

principale vettore del fuoco e sono le componenti che si intende ridurre per mitigare il rischio incendi in un popolamento forestale.

- combustibili sotterranei (a es. lettiera inferiore e *humus*): la loro umidità influisce sulla trasmissione di calore e quindi sugli effetti del fuoco sul suolo e sulla vegetazione. La loro combustione comporta perdita di sostanza organica, molta produzione di fumo e un lungo lavoro di bonifica.

Il *range* di umidità ottimale di queste categorie è difficile da stabilire a priori, in quanto varia a seconda degli obiettivi dell'intervento (a es. livello di consumo richiesto) e dei caratteri di infiammabilità della vegetazione (a es. porosità, rapporto necromassa/biomassa, *umidità di estinzione* - v. Tabella 2.3).



FOFEM (LUTES *et al.* 2012, www.firelab.org/science-applications/fire-fuel/111-fofem) è un sistema di modelli che consente di prevedere il consumo dei combustibili di superficie e sotterranei in funzione di diversi parametri *input* definiti dal progettista (a es. tipo di vegetazione, scenari di umidità). Inoltre, *FOFEM* prevede anche l'intensità del fronte di fiamma (kW m^{-2}), il riscaldamento del suolo, la produzione di emissioni e la mortalità di diverse specie arboree americane. Grazie a queste caratteristiche, *FOFEM* viene utilizzato per progettare i seguenti aspetti del fuoco prescritto:

- individuazione delle finestre di umidità dei combustibili per ottenere gli effetti desiderati di riduzione del carico;

- previsione di possibili effetti indesiderati sul suolo (a es. eccessivo riscaldamento) e sul popolamento arboreo (a es. mortalità degli individui) in date condizioni di carico e umidità dei combustibili;
- stima delle emissioni che possono essere prodotte durante l'intervento.

Per prevedere il consumo dei combustibili, *FOFEM* utilizza come dati di ingresso il carico e l'umidità di specifiche categorie di combustibili. Come introdotto nel § 2.2.2, i modelli previsionali richiedono che i combustibili siano classificati e parametrizzati secondo precisi *standard*, che variano a seconda del modello utilizzato. *FOFEM* utilizza quattro diversi sistemi di classificazione dei combustibili. A nostro avviso, la parametrizzazione prevista dal sistema *Fuel Characteristics Classification System* (FCCS) (OTTMAR *et al.* 2007a), descritto al Box 2.2, è la più adatta per progettare interventi di fuoco prescritto in Italia, in quanto compatibile con l'elevata diversità di ambienti del nostro territorio. In *FOFEM*, la scelta di un combustibile-FCCS viene effettuata in base alla regione geografica (Nord-Est, Sud-Est, Ovest-Interiore, Ovest-Pacifico degli USA) e al tipo di copertura forestale, arbustiva o erbacea (a es. categoria forestale, specie dominante). Individuato il combustibile-FCCS di riferimento, *FOFEM* assegna i valori di carico a ciascuno dei parametri descrittivi il combustibile (Figura 5.8). Il sistema tuttavia è flessibile, e consente di inserire dei valori di carico alternativi sulla base di altre fonti di dati, come per



Figura 5.8 - Esempio di valori dei parametri di descrizione del combustibile richiesti da FOFEM v6: (i) strato organico del suolo (duff); (ii) lettiera (litter); (iii) necromassa legnosa divisa in classi dimensionali (0-6 mm = 0-1/4 inch; 6-25 mm = 1/4-1 inch; 25-75 mm = 1-3 inch; > 35 mm = 3+ inch); (iv) erbe (herb); (v) arbusti (shrub); (vi) foglie e rami della chioma (foliage-branch). I valori di carico ($1 \text{ t acre}^{-1} = 0,405 \text{ t ha}^{-1}$) derivano dal database FCCS e corrispondono a una formazione arbustiva di ambiente mediterraneo (chamise chaparral) nella regione Ovest-Pacifico (Pacific West). In basso viene riportata per ogni parametro la quantità di combustibile consumata sulla base di condizioni di umidità moderate tipiche di interventi di fuoco prescritto in autunno (fall): Umidità strato organico = 75%; necromassa 6-25 mm = 16%.

esempio inventari di campo realizzati utilizzando protocolli di rilievo compatibili con *FOFEM*, come quello descritto al § 2.2.4.1. In assenza di dati inventariali, uno strumento di lavoro molto utile sono le guide fotografiche di combustibili (OTTMAR *et al.* 2007b, KEANE e DICKINSON 2007). In particolare, le guide fotografiche digitali degli USA, consultabili *on-line* possono essere utilizzate come riferimento anche per il territorio italiano. Le guide del Nord-Est sono utili per stimare il carico in boschi montani e pianiziali a clima temperato, quelle del Nord-Ovest per le aree montane appenniniche e alpine e infine quelle del Sud-Ovest per l'area mediterranea.

