



Interreg



UNIONE EUROPEA



MED-Star

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Rapporto sulla attuale configurazione della modellistica a supporto della previsione degli incendi nei territori del Programma

Prodotto T2.2.1

Progetto Interreg IT-FR MED-Star

Strategie e misure per la mitigazione del rischio di incendio
nell'area Mediterranea

CUP B54D19000190006

Gennaio 2020



La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au coeur de la Méditerranée

Autori	3
Introduzione	1
Modelli meteorologici per la previsione del rischio incendi	2
Regione Sardegna	2
Regione Toscana	7
Regione Liguria	12
Regione PACA e Corsica	16
Modelli di pericolosità di incendio	20
Regione Sardegna	21
Regione Toscana	21
Regione Liguria	26
Regione PACA e Corsica	28
Modelli di propagazione degli incendi	31
Regione Liguria	32
Regione Corsica	33
Regione Sardegna	36
Conclusioni	39
Riferimenti bibliografici	41

Autori

Dr. Cristiano Foderi	Università degli Studi di Firenze - Dip. DAGRI
Dr. Francesco Neri	Università degli Studi di Firenze - Dip. DAGRI
Prof. Enrico Marchi	Università degli Studi di Firenze - Dip. DAGRI
Pr. Paul-Antoine Santoni	Université de Corse - UMR CNRS 6134 SPE
Dr. Virginie Tihay-Felicelli	Université de Corse - UMR CNRS 6134 SPE
Dr. Jean-Baptiste Filippi	Université de Corse - UMR CNRS 6134 SPE
Dr. Yolanda Perez Ramirez	Université de Corse - UMR CNRS 6134 SPE
Giacomo Pacini	Regione Toscana
Riccardo Mari	Consorzio LAMMA
Lorenzo Bottai	Consorzio LAMMA
Simone Cristofori	Consorzio LAMMA
Prof. Donatella Spano	Università di Sassari, Dip. di AGRARIA
Dr. Costantino Sirca	Università di Sassari, Dip. di AGRARIA
Florence Vaysse	Météo-France, Assistance Feux de Forêt de la Zone Sud
Antonella Massaiu	ONF DT Corse, Unité DFCI
Dr. Bachisio Arca	Istituto per la BioEconomia, CNR-IBE
Dr. Michele Salis	Istituto per la BioEconomia, CNR-IBE
Dr.ssa Grazia Pellizzaro	Istituto per la BioEconomia, CNR-IBE
Dr. Marcello Casula	Istituto per la BioEconomia, CNR-IBE
Dr.ssa Matilde Schirru	Istituto per la BioEconomia, CNR-IBE
Dr. Pierpaolo Duce	Istituto per la BioEconomia, CNR-IBE
Dr. Paolo Fiorucci	Fondazione CIMA
Dr. Andrea Trucchia	Fondazione CIMA
Dr. Carlo Dessy	ARPAS – Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Sardegna
Dr. Carluccio Castiglia	ARPAS – Agenzia Regionale per la Protezione

Ing. Federico Ferrarese
Ceruti

Dr. Salvatore Cinus

Dr. Michele Peddes

Dr. Fabrizia Soi

dell'Ambiente della Sardegna

Regione Autonoma Sardegna

Regione Autonoma Sardegna

Regione Autonoma Sardegna

Regione Autonoma Sardegna

Introduzione

Il presente rapporto è stato redatto nell'ambito del progetto MED-Star – Strategie e misure per la mitigazione del rischio di incendio nell'area Mediterranea. Si tratta di un progetto “strategico”, con capofila Regione Sardegna, finanziato dal programma di cooperazione transfrontaliera Italia-Francia Marittimo, finalizzato a migliorare la capacità di prevenzione e gestione del crescente rischio di incendio, derivante anche dai cambiamenti climatici, in particolare in aree a elevata presenza antropica. L'area di azione del progetto comprende le cinque regioni del programma di cooperazione transfrontaliera, ovvero Sardegna, Toscana e Liguria, per l'Italia, e Corsica e regione PACA (Provenza- Alpi Marittime-Costa Azzurra) in Francia.

All'interno della attività T.2, dedicata al potenziamento e armonizzazione delle applicazioni modellistiche a supporto della previsione degli incendi, il presente documento (prodotto T2.2.1) riporta i risultati dell'indagine, allo stato attuale, sull'utilizzo di tali applicazioni modellistiche nei territori di Programma, finalizzate alle attività di prevenzione e previsione degli incendi. L'obiettivo è creare un quadro conoscitivo di confronto che servirà da base per lo sviluppo, l'implementazione e il potenziamento di soluzioni modellistiche condivise a supporto della attività di previsione degli incendi nei 5 territori di Programma. In particolare sono state oggetto di indagine le applicazioni modellistiche legate alla previsione meteorologica, alla pericolosità di incendio e ai modelli di propagazione.

La crescente incidenza degli incendi boschivi nella regione Mediterranea, infatti, ha promosso lo sviluppo di numerosi approcci per l'analisi di pericolo, rischio ed esposizione agli incendi. Analogamente, sono stati sviluppati diversi modelli di propagazione, sistemi di calcolo della velocità di avanzamento del fronte di fiamma e del comportamento degli incendi boschivi.

Modelli meteorologici per la previsione del pericolo incendi

La valutazione delle condizioni di pericolo per lo sviluppo e propagazione degli incendi boschivi costituisce uno strumento fondamentale, sia nella gestione operativa del servizio di prevenzione, sia durante le attività di lotta ed estinzione. Tale valutazione si realizza attraverso il monitoraggio e la previsione delle condizioni meteorologiche dalle quali sono elaborati appositi indici di pericolosità, a cui viene fatta corrispondere la probabilità che in quell'intervallo di tempo, in un dato territorio, l'incendio boschivo abbia inizio e si diffonda.

Tutti i territori basano l'analisi del pericolo su modelli atmosferici sia globali sia ad area limitata risolti fino a scala regionale, per il calcolo prognostico delle principali variabili che influiscono sullo stato della vegetazione e sul comportamento del fuoco. Di seguito sono riportate le caratteristiche dei modelli meteorologici utilizzati in ogni territorio di Programma.

Regione Sardegna

Modellistica meteorologica

Nella previsione del pericolo meteorologico per gli incendi boschivi e d'interfaccia, la Regione Sardegna utilizza operativamente la modellistica a scala globale (GCM, General Circulation Model) del centro meteorologico europeo (IFS-ECMWF) e quella ad area limitata (LAM, Limited Area Model), resa operativa con specifico focus sull'Isola e inizializzata con quella globale. La modellistica ad area limitata è oggetto di continua ricerca e sviluppo per il migliore adattamento alla Sardegna; le catene utilizzate operativamente per la campagna AIB, con diversi passi di griglia orizzontale, sono quella BoLAM (resa operativa in collaborazione con il l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del CNR) e quella WRF-ARW.

BoLAM è un modello alle equazioni primitive con uno schema temporale del tipo time splitting, risolte orizzontalmente su un grigliato di tipo C (Arakawa C grid), ruotato in maniera tale da avere un passo lineare con $dx=dy$, e verticalmente su livelli sigma. Le onde di gravità sono risolte con lo schema forward-backward, mentre lo schema numerico per l'avvezione è del tipo FBAS (Forward-Backward Advection Scheme). Sono utilizzate le parametrizzazioni di Geleyn per la radiazione, quella di Kain-Fritsch per la convezione e 5 variabili microfisiche per le idrometeore.

