zece țări: Spania, Portugalia, Italia, Croația, Franța, Grecia, Irlanda, Rusia, Germania și Africa de Sud. Interviurile au fost realizate cu patru experți: doi de la Autoritatea Națională pentru Situații de Urgență și Protecție Civilă din Portugalia (informatorii 1 și 2), unul de la Serviciul de Pompieri și Salvare al Departamentului Bouches-du-Rhone din Franța (informatorul 3) și unul de la Serviciul de Incendii Forestiere din Castilla La Mancha, Spania (informatorul 4).

6.1. Strategii și tehnici de stingere a incendiilor

Potrivit sondajului, o majoritate semnificativă de 89% dintre pompieri au declarat că strategiile și tehnicile pe care le-au folosit s-au dovedit eficiente în combaterea incendiilor în timpul fazei de răspuns inițial sau atacului inițial. Tehnicile și strategiile utilizate sunt rezumate în Figura 9, strategia aeriană fiind abordarea cel mai frecvent menționată în sondaje. Aceasta sugerează că majoritatea țărilor europene utilizează această strategie pentru gestionarea incendiilor de pădure.

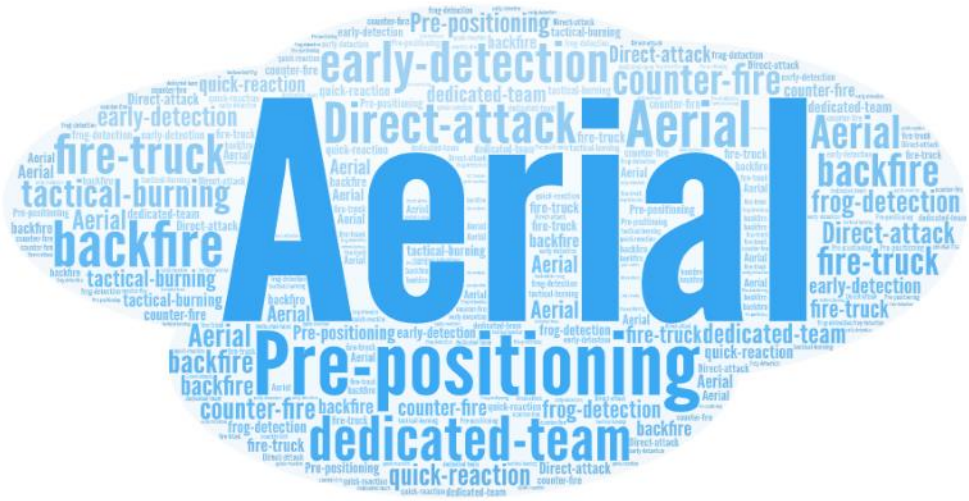


Figura 9. Colecție de cuvinte legate de strategia și tehnicile de stingere a incendiilor utilizate în Europa (ilustrarea autorilor)

Acest capitol își propune să facă diferența între strategia de stingere a incendiilor și tehnica de stingere a incendiilor. O strategie de stingere a incendiilor se referă la o abordare sau un plan amplu dezvoltat pentru combaterea și controlul incendiilor. În schimb, tehnica de stingere a incendiului se referă la o metodă sau abordare specifică utilizată pentru stingerea sau controlul unui incendiu.

6.1.1 Strategia de stingere a incendiilor

A. Strategia aeriană

Strategiile aeriene în stingerea incendiilor implică utilizarea aeronavelor pentru combaterea și controlul incendiilor de pădure. Aceste strategii valorifică capacitățile aeronavelor de a furniza diverse tehnici de stingere a incendiilor din aer, efectuând recunoașteri și sprijinind operațiunile de stingere a incendiilor la sol.

b. Strategia de prepoziționare

Strategia de prepoziționare în managementul incendiilor de pădure implică poziționarea strategică a resurselor și a personalului în zonele cu risc ridicat pentru a îmbunătăți capacitățile de răspuns și a îmbunătăți eforturile de stingere a incendiilor. Obiectivul este de a minimiza timpul de răspuns și de a crește eficiența în limitarea și stingerea incendiilor de vegetație.

Această strategie este folosită în mai multe țări, inclusiv în Franța, așa cum a fost împărtășit într-un interviu cu un pompier din departamentul Bouches du Rhone.

„Folosim forțe terestre de prepoziționare în punctele speciale care sunt aproape de drumurile principale și aproape de accesul în pădure. Dacă detectăm un incendiu undeva, trimitem rapid un număr mare de oameni și camioane” (Informatorul-3).

c. Strategia de utilizarea echipelor de *helitack* /echipaje dedicate

O echipă *helitack* este o echipă specializată de pompieri transportată cu elicopterul în zone izolate pentru a combate incendiile de pădure. Aceștia sunt extrem de antrenați și calificați în tehnici de stingere a incendiilor, inclusiv coborârea în rapel din elicoptere, construirea de linii de apărare împotriva incendiilor și utilizarea uneltelor manuale pentru stingerea flăcărilor. Echipele *helitack* sunt adesea primii respondenți la incendii în zone greu accesibile și joacă un rol esențial în limitarea și lichidarea incendiilor înainte ca acestea să se extindă. Acestea lucrează în coordonare cu alte echipe de pompieri de la sol și din aer pentru a asigura siguranța echipei și a populației, precum și pentru a proteja proprietățile și resursele naturale.

6.1.2 Tehnica de stingere a incendiilor

A. **Atacul direct**

Atacul direct este o abordare de stingere a incendiilor care implică personalul care combate în mod agresiv incendiul din apropierea frontului de foc. Această metodă poate fi efectuată de către echipaje care utilizează unelte de mână sau de către echipaje echipate cu un sistem de refulare a apei, sau o combinație a ambelor. Obiectivul atacului direct este stingerea directă a incendiului prin refularea apei sau îndepărtarea fizică a combustibilului prin folosirea unor unelte, cu scopul de a prelua rapid controlul și de a preveni propagarea în continuare a incendiului.

- Atacul direct frontal: presupune eforturi de stingere a incendiului direct în față, la partea frontală a incendiului, adică cel mai activ front de incendiu;
- Atacul direct din spate: implică atacarea incendiului din spate și lucrul de-a lungul flancurilor către partea frontală a incendiului;
- Atacul direct pe flanc: implică atacarea flancurilor incendiului și lucrul în jurul părții frontale și a părții din spate a acestuia.

B. **Atacul indirect**

Această metodă presupune aplicarea unor tactici de stingere care au loc la distanță de marginea incendiului, fie prin utilizarea unor benzi izolatoare pentru a limita extinderea incendiului, fie prin utilizarea proactivă a contrafocului ca instrument de stingere.

- **Utilizarea benzilor izolatoare** (liniilor de control): Benzile izolatoare sunt bariere construite sau naturale, inclusiv margini de front tratate, care sunt folosite pentru a controla un incendiu. Ele pot fi construite manual, mecanic (prin îndepărtarea combustibilului și mineralizare) sau prin aplicarea de apă sau retardanți (cunoscute ca linii umede).
- **Atacul paralel:** Atacul paralel este un tip specific de atac indirect în care liniile de control sunt create de-a lungul flancurilor incendiului spre și în jurul părții frontale. Această metodă de stingere este, de obicei, cea mai eficientă atunci când se utilizează vehicule adecvate, cum ar fi tractoare cu cositoare sau tocătoare ori buldozere.
- **Ardere controlată/Contrafocul**
    - **Arderea defensivă** - aprinderea unui foc controlat pentru a elimina combustibilul în fața unui incendiu în avans și stingerea focului controlat înainte de sosirea incendiului; această metodă se aplică în mod obișnuit la o anumită distanță de frontul de incendiu și trebuie planificată în timp util
    - **Arderea ofensivă -** aprinderea unui foc controlat și permiterea acestuia să ardă spre frontul de incendiu care se apropie; această tehnică combină avantajul de a elimina combustibilul și de a crea un flux termic care este orientat spre frontul de incendiu; totuși, necesită o evaluare atentă și echipe specializate.

C. **Atacul aerian**

Aeronavele pot fi desfășurate la incendii pentru a utiliza metode de atac direct și indirect.

- **Atac aerian direct:** implică avioane care aruncă apă sau substanțe retardante direct pe zona care arde.
- **Atac aerian indirect:** implică avioane care aruncă apă sau substanțe retardante în fața zonei de incendiu pentru a forma linii de control sau pentru a întări liniile de control existente.

6.2. Combaterea incendiilor în zona de interfață natural-construit (WUI)

Așa cum este descris în capitolul 4, incendiile din zona de interfață natural-construit (WUI) reprezintă un tip complex de incendiu care apare la limita dintre zonele de vegetație și comunitățile umane. Aceste tipuri de incendii sunt deosebit de periculoase și greu de combătut, deoarece implică adesea un amestec de vegetație, structuri și vieți omenești. Europa de Sud este o regiune predispusă la incendii, unde incendiile extreme au deseori consecințe dezastruoase asupra structurilor și oamenilor. Combaterea incendiilor în zona WUI este extrem de dificilă, așa cum afirmă un pompier din Franța:

„În regiunea noastră, dificultatea constă în faptul că avem multe case în diferite zone și nu putem apăra fiecare casă. Nu putem pune o mașină de pompieri în fața fiecărei case, deoarece sunt prea multe, deci este dificil dacă vegetația forestieră este foarte aproape de casă" (Informator-3).

Obiectivul combaterii incendiilor în WUI este de a opri incendiul înainte să ajungă la clădire, în esență, la marginea exterioară a curții sau acolo unde începe vegetația sălbatică (Ganteaume și colab. 2021).

6.2.1. Stingerea incendiilor în WUI

Tabelul 4 prezintă modul în care tehnicile de stingere a incendiilor descrise mai sus pot fi utilizate pentru a combate incendiile în WUI:

Tabelul 4: potențialul și limitele tehnicilor de stingere a incendiilor în WUI

Nu	Tehnică	Acțiune
1	Atac aerian	Retardantul și apa nu pot fi aruncate direct în zonă din cauza problemelor de siguranță și a prezenței oamenilor, proprietăților și liniilor electrice. În schimb, atacurile aeriene sunt efectuate în afara WUI pentru a crea o barieră sau o linie de izolare înainte ca incendiul să ajungă în zonele populate. Această abordare proactivă maximizează siguranța în timp ce stinge eficient incendiul și protejează WUI.
2	Atacul direct	Pentru a proteja structurile în zona WUI, pompierii folosesc tactici de apărare a structurilor, care devin ofensive atunci când resursele direcționează frontul incendiului către un punct final dorit. Dacă pompierii pot ataca un incendiu în siguranță în mod direct, aceștia pot fi trimiși în acțiune cu unelte manuale pentru a îndepărta combustibilul și a înăbuși focul, cu linii de apă pentru a reduce flăcările și cu alte echipamente de stingere. Atacul direct poate fi în mod inerent periculos din cauza naturii dinamice a incendiilor din zona WUI. Atacul direct ar trebui, de asemenea, efectuat imediat atunci când pompierii identifică un focar izolat.
3	Atacul indirect	Crearea unui obstacol la incendiu și efectuarea unui contrafoc înaintea incendiului poate fi o tactică eficientă pentru a proteja WUI; cu toate acestea, înainte de a iniția un contrafoc, este necesară o atenție specială pentru a se asigura că efectuarea acestuia este sigură și fezabilă, având în vedere circumstanțele.

De cele mai multe ori, utilizarea echipamentului greu pentru stingerea incendiilor sau în alte scopuri nu este fezabilă sau practică. Acest lucru se poate datora diverselor motive, cum ar fi spațiu limitat, teren accidentat sau preocupări legate de deteriorarea infrastructurii sau a proprietății. Ca rezultat, respondenții trebuie să utilizeze echipamente alternative adecvate pentru WUI. Aceste instrumente și vehicule specializate sunt proiectate pentru a fi agile, manevrabile și eficiente în combaterea incendiilor din zonele WUI. Iată câteva dintre echipamentele mobile și tactice de stingere a incendiilor care pot fi folosite pentru a lupta împotriva incendiilor în WUI:

- **Motopompe portabile** : Aceste motopompe ușoare sunt proiectate pentru a fi ușor transportate și operate în locații îndepărtate. Acestea pot fi folosite pentru a pompa apa din sursele de apă din apropiere, cum ar fi piscine, iazuri, lacuri sau rezervoare portabile și pentru a alimenta cu apă echipajele de stingere a incendiilor.
- **Rucsaci de stins incendii** : rucsacii cu pulverizatoare sunt dispozitive portabile pe care pompierii le pot purta pe spate, permițându-le să se deplaseze rapid pe teren accidentat în timp ce aplică apă sau agent ignifug pentru a stinge flăcările. Sunt deosebit de utile pentru accesarea zonelor unde echipamentele mai mari nu pot ajunge.

- **Vehicule specializate ușoare**: vehiculele specializate, cum ar fi autospeciale de stingere de capacitate mică sau alte autospeciale cu capabilități *off-road*, potențial echipate cu accesorii de stingere a incendiilor, sunt proiectate pentru a se deplasa pe drumuri înguste, terenuri accidentate și zone WUI. Aceste vehicule transportă rezervoare mici de apă, motopompe, furtunuri și alte echipamente de stingere a incendiilor, permițând echipajelor să răspundă și să stingă incendiile de vegetație în medii dificile.

6.2.2. Protecția populației și a clădirilor

Această preocupare majoră este investigată pe larg în cadrul unei alte activități a proiectului FirEURisk. Rezultatele vor fi documentate în Livrabilul 2.8 „Ghid pentru reducerea vulnerabilității comunităților la incendii extreme și incendii în zona de interfață natural-construit (WUI)".

Practic, există 2 opțiuni principale:

- **Evacuarea**: Uneori, evacuarea este cea mai bună opțiune, mai ales în cazul tipurilor vulnerabile de zone WUI, cum ar fi campingurile sau locuințele ușoare din materiale combustibile. Totuși, aceasta trebuie planificată și organizată suficient de devreme, înainte ca incendiul să se apropie de zona WUI, deoarece poate dura mult timp. Numărul, disponibilitatea și siguranța căilor de evacuare sunt, de asemenea, aspecte cruciale de luat în considerare înainte de a decide evacuarea.
- **Adăpostirea** la locul incidentului: În majoritatea țărilor europene, clădirile sunt construite din materiale neinflamabile, care oferă o protecție mai bună în comparație cu evacuarea. Totuși, este posibil să fie necesară o pregătire prealabilă pentru a se asigura că adăpostul nu prezintă fragilitate și că oamenii pot rămâne în interior fără a intra în panică.

6.3. Combaterea incendiilor extreme

După cum este detaliat în capitolul 3, Combaterea incendiilor extreme este foarte dificilă în comparație cu combaterea incendiilor obișnuite. Incendiile extreme sunt caracterizate de căldură intensă, propagare rapidă și comportament imprevizibil, care cresc semnificativ riscurile pentru siguranța pompierilor și fac dificilă estimarea **dinamicii incendiului. Metodele tradiționale de stingere a incendiilor care implică în primul rând atacarea directă a flăcărilor pot să nu fie la fel de eficiente din cauza căldurii intense și a comportamentului imprevizibil al incendiului, ceea ce face ca localizarea și controlul acestuia să fie mai dificile.**

Pompierii intervievați au subliniat că:

a) combinația de tactici, inclusiv combinarea utilajelor grele cu stingerea tactică a incendiilor, este crucială în combaterea incendiilor extreme.

b) este necesar să se schimbe mentalitatea de la metodele de atac direct la atacul indirect.

În sondajul nostru, s-a constatat că majoritatea respondenților (89%) au considerat că strategiile lor actuale sunt eficiente în atacurile inițiale, dar această eficiență nu s-a extins la strategiile utilizate în cazul incendiilor extreme. O parte semnificativă (26%) le-a considerat ineficiente sau foarte ineficiente, în timp ce doar 30% le-au considerat eficiente. În plus, majoritatea respondenților (40%) au rămas neutri în privința eficienței acestor strategii. Aceste rezultate subliniază necesitatea elaborării unor recomandări bazate pe strategii fundamentate științific, pe care pompierii le pot folosi pentru a combate eficient incendiile extreme.

Trăgând concluzii din sondaj, interviuri și analiza literaturii de specialitate, Tabelul 5 rezumă tehnicile care pot fi utilizate pentru a aborda comportamentele incendiilor extreme descrise mai sus.