Definiti i parametri di carico dei combustibili, il progettista può utilizzare *FOFEM* per testare gli effetti sul consumo di diversi scenari di umidità. Generalmente, il fuoco prescritto si applica quando si verifica un differenziale di umidità fra i combustibili di superficie e quelli sotterranei. Questo consente la propagazione del fuoco e il consumo della lettiera e della necromassa fine, senza alterare le proprietà del suolo. Per quanto riguarda i combustibili di superficie, indicativamente, valori di umidità elevati (>30%) non consentono di applicare il fuoco prescritto in modo efficace, in quanto il fronte di fiamma avanza lento e frammentato aumentando i tempi delle operazioni. Inoltre, difficilmente si raggiunge l'obiettivo stabilito di riduzione del carico e della continuità. Viceversa, valori di umidità troppo bassi (<10%) determinano fronti di fiamma veloci, intensi, con il rischio di innesco di salti di favilla e conseguente aumento delle difficoltà operative. Per quanto riguarda i combustibili sotterranei, valori di umidità elevati (>130%) non ne consentono l'in-

nnesco e la combustione. Se l'umidità è <70-80% la severità del fuoco può aumentare determinando un consumo di sostanza organica e il riscaldamento del suolo. Simulando scenari di umidità alternativi con *FOFEM* il progettista valuta le diverse previsioni di consumo (Figura 5.8) in relazione agli obiettivi di riduzione del carico dei combustibili superficiali e contenimento della perdita di sostanza organica.

Nel caso il consumo sia inferiore o superiore alle aspettative, il progettista potrà giustificare eventuali modifiche alle finestre di umidità prescritte nei piani AIB (v. § 7.2.), rispettivamente verso valori più bassi o più alti. Inoltre, *FOFEM* elabora i risultati in forma di tabelle o grafici che possono servire per comunicare le analisi ed elaborare relazioni tecniche (Figura 5.9a). Indicando il tipo di suolo (a es. sabbioso-fine), *FOFEM* calcola anche il riscaldamento del suolo a diverse profondità in funzione della quantità di combustibile consumata (Figura 5.9b). Questa analisi consente di prevedere, in base agli obiettivi di consumo dei combustibili stabiliti, gli effetti potenziali sulle proprietà del suolo (CERTINI 2005). Ulteriori approfondimenti in merito all'uso di *FOFEM* per stimare le emissioni e prevedere la mortalità di specie arboree vengono riportati in LUTES *et al.* (2012).

5.4.3. PREVISIONE DEL COMPORTAMENTO DEL FUOCO PRESCRITTO

In fase di progettazione del fuoco prescritto è utile prevedere le condizioni ambientali in cui il fronte di fiamma può assumere caratteristiche di comportamento critiche, o quanta superficie del cantiere è possibile trattare in una giornata di lavoro. Per que-

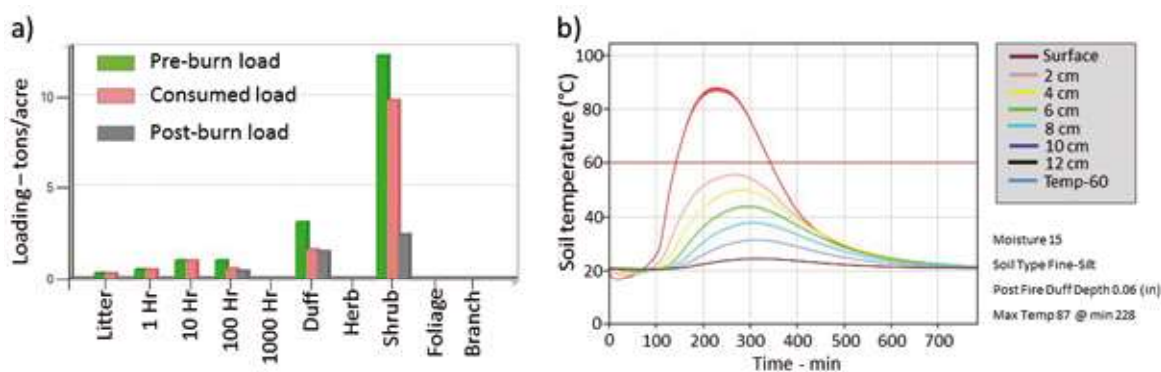


Figura 5.9- Elaborazioni di *FOFEM* v6: (a) previsione della quantità di combustibile consumata ($t\text{ acre}^{-1}$) per ciascun parametro descrittivo del combustibile; (b) previsione del tempo di residenza delle temperature nel suolo (tipo di suolo sabbioso fine) in superficie e a diverse profondità corrispondenti al livello di consumo riportato in (a).