La prima corsa del modello è innestata direttamente sui livelli verticali del IFS-ECMWF, nella versione TCo1279L137 con analisi alle 12 UTC, e utilizza come campo iniziale la previsione a +12h. La scelta di impiegare come analisi iniziale per il LAM la previsione a +12h è basata sull'ipotesi che dopo tale periodo il GCM descriva fenomeni con scale di moto spaziali e temporali maggiormente compatibili con quelle a più alta risoluzione del LAM. L'area su cui si innesta il modello è compresa tra le latitudini 24°N e 61,5°N e tra le longitudini 33.5°W e 49.5°E con un passo di griglia orizzontale di 0.18° (circa 20km) e su 32 livelli verticali sigma. La previsione che esso fornisce è fino a +72h (3 giorni) con campi meteorologici visualizzabili ogni 3h.

La seconda corsa utilizza invece come analisi e come condizione ai bordi (fornite ogni ora) i dati di quella precedentemente descritta. In questo caso, sempre per fare in modo che le scale spaziali e temporali del BOLAM a 20 km siano pienamente risolte, la condizione iniziale è rappresentata dalla previsione a +6h. Il passo di griglia orizzontale di tale corsa è di 0.05° (circa 5 km) con 42 livelli verticali su un'area compresa tra le latitudini 36°N e 44°N e tra le longitudini 3.5°E e 14.5°E. La previsione che esso fornisce è fino a +36h con campi meteorologici visualizzabili ogni 3h.

Il modello meteorologico **WRF-ARW** V3.9 (Weather & Research Forecasting model) è stato sviluppato dalla NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) e da NCEP (National Centre for Environmental Prediction). Si tratta di un modello di grande duttilità che può essere considerato lo stato dell'arte per quanto riguarda la modellistica numerica a scala regionale.

La simulazione per il territorio della Sardegna è effettuata attraverso un 2 way-nesting su due passi di griglia orizzontale, a 5.6 km e a 1.8 km, mentre verticalmente su 45 livelli. Nell'area compresa approssimativamente tra 38°N e 41.9°N di latitudine e tra 6.5°E e 11.5°E di longitudine il passo di griglia orizzontale è di 1.8 km.

Le condizioni iniziali e al contorno per il WRF-ARW provengono dal modello globale del ECMWF, di cui viene acquisita la corsa delle 00UTC fino al forecast +48h. Le ICBC, con cadenza trioraria, hanno passo di griglia orizzontale di 0.125° su 25 livelli di pressione atmosferica.

Inserimento della Modellistica meteorologica nella valutazione del Pericolo incendi

È bene evidenziare che la valutazione del pericolo incendi su ciascuna delle ventisei zone nelle quali è stato suddiviso il territorio regionale, esplicitata nel documento “Bollettino di pericolo incendio” pubblicato quotidianamente dalla Protezione Civile insieme alla corrispondente fase operativa, è un prodotto non automatico ma “soggettivo”, nel senso che è il risultato dell’analisi del previsore di tutte le informazioni disponibili e non output diretto di un determinato modello di pericolo.

In questo contesto, il settore meteo del CFD fornisce in forma numerica gli output modellistici per l’inizializzazione dei modelli di pericolo incendi, inoltre mette a disposizione la propria esperienza in campo previsionale facendo sintesi dei campi meteorologici dei modelli e descrivendo lo scenario atteso anche avvalendosi di mappe delle principali forzanti meteorologiche previste.

Il modello BoLAM viene utilizzato operativamente per la previsione meteorologica nonché come dato iniziale per i modelli di previsione per il pericolo incendi IFI, Speditivo Forestale, RISICO, per quanto riguarda diverse grandezze meteorologiche: la temperatura a 2 metri, l’umidità a 2 metri, il vento a 10 metri e la precipitazione (fig. 1). Inoltre viene utilizzato per il calcolo di un indice sperimentale, denominato IMI (Indice Meteorologico per il rischio di Incendi), basato sulla combinazione pesata delle principali forzanti meteorologiche: vento a 10 metri, della temperatura a 2 metri e dell’umidità a 2 metri.

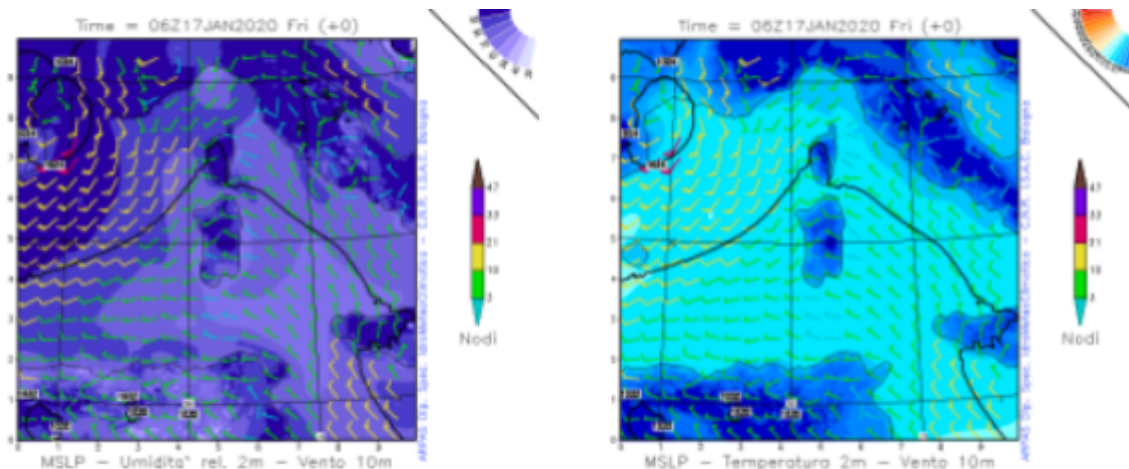


Figura 1: temperatura e umidità relativa a due metri dal suolo e vento a dieci metri previsti dal BoLAM.

Nel caso del WRF-ARW, i dati sono prodotti e inviati alla Protezione Civile Regionale della Sardegna con frequenza giornaliera, approssimativamente alle 9:15 UTC (le 11:15 locali con l’ora solare).

Durante la campagna antincendi, al fine d’inizializzare i modelli di pericolosità, vengono inviati quotidianamente i valori nei punti di griglia, per ogni ora e fino a +48h, delle grandezze:

- umidità relativa a 2 metri [%]
- temperatura a 2 metri [°C]

- intensità del vento a 10 metri [m/s]
- direzione del vento a 10 metri [deg]
- radiazione diretta istantanea [W/m^2]

Inoltre, sono prodotte a cadenza oraria fino a +48h, due serie di mappe che, sovrainposte le 26 zone regionali di pericolo incendi nella quale è stato suddiviso il territorio della Sardegna (in fig. 2 un esempio di quelle fornite nella campagna AIB 2019), combinano diverse grandezze:

- temperatura a 2 m [$^{\circ}C$] e umidità relativa a 2 m [%]
- temperatura a 2 m [$^{\circ}C$] e vettore vento a 10 m [m/s, deg].