Tabelul 5: Punctele forte și limitările diferitelor tehnici aplicate în fața comportamentului extrem al incendiilor

Comportament extrem al incendiului	**Tehnica de stingere a incendiilor**			**Note**
	Atac direct	**Atac indirect**	**Atac aerian**	
Incendii izolate	Foarte recomandat Stingeți incendiile izolate cât mai curând posibil	Efectuați un atac indirect atunci când atacul inițial este eșuat și incendiu scapă de sub control	Când echipa aeriană vede incendiul la fața locului, este foarte recomandat atacul direct de sus	Prioritizează atacul inițial
Incendiile de coronament	Nerecomandat Atacul direct al frontului de incendiu este imposibil și periculos	Se recomandă crearea de benzi izolatoare și contrafocul	Se recomandă atacul aerian direct și indirect	Concentrați-vă pe controlul flancurilor incendiului, mai degrabă decât să atacați direct frontul
Incendii eruptive	Nu se recomandă	Se recomandă arderea controlată sau tactică	Pot fi folosite atacuri aeriene, dar sunt dificile manevrele în anumite locuri precum canioanele	
Incendii de joncțiune	Recomandat înainte ca incendiile să realizeze joncțiunea, cu prudență	Realizarea debaraje de oprire sau benzi izolatoare (linii de control) în jurul zonei de joncțiune	Foarte recomandat pentru a susține operațiunile la sol și pentru a proteja joncțiunea	
Incendii devastatoare	Recomandat înainte ca intensitatea incendiului să fie prea mare, să se rămână într-o zonă sigură	Se recomandă arderea controlată	Se recomandă atacul aerian direct și indirect cu apă și retardant	Poate fi necesară evacuarea preventivă
Vârtejurile de foc	Nu se recomandă	Nu se recomandă	Nu se recomandă	Așteptați și vedeți până când fenomenul se oprește, deoarece vârtejurile de foc se manifestă de obicei pentru o perioadă scurtă

Următorul capitol oferă informații detaliate care justifică opțiunile enumerate în Tabelul 5

7. Siguranța la incendiu

7.1. Starea de sănătate și performanța pe diverse paliere

În prezent, pompierii răspund la incendii de pădure din ce în ce mai intense și periculoase, agravate de schimbările climatice. Prin eforturile lor considerabile, ei previn pagube masive și pierderi umane dramatice. Totuși, aceștia sunt expuși la condiții meteorologice tot mai dificile și la condiții fiziologice extreme atunci când luptă împotriva incendiilor extreme, ceea ce le poate afecta performanța generală, starea de sănătate și bunăstarea. De fapt, o stare bună de sănătate și o capacitate fizică adecvată pot îmbunătăți capacitatea lor generală de intervenție și siguranța, mai ales în condiții critice. Prin urmare, este important să se integreze strategii de antrenament axate pe sănătate în programele de pregătire și în exercițiile curente pentru pompieri. Mai jos sunt prezentate pe scurt câteva dintre aspectele esențiale care ar trebui incluse în programele de pregătire pentru combaterea incendiilor extreme:

- Stare de sănătate corespunzătoare și fiziologie îmbunătățită pentru a stimula performanța:

    - Sănătate cardiovasculară:

Sistemul cardiovascular și condiția fizică sunt de o importanță crucială pentru pompieri, având în vedere capacitatea de a îndeplini sarcini solicitante în medii dificile. Fiziologia cardiovasculară îmbunătățită și capacitatea de anduranță ar trebui promovate și accentuate. Creșterea capacității cardiovasculare și a anduranței poate fi realizată prin exerciții aerobice, incluzând aici și ciclismul, alergarea și înotul. În plus, este important să se pună accent pe obiceiurile sănătoase pentru inimă, care pot include nutriția adecvată, evitarea expunerii la fum și tutun, gestionarea stresului și prevenirea acumulării de țesut adipos.

    - Evaluare fizică:

Pentru a asigura eficiența și bunăstarea pompierilor, este esențial să se stabilească un plan personalizat de îmbunătățire a capacităților fizice ale acestora, care să îmbunătățească randamentul general, dar, cel mai important, să prevină și rănirile sau riscul crescut de evenimente cardiovasculare. În primul rând, ar trebui efectuată o evaluare fizică completă pentru a înțelege starea de bază a sănătății și a capacităților fizice, de exemplu, urmând parametrii standard ai stării cardiovasculare și anduranței, precum și forța musculară și compoziția corporală.

    - Condiție fizică:

După evaluarea stării individuale de sănătate, trebuie implementate programe de antrenament personalizate și sesiuni de exerciții, care să vizeze îmbunătățirea condiției fizice pe o bază regulată, adaptată capacităților și nevoilor speciale ale fiecăruia. Exercițiile aerobice, cum ar fi alergarea, antrenamentul cu greutăți, antrenamentele de circuit și mișcările funcționale, pot fi integrate pentru a răspunde cerințelor specifice. Principalele funcții și sarcini ale pompierilor în timpul intervențiilor ar trebui, de asemenea, luate în considerare, imitând situații reale pentru a potența coordonarea musculară și performanța specifică sarcinilor.

În concluzie, antrenamentele pentru pompieri trebuie să includă sesiuni și programe dedicate, care să introducă și să exploreze aceste aspecte fizice, pentru a sprijini

îmbunătățirea rezultatelor fizice în rândul forțelor de intervenție. Pompierii mai bine pregătiți vor acumula mai puțin acid lactic în mușchi, evitând astfel epuizarea musculară și, în final, extenuarea sau chiar colapsul.

- Sănătate mentală și reziliență, calitatea somnului și gestionarea stresului

Pompierii sunt de obicei expuși la situații periculoase și stresante care le pot afecta în mod semnificativ bunăstarea mentală, procesele de luare a deciziilor și performanța generală. Aceste aspecte sunt de cea mai mare importanță pentru aspectele legate de siguranță și pentru conștientizarea și acțiunile legate de siguranță. În acest sens, antrenamentele pentru pompieri trebuie să includă potențarea unor abilități mai bune de conducere (*leadership*), rezistență mentală și management al stresului. Calitatea somnului este, de asemenea, un factor cu impact semnificativ asupra acestor aspecte, și este esențial să se sublinieze și să se întărească strategiile și practicile pentru optimizarea igienei și sănătății somnului. Gestionarea perturbărilor de somn asociate muncii în ture ar trebui, de asemenea, să fie luată în considerare în cadrul echipelor și forțelor care urmează să fie desfășurate.

- Nutriție și hidratare:

Nutriția corespunzătoare și hidratarea adecvată sunt aspecte cheie pentru menținerea performanței optime și a homeostaziei fiziologice. Programele de antrenament ar trebui să includă, de asemenea, informații despre planificarea unor diete și a unor mese echilibrate înainte, în timpul și după sarcini de lucru intense. Dietele sănătoase, îmbogățite cu antioxidanți și alte componente detoxifiante, pot fi de mare importanță pentru a reduce efectele intervențiilor intense și totodată pentru a sprijini recuperarea în urma expunerii crescute la fum.

Același lucru este valabil și pentru hidratare, care ar trebui să fie susținută înainte și în timpul antrenamentelor intense, pentru a menține osmoreglarea și electroliții esențiali, dar și după munca efectivă, pentru a restabili nivelurile corecte și a accelera recuperarea. Instruirea pe acest subiect ar trebui să includă, de asemenea, concepte despre hidratare, tipurile și periodicitatea consumului de apă sau fluide specifice de hidratare.

Prin promovarea eficientă a acestor obiceiuri sănătoase, se pot reduce riscurile unor evenimente neplăcute și a oboselii excesive, potențând reziliența și o performanță mai bună în perioadele de activitate intensă.

7.2. Impactul fumului asupra vizibilității și sănătății

Inhalarea acută de fum este un sindrom complex și cu potențial fatal care implică un răspuns multisistemic (nu doar respirator) legat de expunerea la o gamă extinsă de agenți chimici și particule rezultate din arderea mai multor materiale. Poate apărea în medii deschise sau închise și poate fi asociată sau nu cu arsuri ale pielii (Gill și colab., 2015; Walker și colab., 2015; Herndon, 2018).

7.2.1. Etiopatogenie

Riscurile toxice asociate incendiilor și incapacitatea victimelor de a părăsi zonele atmosferice periculoase pot fi analizate sub trei aspecte principale: (1) expunerea la căldură, (2) fum și (3) produsele de combustie. Toxicologia specifică a principalelor emisii degajate de incendii a fost studiată exhaustiv, depinzând de mediul în care are loc incendiul (exterior sau interior), și evidențiază numeroase substanțe cu acțiune asfixiantă (ex., monoxid de carbon,

acid cianhidric), iritantă (ex., acid bromhidric, acid clorhidric, acid fluorhidric, dioxid de sulf și substanțe organo-iritante, precum acetaldehida, acroleina, benzenul, crotonaldehida, formaldehida, fenolul, toluenul), gaze cu efect de seră (ex., dioxid de carbon, metan), dar și nivelurile foarte scăzute de oxigen prezente în zonele de incendiu, care pot reprezenta un pericol (Gill și colab., 2015; Herndon, 2018).

Daunele termice provocate de expunerea la căldură sunt în principal localizate la nivelul tractului respirator superior și pot induce edem, cu riscurile asociate, în special pentru glotă și corzile vocale (Walker și colab., 2015).

Substanțele chimice mai solubile în apă (ex., amoniacul, dioxidul de sulf) afectează rapid căile respiratorii superioare. Agenții mai puțin solubili în apă (ex., fosgen, dioxid de azot) nu produc iritație imediată și sunt inhalați mai profund, deoarece nu provoacă la fel de multă tuse, ceea ce duce la leziuni alveolare, în special la edem pulmonar non-cardiogenic, care poate apărea târziu și necesită o supraveghere prelungită (Stec, 2010; Demling, 2008).

Dioxidul de carbon și monoxidul de carbon, care sunt printre principalele componente ale fumului, sunt responsabile de o scădere a concentrației de oxigen ambiental între 5% și 10%. Monoxidul de carbon și acidul cianhidric blochează transferul alveolo-capilar de oxigen, ducând la hipoxemie severă și potențial fatală și sunt considerate gaze asfixiante cu efect sistemic. Monoxidul de carbon este un gaz incolor, inodor și non-iritant, produs prin combustii incomplete, în principal ale hidrocarburilor, surselor de încălzire prin foc și distilatelor de petrol. Afinitatea sa pentru hemoglobină este de peste 200 de ori mai mare decât pentru oxigen, provocând o deplasare a curbei de disociere a hemoglobinei spre stânga, formarea de radicali liberi de oxigen, peroxidarea lipidelor și întreruperea respirației celulare și a metabolismului mitocondrial. Creierul și miocardul sunt printre cele mai afectate structuri (Walker colab., 2015; Dries colab., 2013; Stec, 2010; Demling, 2008; Haponik, 1990; Lafferty KA, 2018).

Monoxidul de carbon a fost implicat în mai multe decese cauzate de inhalarea de fum decât orice alt compus singular. Methemoglobinemia poate apărea, de asemenea, în contextul inhalării acute de fum (în principal din cauza inhalării de fum provenit din arderea materialelor plastice și a altor materiale sintetice). Această formă oxidată a hemoglobinei nu are capacitatea de a transporta oxigenul, provocând cianoză; nivelurile de peste 70% sunt de obicei fatale. Inhalarea funinginii poate acționa și ca un vehicul pentru transportul gazelor și al diverselor toxine în tractul respirator inferior, unde acestea se pot dizolva și forma substanțe acide și alcaline care provoacă daune semnificative structurilor bronșice și alveolare (Lafferty, 2018).

7.2.2. Diagnosticare

Tablourile clinice asociate cu inhalarea acută de fum apar în principal prin expunerea la căldură directă sau prin convecție, inhalarea de gaze asfixiante și expunerea la iritanți neurologici și respiratori (*ISBI Practice Guidelines for Burn Care*, 2016). În general, sunt recunoscute patru faze în urma inhalării acute de fum:

(1) Insuficiență respiratorie acută - apare la 1 până la 12 ore după expunere și este cauzată de bronhospasm, edem laringian și bronhoree.

(2) Edem pulmonar noncardiogen (sindrom de insuficiență respiratorie acută) - la 6 până la 72 de ore după expunere și rezultă din creșterea permeabilității capilare, uneori simulând edem cardiogen acut al plămânului.

(3) Conflict în spațiul cervical - la 60 până la 120 de ore după expunere, asociat cu formarea de escară cervicală la pacienții cu arsuri circulare la nivelul gâtului.

(4) Debut potențial al pneumoniei - 72 de ore după expunere, implicând în principal *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* sau gram-negativi.

Istoricul clinic și examenul obiectiv

Prezentarea clinică și riscurile potențiale ale inhalării de fum depind în mare măsură de durata inhalării, de tipul și mediul de expunere, de substanțele arse (și anume dacă incendiul a avut loc în interior sau în aer liber), de arsura concomitentă a pielii și de starea generală și de sănătatea anterioară a victimei.

Victima prezintă diferite grade de dispnee, care poate fi asociată cu disfonie, răgușeală, stridor și/sau bronhospasm (Walker și colab., 2015). Tusea este un simptom foarte frecvent al inhalării de substanțe iritante. Poate exista și expectorație carbonacee.

Alterarea stării mentale se poate produce cu mai multe dintre substanțele menționate mai sus, ceea ce contribuie la severitatea tablourilor clinice și la incapacitatea progresivă a victimelor de a scăpa . În unele circumstanțe pot apărea episoade convulsive. Alte simptome, cu inhalații minore, includ dureri de cap, anxietate, agitație, convulsii, diaforeza și vertij.

Hipotensiunea arterială poate apărea din vasodilatație periferică, depresie miocardică, aritmie sau modificări ale componentelor apei din corp.

În situațiile în care se formează carboxihemoglobină (inhalarea de monoxid de carbon) și/sau methemoglobină, pulsoximetria poate da citiri eronate. De exemplu, absorbția colorimetrică a carboxihemoglobinei este identică cu cea a oxihemoglobinei, iar oximetrele nu detectează cu precizie diferențele dintre aceste două forme (Rehberg și colab., 2009).

Manifestările clinice corespunzătoare nivelurilor de carboxihemoglobină din sânge sunt următoarele (Lafferty, 2018; Rorison & McPherson, 1992):

0-10% - de obicei fără simptome;
10-20% - cefalee ușoară, dispnee;
20-30% - cefalee pulsatilă, tulburări de concentrare;
30-40% - cefalee severă, gândire confuză;
40-50% - confuzie, letargie, sincopă;
50-60% - insuficienta respiratorie, convulsii;
> 70% - comă, deces.

Evaluare analitică

Evaluarea gazelor sanguine arteriale poate oferi indicații foarte utile, însă valorile acestora depind mult de substanțele inhalate. Astfel, în caz de otrăvire cu fumuri care conțin asfixianți sistemici precum acidul cianhidric și cianura, poate apărea acidoza metabolică, cu niveluri crescute de lactați — în acest caz specific, hipoxemia apare paradoxal mai târziu. În laboratoarele dotate cu tehnologie adecvată, se pot măsura carboxihemoglobina și methemoglobina (Dries și colab., 2013).

Tehnicile cromatografice sau spectrofotometrice pot efectua cuantificarea monoxidului de carbon în sânge. Totuși, echipamentele portabile permit monitorizarea nivelului acestuia în aerul expirat, precum și evaluarea estimativă a procentului de carboxihemoglobină (Rehberg și colab., 2009).

Alte examinări

Radiologia toracică poate fi utilă pentru evaluarea modificărilor pulmonare ulterioare, cum ar fi edemul pulmonar non-cardiogenic, atelectazia sau infiltrațiile pulmonare. Totuși,

este de menționat că, în stadiile incipiente, imaginea radiologică poate fi complet normală după inhalarea acută de fum (Adams, 2013).

În anumite circumstanțe, care trebuie evaluate individual, este uneori necesară vizualizarea directă a căilor respiratorii, cum ar fi prin laringoscopie sau bronhoscopie flexibilă. În multe cazuri, se poate produce o progresie rapidă spre obstrucție completă a căilor respiratorii, chiar și la pacienți inițial cu simptome ușoare. Aceste situații pot necesita intubație traheală precoce, iar monitorizarea atentă este recomandată pentru o perioadă extinsă, deoarece edemul asociat apare uneori la câteva ore după expunere. Bronhoscopia flexibilă poate confirma prezența și amploarea leziunii de inhalare. Cele mai frecvente constatări sunt prezența funinginii în căile respiratorii, edemul și eritemul mucoasei, hemoragia și ulcerațiile.

Endorf și Gamelli (2007) au propus criteriile bronhoscopice pentru a grada leziunile provocate de inhalarea de compuși toxici *(Abbreviated Injury Score),* care sunt folosite în mod curent:

- Gradul 0 (fără leziuni): absența depozitelor carbonacee, eritem, edem, bronhoree sau obstrucție.
- Gradul 1 (leziune ușoară): zone minore sau izolate de eritem, depozite carbonacee în bronhiile proximale sau distale (oricare sau combinație).
- Gradul 2 (leziune moderată): eritem moderat, depozite carbonacee, bronhoree, cu sau fără compromiterea bronhiilor (oricare sau combinație).
- Gradul 3 (leziune severă): inflamație severă cu friabilitate, depozite carbonacee abundente, bronhoree, obstrucție bronșică (oricare sau combinație).
- Gradul 4 (leziune masivă): evidență de descuamare a mucoasei, necroză, obliterare endoluminală (oricare sau combinație).