ste finalità, i modelli di comportamento del fuoco sono un utile strumento di analisi. La maggior parte dei modelli richiede diversi parametri di ingresso relativi alle condizioni meteorologiche (a es. velocità del vento, direzione del vento rispetto alla direzione di avanzamento del fronte), topografiche (a es. pendenza), e alle caratteristiche dei combustibili parametrizzate secondo le variabili *input* richieste dal modello (v. § 2.2.2). Esistono diversi strumenti per simulare il comportamento del fuoco prescritto a scala di popolamento. Fra tutti, *BehavePlus* 5.0 (HEINSCH e ANDREWS 2010, ANDREWS *et al.* 2008) è uno dei più conosciuti e utilizzati (a es. SCOTT e BURGAN 2005, CRUZ e FERNANDES 2008, DIAMOND *et al.* 2009), anche in Italia, grazie alla buona affidabilità delle previsioni, alla possibilità di elaborare stime di comportamento in diversi ambienti, e alla facilità di utilizzo grazie a una interfaccia ergonomica. *BehavePlus* viene utilizzato per progettare i seguenti aspetti del fuoco prescritto:

- valutare se i livelli di lunghezza di fiamma e intensità del fuoco sono compatibili con i tratti di resistenza della vegetazione;
- preparare il personale operativo a rispondere a variazioni di comportamento del fuoco prescritto in relazione a un ambiente dinamico;
- stimare i tempi di lavoro per organizzare le squadre di intervento e definire gli schemi di accensione;
- valutare a priori l'efficacia di scenari alternativi di riduzione dei combustibili nel mitigare il comportamento di un incendio potenziale a scala di popolamento.

BehavePlus utilizza il modello di ROTHERMEL (1972), che prevede la velocità di propagazione del fuoco superficiale in combustibili omogenei e di superficie (lettiera, erbe, arbusti fino a 2-3 m di altezza), e integra ulteriori modelli per prevedere altre caratteristiche del fronte di fiamma (a es. intensità, passaggio in chioma del fuoco, distanza di un salto di favilla), in parte descritti al § 2.2. Le variabili di ingresso riguardano: parametri dei combustibili; condizioni meteorologiche; pendenza; schemi di accensione (favore - controvento e pendenza). Il programma fornisce una previsione puntuale del comportamento del fronte di fiamma (velocità, intensità, lunghezza fiamma, ecc.) sotto forma di tabelle e grafici.

Il primo insieme di variabili *input* per simulare il fuoco prescritto con *BehavePlus* riguarda i parametri che caratterizzano i combustibili nell'area di intervento. Nel sistema *BehavePlus* i combustibili vengono parametrizzati sulla base degli *input* richiesti dal

modello di ROTHERMEL (Tabella 5.5), ovvero secondo lo *standard* dei *Fire Behavior Fuel Models*, che in italiano vengono comunemente indicati come modelli di combustibile (v. § 2.2.1). *BehavePlus* utilizza come dati di ingresso sia i tredici modelli di combustibile di ANDERSON (1982) che i quaranta modelli di combustibile di SCOTT e BURGAN (2005) (v. § 2.2.1). Inoltre, consente di utilizzare nuovi modelli di combustibile i cui parametri sono stati opportunamente calibrati. Di seguito vengono fornite alcune indicazioni utili per scegliere i modelli esistenti o per elaborarne di nuovi.