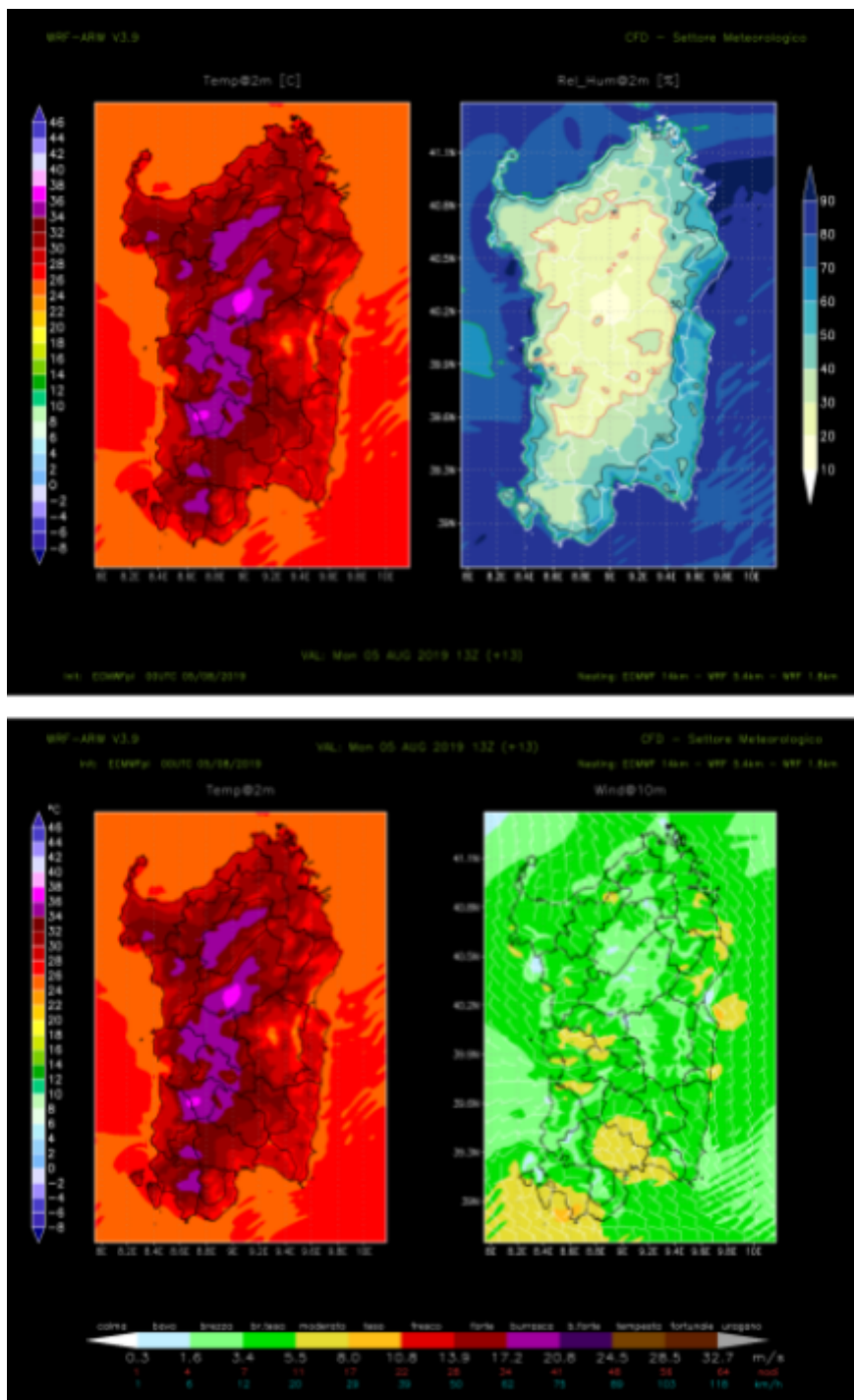


Figura 2 : temperatura e umidità relativa a due metri dal suolo e vento a dieci metri per la campagna AIB 2019 previste dal modello WRF-ARW V3.9 per la Sardegna.

Regione Toscana

Il calcolo delle variabili necessarie alla valutazione del rischio di incendi è stato implementato dal Consorzio LAMMA, a partire dal 2007, mediante il modello WRF-ARW.

WRF è un sistema di previsione numerica di mesoscala di ultima generazione, concepito sia per la ricerca sia per le previsioni operative dello stato del tempo. Consiste di due diversi "core" per la dinamica, di un sistema di data assimilation, e di un'architettura software che supporta il calcolo parallelo e l'estendibilità del sistema. Il sistema è in grado di simulare le condizioni atmosferiche attraverso un ampio range di scale: dalle decine di metri, fino alle centinaia di km.

WRF viene fatto girare sul cluster di calcolo del Consorzio LAMMA a diverse risoluzioni e con più corse giornaliere che permettono di produrre previsioni operative ad altissima risoluzione di dettaglio spaziale.

La configurazione e i dati di inizializzazione sono diversi rispetto a quelli utilizzati in Sardegna. Le configurazioni attuali, oggetto di continua ricerca e sviluppo, sono infatti frutto di anni di test e sono state specificamente ottimizzate per il territorio italiano ed in particolare toscano tramite l'introduzione di parametri locali quali uso suolo e tipo di vegetazione.

I dati di analisi e di condizioni al contorno sono ottenuti dai seguenti modelli:

- modello globale GFS (Global Forecasting System) del National Center for Env Prediction (NCEP) a 0.25 gradi di risoluzione;
- modello globale IFS (Integrated Forecasting System) del Centro Europeo (ECMWF) a 0.125 gradi di risoluzione.

Il modello WRF_3km gira su una griglia lambertiana a 3 km di risoluzione su di un'area che copre la penisola italiana con 50 livelli verticali senza parametrizzazione dei cumuli (convezione esplicita).

Vengono effettuate 4 corse al giorno (00, 06, 12 e 18 UTC) con ognuna delle due inizializzazioni (GFS e IFS), per un totale di 8 corse al giorno, con un orizzonte temporale di previsione di 48 ore per la corsa delle 00, 42 ore per la corsa delle 06, 60 ore per la corsa delle 12 e 54 ore per la corsa delle 18, in modo da effettuare 2 giorni completi di previsione per tutte le corse.

Per la valutazione delle condizioni di rischio per lo sviluppo e propagazione degli incendi boschivi, negli ultimi anni, la Regione Toscana si è dotata di un sistema di calcolo dell'indice di rischio per lo sviluppo e propagazione degli incendi boschivi che, sulla base di osservazioni e previsioni meteorologiche, permette di valutare la predisposizione dei boschi ad essere interessati dal fuoco.

La previsione della variazione del pericolo di incendio nel breve-medio periodo, effettuata pertanto su base oggettiva, è utile ai fini di una più efficace organizzazione degli interventi e dei servizi di prevenzione, nonché per ottimizzare il modo in cui i mezzi e risorse, necessarie alle operazioni di spegnimento, vengono predisposte sul territorio. La conoscenza della probabilità di inizio e di diffusione di incendio consente, inoltre, di attuare interventi e

provvedimenti finalizzati al rispetto generale delle norme di prevenzione per l'abbruciamento di residui vegetali e l'accensione di fuochi.

Le funzioni principali della previsione delle condizioni di rischio per lo sviluppo e propagazione degli incendi boschivi possono pertanto essere riassunte come segue:

- definizione del livello di rischio giornaliero;
- individuazione delle soglie, oltre le quali devono essere attivati gli interventi e servizi di prevenzione AIB, nonché i controlli per il rispetto delle norme di prevenzione AIB;
- emanazione dei provvedimenti e dei relativi bollettini di informazione per la cittadinanza, ai fini del rispetto delle norme di prevenzione dagli incendi boschivi.

I prodotti realizzati sono sia con visibilità riservata che pubblica.

Per la parte riservata all'organizzazione AIB i prodotti consistono in:

- un portale WebGIS per la navigazione dinamica degli indici di rischio;
- un "Bollettino di Analisi meteo AIB".