7.2.3. Tratament

Victima trebuie îndepărtată rapid din atmosfera periculoasă. Prioritatea imediată este asigurarea căilor respiratorii, a respirației și a circulației (ABC - căi respiratorii, respirație, circulație - *airway, breathing, circulation*). Intubarea traheală precoce și chiar ventilația mecanică pot fi necesare în cazuri mai severe. Rețineți că edemul progresiv al căilor aeriene superioare poate îngreuna intubația ulterioară. De obicei, se administrează un flux mare de oxigen printr-o mască cu debit mare (Toon și colab., 2010; Sheridan, 2016; Herndon, 2018).

În cazuri specifice, cum ar fi intoxicația cu monoxid de carbon și cianuri, poate fi utilizată terapia cu oxigen hiperbar. Această metodă, disponibilă doar în câteva centre, reduce semnificativ timpul de înjumătățire al monoxidului de carbon și edemul interstițial pulmonar (Herndon, 2018; Spinou & Koulouris, 2018).

Măsurile de supraveghere și monitorizare clinică și vitală, suportul hidro-electrolitic, acido-bazic și farmacologic (inclusiv corectarea acidozei metabolice) și kinetoterapia respiratorie sunt esențiale. Prin urmare, majoritatea acestor cazuri necesită trimitere către un centru medical specializat, capabil să abordeze în mod cuprinzător și detaliat diversele aspecte terapeutice.

7.2.4. Concluzii

Inhalarea fumului este responsabilă pentru până la 80% din decesele asociate incendiilor. Aceasta crește semnificativ riscul de deces în situații specifice, cum ar fi în cazurile de arsuri

ale pielii. Diagnosticul prompt și tratamentul corect inițial sunt esențiale. În unele cazuri severe, sechelele respiratorii pot persista (de exemplu, stenoza traheală, traheomalacia, bronhiectaziile, hiperreactivitatea bronșică, bronhiolita obliterantă), indicând necesitatea reevaluării ulterioare în ambulatoriu.

7.3. Reguli de siguranță

Foarte adesea, accidentele legate de incendiile de pădure sunt cauzate de o cunoaștere insuficientă a comportamentului incendiului. Acest manual are scopul de a închide această lacună și de a ajuta forțele de intervenție să înțeleagă concepte fundamentale care se transpun adesea în standarde sau reguli de bază, care ar trebui să fie o parte constantă a pregătirii personale pentru toți actorii implicați în orice fază a managementului incendiilor. Această secțiune va descrie câteva dintre cele mai utilizate reguli și linii directoare aplicate în prezent la nivel mondial.

7.3.1. Ordine standard pentru pompierii forestieri (PF) și situații de vigilență

Statele Unite au deschis drumul științei moderne privind incendiile de pădure, la fel cum au făcut pionierat și în dezvoltarea protocoalelor și procedurilor de siguranță la incendiu. La mijlocul secolului XX, mai multe accidente fatale au curmat viețile unui număr mare de pompieri în incendii de vegetație notabile din SUA. Unele dintre acestea sunt încă studiate și prezentate în sesiunile de formare: incendiul Blackwater din Wyoming (1937), cu 15 decese; incendiul Bryant Canyon din California (1947), cu 11 decese; incendiul Mann Gulch din Montana (1949), cu 13 decese; incendiul Rattlesnake din California (1953), cu 15 decese și incendiul Inaja din California (1956), cu 11 decese. Această succesiune de evenimente, în special ultimul dintre ele, a declanșat o reacție din partea Serviciului Forestier al SUA, și a fost creat un grup de lucru pentru a analiza evenimentele și pentru a „recomanda măsuri de reducere a riscurilor ca pompierii să fie uciși de foc în timpul intervenției” (USDA Forest Service, 1957). Raportul grupului de lucru a dus la elaborarea celor 10 Ordine Standard pentru Stingerea Incendiilor, publicate pentru prima dată de R.E. McArdle (1957), și a celor 13 (în prezent 18) Situații de Vigilență.

Aceste două seturi de reguli constituie o colecție de lecții învățate de grupul de lucru din analiza greșelilor care au dus la accidentele fatale. Raportul afirmă că numărul victimelor ar putea fi probabil redus, iar eficiența suprimării incendiilor ar putea fi îmbunătățită dacă ar fi folosite bune practici de stingere a incendiilor, o supervizare mai atentă și o funcționare organizațională îmbunătățită în toate situațiile (Zimmerman & Parkinson, 2020). Grupul de lucru a analizat, de asemenea, incidentele aproape fatale cu rezultat pozitiv și a subliniat necesitatea de a include predicția comportamentului incendiului și prognoza meteo în strategie.

Cele „10 Ordine Standard pentru Stingerea Incendiilor” au fost larg adoptate, nu doar în SUA, și sunt în prezent organizate ca o secvență de pași pe care pompierii trebuie să îi urmeze pentru a asigura siguranța în timpul operațiunilor. Acestea sunt grupate în trei teme principale – comportamentul incendiului, siguranța la incendiu și organizarea intervenției – care au scopul de a crea condițiile necesare aplicării celei de-a 10-a reguli. Cele 10 ordine sau reguli sunt enumerate în Tabelul 6.

Tabelul 6. 10 Ordine standard pentru stingerea incendiilor (NWCG, 2022)

Subiect	Nr	Ordin
Comportamentul incendiului	1	Fii informat despre starea vremii și prognoza meteo din zona incendiului.
	2	Cunoaște în permanență manifestarea incendiul tău.
	3	Bazează-ți toate acțiunile pe comportamentul actual și cel așteptat al incendiului.
Siguranța la incendiu	4	Identifică căile de retragere și zonele de siguranță și fă-le cunoscute tuturor.
	5	Instalează puncte de observație atunci când există un posibil pericol.
	6	Fii alert. Păstrează-ți calmul. Gândește limpede. Acționează decisiv.
Control organizațional	7	Menține comunicarea promptă cu subordonații, superiorii și forțele de sprijin.
	8	Dă instrucțiuni clare și asigură-te că sunt înțelese.
	9	Menține controlul asupra forțelor tale în orice moment.
	10	**Combate incendiul cu hotărâre, luând în primul rând măsurile de siguranță necesare.**

Acest set de instrucțiuni a fost scris într-un mod care să fie auto-explicativ, dar informații mai detaliate pot fi găsite pe site-ul web al Grupului Național de Coordonare a incendiilor de vegetație (https://www.nwcg.gov/publications/pms110 , accesat în 17/ 11/2023).

Cele 18 Situații de Vigilență (NWCG, 2022) au fost listate pentru a descrie situații specifice care trebuie să fie un semnal de alarmă pentru toți pompierii, în cazul în care se confruntă cu oricare dintre ele în timpul oricărei operațiuni de stingere a incendiilor (de unde și denumirea de „vigilență"). Aceste situații, enumerate în Tabelul , reprezintă o extindere a celor 10 Ordine Standard pentru Stingerea Incendiilor.

Tabelul 7. 18 Situații de vigilență (NWCG, 2022)

Nr	Situații de vigilență
1	Nu se cunosc limitele incendiului
2	Nu se vede lumina zilei
3	Zonele de siguranță și căile de retragere nu sunt identificate
4	Nu sunteți familiarizat cu starea vremii și factorii locali care influențează comportamentul incendiului
5	Nu sunteți informat cu privire la strategie, tactici și pericole
6	Ordinele și instrucțiunile nu sunt clare
7	Nu există sistem de comunicare cu subordonații și superiorii
8	Incendiul este atacat fără a avea un punct de ancorare sigur
9	Se construiește o bandă izolatoare la vale iar incendiul este dedesubt
10	Incendiul este atacat frontal fără forțe și mijloace adecvate
11	Zone cu combustibil nears între tine și incendiu
12	Nu se poate vedea focarul principal; nu există contact cu cineva care cunoaște situația incendiului
13	Pe versant există materiale combustibile care se rostogolesc și se aprind
14	Vremea devine din ce în ce mai caldă și mai uscată
15	Viteza vântului crește și/sau se schimbă direcția acestuia
16	Apar frecvent focare noi peste linia de siguranță

17	Terenul și combustibilii fac dificilă retragerea către zonele de siguranță
18	Odihna sau somnul în apropierea frontului de incendiu

Similar celor 10 ordine de stingere a incendiilor, aceste situații de vigilență au fost listate pentru a fi auto-explicative, iar explicații suplimentare pot fi găsite pe pagina web a Grupului Național de Coordonare a incendiilor de vegetație (https://www.nwcg.gov/publications/pms118 , accesat în 17/11/2023).

Unul dintre scopurile acestor două instrumente este ca acestea să fie asimilate de către toți cei implicați în acțiunile de management al incendiilor, în special în stingerea incendiilor, și să „pună accent pe identificarea punctelor de reacție (i.e. de declanșare a acțiunilor) care reamintesc pompierilor să reanalizeze conceptele LCES" (*Lookouts, Communication, Escape routes, Safety zones*) (Zimmerman, 2020).

7.3.2. LCES - LACES

Sistemul LCES a fost dezvoltat de Paul Gleason (1991), un supraveghetor experimentat al echipei Hotshot din cadrul Serviciului Forestier al USDA, în urma incendiului Dude din 1990, în Arizona. În ciuda eforturilor depuse pentru adoptarea celor 10 reguli și a celor 18 situații de vigilență, bine stabilite la acea vreme, acest incendiu a dus la pierderea vieții a 6 pompieri. Gleason a fost solicitat să investigheze accidentul și să extragă câteva lecții. El a declarat în raportul său: „Pe parcursul carierei mele, m-am ocupat de stingerea incendiilor de vegetație, ca supraveghetor al echipei Hotshot, cu doar câteva răni minore pentru cei pe care i-am supravegheat direct. Acest lucru se datorează în principal a două motive: norocul (care nu poate fi ignorat) și lecțiile de bază pe care le-am învățat de la pompierii excepționali cu care am avut ocazia să lucrez". Tocmai aceste „lecții de bază" le-a reunit în acronimul LCES, care reprezintă **Observatori** (*Lookouts*), **Comunicații** (*Communications*), **Căi de retragere** (*Escape routes*) și **Zone de siguranță** (*Safety zones*). Ideea de bază era ca toți cei aflați pe frontul incendiului să observe constant acest set de elemente legate de siguranță. Toți pompierii ar trebui să stabilească LCES înainte de a începe orice activitate pe un incendiu. Ghidul de intervenție la incidente al NWCG (NWCG, 2022) enumeră elementele care trebuie observate în fiecare temă, și le transcriem aici::

1) Observator(i):
    a. Experimentat, competent, de încredere
    b. Suficient de mulți observatori în puncte de observație adecvate
    c. Cunoașterea locațiilor echipajelor
    d. Cunoașterea căilor de evacuare și a zonelor de siguranță
    e. Cunoașterea punctelor de declanșare (*trigger points*) a acțiunilor pentru a schimba strategia sau a decide evacuarea.
    f. Disponibilitate de echipamente esențiale: hărți, set prognoză meteo, ceas, Plan de Acțiune în Caz de Incident (PACI)
2) Comunicații
    a. Frecvențele radio confirmate
    b. Proceduri și canale de comunicare de rezervă cu stabilirea orelor de raportare
    c. Rapoarte operative cu privire la orice schimbare a situației
    d. Alarmare timpurie, nu prea târzie
3) Căi de Retragere
    a. Mai mult de o singură cale de retragere

b. Evitarea căilor de retragere abrupte, în amonte
c. Cercetarea zonei pentru soluri afânate, roci, vegetație
d. Cronometrarea luând în considerare persoana cea mai lentă, oboseala și factorii de temperatură
e. Marcarea căilor de retragere pentru zi și noapte
f. Evaluarea timpul de retragere în funcție de viteza de propagare a incendiului
g. Parcarea vehiculelor astfel încât să permită evacuarea rapidă.

4) Zone de Siguranță
a. Să asigure supraviețuirea fără utilizarea de adăposturi de incendiu individuale[5]
b. Preferabil să fie amplasate în zone arse anterior (*clean burn*)
c. Să se utilizeze caracteristicile naturale: stânci, ape, pajiști
d. Zone construite (terenuri defrișate, drumuri, heliporturi)
e. Să fie cercetate dinainte să corespundă ca mărime și să fie ferite de pericole
f. Sunt în amonte pe un versant? Sunt pe direcția în care bate vântul ? Prezintă încărcătură de combustibili mare? Fiecare dintre acestea înseamnă mai mult impact termic, ceea ce înseamnă că este necesară o zonă de siguranță mai mare.

Cu unele adaptări, sistemul LCES este în prezent protocolul de bază pentru siguranță utilizat la nivel mondial și este privit ca o simplificare a celor 10 Ordine pentru Stingerea Incendiilor, reducând-le la elementele sale esențiale, cu accent pe siguranță.

În 2001, Thorburn & Alexander au propus includerea unui „A" pentru **Puncte de Ancorare**, din nou ca urmare a unui accident fatal, de data aceasta în Alberta, Canada, în 1995. Autorii definesc „punctul de ancorare" ca o barieră în calea propagării incendiului, conceput pentru a fi folosit ca punct de plecare în începerea acțiunilor de stingere a incendiilor pentru a reduce șansele de a fi flancat de un incendiu.

Acest nou protocol, LACES, a fost adoptat de Agenția de Protecție împotriva Incendiilor din Alberta și de multe alte servicii de pompieri din afara SUA, în special în țările mediteraneene.

LACES are o implementare secvențială: **Observatorii** monitorizează incendiul dintr-un **punct de Ancorare** și **Comunică** toate observațiile importante echipelor, care, în caz de pericol, pot folosi **căile de Retragere** pentru a ajunge într-o **zonă de Siguranță**. Acest ultim punct, zona de siguranță, este de o importanță capitală pentru a asigura o retragere posibilă în caz de pericol. Teoretic, o zonă de siguranță este o arie de refugiu pre-planificată, care poate fi utilizată fără adăposturi anti-incendiu în cazul în care incendiul încercuiește forțele de intervenție (Page & Butler, 2017). Alegerea unei zone de siguranță nu este întotdeauna ușoară și au fost elaborate mai multe modele (de ex. Butler & Cohen, 1998; Butler, 2014) și ghiduri (de ex. Green & Schimke, 1971 ; Butler & Cohen, 1998b) pentru a ajuta în această sarcină. Menționăm aici una dintre cele mai recente propuneri ale lui Butler (2018), în care combină panta, viteza vântului și înălțimea combustibilului pentru a determina Distanța de Separare Sigură (*Safe Separation Distance* - SSD) care trebuie respectată pentru ca o zonă de siguranță să fie considerată eficientă. SSD este calculată folosind (Ecuația 2, unde Δ reprezintă factorul pantă-vânt, conform Tabelul 8.

[5] Un adăpost pentru incendiu este un dispozitiv de siguranță de ultimă instanță utilizat de pompierii forestieri atunci când sunt surprinși de un incendiu (https://en.wikipedia.org/wiki/Fire_shelter)

SSD (*Distanța de Separare Sigură*) = 8 x înălțimea combustibilului x Δ (Ecuația 2)

Error! Reference source not found.10 exemplifică variația SSD-ului în funcție de pantă și vânt, conform ecuației de mai sus.

Tabelul 8. Factorul pantă-vânt (Δ) pentru calcularea SSD în funcție de diferite înălțimi ale vegetație (Butler, 2018) .

Factorul pantă-vânt(Δ)	Panta terenului (%)		
Viteza vântului (km/h)	Plană (<15%)	15-30%	>35%
Slab (0-10)	1/0.7/0.7	1/1/1	4/2/2
Moderat (10-25)	2/1/1	4/2/1	6/3/2
Puternic (>30)	4/2/2	6/3/2	8/3/2

Combustibil < 3m / 3m > Combustibil > 15m / Combustibil > 15m

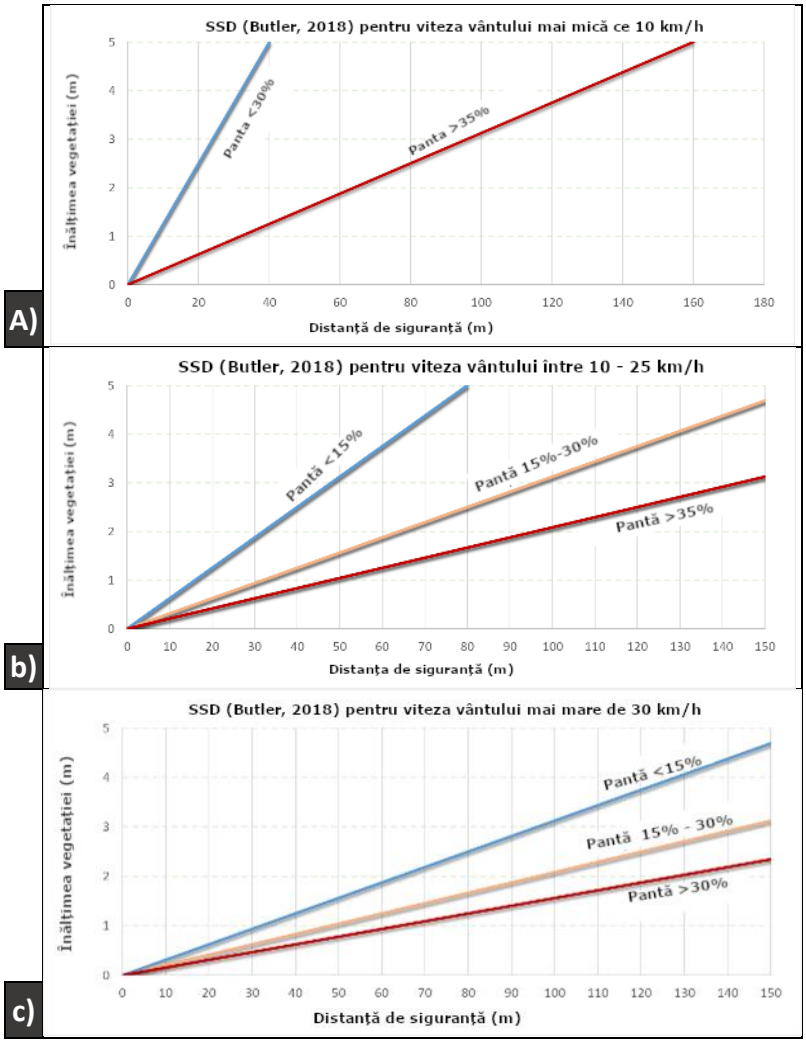


Figura 10. SSD pentru a) vânt slab, b) vânt moderat și c) vânt puternic, pentru cele 3 clase de pantă din ecuație (Butler, 2018).