5.4.3.1. SCELTA DEI MODELLI STANDARD

I modelli di combustibile definiti da SCOTT e BURGAN (2005) sono più adatti per prevedere il comportamento del fuoco prescritto, in quanto più affidabili rispetto ai modelli di ANDERSON (1982) nello stimare la velocità di propagazione in condizioni marginali di umidità (condizioni in cui si opera con il fuoco prescritto). La scelta di uno dei quaranta modelli di SCOTT e BURGAN (2005) deve essere fatta portando l'attenzione sui tratti di infiammabilità della vegetazione. In particolare bisogna individuare il principale strato di combustibile che contribuirà alla propagazione del fuoco prescritto e arrivare a scegliere uno dei seguenti gruppi di modelli:

- solo erba (modelli del gruppo GR; n. 9 modelli);
- erba mista ad arbusti (gr. GS; n. 4);
- solo arbusti (gr. SH; n. 9);
- lettiera forestale con erbe e arbusti (gr. TU; n. 5);
- solo lettiera forestale (gr. TL; n. 9);
- residui di utilizzazione e necromassa (gr. SB; n. 4).



Figura 5.10 - Esempio di sottobosco a cui assegnare un modello di combustibile erbaceo (principale vettore del fuoco prescritto) nonostante la copertura forestale di conifere (Foto: ASCOLI).

Questo passaggio è delicato, in quanto il progettista forestale potrebbe essere portato a scegliere il modello sulla base della struttura del popolamento arboreo, e non sulle caratteristiche di infiammabilità dei combustibili di superficie. Per esempio, in un rimboschimento di conifere con copertura delle chiome rada, scarsa lettiera e una componente erbacea abbondante e continua (Figura 5.10), sarà soprattutto lo strato erbaceo a condurre il fuoco. Un modello di tipo erbaceo (GR) sembra quindi essere più appropriato per simulare il comportamento del fuoco prescritto in questo ambiente rispetto a una lettiera di conifere (TL).

Individuato il gruppo (GR, GS, ecc.) è necessario scegliere uno dei modelli. Un primo criterio riguarda le condizioni stazionali legate all'umidità: ambiente xerico (*Dry*) o udico (*Humid*). Nei modelli calibrati per ambienti secchi, i valori del parametro *umidità di estinzione* (Tabella 5.5) sono più bassi rispetto a quelli dei modelli per ambienti umidi (SCOTT e BURGAN 2005). Questa distinzione si basa sui tratti di adattamento della vegetazione a specifici regimi di incendio (a es. in ambienti umidi le specie pirofite adattate a un passaggio frequente del fuoco devono poter bruciare a umidità elevate, altrimenti le con-

dizioni di infiammabilità verrebbero verificate raramente). Questo criterio di scelta non deve essere sottovalutato in quanto il modello di ROTHERMEL (1972) è molto sensibile a variazioni dell'*umidità di estinzione* (BURGAN 1987). Di conseguenza, in condizioni stazionali xeriche si sceglieranno modelli per condizioni ambientali secche (a es. macchia mediterranea), e viceversa per condizioni stazionali umide (a es. canneti in ambiente di palude).

Un secondo criterio di scelta riguarda la quantità di combustibile disponibile secondo un gradiente da bassa a molto alta. Per orientare questa scelta si possono confrontare i combustibili presenti nell'area di intervento (rilevati con il protocollo di cui al § 2.2.4) rispetto ai valori dei seguenti parametri del modello: *1-h*, *10-h*, *100-h* (v. glossario), *erbe vive*, *arbusti vivi* e *profondità del combustibile* (Tabella 5.5). Per comprendere meglio questo passaggio è utile sottolineare che quando si sceglie un modello di combustibile l'obiettivo è ottenere una simulazione attendibile della velocità di propagazione del fuoco, e non l'equivalenza fra i parametri di carico e profondità del modello e le caratteristiche reali della vegetazione osservate in campo (CRUZ e FERNANDES 2008). Una volta scelti i modelli è infatti necessario verifi-

a) Fuel model code	Fuel load (t/ac)					Fuel Model Type	SAV ratio (1/ft)			Fuel bed depth (ft)	Dead fuel extinction moisture (%)	Heat content (BTU/lb)
	1-h	10-h	100-h	Live herb	Live woody		Dead 1-h	Live herb	Live woody			
SH2	1,35	2,40	0,75	0,00	3,85	static	2.000	-	1.600	0,29	15	8.000
TL6	2,34	1,20	1,20	0,00	0,00	static	2.000	-	-	1,00	25	8.000

b) Codice modello	Carico di combustibile (t/ha)					Tipo di modello	Rapporto S/V (1/m)			Profondità combustibile (cm)	Umidità di estinzione (%)	Potere calorifico (kJ/kg)
	1-h	10-h	100-h	Erbe vive	Arbusti vivi		1-h Morto	Erbe vive	Arbusti vivi			
SH2	3,03	5,38	1,68	0,00	8,63	statico	6.562	-	5.249	31	15	18.622
TL6	5,38	2,69	2,69	0,00	0,00	statico	6.562	-	-	9	25	18.622