Dopo la sperimentazione avvenuta nel corso del 2017 e 2018, è stata data piena attuazione al Bollettino di Analisi meteo AIB quale strumento di supporto alla previsione del rischio. In presenza di condizioni di rischio MOLTO ALTO (indice FWI ROSSO) in una o più zone, il Settore Forestazione, entro le ore 12, invia tramite posta elettronica il bollettino di Analisi Meteo AIB agli Analisti AIB, ai Direttori delle operazioni di spegnimento, alla Sala Operativa Unificata Permanente (SOUP), ai Centri Operativi Provinciali (COP) AIB e al Coordinamento regionale Volontari antincendi boschivi della Toscana (CVT). Il bollettino di Analisi Meteo AIB, nel quale vengono riassunti i principali indici e parametri meteo ai fini AIB (fig. 3), contiene due sezioni: "COSA ABBIAMO AVUTO" e "COSA CI ASPETTIAMO". Nella sezione "COSA ABBIAMO AVUTO" vengono riportate le informazioni riguardanti il numero, la distribuzione territoriale e le caratteristiche degli incendi boschivi che si sono verificati in Toscana durante la giornata precedente, mentre nella sezione "COSA CI ASPETTIAMO" viene effettuata un'analisi puntuale delle condizioni meteo previste per la giornata, suddivisa in fasce orarie (fig. 4).

Particolare rilievo viene dato alle caratteristiche del vento, umidità relativa dell'aria e condizioni atmosferiche in termini di stabilità/instabilità, nonché alla tipologia e intensità degli incendi attesi, oltre ad indicazioni operative ritenute particolarmente utili in funzione delle condizioni meteo presenti e previste.

Per la parte pubblica è stato realizzato il "Bollettino rischio incendi boschivi", raggiungibile dal seguente link:

<http://www.regione.toscana.it/-/il-sistema-di-previsione-in-toscana>



Analisi meteo AIB
Domenica, 16 Luglio 2017
 SITUAZIONE METEO

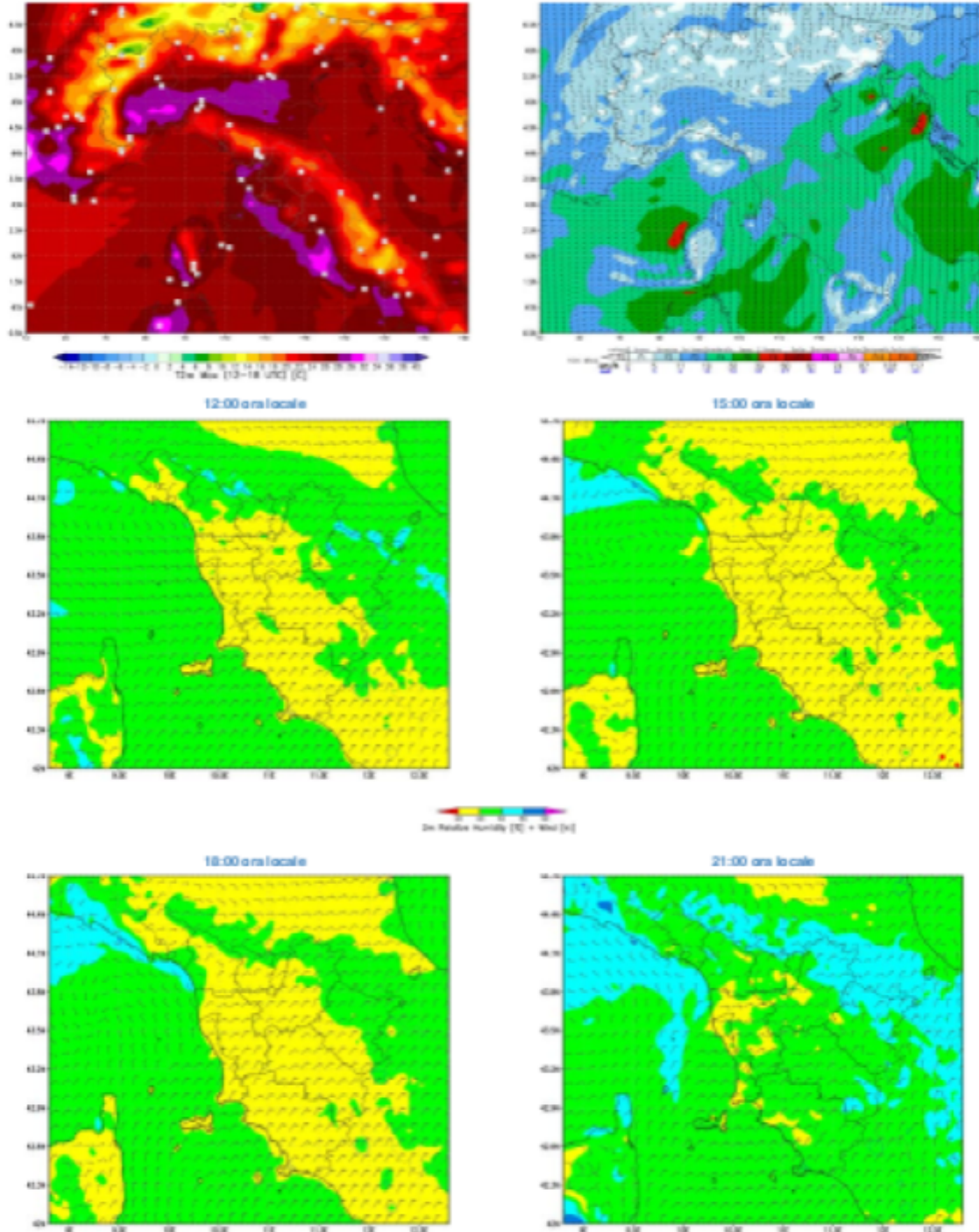


Figura 3: Parametri meteo riportati nel bollettino di Analisi Meteo AIB in Toscana.



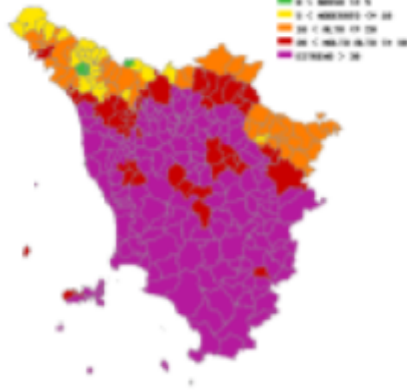
Analisi meteo AIB
Domenica, 16 Luglio 2017

7



LIVELLI DI RISCHIO:
ESTRIMO

Indice FWI previsto per oggi
 (importanza del fuoco - pericolosità potenziale)



COSA ABBIAMO AVUTO:

Nelle giornate di ieri sono verificati numerosi incendi isolati e già rilevanti, nelle province di Siracusa ed Azzara, a Paternò (SR) si è verificato un incendio, tuttora in corso, che ha interessato circa 20 ettari di bosco misto (principalmente cuscutole depauperate e pini).
 Da notare come i incendi notturni abbiano visto massimi intensità a quelli della notte precedente a causa del persistere della ventilazione di nord anche durante la notte.