7.3.3. Recomandări suplimentare pentru incendiile de pe versanții cu pante abrupte

Lahaye și colab. (2018b) au investigat 103 situații din întreaga lume în care pompierii au fost încercuiți, majoritatea în Sudul Europei (Lahaye și colab., 2018c) și în Australia (Lahaye și colab., 2018d). Ei au subliniat că 40% dintre acestea s-au petrecut în timp ce echipele captive se aflau blocate pe versanți cu o înclinație mai mare de 20°, deasupra liniei frontului. Același studiu a arătat că 30% dintre cazurile de încercuire studiate au avut loc pe pante predispuse la propagarea laterală indusă de vorticitate, adică pe versanți orientați spre partea opusă vântului, cu o înclinație de peste 20° și viteză a vântului de peste 20 km/h (J. J. Sharples și colab., 2012).

Pe cale de consecință, aceste două situații critice de vigilență sunt acum tratate cu atenție în cursurile de pregătire pentru analiștii de comportament al incendiului din New South Wales (Australia) și din Franța, începând cu anul 2023.

În aceeași direcție, putem menționa și lista de verificare a NWCG din SUA pentru „Realizarea unei benzi izolatoare la incendiu în pantă descendentă" (NWCG, 2022). Atacarea unui incendiu sau realizarea unei benzi izolatoare spre aval, pe o pantă descendentă, cu incendiul dedesupt, este ceva de evitat cu orice preț, cu excepția cazului în care este absolut necesar. Dacă acest lucru trebuie realizat, atunci trebuie luate în considerare mai multe măsuri suplimentare. Lista de verificare face referire la protocolul LCES, dar include puncte de ancorare în două locuri. De aceea, am ales să le îmbinăm, adaptând lista originală NWCG (2022) pentru a o prezenta aici:

1. Discută sarcinile atribuite cu comandantul intervenției, șefii de sectoare și comandanții de echipaje înainte de a începe realizarea unei benzi izolatoare în pantă descendentă. Persoanele responsabile trebuie să rămână la locul de execuție al benzii până la finalizare.
2. Începeți lucrul doar după ce locația a fost explorată în detaliu, iar raportul dintre beneficiul adus și riscul asumat a fost evaluat de către comandantul intervenției.
3. Coordonați LACES pentru tot personalul implicat.
    - Comandantul (intervenției) este în contact direct cu observatorul care poate vedea focul.
    - Stabiliți comunicarea între toate echipele.
    - Acces rapid la zonele de siguranță în cazul în care incendiul coboară dedesubtul poziției echipei/echipelor.
    - Punct de plecare bine ancorat pentru echipele care realizează banda izolatoare, de sus în jos, în pantă descendentă.
4. Utilizați atacul direct ori de câte ori este posibil. Dacă nu este posibil, banda izolatoare trebuie finalizată între punctele de ancorare înainte de a se propaga incendiul.
5. Banda izolatoare nu va trece prin sau în vecinătatea unui canion sau „coș de fum".
6. Monitorizați partea inferioară a incendiului; dacă există potențial de extindere , luați măsuri pentru securiza marginea incendiului.

Pentru a încheia această secțiune, și în ciuda tuturor regulilor, listelor de verificare sau instrumentelor prezentate aici, sau a altora care cu siguranță există, subliniem trei dintre cele mai importante „**Reguli de Angajament pentru Supraviețuirea Pompierilor**" ale Asociației Internaționale a Șefilor de Pompieri din SUA, Secția Siguranță, Sănătate și Supraviețuire (IAFC, 2016), legate de stingerea incendiilor structurale și perfect aplicabile incendiilor de vegetație:

(…)

3) NU îți risca viața pentru vieți sau proprietăți care nu pot fi salvate.

4) Aplică un risc LIMITAT pentru a proteja proprietățile CARE POT FI SALVATE.

5) Aplică un risc VIGILENT și MĂSURAT pentru a proteja și salva viețile CARE POT FI SALVATE.

(…)

Aceste reguli rezumă ceea ce ar trebui să fie prioritar în stingerea incendiilor de vegetație și anume siguranța individuală și colectivă.

8. Studii de caz

8.1. Incendii extreme

8.1.1. Incendiul de la Pedrógão Grande

Incendiile care au început în după-amiaza zilei de 17 iunie 2017 în apropiere de *Pedrógão Grande* (PG) vor fi amintite ca fiind cele mai grave înregistrate în Portugalia, deoarece au distrus aproximativ 45 000 ha de vegetație și teren forestier, dar mai ales pentru că au provocat moartea a 66 de persoane. Descrierile acestor incendii au fost prezentate în publicațiile elaborate de Viegas și colab. (2017) și Viegas și colab. (2023).

Incendiul a fost declanșat de o linie electrică de 15 kV în două locații aflate la o distanță de 3 km una față de cealaltă (Fig. 11). Interacțiunea dintre o furtună și cele două incendii a fost analizată pe larg în cadrul publicației Pinto și colab. (2022) folosind date de la stații meteo, date satelitare și date radar. În urma acestei interacțiuni, cele două incendii au început să scape de sub control. Condițiile foarte neobișnuite care au rezultat din acea interacțiune au condus la joncțiunea celor două incendii în seara târzie a acelei zile. Acest proces, denumit incendiu de joncțiune (Viegas și colab., 2012; Raposo și colab., 2018) este însoțit de procese convective puternice și are ca rezultat propagarea foarte rapidă a incendiului, care în acest caz a provocat moartea a 66 de persoane în primele 2 ore. Propagarea incendiului a fost însoțită de dezvoltarea unei coloane de fum foarte dense și de apariția unor procese convective violente, care au fost raportate în studiul elaborat de Viegas și colab. (2017), subliniind relevanța proceselor de joncțiune a celor două incendii separate asupra propagării și evoluției incendiului din PG și evidențiind faptul că propagarea incendiului ar fi fost destul de diferită dacă s-ar fi produs doar una dintre cele două aprinderi.

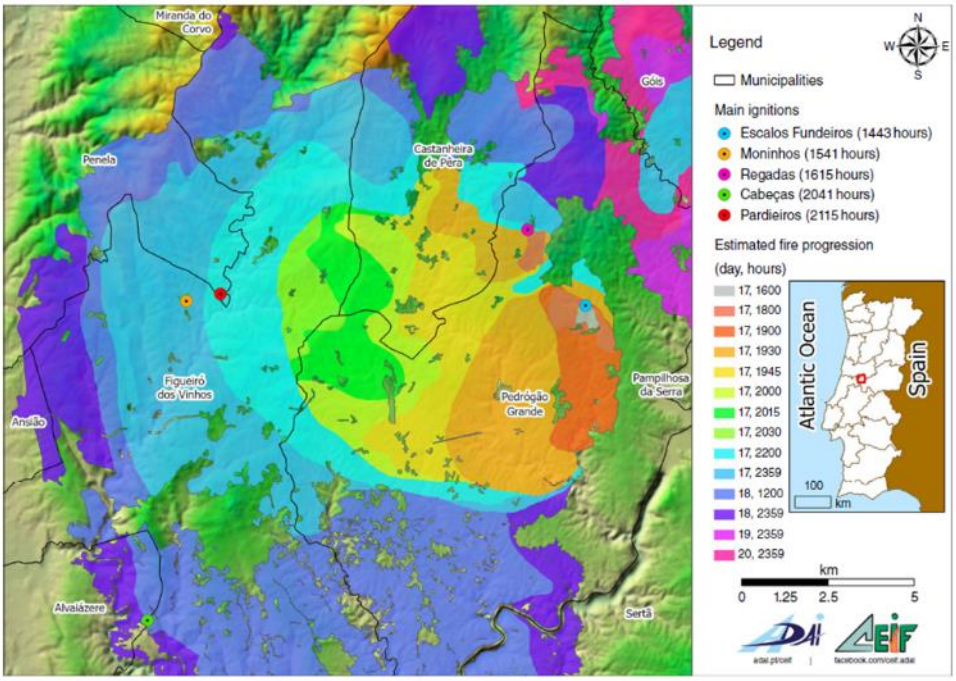


Figura 11. Harta Portugaliei și a zonei incendiului din Pedrógão Grande cu evidențierea punctelor de aprindere a incendiului și propagarea acestuia (reprezentare grafică a autorilor)



Figura 12. Imagini ale coloanei de foc din Escalos Fundeiros, surprinse la orele 18:00 și 18:15, evidențiind interacțiunea cu fluxul descendent generat de curenții convectivi la scară medie.

Aprinderea și propagarea incendiului Incendiul PG a avut loc în districtul Leiria, din centrul Portugaliei (Fig. 11), într-o perioadă de secetă, cu temperaturi ale aerului de peste 40°C și umiditate relativă foarte scăzută. Direcția vântului în regiune era dinspre NV cu o intensitate moderată. Deasupra Peninsulei Iberice, în zona central-vestică, s-a format un sistem convectiv de scară medie, care s-a deplasat spre vest-nord-vest, declanșând mai multe incendii din cauza trăsnetelor. Totuși, la ora 14:30 (toate orele indicate sunt ora locală, respectiv UTC - Timpul Universal Coordonat + 1 oră), moment în care a început incendiul PG, cea mai activă parte a sistemului se afla încă la aproximativ 100 km distanță, iar trăsnetele nu au fost înregistrate în zona afectată până la ora 18:00 (Pinto și colab. 2022). Incendiul PG a fost declanșat de două aprinderi distincte: prima lângă *Escalos Fundeiros* (EF) la ora 14:30 și a doua lângă *Regadas* (RE) la ora 15:40. Ambele au fost provocate de contactul frunzișului arborilor cu o linie electrică. Cele două locații sunt separate de o distanță de 3,2 km, însă accesul vehiculelor grele între EF și RE era dificil. În contextul existenței altor focare active, resursele de stingere erau dispersate, insuficiente pentru a controla incendiul de la EF, care, începând cu ora 15:30, a început să amenințe locuințele din sat. Când a fost detectat incendiul de la RE, deja nu mai existau resurse disponibile, iar incendiul a fost lăsat să se extindă necontrolat. Între orele 18:00 și 18:15, un flux descendent generat de sistemul convectiv, deși încă departe de regiunea incendiului, a înclinat coloana de foc spre sud-vest, răspândind flăcările pe o arie extinsă și făcând controlul incendiului imposibil din acel moment. Acest fenomen a fost înregistrat continuu de camerele video ale Detașamentului de Pompieri din PG. Două imagini capturate la 18:00 și 18:15 de camera orientată spre nord sunt prezentate în Figura 12. Procesul fluxului descendent a fost analizat detaliat utilizând senzori radar și de sol, evidențiind complexitatea interacțiunii dintre furtună și incendiu (Pinto și colab. 2022). Incendiul de la EF s-a extins rapid spre orașul *Pedrógão Grande*, afectând numeroase sate, în timp ce incendiul de la RE, deși inițial mai mic, s-a dezvoltat necontrolat spre nord-vest. Cele două focare au format un front de incendiu curbat, de peste 20 km lungime, amenințând o zonă circulară cu un diametru de 10 km, în care locuiau sute de oameni, prinși într-o situație critică din cauza avansului rapid și violent al flăcărilor (Figura 11).

Joncțiunea celor două incendii. După ora 19:30, există dovezi că flancurile interioare ale celor două incendii s-au apropiat considerabil, formând un unghi mic între ele, ceea ce a creat condițiile ideale pentru a se transforma într-un incendiu de joncțiune, conform studiilor lui Viegas și colab. 2012, Raposo și colab. 2018 și Ribeiro și colab. 2023. Între 19:30 și 20:30, procesul de fuziune a generat vânturi extrem de puternice în fața incendiului, iar viteza de propagare (ROS) a flăcărilor principale a atins aproximativ 14 km h^{-1}. Arderea rapidă a unei cantități masive de vegetație a generat o coloană de convecție care a atins altitudinea de 12.000 m la ora 20:10, menținându-se la această înălțime timp de câteva ore. Flăcările au atins lungimi cuprinse între 50 și 100 de metri, ridicându-se deasupra vegetației și transformând zona de la sol într-un mediu asemănător interiorului unui cuptor. S-au raportat cazuri în care arboretele au luat foc începând de la vârf până la rădăcină, iar întunericul dens din zona incendiului era însoțit de mingi de foc. De asemenea, bucăți de lemn, crengi și scoarță erau purtate de vânt, aprinzând focare izolate (i.e. secundare) noi. În cel puțin două zone bine delimitate, s-au format tornade de foc, care au smuls și rupt arbori cu diametre de peste 20 cm, asemenea unor scobitori. Se estimează că viteza vântului necesară pentru astfel de fenomene a fost de aproximativ 200 km h^{-1}. Fenomene similare au fost observate în fuziunea incendiilor McIntyre și Bendora, lângă Canberra, pe 18 ianuarie 2003, unde incendiul s-a propagat rapid cu o viteză de 27 km h^{-1}, iar o tornadă de foc a rupt trunchiuri de arbori cu diametre de peste 30 cm (Doogen, 2006). Zgomotul asurzitor al flăcărilor înalte și furioase a creat o atmosferă de teroare, determinând mulți cetățeni să fugă din casele lor, deși știau

că locuințele ar putea rezista incendiului, fapt confirmat ulterior în majoritatea cazurilor. În încercarea de a scăpa cu mașinile, numeroase persoane, inclusiv familii întregi, au fost surprinse de fum dens, pierderea vizibilității și flăcări, pierzându-și viața. O situație deosebit de tragică s-a petrecut pe un segment de 200 de metri al drumului N326-1, între *Figueiró dos Vinhos* și *Castanheira de Pêra*, unde 30 de persoane au murit în vehiculele lor sau în imediata apropiere. Lipsa întreținerii vegetației, inclusiv a arborilor de pe marginea drumului, a contribuit la imposibilitatea supraviețuirii celor implicați. Un pin căzut pe șosea din cauza vântului puternic indus de incendiu a blocat complet drumul, împiedicând evacuarea. Arborele, împreună cu mai multe mașini accidentate între ele, au creat o capcană fatală. Mărturiile supraviețuitorilor și ale martorilor care au trecut prin zonă, înainte sau în timpul incidentului, au permis identificarea a cel puțin 16 persoane a căror moarte a fost direct legată de acest arbore. Incendiul principal a fost adus sub control pe 22 iunie, la ora 23:50, cu implicarea a peste 1.400 de pompieri și alți agenți, după ce devastase o suprafață totală de 45.328 de hectare.

8.1.2. Incendiull de la Garrocho (Serra da Estrela)

Incendiul de la Garrocho/Serra da Estrela din Portugalia este remarcabil prin lecțiile operaționale pe care le oferă. Acesta s-a distins prin amploarea sa, afectând aproximativ 25.000 de hectare, și prin durata deosebit de lungă, rămânând activ timp de 12 zile, între 6 și 17 august 2023, fiind complet stins pe 3 septembrie 2023. Deși nu s-au înregistrat victime, principalele consecințe au fost deteriorarea mai multor clădiri și afectarea unei vaste suprafețe a unei arii naturale protejate.

Alerta de incendiu a fost emisă la ora 01:18, pe 6 august 2023, iar încă de la început, eforturile de stingere au fost îngreunate de accesul dificil la teren, mai ales pe timpul nopții. Deși incendiul a fost aproape de a fi controlat în mai multe rânduri, evenimente neprevăzute au perturbat strategiile aplicate. Două dintre aceste incidente vor fi prezentate în continuare, oferind lecții valoroase de învățat.

Incendiu violent într-un defileu, declanșat de o operațiune cu elicopterul

În jurul orei 10:23, în prima zi, un elicopter de stingere a incendiilor a ajuns în zona afectată, aducând o echipă formată din opt membri. Sprijinită de descărcările de apă aeriene efectuate de elicopter, echipa a început operațiunile de stingere la sol, coborând panta cu intenția de a închide flancul incendiului la baza defileului (Figura 13).