Fattori di conversione utilizzati: Carico: 1 t acro⁻¹ = 2,47 t ha⁻¹; Rapporto S/V: 1 ft² ft⁻³ = 3,28 m² m⁻³; Potere calorifico: 1 Btu lb⁻¹ = 2,326 kJ kg⁻¹; Profondità: 1 ft = 30,48 cm

Tabella 5.5 - Parametri dei Fire Behavior Fuel Models (modelli di combustibile) utilizzati come input del modello di ROTHERMEL (1972): a) termini in inglese e valori espressi in unità di misura anglosassoni: SH2 / TL6 = codici dei modelli (rispettivamente, arbusti bassi e lettiera moderata di latifoglie); 1-h = combustibili di superficie fini morti con diametro < 6 mm (es., lettiera; necromassa fine); 10-h = combustibili di superficie morti con diametro compreso fra 6-25 mm; 100-h = combustibili di superficie morti con diametro fra 25-75 mm; Live herb = combustibili erbacei vivi con diametro < 6 mm; Live woody = combustibili arbustivi vivi con diametro < 6 mm; Fuel model type = dinamico o statico a seconda che la vegetazione cambi il rapporto dei combustibili morti/vivi durante l'anno (es., rapporto più alto durante il riposo vegetativo); Fuel bed depth = valore unico relativo alla profondità/altezza dello strato di combustibile responsabile della propagazione del fuoco; Dead fuel moisture of extinction = umidità oltre la quale non viene sostenuta la combustione; Heat content = potere calorifico superiore;

b) traduzione in italiano e conversione in unità metriche.

care se la previsione del comportamento del fuoco prescritto in specifiche condizioni meteorologiche e topografiche corrisponde alle aspettative, sia sulla base dell'esperienza acquisita in campo, sia in base a osservazioni dirette e misurate durante interventi di fuoco prescritto e fronti di fiamma sperimentali (a es. ASCOLI *et al.* 2007).

5.4.3.2. ELABORAZIONE E CALIBRAZIONE DI NUOVI MODELLI DI COMBUSTIBILE

Nel caso in cui nessuno dei quaranta modelli di combustibile di SCOTT e BURGAN (2005) produca una simulazione affidabile del fuoco prescritto, è possibile modificare i parametri dei modelli *standard*, o arrivare a elaborarne di nuovi. Di seguito vengono riportate indicazioni utili per calibrare i parametri di un modello di combustibile:

- *modello dinamico/statico*: un modello dinamico presuppone che i combustibili modifichino il loro stato durante l'anno a seguito dei cicli di riposo vegetativo invernale o estivo, che influiscono sul rapporto fra combustibili vivi e morti. In particolare, sulla base dei valori *input* di umidità del parametro *erbe vive*, una frazione del suo carico verrà considerata come combustibile morto *1-h*. Per esempio, se inseriamo una umidità per le erbe vive inferiore al 30% il sistema *BehavePlus* considererà tutto il carico delle erbe vive come combustibile morto e andrà a sommarlo al parametro *1-h*

(ANDREWS *et al.* 2008);

- *parametri di carico 1-h, 10-h, 100-h, erbe vive, arbusti vivi (Tabella 5.5)*: a partire da dati inventariali raccolti in campo utilizzando il protocollo di rilievo descritto al § 2.2.4, verranno ricavati dei valori medi/mediani di carico dei combustibili morti (parametri: *1-h, 10-h, 100-h*) e vivi (parametri: *erbe vive, arbusti vivi*). Se il combustibile da elaborare è "dinamico", il parametro *erbe vive* andrà sempre considerato vivo e il contributo della componente erbacea ai combustibili *1-h* verrà stabilito in base alla sua umidità (v. punto precedente). Il parametro *arbusti vivi* corrisponde sempre alle foglie vive degli arbusti bassi fini (< 6 mm), sia che si voglia elaborare un modello dinamico che statico;
- *profondità del combustibile*: è un valore unico per tutto il modello di combustibile. Il modello di ROTHERMEL (1972) è particolarmente sensibile a variazioni della profondità (BURGAN 1987); se si aumenta la profondità, mantenendo costante il carico, aumenta la porosità del combustibile e quindi la velocità simulata. Di conseguenza è soprattutto su questo parametro che si agisce nel percorso di calibrazione per far corrispondere i dati di comportamento simulato a quelli osservati. Indicativamente, la profondità deve essere una frazione dell'altezza massima (a es. 2/3) dello strato di combustibile che porta il fuoco,