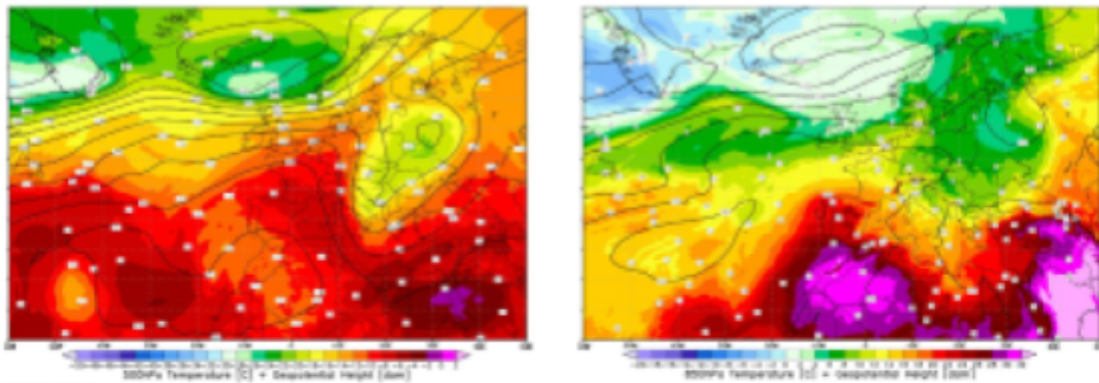
Umidità relativa massima registrata nella notte



COSA CI ASPETTIAMO:

ATTENZIONE SU TUTTO IL TERRITORIO REGIONALE!
 Il titolo meteo prevedeva un di giorno su tutta la regione, intensità generalmente intorno a 20-30°C, con tendenza ad attenuarsi a partire dalla sera. I venti, durante le ore centrali della giornata, saranno accompagnati da venti debolissimi relativamente molto bassi, anche compresi fra 20-30%. Si continuerà a rischio di eventi in zone dell'entroterra, in costa granitica, in montagna, in colline del Fico, il compimento dell'isola e i monti della vallata di Siracusa e Azzara, dove si potranno verificare occasionalmente incendi soprattutto con vento di alta intensità.
 Su tutto il territorio regionale, in presenza di incendi si raccomanda la disponibilità dell'intervento e particolare attenzione alle operazioni di bonifica al fine di scongiurare quelle che potrebbero essere dovute dalle condizioni meteo presenti. Durante gli eventi si consiglia inoltre di monitorare l'osservazione del rischio e le previsioni a breve termine.

SITUAZIONE METEO



DESCRIZIONE:

Vasto campo di alta pressione si estende dalle isole britanniche all'Europa centrale. Minimo depressionario sul Tevere con forte gradiente barico sulla nostra penisola. Da martedì il minimo sull'Egeo tenderà a colmare mentre il Mediterraneo Centrale sarà nuovamente interessato da un promontorio di alta pressione di matrice africana.

Figura 4: Esempio di Bollettino di analisi meteo AIB con sintesi delle informazioni relative alle condizioni del giorno precedente e previsione per il giorno in atto.

Regione Liguria

La valutazione del rischio incendi in Liguria è effettuata attraverso l'elaborazione del modello RISICO, che può essere alimentato da qualsiasi modello meteorologico disponibile. Le corse operative elaborate da Fondazione CIMA a livello nazionale sono alimentate da COSMOI2, COSMOI5, ECMWF, mentre la corsa operativa di Regione Liguria è alimentata da MOLOCH_Liguria con risoluzione spaziale di 2 km.

MOLOCH, analogamente al modello BoLAM, è un modello sviluppato dal gruppo di modellistica numerica MODAT del CNR-ISAC in grado di fornire previsioni spazialmente dettagliate e che rappresenta esplicitamente i fenomeni convettivi. Esso integra le equazioni per un'atmosfera non idrostatica e compressibile, con un passo di griglia attualmente di 0.0113 gradi, corrispondente a 1.25 km, 60 livelli atmosferici e 7 livelli di suolo.

Rispetto a BoLAM cambia il fatto che MOLOCH è un modello non idrostatico, quindi l'equazione del moto verticale non è approssimata dall'equazione idrostatica, ma è completa. Questo permette di aumentare le risoluzioni spaziali di previsione, alle quali l'approssimazione idrostatica non sarebbe più attendibile. Andando verso risoluzioni migliori si possono descrivere i fenomeni atmosferici con maggior dettaglio (ad esempio quei fenomeni legati all'orografia). L'altra grande differenza risiede nel fatto che mentre in BoLAM la convezione è parametrizzata, ovvero descritta in forma "approssimata", nel modello MOLOCH la convezione è descritta dalle equazioni del modello. Sebbene permanga la difficoltà di prevedere i fenomeni convettivi, in linea di massima il modello MOLOCH dovrebbe permetterne una migliore descrizione e conseguentemente una previsione più accurata.

Le corse di MOLOCH partono dalle ore 03:00 UTC di ogni giorno.

Fondazione CIMA produce inoltre corse del Modello atmosferico WRF per conto di ARPAL (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Ligure) in due distinte configurazioni modellistiche WRF (versione 3.9.1):

- WRF-1.5km OL: Configurazione open loop (senza assimilazione dati) a 3 domini rispettivamente con risoluzione spaziale 13.5, 4.5 e 1.5 km con 50 livelli verticali (fig. 5). I dati di analisi e di condizioni al contorno (con frequenza oraria) sono ottenuti dal modello globale GFS (Global Forecasting System) del National Center for Environmental Prediction (NCEP) a 0.25 gradi di risoluzione. Viene effettuata 1 corsa al giorno (00 UTC) con i dati GFS con un orizzonte temporale di previsione di 48 ore per avere 2 giorni completi di previsione. Tale previsione viene eseguita su risorse di calcolo presso CINECA e viene consegnata ad ARPAL entro le 730UTC.

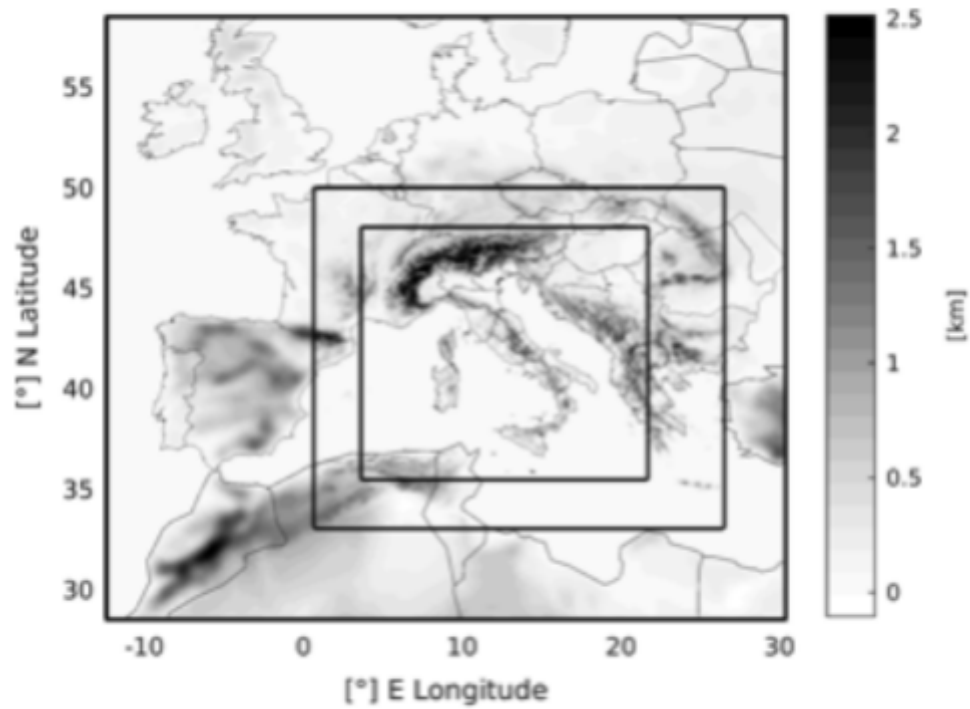


Figura 5: risoluzione spaziale di WRF-1.5km OL

- WRF-2.5km 3DVAR: Configurazione con assimilazione variazionale 3DVAR ciclica a 3 domini rispettivamente con risoluzione spaziale 22.5, 7.5 e 2.5 km (su tutto il territorio italiano) con 50 livelli verticali (fig. 6). I dati di analisi e di condizioni al contorno (con frequenza trioraria) sono ottenuti dal modello GFS a 0.25 gradi di risoluzione.