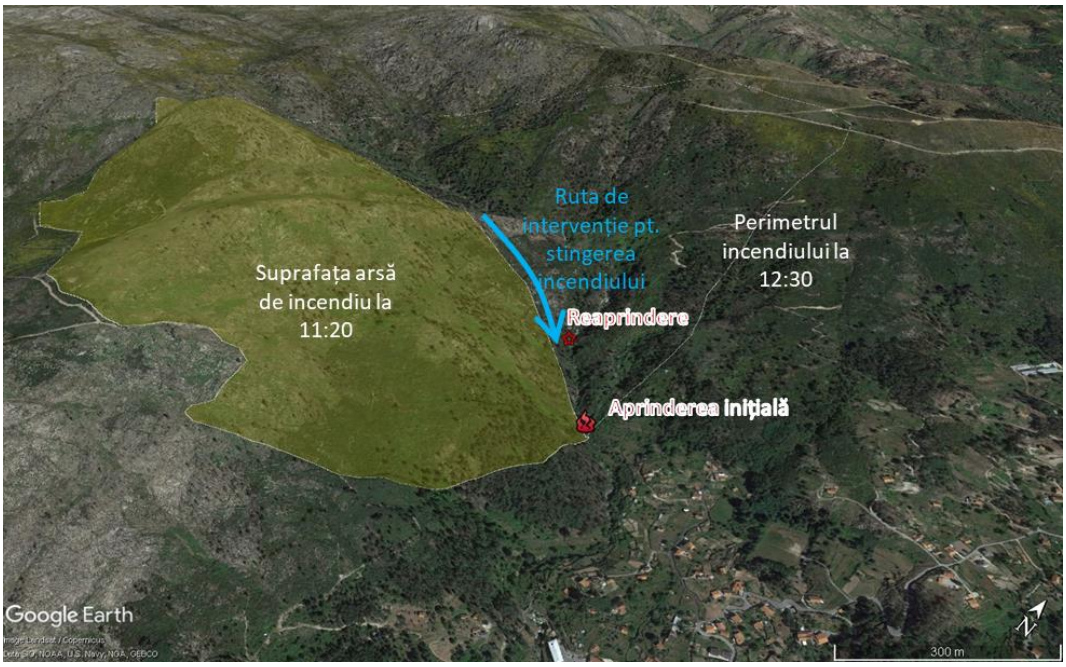


Figura 13. Situație operațională la 11:30 pe 6 august 2023 (reprezentare grafică a autorilor)

Sursa de alimentare cu apă a elicopterului se afla la doar 5 km de locul intervenției, însă era situată la o altitudine cu aproximativ 600 m mai mare, ceea ce a redus semnificativ autonomia și durata de operare a elicopterului. După aproximativ o oră, echipa de intervenție la sol, sprijinită de elicopter, era aproape de a închide flancul incendiului la baza defileului. Restul perimetrului incendiului fusese aproape controlat, rămânând doar o mică porțiune activă lângă baza defileului. Totuși, elicopterul a fost nevoit să se retragă pentru realimentare înainte de finalizarea misiunii.

Conform doctrinei operaționale, elicopterul trebuia să-și recupereze echipa înainte de a părăsi zona incendiului pentru realimentare. Recuperarea s-a realizat în apropierea văii de la baza defileului, unde echipa de la sol era staționată, evitându-se astfel necesitatea de a urca panta. Mărturiile au indicat că turbulențele create de elicopter în timpul recuperării echipei au dus la reaprinderea incendiului în acea zonă, ceea ce a determinat extinderea flăcărilor pe versantul opus al defileului. În acest moment, a avut loc un episod de comportament eruptiv al incendiului (Figura 13), care a dus la pierderea controlului asupra situației, ce fusese aproape limitată.

Acest incident a oferit două lecții importante. Prima se referă la evaluarea autonomiei mijloacelor aeriene, care trebuie să țină cont nu doar de distanța dintre punctele de alimentare cu apă și zona de intervenție, ci și de diferența de altitudine dintre aceste locații. A doua lecție subliniază necesitatea ca operatorii de aeronave să fie extrem de precauți în timpul operațiunilor, pentru a evita turbulențele atmosferice generate de aeronave, în special de elicoptere, în apropierea frontului incendiului și a punctelor critice/sensibile.

Reaprinderea incendiului în Vale da Amoreira

Între 12 și 14 august 2023, incendiul s-a extins lent, acoperind un perimetru semnificativ și o suprafață arsă de 9.000 de hectare, fiind aproape sub control. Toate fronturile erau sub „supraveghere activă și lichidare focare reziduale”, cu excepția unui punct fierbinte din nord-est, unde stingerea avansa favorabil. Pe 15 august 2023, la ora 15:44, incendiul a fost clasificat ca fiind „în curs de rezolvare”.

Satul *Vale da Amoreira* a fost una dintre zonele critice, din cauza mai multor reaprinderi înregistrate aici și a riscului de extindere a frontului de incendiu. Pe versantul de nord-vest al satului, unde a avut loc o reaprindere rapidă și bruscă, incendiul ajunsese cu câteva zile înainte și fusese oprit la jumătatea versantului, lăsând partea inferioară neafectată. Pentru securizarea perimetrului ars, s-a deschis o bandă izolatoare a incendiului la jumătatea pantei, cu ajutorul unui buldozer. De asemenea, a fost stabilit un punct de concentrare al pompierilor în *Vale da Amoreira*, ceea ce a dus la o creștere semnificativă a resurselor în această zonă.

La ora 15:47 pe 15 august 2023, la doar trei minute după ce incidentul fusese considerat lichidat, în *Vale da Amoreira* a avut loc o reaprindere puternică (Figura 14), care a deschis rapid trei fronturi de incendiu care se propagau în direcții divergente, în principal din cauza vântului local eterogen generat de topografia accidentată a zonei. Conform mărturiei unui localnic care a observat acest episod de pe versantul opus, reaprinderea a avut loc într-o zonă cu o acumulare semnificativă de vegetație uscată. Ca reacție, un elicopter a efectuat manevre în apropierea acelei locații, ceea ce a dus la lărgirea bruscă a frontului de flăcări și la apariția scânteilor care se proiectau pe versant în jos, dincolo de banda izolatoare deschisă de buldozere într-o zonă încă nearsă. Deși nu au fost obținute detalii suplimentare pentru a analiza exact manevra elicopterului, alți localnici din *Vale da Amoreira* au confirmat această mărturie. De la acest moment și până pe 17 august 2023, situația a scăpat din nou de sub control, incendiul extinzându-se cu mare intensitate spre est, adăugând încă 6.000 de hectare la suprafața deja arsă.

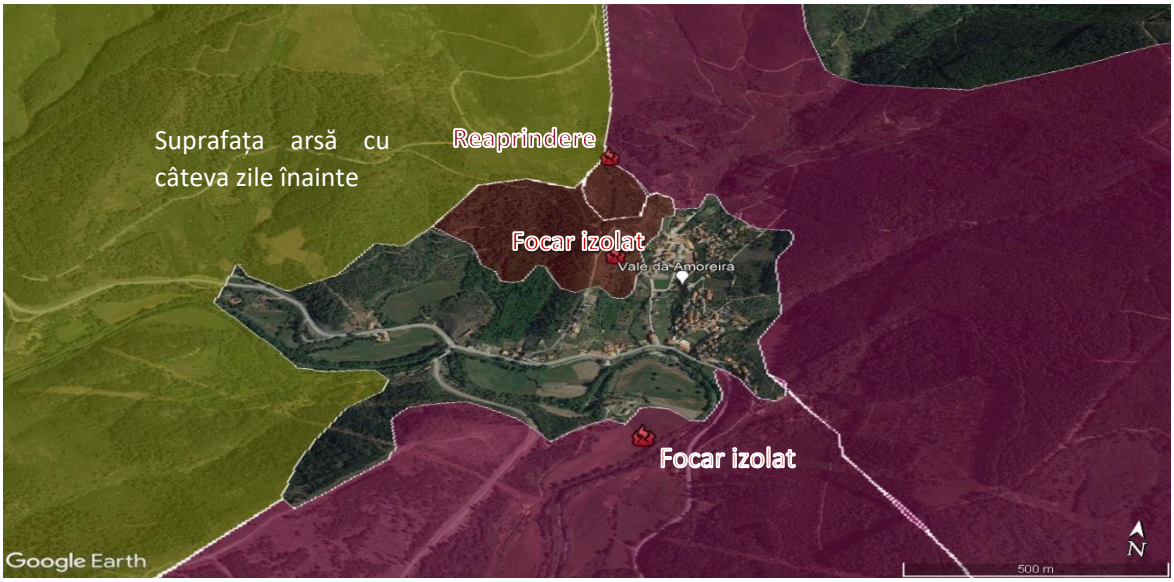


Figura 14. Situația operațională în data de 15 August 2023 (reprezentare grafică a autorilor)

Din acest episod se pot extrage mai multe lecții. Prima întărește lecțiile învățate din incidentul anterior, subliniind pericolul reprezentat de turbulențele induse de elicoptere și necesitatea de a lua în considerare aceste efecte, la nivel operațional . A doua lecție se referă la poziționarea mijloacelor operaționale, care se aflau foarte aproape de locul reaprinderii, dar care e posibil să fi manifestat o atitudine prea relaxată ca urmare a evoluției favorabile a intervenției de stingere și a trecerii acesteia în faza de rezolvare. În final, operațiunile de localizare la jumătatea pantei ar trebui evitate, deoarece combustibilii incandescenți, împinși de vânt, se pot rostogoli pe versant și pot provoca noi focare izolate în zonele nearse. În acest caz, ar fi fost necesară o operațiune tactică de ardere controlată pentru a aduce zona arsă

până la baza versantului sau o supraveghere continuă și eficientă a versantului respectiv, pentru a interveni imediat, lucru care nu s-a întâmplat.

8.2. Accidente

8.2.1 - Accidentul din Freixo de Espada a Cinta

În vara anului 2003, printre numeroasele accidente mortale din Portugalia se regăsește unul care a avut loc la *Freixo de Espada-à-Cinta*, pe data de 5 august (Viegas, 2004a), când două persoane și-au pierdut viața într-un incendiu. Incendiul s-a dezvoltat pe malul râului Douro, în nord-estul Portugaliei, la granița cu Spania (Figura 15). Zona de interes pentru acest studiu era acoperită cu vegetație de suprafață, un amestec de plante erbacee și arbuști, cu unele culturi agricole. Incendiul, care a început la ora 14:30, este marcat pe hartă ca punctul A. Pompierii au încercat să limiteze incendiul în partea inferioară a versantului, lăsându-l să se propage spre malul râului. Când a ajuns în punctul marcat B, incendiul era aproape complet controlat, rămânând doar o mică secțiune de mai puțin de 50 m de linie de foc de stins. La acest moment, șeful pompierilor, care se afla în punctul C cu un echipament cu care crease o bandă izolatoare, a informat superiorii că situația este sub control. Cu toate acestea, brusc, incendiul a început să se extindă rapid în amonte pe un canion deasupra punctului B (Figura 15), cu o explozie a flăcărilor ce s-au răspândit pe întregul versant, atingând vârful în câteva minute.

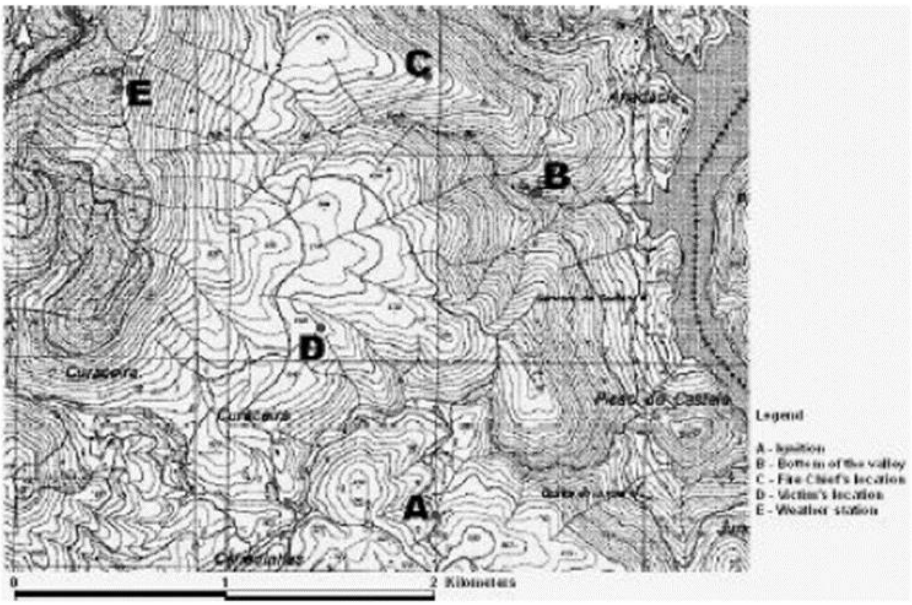


Figura 15 Harta topografică a zonei incendiului Freixo. Nordul este indicat de săgeata albă din colțul din stânga sus al figurii

Un cuplu care verifica securitatea proprietății lor situate la punctul D, destul de departe de incendiu și, în principiu, care nu era în pericol, au fost surprinși de incendiul eruptiv și amândoi au fost uciși. Mai multe detalii despre acest accident pot fi găsite în literatura de specialitate (Viegas, 2004a). În vârful versantului, în punctul E, o stație meteorologică se afla pe traseul frontului de incendiu. Datorită unei benzi de protecție la incendiu aflată la vârful crestei, senzorii stației nu au fost distruși – deși protecțiile lor au fost deteriorate de căldură – iar datele înregistrate la intervale de 10 minute au fost recuperate ulterior.

Datele privind temperatura aerului, umiditatea relativă, presiunea atmosferică, direcția și viteza vântului din 5 august sunt prezentate în Figurile 16-18. După cum se poate observa, în jurul orei 18:30, toate măsurătorile indică o schimbare semnificativă: temperatura medie (pe intervale de 10 minute) a crescut la 55,5 ºC, umiditatea relativă a scăzut la 8%, iar viteza medie a vântului a ajuns la 63,8 km h^{-1}, cu un vânt maxim (pe intervale de 10 minute) de 96 km h^{-1}.

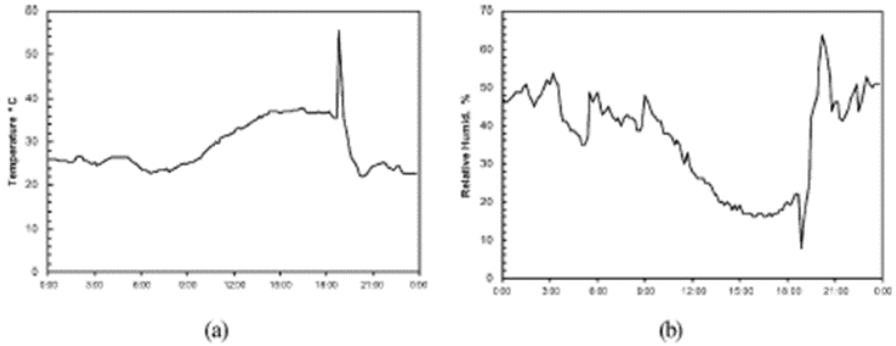


Figura 16 (a) Temperatura aerului și (b) umiditatea relativă în Freixo în data de 5 august 2003.

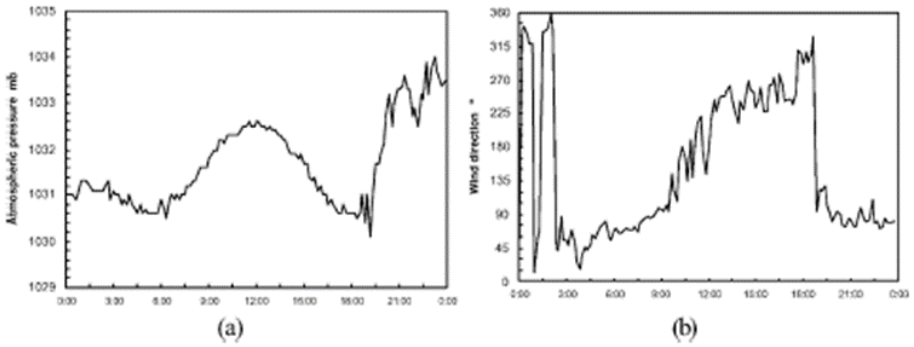


Figura 17 - (a) Presiunea atmosferică și (b) direcția vântului în Freixo în data de 5 august 2003 .