Componente	Specie	Rapporto S/V (m ² m ⁻³)	Potere calorifico sup. (kJ kg ⁻¹)	Umidità di estinzione (%)
Lettiera sup.	Indicativi	conifere: 1,640 - 4,921 ⁽³⁾ latifoglie: 4,921 - 8,201 ⁽³⁾	18.622 ⁽³⁾	25 - 40 ⁽⁴⁾
	<i>Castanea sativa</i>	10,383 ⁽²⁾	18.653 ⁽¹⁾	18 ⁽²⁾
	<i>Pinus pinaster</i>	2,925 - 3,061 ⁽²⁾	21.302 ⁽²⁾	36 - 38 ⁽³⁾
Erba	Indicativi	erbe fini: 4,921-8,201 ⁽¹⁾ erbe gen.: 1,640 - 4,921 ⁽¹⁾	18.000 ⁽³⁾	15 - 40 ⁽⁴⁾
	<i>Festuca sp.</i>	6.860 ⁽⁶⁾ (cespo)	16.500	31
	<i>Brachipodium sp.</i>	7,600 ⁽²⁾	17.638 ⁽²⁾	25 ⁽²⁾
Arbusti	Indicativi	Arbusti gen.: 3,280-6,500 ⁽¹⁾ Arbusti fini: 6,500-9,000 ⁽¹⁾	18.654 - 23.586 ⁽⁵⁾	15 - 40 ⁽⁴⁾
	<i>Calluna vulgaris</i>	9,560 ⁽²⁾ (foglie + rami < 2mm)	23.674 ⁽²⁾	65 ⁽²⁾
	<i>Erica arborea</i>	7,200 ⁽²⁾ (foglie + rami < 2mm)	24.058 ⁽²⁾	70 ⁽²⁾

⁽¹⁾ NÚÑEZ-REGUEIRA *et al.* 1996, ⁽²⁾ HERNANDO *et al.* 2004, ⁽³⁾ ANDREWS *et al.* 2008, ⁽⁴⁾ SCOTT e BURGAN 2005, ⁽⁵⁾ DIMITRAKOPOULOS e PANOV 2001, ⁽⁶⁾ BROWN 1970, ⁽⁷⁾ DAVIES e LEGG 2011.

Tabella 5.6 - Valori di rapporto S/V, potere calorifico e umidità di estinzione di riferimento per elaborare modelli di combustibile secondo lo standard previsto dal modello di Rothermel (1972).

- *rapporto superficie/volume (S/V), potere calorifico superiore e umidità di estinzione*: per assegnare i valori di questi parametri alla frazione 1-h si consiglia di fare riferimento a valori reperibili in bibliografia per diverse lettiere, specie erbacee e arbustive (a es. DIMITRAKOPOULOS e PANOV 2001, HERNANDEZ *et al.* 2004) sia di ambiente mediterraneo che alpino (Tabella 5.6). I valori del rapporto S/V per le classi 10-h e 100-h sono costanti per tutti i modelli di combustibile e sono rispettivamente pari a 358 e 98 m² m⁻³;
- *calibrazione del modello di combustibile*: per calibrare i parametri del nuovo modello di combustibile è necessario variare i singoli valori basandosi sulla conoscenza delle relazioni fra le variabili che compongono il modello di ROTHERMEL (BURGAN e ROTHERMEL 1984, BURGAN 1987). Di seguito si riportano alcune indicazioni che possono tornare utili in questa fase:
 - ordine con cui si consiglia di modificare i parametri:
 - carico 1-h, erbe vive, arbusti vivi, 10-h, 100-h;
 - profondità del combustibile;
 - rapporto S/V dei combustibili 1-h, erbe vive, arbusti vivi;
 - umidità di estinzione;
 - potere calorifico;
 - in generale un modello può essere reso più sensibile alla velocità del vento e alla pendenza aumentando il rapporto S/V e la profondità del combustibile, o diminuendo il carico di combustibile del parametro 1-h;

- il *potere calorifico* influisce direttamente sulla simulazione del comportamento del fuoco e può essere utilizzato come ultimo parametro da modificare per correggere piccole differenze alla fine del percorso di calibrazione.

Si rimanda a CRUZ e FERNANDES (2008) per approfondire un metodo di calibrazione basato sulla migliore equivalenza fra il comportamento del fuoco osservato in campo e tutte le simulazioni possibili variando i valori dei parametri di combustibile all'interno del range misurato in campo (*bootstrapping*).