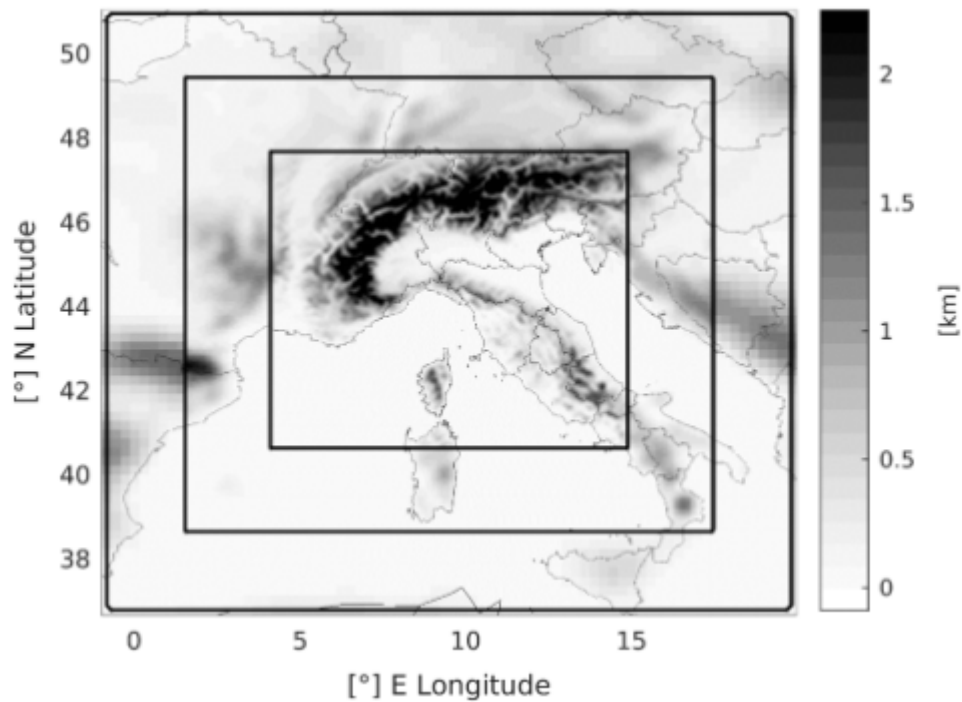


Figura 6: risoluzione spaziale di WRF-2.5km 3DVAR

Lo schema di assimilazione prevede due distinte run:

- WRF-2.5 km è inizializzato con il modello GFS delle 18:00 UTC, la cui analisi è integrata, mediante 3DVAR, da dati remote sensing nonché dai dati delle stazioni in situ della rete fiduciaria del Dipartimento della Protezione Civile Italiana. Il modello WRF viene così eseguito per 3 ore fino alle 21:00 UTC, quando viene applicato un secondo ciclo di assimilazione 3DVAR. WRF viene poi eseguito per ulteriori 3 ore fino alle 00:00 UTC, quando viene applicato un terzo e ultimo ciclo di assimilazione 3DVAR. La previsione WRF viene poi effettuata per ulteriori 48 ore a partire dalle 00UTC al fine di avere 2 giorni completi di previsione, a risoluzione temporale oraria.
- WRF-2.5 km è inizializzato con il modello GFS delle 6:00 UTC, la cui analisi è integrata, mediante 3DVAR, da dati remote sensing nonché dai dati delle stazioni in situ della rete fiduciaria del Dipartimento della Protezione Civile Italiana. Il modello WRF viene così eseguito per 3 ore fino alle 9:00 UTC, quando viene applicato un secondo ciclo di assimilazione 3DVAR. WRF viene poi eseguito per ulteriori 3 ore fino alle 12:00 UTC, quando viene applicato un terzo e ultimo ciclo di assimilazione 3DVAR. La previsione WRF viene poi effettuata per ulteriori 48 ore a partire dalle 12UTC al fine di avere 2 giorni completi di previsione, a risoluzione temporale oraria.

Entrambe le previsioni vengono elaborate su risorse di calcolo presso Fondazione CIMA (3 cluster) e vengono consegnate ad ARPAL rispettivamente entro le 3:30 UTC e le 14:30 UTC.

I prodotti previsionali di alcune delle configurazioni modellistiche WRF-1.5km OL e WRF-2.5 km 3DVAR alimentano successivamente l'esecuzione del modello idrologico Continuum, nonché del modello per il rischio di incendi RISICO (corsa 00UTC). Attualmente le corse del modello RISICO con la modellistica WRF sono sperimentali e non utilizzate operativamente per la produzione di bollettini. Il modello WRF è usato operativamente da ARPAL e Arpa Valle d'Aosta, nonché in maniera sperimentale dal Dipartimento della Protezione Civile Italiana.

Il run operativo di RISICO per Regione Liguria utilizza il modello MOLOCH ed è utilizzato per attivare procedure di prevenzione (pattugliamento) e per la fase di preparedness. Il prodotto è accessibile attraverso la piattaforma DEWETRA previa richiesta di autorizzazione e rilascio di username e password.

Regione PACA e Corsica

Nell'area del Mediterraneo (ovvero i dipartimenti di Languedoc-Rossiglione, PACA, Corsica e Drôme-Ardèche) viene effettuata una previsione di pericolo meteorologico due volte al giorno per ogni zona a rischio di incendio boschivo. La previsione è sviluppata da un meteorologo esperto dell'unità Feux de Forêt (FDF), sotto forma di una scala a 6 livelli distinti da un codice colore. F debole (blu) - L leggero (verde) - M moderato (giallo) - S grave (arancione) - T molto grave (rosso) - E estremo (nero). La previsione rappresenta il livello medio di una percentuale significativa dell'area interessata dal pericolo (fig. 7).

Un esperto di ingegneria meteorologica di Météo-France è presente ogni giorno all'EMIZ Sud per perfezionare l'analisi meteorologica, preparare mappe di pericolo, bollettini e partecipare a briefing. Le carte con i codici colore sono accompagnate dalle previsioni commentate che riprendono gli elementi importanti e possono qualificare il pericolo o spiegarlo meglio.

Esistono due fasi di analisi previsionale del pericolo meteorologico degli incendi:

1. Previsione dei parametri meteorologici: i dati meteorologici sono valutati su un database comune (previsione a monte), se il meteorologo pensa che il vento sarà più forte in Corsica, può forzare i parametri del vento;
2. Previsione del pericolo meteorologico degli incendi: la responsabilità è del previsore di FDF di Météo France all'EMIZ Sud.

La previsione dei parametri meteorologici utilizzati nell'analisi del pericolo di incendio viene effettuata dalla previsione a monte. Gli esperti scelgono un'inizializzazione da diversi modelli meteorologici in base alla pertinenza del modello: AROME (maglia 1,3 km), ARPEGE o CEP (ECMWF). Vengono fatte due previsioni al giorno:

- Mattina: previsioni per il pomeriggio;
- Pomeriggio: previsioni per la mattina successiva.