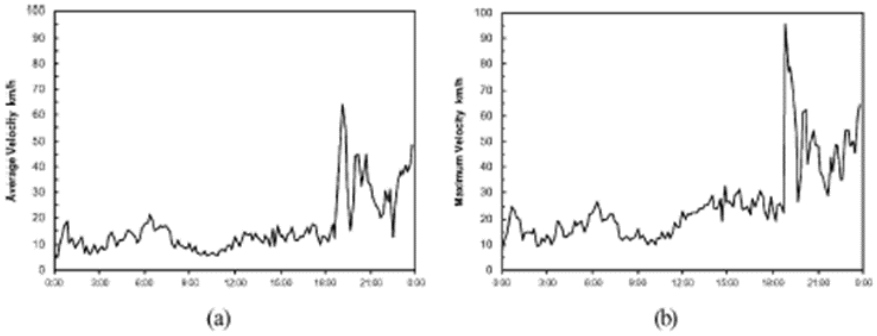


Figura 18 - (a) Viteza medie a vântului la zece minute și (b) viteza maximă a vântului în Freixo în data de 5 august 2003.

Un aspect deosebit de notabil al acestor înregistrări este schimbarea bruscă a direcției vântului, care a avut loc la ora 18:40, așa cum se poate observa în Figura 17b. Vântul, care inițial sufla din nord-vest (327º) pe o direcție descendentă, cu o viteză medie de 12,2 km h^{-1}, a virat brusc spre sud-sud-vest (între 95 și 120º), aproximativ în direcția ascendentă a văii râului. La 30 de minute după această schimbare, viteza vântului a ajuns la aproximativ 64 km h^{-1}, cu rafale de până la 96 km h^{-1}.

Această înregistrare constituie o dovadă clară că explozia produsă în acel incendiu a generat vânturi cu viteze de aproximativ 100 km h^{-1}, un fenomen care nu poate fi explicat prin niciun alt fenomen atmosferic, ci doar prin interacțiunea dintre incendiul propriu-zis și curentul de aer determinat de panta terenului. Deși nu există imagini ale accidentului, descrierile oferite de toate persoanele chestionate corespund cu o accelerare bruscă a incendiului, care a cuprins întregul versant al canionului, urcând rapid până la vârful crestei și dincolo de aceasta. Pierderea celor două vieți, deja menționată, reprezintă o mărturie tristă a acestui comportament neobișnuit al incendiului.

Modelul matematic propus de Viegas (2005) a fost folosit pentru a prezice evoluția incendiului și viteza vântului generată în timpul incendiului exploziv, fiind obținute valori ale vitezei vântului de aproximativ 113 km h^{-1} , în concordanță strânsă cu observațiile de la locul incendiului.

Este important de menționat că acesta reprezintă unul dintre puținele exemple de accidente reale asociate cu un canion, în care există înregistrări meteorologice detaliate, foarte aproape de zona incendiului, ce documentează și confirmă ipotezele formulate în dezvoltarea modelului de prezicere a comportamentului unui incendiu în canioane.

8.2.2 - Accidentul din Famalicão da Serra (Portugalia) 2006

Acest raport se bazează pe studiul realizat de Viegas și colab. 2009.

Introducere

În acest accident, șase pompieri și-au pierdut viața în timp ce luptau cu un incendiu de mari proporții la periferia satului *Famalicão da Serra*, din districtul Guarda, situat în centrul Portugaliei, la începutul după-amiezii zilei de 9 iulie 2006. Cinci dintre victime erau cetățeni chilieni, care activau în Portugalia ca pompieri profesioniști pentru Afocelca, o companie privată dedicată protecției plantațiilor de arbori deținute de un grup de companii portugheze de fabrici de celuloză. A șasea victimă a fost un pompier voluntar portughez din brigada locală de pompieri din Gonçalo, care lucra alături de această echipă.

Acest accident a avut un impact extraordinar nu numai din cauza numărului de victime și a împrejurărilor accidentului, ci și din cauza faptului că o întreagă echipă de pompieri profesioniști străini a murit în incendiu.

Descrierea accidentului

Condițiile de mediu

Incendiul s-a dezvoltat pe un versant al masivului *Serra da Estrela*, cu vedere spre o vale unde se află micul sat *Famalicão*. Partea inferioară a versantului era acoperită cu teren agricol, vegetație ierboasă și alte materiale combustibile ușoare, în timp ce partea superioară era dominată de un arboret de pin matur, care era curățat și protejat de o bandă lată de protecție contra incediilor.

Condițiile meteorologice în ziua respectivă au fost extrem de favorabile incendiilor, cu temperaturi de 35°C și umiditate relativă de 15%, iar vântul slab suflând din direcția Est-SudEst, conform datelor obținute de la stația meteorologică Meimoa.



Figura 19. Vedere generală a zonei incendiului de la Famalicão. Originea incendiului a fost aproape de centrul de jos al imaginii. Accidentul a avut loc în canionul din centrul fotografiei (Viegas şi colab. 2009)

Originea incendiului și intervenția inițială

Incendiul a izbucnit accidental la ora 12:30 într-o fermă, din cauza scânteilor generate de lamele unei mașini de cosit iarbă, care au lovit niște pietre. Deși două persoane aflate în apropiere au încercat să stingă focul inițial cu un stingător auto, eforturile lor nu au avut succes, iar incendiul s-a propagat rapid prin fermă și a pătruns pe versant.

Un vehicul ușor al secției locale de pompieri voluntari din Gonçalo a fost trimis imediat și a ajuns pe un drum rural situat deasupra locului de origine al incendiului. Extinderea rapidă a incendiului le-a depășit capacitatea de intervenție și a traversat acel drum. Susținut de pantă și vânt, incendiul s-a propagat în direcția vârfului muntelui. Grupul a părăsit zona și s-a îndreptat spre vârf, unde un alt grup de pompieri, împreună cu câțiva proprietari de păduri și civili, lucrau deja pentru a proteja arboretul de pini.

A fost dată alarma, iar printre alte resurse, au fost trimise două elicoptere pentru intervenție. Unul dintre ele, aparținând Protecției Civile Naționale, a aterizat lângă baza incendiului, pe flancul drept al acestuia. Din cauza terenului accidentat din zonă și cantității mari de combustibil, controlul complet al flancului nu a fost posibil. După sosirea altor autospeciale de pompieri, echipa aeropurtată a părăsit zona practic în momentul producerii accidentului.

Cealaltă echipă, transportată cu elicopterul, aparținea Afocelca și era formată din cinci pompieri chilieni. Aceștia au aterizat pe un drum situat aproape de vârful pantei, la marginea arboretului de pini pe care aveau misiunea să-l protejeze.

Incendiul ajunsese deja în arboretul de pini, propagându-se pe flanc și fiind alimentat de vânt, arzând triunghiul ilustrat în Figura 19, format din cele două zone de întrerupere a incendiului și șirul de pini afectați de flăcări.

Echipa a început să lucreze cu unelte de mână pe o linie coborând de la drum, urmând șirul de pini arși și extinzându-se în stânga acestuia. Comandantul echipei a solicitat unui pompier din Brigada locală din Gonçalo să ajute echipa de pompieri chilieni în stingerea incendiului. Poziția lor părea sigură, iar grupul avansa rapid, stingând flăcările relativ mici generate de litiera de pin și care se propagau în direcția vântului.

Încercuirea în incendiu

După câteva minute, în jurul orei 13:30, a avut loc o succesiune bruscă de izbucniri de incendiu sub poziția grupului, iar focul a început să ardă coroanele arborilor, formând trei fâșii vizibile în Figura 19. S-a dat alarma generală. Cei care erau amplasați în partea superioară, aproape de drum, au scăpat de-a lungul crestei, înaintând spre dreapta. Au izbucnit incendii secundare, iar unele persoane au suferit arsuri ușoare în timpul evacuării.

Grupul de șase pompieri care se aflau la mijlocul pantei a decis să fugă de incendiul de coronament pe partea stângă a incendiului principal. Ei au mers pe drum către centrul canionului mare, necunoscând faptul că partea de jos a incendiului nu era controlată la sol din cauza dificultății de acces. Doar un elicopter arunca apă pe flancul stâng al incendiului, aproape de baza acestuia, fără suport de la sol.

În timp ce grupul se retrăgea din fața frontului principal, flancul stâng al acestuia a ajuns pe vale și pe versantul din dreapta canionului. În câteva minute, incendiul a izbucnit de-a lungul acelui versant, tăind calea de evacuare a grupului. În locul în care drumul ajungea la firul văii , exista o zonă deschisă, fără vegetație. Acolo, grupul s-a împărțit în două. Pompierul portughez a decis să rămână în acea zonă și s-a adăpostit într-un șanț aflat la marginea zonei afectate de incendiu.

Cei cinci pompieri chilieni au lăsat materialele pe care încă le purtau și, la comanda șefului lor, au început să urce, încercând să scape de cele două ziduri de foc care se apropiau. Terenul în acea direcție era destul de accidentat, cu terase și bariere de 4-5 metri înălțime. Unul dintre pompieri a reușit să urce peste patru dintre aceste bariere, ajungând la o distanță de 60 de metri de punctul de plecare.

Convecția puternică generată de incendiul izbucnit pe versantul stâng a determinat flăcările din arboretul de pin să conveargă spre grup, care a fost complet copleșit de fum și foc.

Trupul neînsuflețit al pompierului portughez a fost găsit nears din cauza efectului de adăpost al șanțului de piatră în care s-a refugiat. Cei cinci pompieri chilieni au murit și ei în mijlocul arboretului de pini. Unii dintre ei au încercat să folosească un aparat respirator, dar fără rezultat.

Simularea de incendiu

Există o opinie generală conform căreia încercuirea în incendiu a fost cauzată de o schimbare bruscă a direcției vântului, însă înregistrările meteorologice nu susțin această ipoteză. O simulare a incendiului din canionul *Famalicão* a fost realizată în cadrul mesei de testare *Large Canyon Table DE4* din Laboratorul de Cercetare a Incendiilor (LEIF) al Universității din Coimbra, în Lousã. Geometria de bază canionului a fost reprodusă, iar ca strat de combustibil au fost utilizate paie. A fost aprins un foc liniar pentru a simula poziția flancului stâng al incendiului principal la momentul în care brigada chiliană a intrat în zona respectivă. Incendiul s-a extins încet, lărgindu-și flancurile, până când a ajuns la vale. Când acest lucru s-a întâmplat, focul a erupt rapid și a ars întreaga parte stângă a canionului în doar câteva secunde.

Simularea a demonstrat că schimbarea bruscă a comportamentului focului a fost cauzată de convecția generată de incendiu, care a fost inițial interpretată ca o modificare a direcției vântului. Secvențele de imagini din cadrul testelor evidențiază o accelerare dramatică a incendiului atunci când acesta a pătruns pe versantul stâng al canionului. În plus, experimentul s-a desfășurat într-un mediu controlat, fără efecte ale vântului în interiorul laboratorului, confirmând astfel că factorul determinant a fost convecția generată de incendiu.

Concluzii

Acest studiul de caz analizează pierderea vieții a șase pompieri care au fost surprinși de un incendiu izbucnit într-un canion. Ceea ce părea a fi o situație controlată și o intervenție aproape de rutină s-a transformat într-o capcană mortală. Este posibil ca utilizarea adăposturilor de incendiu să fi salvat viețile acestor bărbați, dar acest lucru nu poate fi garantat.

Simularea accidentului realizată în Laboratorul de Incendii a furnizat rezultate convingătoare privind comportamentul focului în timpul intervenției. Aceasta a arătat că nu a fost necesară nicio schimbare a vântului pentru a explica accelerarea bruscă a incendiului pe partea stângă a canionului, care i-a surprins pe cei șase pompieri.

Bibliografie

Abouali, A., Viegas, D. X., & Raposo, J. R. (2021). Analysis of the wind flow and fire spread dynamics over a sloped–ridgeline hill. *Combustion and Flame*, *234*, 111724. https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2021.111724

Adams J. Emergency medicine: clinical essentials. 2nd ed. ed. Philadelphia.

Elsevier/Saunders; 2013.

Albini, F. A. (1976). *Estimating wildfire behavior and effects*. USDA Forest Service. General Technical Report GTR INT-30. https://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_gtr030.pdf

Alexander, M. E. (2008). Latitude considerations in adapting the Canadian Forest Fire Weather Index System for use in other countries. In B. D. Lawson & O. B. Armitage (Eds.), *Weather guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System* (pp. 67–73). Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre.

Alexander, M. E., & Cruz, M. G. (2020). Fireline Intensity. In *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (pp. 453–460). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_52

Almeida, M., Ribeiro, L.M., Alves, D., Viegas, D.X., Vaz Pinto, V., Marques, R., Gomes, A., Ballereau, D., Lahaye, S., Romain, M., Salis, M., Arca, B., Bacciu, V., Canu, A., Del Giudice, L., Duce, P., Pellizzaro, G., Stroppiana, D., Ventura, A., Cabiddu, S., Casula, A., Cuccu, G., Pinna, T., Vaccargiu, M., Campesi, S., Casule, F., Chessa, M., Cinus, S., Massidda, P., Peddes, M., Soi, F., Tola, F., Usai, A., Castiglia, C., Dessy, C., Delitala, A., Trudu, P.L., Angotzi, S., Murtas, F., Barone, A.V., Erriu, N., Fresu, G., Melis, G., Fiorucci, P., Pampanoni, V., Laneve, G., Eftychidis, G., Varela, V., Gkotsis, I., Petrou, K., Boustras, G., Senekkis, I., Kirschner, J., Pandey, P., San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Liberta`, G., Boca, R., Maianti, P., Branco, A., Jacome Felix Oom, D., De Rigo, D., Roglia, E., Scionti, N. and Suarez-Moreno, M. (2023). Analysis of 2021 critical wildfire events in the Mediterranean region, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/562495, JRC133972.

Almeida, M., Modarres, M., Muñoz, J. A., & Ribeiro, L. M. (2022). Flammability characteristics of typical garden species. In *Advances in Forest Fire Research 2022* (pp. 602–609). Imprensa da Universidade de Coimbra. https://doi.org/10.14195/978-989-26-2298-9_92

Almeida, M., Porto, L., & Viegas, D. (2021). Characterization of Firebrands Released From Different Burning Tree Species. *Frontiers in Mechanical Engineering*, *7*, 651135. https://doi.org/10.3389/fmech.2021.651135

Alves, D., & et. al. (2018). Calibration of the Canadian FWI system for the territory of Europe. *Advances in Forest Fire Research 2018*, 33–43. https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_3

Alves C, Vicente A, Nunes T, Gonçalves C, Fernandes AP, Mirante F, Tarelho L, Sánchez de la Campa AM, Querol X, Caseiro A, Monteiro C, Evtyugina M, Pio C (2011) Summer 2009 wildfires in Portugal: Emission of trace gases and aerosol composition. Atmospheric Environment 45, 641–649. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.10.031.

Anderson, H. E. (1982). Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. In *USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-122*. Intermt. For. and Range Exp. Stn., Ogden, Utah 84401.

Andrews, P. L. (2014). Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System. *International Journal of Wildland Fire*, *23*(1), 21. https://doi.org/10.1071/WF12167

Aragoneses, E., García, M., Salis, M., Ribeiro, L. M., & Chuvieco, E. (2023). Classification and mapping of European fuels using a hierarchical, multipurpose fuel classification

system. *Earth System Science Data*, *15*(3), 1287–1315. https://doi.org/10.5194/essd-15-1287-2023

Bradshaw, L. S., Deeming, J. E., Burgan, R. E., & Cohen, J. D. (1984). The 1978 National Fire-Danger Rating System: technical documentation. In *General Technical Report INT-169. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 44 p.* (Vol. 169). https://doi.org/10.2737/INT-GTR-169

Butler, B. W. (2014). A study of the impact of slope and wind on firefighter safety zone effectiveness. *Final Report for JFSP Project 07-2-1-10*, 21.

Butler, B. W. (2018). A review of current status of efforts to reduce firefighter entrapments in the US. *In V Short Course on Fire Safety: "Fire Safety at the WUI", Held at the VIII International Conference on Forest Fire Research*.

Butler, B. W., & Cohen, J. D. (1998a). Firefighter safety zones: A theoretical model based on radiative heating. *International Journal of Wildland Fire*, *8*(2), 73. https://doi.org/10.1071/WF9980073

Butler, B. W., & Cohen, J. D. (1998b). Firefighter safety zones: how big is big enough? *Fire Management Notes*, *58*(1), 13–16. https://doi.org/10.2307/j.ctvx078wk.11

Byram, G. M. (1959). Combustion of forest fuels. In K. P. Davis (Ed.), *Forest Fire: Control and Use* (pp. 61–89). McGrawHill.

Byram, G. M., & Nelson, R. M. (2015). An analysis of the drying process in forest fuel material. In *e-Gen. Tech. Rep. SRS-200. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station. 45 p.* (Vol. 200). https://doi.org/10.2737/SRS-GTR-200

Carmo, M., Ferreira, J., Mendes, M., Silva, Á., Silva, P., Alves, D., Reis, L., Novo, I., & Xavier Viegas, D. (2022). The climatology of extreme wildfires in Portugal, 1980–2018: Contributions to forecasting and preparedness. *International Journal of Climatology*, *42*(5), 3123–3146. https://doi.org/10.1002/joc.7411

Carvalho A, Monteiro A, Flannigan M, Solman S, Miranda AI, Borrego C (2011) Forest fires in a changing climate and their impacts on air quality. Atmospheric Environment 45, 5545–5553. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.05.010.