5.4.3.3. ELABORAZIONE DI SCENARI DI INTERVENTO

Una volta che il progettista ha scelto il modello di combustibile è in grado di utilizzare *BehavePlus* per prevedere il comportamento del fuoco prescritto in funzione delle finestre di umidità stabilite con *FO-FEM*. Altre variabili di ingresso riguardano la pendenza dell'area di intervento, la velocità del vento (misurata a diverse altezze), e se il fronte di fiamma verrà condotto a favore o controvento e pendenza. *BehavePlus* elabora i risultati in forma di tabelle e grafici (Figura 5.11) che aiutano il progettista a comprendere come i diversi fattori ambientali influiscano sul comportamento del fuoco prescritto. Questa analisi consente di:

- definire gli schemi di accensione per trattare la superficie del cantiere nei tempi stabiliti: per esempio, se si prevede un fronte controvento e pendenza particolarmente lento, l'analisi aiuterà a definire quante linee parallele sono necessarie per trattare l'intera superficie (Figura 5.12a);

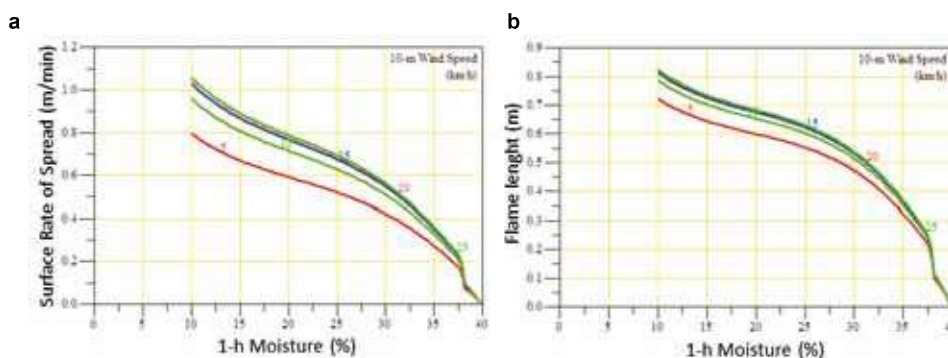


Figura 5.11 - Esempi di elaborazioni con BehavePlus 5.0. velocità di propagazione (a) e lunghezza di fiamma (b) di un fronte controvento in combustibili erbacei bassi su superficie pianeggiante; le curve variano in funzione dell'umidità dei combustibili 1-h morti (asse X) e della velocità del vento a 10 m di altezza misurata in km/h (colori delle curve); il modello di combustibile utilizzato è il GR5 di SCOTT e BURGAN (2005), considerando il parametro erbe vive (carico modificato a 5,6 t ha⁻¹) come addugiata (umidità 50%); si noti l'effetto dell'umidità di estinzione che determina una marcata riduzione della velocità di propagazione e della lunghezza di fiamma quando i combustibili 1-h assumono valori prossimi alla soglia di estinzione (40%).