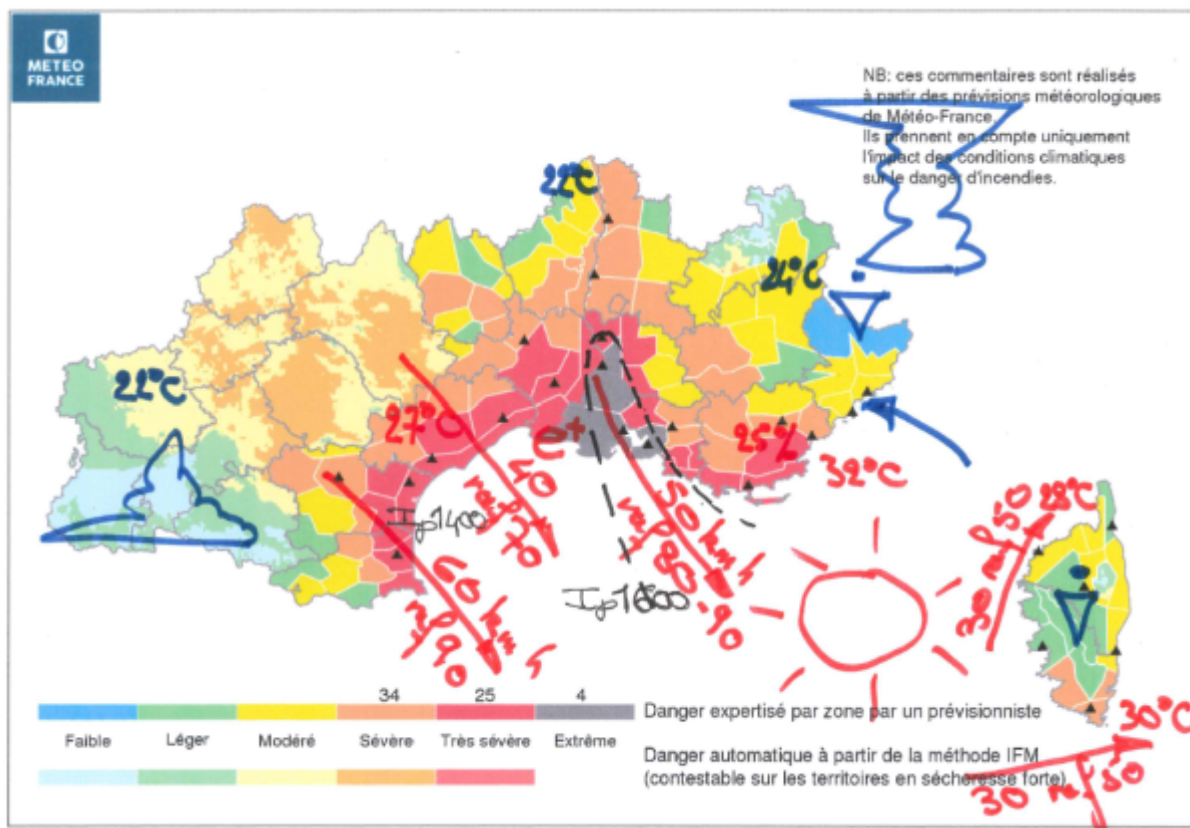


Figura 7: esempio di carta della pericolosità meteorologica di incendio del 5 settembre 2019.

Le previsioni meteorologiche regionali (vento, temperatura, nuvolosità) vengono trasmesse all'antenna meteorologica EMIZ Sud e sul sito Extranet FDFSE di Météo France.

Gli indici di pericolo vengono automaticamente calcolati, successivamente, tali indici sono elaborati dal meteorologo FDF che valuta anche i parametri di umidità e precipitazione.

I parametri forniti:

- direzione e velocità del vento;
- temperatura;
- l'umidità;
- nuvolosità;
- precipitazioni.

I parametri corrisponderanno alle condizioni riscontrate il pomeriggio tra le 12 e le 18 ora locale.

Per la previsione del rischio, è indispensabile stimare correttamente la quantità di pioggia prevista su ciascuna delle zone meteo.

La previsione "incendi forestali" presenta le condizioni più favorevoli per gli incendi, cioè la lama d'acqua minima prevista. Tenuto conto di questa definizione, è possibile trovare delle lame d'acqua deboli nella previsione "incendi forestali", allorché la carta di vigilanza e il bollettino

presentano (prevedono) delle quantità d'acqua molto più importanti. In questo caso si terrà conto della lama d'acqua minima attesa.

In Corsica, è in fase di sviluppo un altro modello di rischio per gli incendi boschivi. Il modello si basa sul modello atmosferico Meso-NH / SURFEX abbinato al modello a propagazione del fuoco di ForeFire implementato nell'ambito del progetto FireCaster. L'obiettivo del progetto FireCaster è il potenziamento, a scala nazionale, degli strumenti sviluppati facendo affidamento sui recenti progressi tecnologici nel campo della meteorologia, dell'assimilazione dei dati, della modellazione del fuoco e dell'informatica, mediante la creazione di una piattaforma web che consenta di stimare il rischio di incendio futuro (h + 24, h + 48) e la simulazione in caso di crisi, disponibile ovunque, sempre, per prevedere la posizione delle fiamme e delle emissioni inquinanti in caso di incendio.

L'Università della Corsica partecipa allo sviluppo dell'elaborazione dei modelli Meso-NH / SURFEX. Questi calcoli giornalieri ad altissima risoluzione e altissima frequenza hanno lo scopo di fare previsioni a breve termine per eventi molto localizzati come gli incendi.

Meso-NH è il modello atmosferico a mesoscala non idrostatico della comunità di ricerca francese. È stato sviluppato congiuntamente dal Laboratoire d'Aérodologie (UMR 5560 UPS / CNRS) e dal CNRM (UMR 3589 CNRS / Météo-France). Meso-NH incorpora un sistema di equazioni non idrostatiche, per gestire scale che vanno dalle scale grandi (sinottiche) a quelle piccole (grandi vortici), comprendendo un set completo di parametrizzazioni fisiche che sono particolarmente avanzate per la rappresentazione di nuvole e precipitazioni.

È accoppiato al modello di superficie SURFEX per la rappresentazione delle interazioni dell'atmosfera superficiale considerando diversi tipi di superficie (vegetazione, città, oceano, lago) e permette un approccio multi-scala attraverso una tecnica di annidamento della griglia;

È un codice versatile, vettoriale, parallelizzato, operativo in 1D, 2D o 3D progettato per gestire situazioni reali e casi di studio;

SURFEX (Surface Externalisée), una piattaforma di modellazione di superfici sviluppata da Météo-France in collaborazione con la comunità scientifica, è composto da vari modelli fisici per la superficie del terreno naturale, aree urbanizzate, laghi e oceani. Simula, inoltre, i processi chimici e aerosol di superficie e può essere utilizzato per l'assimilazione di variabili superficiali e vicine alla superficie.

Per il rischio incendi vengono elaborate informazioni meteorologiche a una risoluzione di 1,4 km, sovra-risolte a una risoluzione di 600 m per una migliore considerazione di brezze e

rilievi. Il calcolo giornaliero richiede 6 ore su 120 processori e genera 800 GB di dati per la sola Regione Corsica.

Modelli di pericolosità di incendio

Tradizionalmente il rischio e la pericolosità connessi agli incendi boschivi sono stati valutati impiegando dati e metodologie differenti che hanno condotto alla determinazione di vari e differenti indici, tutti con lo scopo di individuare e misurare i fattori predisponenti l'innescò e la propagazione. Differenti approcci modellistici e algoritmi sono stati, infatti, sviluppati al fine di adattarsi alle differenti condizioni meteo-climatiche, alle differenti morfologie dei territori e ai tipi di vegetazione. In generale, per i fenomeni naturali, il rischio è dato dalla combinazione tra la pericolosità, la vulnerabilità e l'esposizione:

$$RISCHIO = Pericolosità \times Vulnerabilità \times Esposizione$$

Il primo termine fa riferimento alla probabilità che avvenga un determinato fenomeno naturale, di una certa estensione, intensità e durata, con conseguenze negative.

Il secondo parametro si riferisce all'impatto del fenomeno sulla società ed è strettamente correlato all'uso del territorio.

L'esposizione, infine, prende in considerazione la quantità e qualità di tutto ciò che è esposto al rischio (popolazione, edifici, attività economiche e servizi).

La pericolosità dipende dalla probabilità di innescò e dalla probabilità di propagazione del fuoco in una determinata area, mentre la vulnerabilità prende in considerazione gli effetti ecologici, i danni alle infrastrutture e proprietà e alle perdite umane causate da un incendio.