Chandler, C. C., Williams, D., Trabaud, L., Thomas, P. H., & Cheney, P. (1983). *Fire in forestry, Volume II. Forest fire management and organization*. John Wiley and Sons.

Chuvieco, E., Aguado, I., Jurdao, S., Pettinari, M. L., Yebra, M., Salas, J., Hantson, S., de la Riva, J., Ibarra, P., Rodrigues, M., Echeverría, M., Azqueta, D., Román, M. V., Bastarrika, A., Martínez, S., Recondo, C., Zapico, E., & Martínez-Vega, F. J. (2014). Integrating geospatial information into fire risk assessment. *International Journal of Wildland Fire*, *23*(5), 606. https://doi.org/10.1071/WF12052

Chuvieco E, Yue C, Heil A, Mouillot F, Alonso-Canas I, Padilla M, Pereira JM, Oom D, Tansey K (2016) A new global burned area product for climate assessment of fire impacts. Global Ecology and Biogeography 25, 619–629. doi:10.1111/geb.12440.

Countryman, C. M. (1982). *Physical Characteristics of Some Northern California Brush Fuels*. 8.

Cruz, M. G. (2005). Guia Fotográfico para Identificação de Combustíveis Florestais - Região Centro de Portugal. *Centro de Estudos Sobre Incêndios Florestais. Associação Para o Desenvolvimento Da Aerodinâmica Industrial. Universidade de Coimbra*.

Cruz, M. G., & Viegas, D. X. (1995). *Forest fuels characterization and modelling. State of the art and methodology*. Deliverable 4.1. PROMETHEUS Project.

Darmenov A, da Silva AM (2015) The Quick Fire Emissions Dataset (QFED) - Documentation of versions 2.1, 2.2 and 2.4.

Davies GM, Gray A, Rein G, Legg CJ (2013) Peat consumption and carbon loss due to smouldering wildfire in a temperate peatland. Forest Ecology and Management 308, 169-177.

De Groot, W. J., Wardati, & Wang, Y. (2005). Calibrating the Fine Fuel Moisture Code for

grass ignition potential in Sumatra, Indonesia. *International Journal of Wildland Fire*, *14*(2), 161–168. https://doi.org/10.1071/WF04054

Deeming, J. E., Burgan, R. E., & Cohen, J. D. (1978). *The National Fire Danger Rating System*.

Demling R. H. (2008). Smoke inhalation lung injury: an update. Eplasty, 8, e27.

Dennekamp M, Straney LD, Erbas B, Abramson MJ, Keywood M, Smith K, Sim MR, Glass DC, Del Monaco A, Haikerwal A, Tonkin AM (2015) Forest fire smoke exposures and out-of-hospital cardiac arrests in Melbourne, Australia: A case-crossover study. Environmental Health Perspectives 123, 959–964. doi:10.1289/ehp.1408436.

Doogen M (2006) 'The Canberra Firestorm Inquests and Inquiry into Four Deaths and Four Fires Between 8 and 18 January 2003.' (ACT Coroner's Court: Canberra, ACT)

Dowdy, A. J., Mills, G. A., Finkele, K., Groot, W. De, & De Groot, W. (2009). Australian fire weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index. In *Citeseer* (Issue 10). The Centre for Australian Weather and Climate Research. Technical Report No. 10. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.307.8282&rep=rep1&type=pdf

Drury, S. (2020). Fuel Continuity. In *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (Issue 2009, pp. 513–516). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_239

Edgar, R. A., Sharples, J. J., & Sidhu, H. S. (2016). Examining the effects of convective intensity on plume attachment in threedimensional trenches. Chemeca 2016: Chemical Engineering-Regeneration, Recovery and Reinvention, 613–621.

EFFIS/JRC. (2023). *EFFIS Fire Danger Forecast*.

EFFIS. (2017). *European Fuel Map, 2017, based on JRC Contract Number 384347 on the "Development of a European Fuel Map."* European Commission.

Endorf FW, Gamelli RL. (2007) Inhalation injury, pulmonary perturbations, and fluid resuscitation. Journal of burn care & research: official publication of the American Burn Association. 28(1):80-3.

Fernandes, A. P., Lopes, D., Sorte, S., Monteiro, A., Gama, C., Reis, J., Menezes, I., Osswald, T., Borrego, C., Almeida, M., Ribeiro, L. M., Viegas, D. X., & Miranda, A. I. (2022). Smoke emissions from the extreme wildfire events in central Portugal in October 2017. *International Journal of Wildland Fire*, *31*(11), 989–1001. https://doi.org/10.1071/WF21097

Fernandes, P., Loureiro, C., & Fernandes, M. (2009). Modelos de Combustível Florestal para Portugal. *6º Congresso Florestal Nacional*, *January*, 348–354.

Fernandes, P. M., Botelho, H., Rego, F., & Loureiro, C. (2008). Using fuel and weather variables to predict the sustainability of surface fire spread in maritime pine stands. *Canadian Journal of Forest Research*, *38*(2), 190–201. https://doi.org/10.1139/X07-159

Finney, M. A. (2006). An Overview of FlamMap Fire Modeling Capabilities. *Fuels Management - How to Measure Success: Conference Proceedings*, 213–220.

FIREURISK project (2024). *D3.5 New Dimensions of future fire regimes, extremes and new fire-prone areas*, to be released

FUELMAP Project. (2011). *Final Classification and Mapping of EU Fuel Complexes. Deliverable 2*. FUELMAP Project: Development of a European Fuel Map Based on a Novel Classification Suited to EU Environments -The Fuelmap Project.

Fulton, M. (2024). Electricity pole sparks 'scary' wildfire which spread for five miles. STV News, January 29th 2024. https://news.stv.tv/highlands-islands/lochinver-wildfire-raged-for-five-miles-in-just-three-hours-after-damage-to-power-line-amid-high-winds [Verified February 23rd 2024]

Ganteaume, A., Barbero, R., Jappiot, M., & Maillé, E. (2021). Understanding future changes to fires in southern Europe and their impacts on the wildland-urban interface. Journal

of Safety Science and Resilience, 2(1), 20-29. ISSN 2666-4496. doi: 10.1016/j.jnlssr.2021.01.001.
Gill P, Martin RV. (2015) Smoke inhalation injury. BJA Education. 15(3):143-8.
Gleason, P. (1991). LCES - a key to safety in the wildland fire environment. *Fire Management Notes*, *52*(4).
Green, L. R., & Schimke, H. E. (1971). *Guides for fuel-breaks in the Sierra Nevada mixed-conifer type*.
Haikerwal A, Akram M, Sim MR, Meyer M, Abramson MJ, Dennekamp M (2016) Fine particulate matter (PM2.5) exposure during a prolonged wildfire period and emergency department visits for asthma. Respirology 21, 88–94. https://doi.org/10.1111/resp.12613\
Haponik EF, Munster AM. (1990) Respiratory injury: smoke inhalation and burns. New York:
McGraw-Hill, Health Professions Division.
Herndon DN. (2018) Total Burn Care (Fifth Edition), Elsevier, ISBN 9780323476614.
Hornby, L. G. (1936). *Fire control planning in the Northern Rocky Mountain Region*.
IAFC. (2016). *Rules of Engagement for Firefighter Survival (training poster)*. International Association of Fire Chiefs (United States Safety, Health and Survival Section). http://iafcsafety.org/image/ROE_Poster.pdf
Ichoku C, Ellison L (2014) Global top-down smoke-aerosol emissions estimation using satellite fire radiative power measurements. Atmospheric Chemistry and Physics 14, 6643–6667. doi:10.5194/acp-14-6643-2014.
ISBI Practice Guidelines Committee; Steering Subcommittee; Advisory Subcommittee. ISBI Practice Guidelines for Burn Care. Burns. 2016 Aug;42(5):953-1021.
Johnston FH, Henderson SB, Chen Y, Randerson JT, Marlier M, DeFries RS, Kinney P, Bowman DMJS, Brauer M (2012) Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. Environmental Health Perspectives 120, 695–701. doi:10.1289/ehp.1104422.
Jones, Matthew W., John T. Abatzoglou, Sander Veraverbeke, Niels Andela, Gitta Lasslop, Matthias Forkel, Adam J. P. Smith, et al. 2022. 'Global and Regional Trends and Drivers of Fire Under Climate Change'. *Reviews of Geophysics* 60 (3): e2020RG000726. https://doi.org/10.1029/2020RG000726.
Kaiser JW, Heil A, Andreae MO, Benedetti A, Chubarova N, Jones L, Morcrette JJ, Razinger M, Schultz MG, Suttie M, Van Der Werf GR (2012) Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. Biogeosciences 9, 527–554. doi:10.5194/bg-9-527-2012.
Keywood M, Cope M, Meyer CPM, Iinuma Y, Emmerson K (2015) When smoke comes to town: The impact of biomass burning smoke on air quality. Atmospheric Environment 121, 13–21. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.03.050.
Kunisaki T., Godwin S. A. (2013) Smoke Inhalation (Cap. 136). In: Emergency Medicine: Clinical Essentials. 2nd Ed. Ed: Adams J. G., Elsevier Saunders, Philadelphia. pp. 1178-1181.
Lafferty KA. Smoke Inhalation Injury 2018. Available from: https://emedicine.medscape.com/article/771194-overview#a3. (consulted September 2022).
Lahaye, S., Miralles, M., Garcia, C., Pages, J., Gallardo, C., Fresu, G., Goldammer, J. G., Pronto, L., Schneider, I., & Oslejsek, P. (2018a). *Fire-In D1.2 Report on current and future common capability challenges (CCCs and FCCCs) #1. Fire-In European project.*
Lahaye, S., Curt, T., Fréjaville, T., Sharples, J., Paradis, L., & Hély, C. (2018b). What are the drivers of dangerous fires in Mediterranean France? *International Journal of Wildland Fire*, *27*(3), 155. https://doi.org/10.1071/WF17087
Lahaye, S., Sharples, J., Hély, C., & Curt, T. (2018c). Toward safer firefighting strategies and

tactics. In D. X. Viegas (Ed.), *Advances in forest fire research 2018* (pp. 1311–1316). Imprensa da Universidade de Coimbra. https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_166

Lahaye, S., Sharples, J., Matthews, S., Heemstra, S., Price, O., & Badlan, R. (2018d). How do weather and terrain contribute to firefighter entrapments in Australia? *International Journal of Wildland Fire*, *27*(2), 85–98. https://doi.org/10.1071/WF17114

Lobert J, Warnatz J (1993) Emissions from the combustion process in vegetation. In P. Crutzen e J. Goldammer - Fire in the environment. The ecological atmospheric, and climatic importance of vegetation fires. Chichester, England: John Wiley and Sons, pp. 15–38.

Lopes, S., Viegas, X. D., Teixeira, L. L., & Viegas, M. T. (2014). Equilibrium moisture content and timelag of dead Pinus pinaster needles. *International Journal of Wildland Fire*, *23*, 721–732. https://doi.org/https://doi.org/10.1071/WF13084

Martins V, Miranda AI, Carvalho A, Schaap M, Borrego C, Sá E (2012) Impact of forest fires on particulate matter and ozone levels during the 2003, 2004 and 2005 fire seasons in portugal. Science of the Total Environment 414, 53–62. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.10.007.

Mayer, C., Mayr, S., Müller, M. M., Vacik, H., Vilà-Vilardell, L., Carrega, P., Duché, Y., & Lahaye, S. (2020). FOREST FIRES IN THE ALPS State of knowledge, future challenges and options for an integrated fire management. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:221758393

McArdle, R. E. (1957). Standard fire fighting orders. *Fire Control Notes*, *18*(4), 151.

McArthur, A. G. (1967). *Fire behaviour in eucalyptus forests*. Forest Research Institute, Forestry and Timber Bureau.

MCFIRE/ADAI. (2022). *Consulta de medições da humidade de combustíveis*.

Miranda, A. I. (2004). An integrated numerical system to estimate air quality effects of forest fires. *International Journal of Wildland Fire*, *13*(2), 217. https://doi.org/10.1071/WF02047

Miranda AI, Borrego C, Viegas D (1994) Forest fire effects on the air quality. In 'Air pollution II, computer simulation'. (Eds JM Baldasano, CABrebbia,HPower, P Zannetti) pp. 191–199. (Computational Mechanics Publications: Southampton, UK)

Miranda AI, Borrego C, Martins H, Martins V, Amorim JH, Valente J, Carvalho A (2009) Forest Fire Emissions and Air Pollution in Southern Europe. 'Earth Obs. Wildl. Fires Mediterr. Ecosyst.' (Ed E Chuvieco) pp. 171–187. (Springer: Berlin, Heidelberg) doi:10.1007/978-3-642-01754-4_12.

Miranda AI, Ferreira J, Valente J, Santos P, Amorim JH, Borrego C (2005) Smoke measurements during Gestosa-2002 experimental field fires. International Journal of Wildland Fire 14, 107–116. doi:10.1071/WF04069.

Miranda AI, Martins V, Cascão P, Amorim JH, Valente J, Tavares R, Borrego C, Tchepel O, Ferreira AJ, Cordeiro CR, Viegas DX, Ribeiro LM, Pita LP (2010) Monitoring of firefighters exposure to smoke during fire experiments in Portugal. Environment International 36, 736–745. doi:10.1016/j.envint.2010.05.009.

Miranda AI, Martins V, Casco P, Amorim JH, Valente J, Borrego C, Ferreira AJ, Cordeiro CR, Viegas DX, Ottmar R (2012) Wildland smoke exposure values and exhaled breath indicators in firefighters. Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues 75, 831–843. doi:10.1080/15287394.2012.690686.

Monteiro A, Corti P, San Miguel-Ayanz J, Miranda AI, Borrego C (2013) The EFFIS forest fire atmospheric emission model: Application to a major fire event in Portugal. Atmospheric Environment 84, 355–362. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.11.059.

Morton RD, Marston CG, O'Neil AW, Rowland CS (2020). Land Cover Map 2018 (20m classified pixels, GB). NERC Environmental Information Data Centre. Available at https://doi.org/10.5285/b3dfc4c7-c9bd-4a02-bed8-46b2a41be04a [Verified 23

February 2024]
Nguyen HM, He J, Wooster M (2023) Biomass burning CO, PM and fuel consumption per unit burned area estimates derived across Africa using geostationary SEVIRI fire radiative power and Sentinel-5P CO data. Atmos. Chem. Phys., 23, 2089–2118, doi.org/10.5194/acp-23-2089-2023.
Niklasson, M. & Granström, A. (2000). Numbers and sizes of fires: long-term spatially explicit fire history in a Swedish boreal landscape. Ecology, 81(6), 1484-1499.
NWCG. (2021a). *Fire Behavior Field Reference Guide*. *PMS 437*.
NWCG. (2021b). *Fuel Moisture Sampling*. National Wildfire Coordinating Group (NWCG).
NWCG. (2022). *NWCG Incident Response Pocket Guide (IRPG), PMS 461* (Issue January). National Wildfire Coordinating Group. https://www.nifc.gov/standards/guides/red-book
Osswald T, Gama C, Fernandes AP, Lopes D, Varela V, Miranda AI (2023). Effects of the wildfires in August 2021 on the air quality of Athens through a numerical simulation. International Journal of Wildland Fire. 32. 10.1071/WF22148.
Ottmar R, Miranda AI, Sandberg D (2009) Characterizing Sources of Emissions from Wildland Fires. In A. Bytnerowicz, M. Arbaugh, A. Riebau, C. Andersen - Wildland fires and air pollution. Developments in Environmental Science, Vol 8, Chapter 3. Amsterdam: Elsevier, pp. 61-78.
Page, W. G., & Butler, B. W. (2017). An empirically based approach to defining wildland firefighter safety and survival zone separation distances. *International Journal of Wildland Fire*, *26*(8), 655–667. https://doi.org/10.1071/WF16213
Patrick, B. (2009). Photo Guide for Estimating Fuel Loading and Fire Behavior in Mixed-Oak Forests of the Mid-Atlantic Region. *General Technical Report*, *NRS-45*. https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-45
Pausas, J. G., Keeley, J. E., & Schwilk, D. W. (2017). Flammability as an ecological and evolutionary driver. *Journal of Ecology*, *105*(2), 289–297. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12691
Peterson, J. 1987. Analysis and reduction of the errors of predicting prescribed burn emissions. Thesis. Seattle: University of Washington. 70 p.
Pinto P, Silva ÁP, Viegas DX, Almeida M, Raposo J, Ribeiro LM (2022) Influence of convectively driven flows in the course of a large fire in Portugal: the case of Pedrógão Grande. *Atmosphere* **13**, 414. doi:10.3390/atmos13030414
PROMETHEUS Project. (2000). *Management techniques for optimization of suppression and minimization of wildfire effects. System Validation. European Commission - Contract number ENV4-CT98-0716.*
Pyne, S. J., Andrews, P. L., & Laven, R. D. (1996). *Introduction to Wildland Fire*. Wiley, New York (USA).
Raposo, J. R., Cabiddu, S., Viegas, D. X., Salis, M., & Sharples, J. (2015). Experimental analysis of fire spread across a two-dimensional ridge under wind conditions. *International Journal of Wildland Fire*, *24*(7), 1008. https://doi.org/10.1071/WF14150
Raposo, J. R., Viegas, D. X., Xie, X., Almeida, M., Figueiredo, A. R., Porto, L., & Sharples, J. (2018). Analysis of the physical processes associated with junction fires at laboratory and field scales. *International Journal of Wildland Fire*, *27*(1), 52. https://doi.org/10.1071/WF16173
Rea G, Paton-Walsh C, Turquety S, Cope M, Griffith D (2016) Impact of the New South Wales Fires during October 2013 on regional air quality in eastern Australia. Atmospheric Environment, 131, 150-163. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.01.034.
Rego, F. C., Morgan, P., Fernandes, P., & Hoffman, C. (2021). Fire Science. In *Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment*. Springer International

Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69815-7
Reid CE, Brauer M, Johnston FH, Jerrett M, Balmes JR, Elliott CT (2016) Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. Environmental Health Perspectives 124, 1334–1343. doi:10.1289/ehp.1409277.
Rehberg S, Maybauer MO, Enkhbaatar P, Maybauer DM, Yamamoto Y, Traber DL. (2009) Pathophysiology, management and treatment of smoke inhalation injury. Expert review of respiratory medicine. 3(3):283-97.
Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Palacios-Orueta, A., & Bastarrika, A. (2002). Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, *32*(8), 1301–1315. https://doi.org/10.1139/x02-052
Ribeiro, C., Xavier Viegas, D., Raposo, J., Reis, L., & Sharples, J. (2023). Slope effect on junction fire with two non-symmetric fire fronts. *International Journal of Wildland Fire*, *32*(3), 328–335. https://doi.org/10.1071/WF22152
Ribeiro, L. . (2011). Interface Urbano-Florestal. In D. X. Viegas (Ed.), *Incêndios Florestais*. Verlag Dasshöfer.
Ribeiro, L. M., & Almeida, M. (2020). *Report on real scale experiments. Deliverable D2.1. Wuiview Project*.
Ribeiro, L. M., Rodrigues, A., Lucas, D., & Viegas, D. X. (2020). The Impact on Structures of the Pedrógão Grande Fire Complex in June 2017 (Portugal). *Fire*, *3*(4), 57. https://doi.org/10.3390/fire3040057
Ribeiro, L. M., Viegas, D. X., Almeida, M., Alves, D., Barbosa, T., & Modarres, M. (2021). *Planeamento da gestão de combustíveis: Efeito da distância e da frequência das limpezas na proteção das estruturas e rede viária*. ForestWISE (Coord.) - Projetos AGIF 2021 (P32100231). Vila Real, 160p. https://www.agif.pt/app/uploads/2022/07/Relatório-Projeto-Distancia-e-frequencia-de-intervenções_FW_final_06072022.pdf
Ribeiro, L. M., Viegas, D. X., Almeida, M., McGee, T. K., Pereira, M. G., Parente, J., Xanthopoulos, G., Leone, V., Delogu, G. M., & Hardin, H. (2020). Extreme wildfires and disasters around the world: lessons to be learned. In F. Tedim, V. Leone, & T. McGee (Eds.), *Extreme Wildfire Events and Disasters* (pp. 31–51). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815721-3.00002-3
Rorison DG, McPherson SJ. (1992) Acute toxic inhalations. Emergency medicine clinics of North America. 10(2):409-35.
Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Research Paper INT-115*. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
Schroeder, M. J., & Buck, C. C. (1970). Fire Weather : A Guide for Application of Meteorological Information to Forest Fire Control Operations. In *USDA Forest Service, Agriculture Handbook 360*.
Scott, J. H., & Burgan, R. E. (2005). Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. In *USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR: Vol. RMRS-GTR-1* (Issues 153 RMRS-GTR). https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-153
Sebastião R, Sorte S, Valente J, Miranda AI, Fernandes JM (2019) Detecting changes in the heart rate of firefighters to prevent smoke inhalation and health effects. Evol. Syst. 10, 295–304. https://doi.org/10.1007/s12530-018-9241-0
Sharples, J. J., McRae, R. H. D., & Wilkes, S. R. (2012). Wind-terrain effects on the propagation of wildfires in rugged terrain: Fire channelling. *International Journal of Wildland Fire*, *21*(3), 282–296. https://doi.org/10.1071/WF10055
Sharples, J., Towers, I., Wheeler, G., Wheeler, V., & McCoy, J. (2013). Modelling fire line merging using plane curvature flow. *20th International Congress on Modelling and*

Simulation, 256–262.
Sjöström, J. & Granström, A. (2023a). Human activity and demographics drive the fire regime in a highly developed European boreal region. Fire Safety Journal, 136, 103743. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103743
Sjöström, J., & Granström, A. (2023b). A phenology-driven fire danger index for northern grasslands. International journal of wildland fire, 32, 1332-1346.
Sjöström, J. & Granström, A. (2024). Analys av 160 års brandväder i Sverige: Skogsbrandsrisken sedan 1860 för nio lokaler. MSB2300. (Swedish Civil Contingencies Agency, Karlstad). ISBN 978-91-7927-468-9 (In Swedish)
Sofiev M, Vankevich R, Lotjonen M, Prank M, Petukhov V, Ermakova T, Koskinen J, Kukkonen J (2009) An operational system for the assimilation of the satellite information on wild-land fires for the needs of air quality modelling and forecasting. Atmospheric Chemistry and Physics 9, 6833–6847. doi:10.5194/acp-9-6833-2009.
Spinou A, Koulouris NG. (2018) Current clinical management of smoke inhalation injuries: a reality check. The European respiratory journal ; 52(6).
Stec A., Hull T.R. (2010), Fire Toxicity. 1st Ed. Woodhead Publishing Limited. Cambridge.
Thomas, C. ., Sharples, J. ., & Evans, J. . (2017). Modelling the dynamic behaviour of junction fires with a coupled atmosphere–fire model. *International Journal of Wildland Fire*, *26*, 331. https://doi.org/10.1071/WF16079
Thorburn, R. W., & Alexander, M. E. (2001). LACES versus LCES: adopting an "A" for "anchor points" to improve wildland firefighter safety. In Association of Wildland Fire (Ed.), *Proceedings of the 2001 International Wildland Fire Safety Summit* (p. 10). Association of Wildland Fire.
Toon MH, Maybauer MO, Greenwood JE, Maybauer DM, Fraser JF. (2010) Management of acute smoke inhalation injury. Critical care and resuscitation : journal of the Australasian Academy of Critical Care Medicine ; 12(1):53-61.
Turquety S, Menut L, Siour G, Mailler S, Hadji-lazaro J, George M, Clerbaux C, Hurtmans D, Coheur PF (2020) APIFLAME v2.0 biomass burning emissions model: impact of refined input parameters on atmospheric concentration in Portugal in summer 2016. Geoscientific Model Development, 13(7), 2981-3009. doi.org/10.5194/gmd-13-2981-2020
Urbanski SP (2013) Combustion efficiency and emission factors for wildfire-season fires in mixed conifer forests of the northern Rocky Mountains, US. Atmospheric Chemistry and Physics 13, 7241–7262. doi:10.5194/acp-13-7241-2013.
USDA/Forest Service. (2023). *National Fire Danger Rating System*.
USDA Forest Service. (1957). *Report of Task Force to Recommend Action to Reduce the Chances of Firefighters Being Killed by Burning While Fighting Fire*. https://www.fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb5393525.pdf
UNISDR. (2009). UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction. In *United Nations International Strategy for Disaster Reduction*. https://doi.org/10.1021/cen-v064n005.p003
Valente J, Miranda AI, Lopes AG, Borrego C, Viegas DX, Lopes M (2007) Local-scale modelling system to simulate smoke dispersion. International Journal of Wildland Fire 16, 196–203. doi:10.1071/WF06085.
van der Kamp, D. W., Moore, R. D., & McKendry, I. G. (2017). A model for simulating the moisture content of standardized fuel sticks of various sizes. *Agricultural and Forest Meteorology*, *236*, 123–134. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.01.013
Van Der Werf GR, Randerson JT, Giglio L, Collatz GJ, Mu M, Kasibhatla PS, Morton DC, Defries RS, Jin Y, Van Leeuwen TT (2010) Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009). Atmospheric Chemistry and Physics 10, 11707–11735. doi:10.5194/acp-10-11707-2010.
Van Wagner, C. E. (1977). Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian*

Journal of Forest Research, *7*(1), 23–34. https://doi.org/10.1139/x77-004
Van Wagner, C. E. (1987). Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. In *Forestry*. https://doi.org/19927
Vermina Plathner, F., Sjöström, J., & Granström, A. (2022). Influence of tree species on surface fuel structure in Swedish forests. Advances in Forest Fire Research, 14-18.
Vermina Plathner, F., Sjöström, J., & Granström, A. (2023). Garden structure is critical for building survival in northern forest fires–An analysis using large Swedish wildfires. Safety science, 157, 105928.
Vicente A, Alves C, Monteiro C, Nunes T, Mirante F, Cerqueira M, Calvo A, Pio C (2012) Organic speciation of aerosols from wildfires in central Portugal during summer 2009. Atmospheric Environment 57, 186–196. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.04.030.
Vicente A, Calvo A, Fernandes AP, Nunes T, Monteiro C, Pio C, Alves C (2017) Hydrocarbons in particulate samples from wildfire events in central Portugal in summer 2010. Journal of Environmental Sciences (China) 53, 122–131. doi:10.1016/j.jes.2016.02.022.
Viegas, D., & Viegas, M. (1994). 1994 - Viegas_Relationship between rainfall burne.pdf. *International Journal of Wildland Fire*, *4*(1), 11–16.
Viegas, D. X. (2004). A Mathematical Model For Forest Fires Blowup. *Combustion Science and Technology*, *177*(1), 27–51. https://doi.org/10.1080/00102200590883624
Viegas, D. X. (2004). *Cercados pelo Fogo*. (in Portuguese), Minerva Editora. Coimbra, Portugal.
Viegas, D. X. (2006). Parametric study of an eruptive fire behaviour model. *International Journal of Wildland Fire*, *15*(2), 169. https://doi.org/10.1071/WF05050
Viegas, D. X. (2009). *Cercados pelo Fogo, Parte 2*. (in Portuguese), Minerva Editora. Coimbra, Portugal.
Viegas, D. X. (2013). *Cercados pelo Fogo em Armamar. O Acidente de Armamar em 8 de setembro de 1985*. (in Portuguese), Ediliber. Coimbra, Portugal.
Viegas, D. X. (2017). *Cercados pelo Fogo em Águeda - Relato do acidente ocorrido em Águeda em 14 de junho de 1986* (P. (in Portuguese), FIG – Indústrias Gráficas, SA., Coimbra (ed.)).
Viegas, D. X., Almeida, M. A., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Rodrigues, A., Ribeiro, C., Lopes, S., Jorge, H., & Viegas, C. X. (2019). *Análise dos Incêndios Florestais Ocorridos a 15 de outubro de 2017*. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA). Coimbra, Portugal. https://www.portugal.gov.pt/pt/gc21/comunicacao/documento?i=analise-dos-incendios-florestais-ocorridos-a-15-de-outubro-de-2017
Viegas, D. X., Almeida, M. F., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Jorge, H., Rodrigues, A., Lucas, D., Lopes, S., & Silva, L. F. (2017). *O complexo de incêndios de Pedrógão Grande e concelhos limítrofes, iniciado a 17 de junho de 2017*. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA).
Viegas, D. X., Almeida, M., Raposo, J., Oliveira, R., & Viegas, C. X. (2014). Ignition of Mediterranean Fuel Beds by Several Types of Firebrands. *Fire Technology*, *50*(1), 61–77. https://doi.org/10.1007/s10694-012-0267-8
Viegas, D. X. D., Bovio, G., Ferreira, A., Nosenzo, A., & Sol, B. (1999). Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe. *International Journal of Wildland Fire*, *9*(4), 235–246. https://doi.org/10.1071/WF00015
Viegas, D. X. D., & Pita, L. L. P. (2004). Fire spread in canyons. *International Journal of Wildland Fire*, *13*(3), 253–274. https://doi.org/dx.doi.org/10.1071/wf03050
Viegas, D. X. F. C., Raposo, J. R. N., Ribeiro, C. F. M., Reis, L. C. D., Abouali, A., & Viegas, C. X. P. (2021). On the non-monotonic behaviour of fire spread. *International Journal of Wildland Fire*, *30*(9), 702–719. https://doi.org/10.1071/WF21016
Viegas, D. X., Figueiredo Almeida, M., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Jorge, H., Rodrigues, A., Lucas, D., Lopes, S., Silva, L. F., Almeida, M.

F., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., … Silva, L. F. (2017). *O complexo de incêndios de Pedrógão Grande e concelhos limítrofes, iniciado a 17 de junho de 2017* (Vol. 2017). Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA). Coimbra, Portugal. https://www.portugal.gov.pt/pt/gc21/comunicacao/documento?i=o-complexo-de-incendios-de-pedrogao-grande-e-concelhos-limitrofes-iniciado-a-17-de-junho-de-2017

Viegas, D. X., Pita, L. P., Ribeiro, L. M., & Palheiro, P. (2005). Eruptive Fire Behaviour in Past Fatal Accidents. *Eighth International Wildland Fire Safety Summit, April 26-28, 2005 Missoula, MT.*, 1–8.

Viegas, D. X., Raposo, J. R., Davim, D. A., & Rossa, C. G. (2012). Study of the jump fire produced by the interaction of two oblique fire fronts. Part 1. Analytical model and validation with no-slope laboratory experiments. *International Journal of Wildland Fire*, *21*(7), 843–856. https://doi.org/10.1071/WF10155

Viegas, D. X., Reis, R. M., Cruz, M. G., Viegas, M. T., Doutoramento, B. De, Silvicultora, E., Coimbra, U. De, Engenharia, D. De, & De, P. (2004). Calibração do Sistema Canadiano de Perigo de Incêndio para Aplicação em Portugal. *Silva Lusitana*, *12*(1), 77–93. http://www.scielo.oces.mctes.pt/pdf/slu/v12n1/12n1a07.pdf

Viegas, D. X., Ribeiro, L. M., Almeida, M. A., Oliveira, R., Viegas, M. T. P., Raposo, J. R., Reva, V., Figueiredo, A. R., & Lopes, S. (2013). *Os grandes incêndios florestais e os acidentes mortais ocorridos em 2013*. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA). https://www.historico.portugal.gov.pt/media/1281135/Relatório_IF2013_parte1.pdf

Viegas, D. X., Ribeiro, L. M., Gabbert, W., Viegas, M. T., Figueiredo, A. R., Oliveira, R., Reva, V., Raposo, J. R., & Almeida, M. A. (2012). *Relatório do Incêndio Florestal de Tavira/São Brás de Alportel, 18 a 22 de Julho de 2012*. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA). https://www.historico.portugal.gov.pt/media/730414/rel_incendio_florestal_tavira_jul2012.pdf

Viegas, D. X., Silva, A. M., & Cruz, M. G. (2001). Analysis of Three Fatal Accidents Involving Portuguese Firefighters. *Proc. 2001 Fire Safety Summit, Edmonton, Canada*.

Viegas, D. X., & Simeoni, A. (2011). Eruptive Behaviour of Forest Fires. *Fire Technology*, *47*(2), 303–320. https://doi.org/10.1007/s10694-010-0193-6

Viegas, D. X., Soares, J., & Almeida, M. (2013). Combustibility of a mixture of live and dead fuel components. *International Journal of Wildland Fire*, *22*(7), 992–1002. https://doi.org/10.1071/WF12031

Viegas, D. X., Stipanicev, D., Ribeiro, L., Pita, L. P., & Rossa, C. (2008). The Kornati fire accident – eruptive fire in relatively low fuel load herbaceous fuel conditions. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, *119*, 365–375. https://doi.org/10.2495/FIVA080361

Viney, N. R. (1991). A review of fine fuel moisture modelling. *International Journal of Wildland Fire*, *1*(4), 215–234. https://doi.org/10.1071/WF9910215

Walker PF, Buehner MF, Wood LA, Boyer NL, Driscoll IR, Lundy JB, et al. (2015) Diagnosis and management of inhalation injury: an updated review. Critical care. 19:351.

Zikeloglou, I., Lekkas, E., Lozios, S., Stavropoulou, M. (2023). Is early evacuation the best and only strategy to protect and mitigate the effects of forest fires in WUI areas? A qualitative research on the residents' response during the 2021 forest fires in NE Attica, Greece. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 88. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103612.

Zimmerman, T. (2020). Watch Out Situations. In S. L. Manzello (Ed.), *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (pp. 1051–1054). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_262

Zimmerman, T., & Parkinson, T. (2020). Standard Firefighting Orders. In *Encyclopedia of*

Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires (Vol. 21, Issue 5, pp. 958–962). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_221