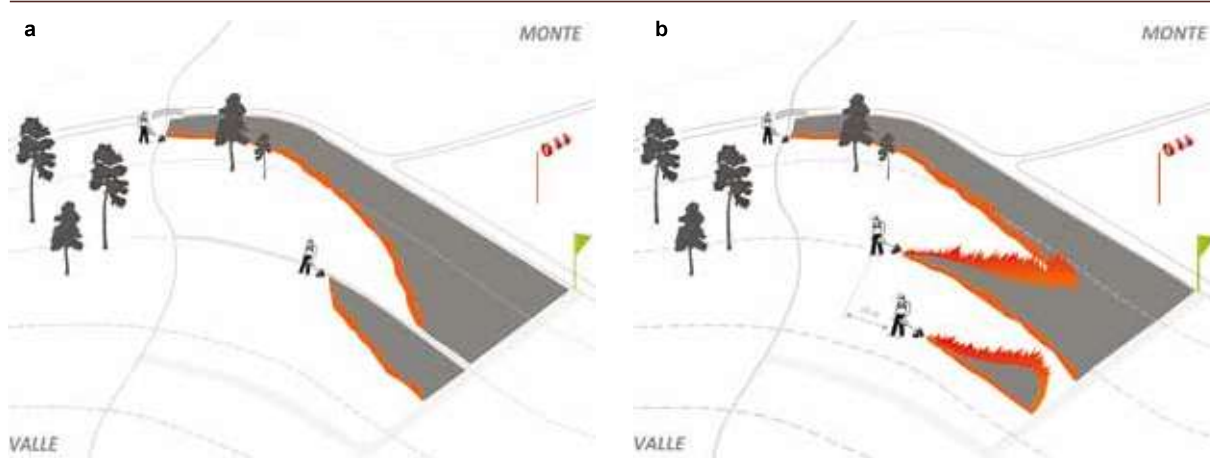


Figura 5.12 - Schemi di accensione in funzione della previsione del comportamento del fuoco prescritto: (a) se si prevede un fronte lento controvento e pendenza, il progettista stabilisce quante linee parallele sono necessarie per trattare l'intera superficie; (b) se si prevede che il fronte di fiamma a favore di vento e pendenza assuma una intensità elevata, il progettista può prescrivere l'uso dello schema di accensione per strisce parallele a favore di vento.

- valutare a priori il livello di difficoltà operativa dell'intervento: per esempio, se si prevede che il fronte di fiamma assuma una intensità maggiore di circa 500 kW m^{-1} , oltre la quale è difficile gestire il fronte con attrezzi manuali (ASCOLI *et al.* 2007), il progettista dovrà definire degli schemi di accensione che riducano l'accelerazione e la profondità del fronte di fiamma, come l'utilizzo di strisce parallele a favore di vento (Figura 5.12b).

5.4.4. CONSIDERAZIONI

Realizzare un intervento di fuoco prescritto a fini preventivi è un'operazione che richiede esperienza e attenta progettazione. Spesso non è possibile conseguire gli obiettivi di riduzione del carico senza evitare qualche effetto indesiderato. Il compito del progettista consiste nel definire le prescrizioni che massimizzano gli effetti desiderati sui combustibili, ma che limitano al tempo stesso quelli indesiderati, trovando il giusto compromesso tra gli obiettivi prioritari stabiliti dal piano antincendi dell'area e gli altri servizi ambientali della vegetazione e del suolo. Molti degli effetti desiderati, e soprattutto indesiderati, sono evidenti solo dopo qualche tempo, alcuni non sono di facile valutazione, e le loro interazioni sono complesse.

I sistemi esperti migliorano la capacità di analisi e aiutano a definire prescrizioni efficaci. Tuttavia, l'utilizzo di questi strumenti richiede un'adeguata conoscenza dei loro modelli e una corretta calibrazione dei parametri di ingresso. A esempio, quando si sce-

glie o si elabora un modello di combustibile secondo lo standard dei *Fire Behavior Fuel Models*, il risultato atteso è una simulazione attendibile della velocità di propagazione del fuoco, e non l'esatta descrizione quantitativa del combustibile. Infatti, a seguito delle caratteristiche intrinseche del modello di ROTHERMEL (1972), e dei suoi limiti (BURGAN e ROTHERMEL 1984), non è detto che inserendo come *input* i valori reali del combustibile misurati in campo otterremo la migliore simulazione possibile.

Sebbene i parametri di un modello di combustibile vengano ricavati a partire da misure in campo e di laboratorio, tuttavia sono il risultato della successiva fase di calibrazione basata sul confronto fra il comportamento reale del fuoco e quello simulato in specifiche condizioni ambientali (CRUZ e FERNANDES 2008).

Di conseguenza, i valori dei singoli parametri del modello (Tabella 5.5), riportati in diverse pubblicazioni italiane (a es. CESTI 2005), possono essere anche molto diversi dal combustibile reale e non vanno quindi utilizzati come delle guide fotografiche (a es. OTTMAR *et al.* 2007b) per stimarne le caratteristiche in campo, ma solo come parametro *input* degli strumenti basati sul modello di ROTHERMEL (1972). Inoltre, nell'elaborare nuovi modelli, in alcuni casi vengono tralasciati alcuni parametri fondamentali, come l'*umidità di estinzione* (a es. RODRÍGUEZ Y SILVA e MOLINA-MARTÍNEZ 2012), senza la quale non è possibile eseguire simulazioni attendibili.

Infine, la validazione dei modelli di combustibile

con dati osservati di comportamento del fuoco viene trascurata nella maggior parte dei casi, spesso per mancanza di dati misurati in campo. A tal fine, la descrizione del comportamento del fuoco durante interventi di fuoco prescritto è ope-

razione di grande interesse per validare i modelli di comportamento, con ricadute positive anche per altri utilizzi dei sistemi esperti nella previsione, prevenzione e lotta agli incendi boschivi.