In bibliografia esistono numerosi indici che sono stati sviluppati nel tempo in relazione alle caratteristiche ed esigenze specifiche dei territori. La maggior parte di essi include le condizioni meteorologiche, in forma di previsione o attraverso osservazioni dirette, in quanto costituiscono le variabili indipendenti dall'intervento del fattore antropico che influiscono maggiormente sul fenomeno e sul comportamento degli incendi.

In questo capitolo sono raccolte le informazioni di dettaglio degli approcci modellistici, utilizzati nei 5 territori di Programma, relativi alla stima del rischio e della pericolosità di incendio.

Regione Sardegna

Modellistica AIB

I modelli per la definizione della pericolosità AIB, utilizzati dal Centro Funzionale Decentrato (CFD) della Regione Autonoma della Sardegna, sono i seguenti:

- Modello IFI (Ichnusa Fire index) (Spano et al. 2003; Sirca et al. 2006; 2007; Cadoni 2014; Sirca et al., 2018) specificatamente sviluppato per la stima della pericolosità in ambiente mediterraneo, fornisce un output numerico proporzionale al grado di pericolosità potenziale stimato, suddiviso in una scala variabile da 1 (pericolosità molto bassa) a 5 (pericolosità estrema). L'IFI è calcolato come somma di quattro moduli: il Meteo Code (MC) che tiene conto delle condizioni meteorologiche, il Drough Code (DC), che rappresenta la parametrizzazione del bilancio idrico ed è ottenuta come rapporto tra l'evapotraspirazione e la precipitazione, il Fuel Code (FC) che tiene conto del tipo di vegetazione e dell'umidità e un quarto modulo (R) che è funzione della radiazione globale. L'indice IFI considera le seguenti variabili, previste dalla modellistica meteorologica e/o registrate nel periodo precedente:
 - Temperatura media e massima giornaliera;
 - Umidità relativa minima giornaliera;
 - Intensità del vento massima giornaliera;
 - Radiazione solare globale media e massima giornaliera;
 - Precipitazione giornaliera prevista e cumulata nelle ultime 96 ore;
 - Calore latente di evaporazione.

- Modello Speditivo Forestale sviluppato dal CFVA, è stato utilizzato dalla Regione Sardegna dal 2005 ed è correlato alle seguenti variabili, previste dalla modellistica meteorologica e/o registrate nel periodo precedente:
 - Temperatura massima giornaliera;
 - Velocità massima del vento;
 - Media della temperatura massima giornaliera degli ultimi 7 giorni;
 - Valore minimo dell'umidità relativa giornaliera.

Ad ogni singolo parametro viene assegnato un indice. L'indice speditivo (MS) è ottenuto come somma di quattro componenti: la MS Tmax che è funzione della temperatura massima giornaliera dell'aria, la MS U.R.min funzione dell'umidità relativa minima giornaliera, la MS I.V.max funzione dell'intensità del vento massima giornaliera e la MS Tmed.max7gg che è funzione della media delle temperature massime giornaliere registrate negli ultimi sette giorni.

- Il sistema RIS.I.CO (RISchio Incendi e COordinamento) (Fiorucci et al. 2011) è un modello matematico sviluppato da Fondazione CIMA per supportare gli operatori del settore nelle attività di prevenzione degli incendi boschivi. Utilizzato sin dal 2003 dalla Protezione Civile Nazionale per individuare le priorità di dislocamento dei mezzi aerei dello Stato per lo spegnimento. RISICO è alimentato da un flusso di dati continuo costituito dai dati meteorologici in tempo reale, dalle previsioni meteorologiche fornite dai modelli disponibili e da informazioni satellitari. Tutta questa mole di informazioni, che tengono in considerazione parametri come il contenuto di umidità della vegetazione, il vento e l'orografia del territorio, consentono di valutare quantitativamente il pericolo conseguente all'eventuale innesco di un incendio boschivo in termini di velocità di propagazione e intensità lineare del fronte di fiamma.

Utilizzo della modellistica AIB e attività del CFD

Il bollettino di previsione di pericolo incendi (BPI) predisposto dal Centro Funzionale Regionale (CFD) della Regione Sardegna, si basa sull'analisi degli output forniti dai modelli di pericolosità succitati e sull'analisi delle principali variabili meteo (temperatura, umidità, vento e precipitazioni) effettuata giornalmente dall'area meteo del CFD (ARPAS).

Sono di supporto alla previsione, anche l'analisi congiunta eseguita dalle aree meteo e idro del CFD, delle variabili meteorologiche dei modelli BoLAM, WRF e ECMWF-IFS e degli output del modello sperimentale IMI, un modello di pericolosità messo a punto da ARPAS e basato esclusivamente sulle forzanti meteorologiche.

Dalla campagna AIB del 2017, dopo una fase di sperimentazione avviata nel 2015, il livello di pericolosità non è più stabilito su scala provinciale, ma su 26 zone omogenee di allerta/pericolosità individuate dal gruppo di lavoro costituito dal Centro Funzionale Decentrato, area idro e meteo, e dal CFVA.

Il gruppo di lavoro ha definito le 26 zone in seguito a specifiche elaborazioni che hanno tenuto conto dei fattori orografici, altimetrici, climatici e fisici che influenzano l'innesco e la propagazione degli incendi.

I livelli di pericolosità previsti nel bollettino AIB sono 4: bassa (verde), media (giallo), alta (arancione) ed estrema (rosso). La pericolosità è sempre riferita al giorno seguente, ad ogni livello corrispondono determinate condizioni operative nelle attività di spegnimento.

Nel bollettino, per ognuna delle 26 zone, è stabilito un livello di pericolosità a cui è associata una fase operativa minima regionale (attenzione, preallarme, allarme), che può essere

innalzata dal Direttore Generale della Protezione Civile regionale, qualora ne riscontrasse le condizioni.

Il contenuto del bollettino esplica quella che è la valutazione giornaliera che viene eseguita dall'analisi dei dati generati dai modelli e dall'analisi delle variabili che il funzionario di turno esegue con il supporto del collega dell'area meteo dell'ARPAS.

I destinatari principali del bollettino di pericolosità sono in primo luogo gli operatori del sistema regionale antincendio addetti alla fase di avvistamento e lotta attiva, che possono regolare il proprio operato in funzione del codice di pericolosità nelle diverse zone di allerta, ma soprattutto in relazione a quella che è la fase operativa associata, sulla base della quale sono predisposti e potenziati i servizi relativi come rafforzamenti dei turni, spostamenti delle squadre di lotta e prolungamento dei turni delle vedette.

Le strutture AIB sono allertate attraverso la pubblicazione del BPI nel sito istituzionale e sulla piattaforma web regionale ZEROGIS, finalizzata alla gestione, sia a livello locale che regionale, delle risorse e delle strutture di protezione civile. Per quanto riguarda le organizzazioni di volontariato, esse vengono informate attraverso un SMS nel caso di particolari condizioni di pericolosità in una o più zone di allerta di competenza.

Regione Toscana

FWI (Fire Weather Index) rappresenta l'indice meteorologico di pericolo di incendio utilizzato operativamente.

È stato implementato un sistema di previsione del rischio incendi boschivi sul territorio toscano che utilizza l'indice canadese per determinare il livello di pericolo di incendio giornaliero in ogni comune della Toscana. Le Classi di pericolo in Toscana sono:

- Rischio Basso - propagazione del fronte di fiamma poco probabile;
- Rischio Moderato - propagazione lenta. Estinzione facilmente realizzabile;
- Rischio Alto - propagazione a velocità moderata. Estinzione efficace se tempestiva;
- Rischio Molto Alto - propagazione rapida. Estinzione difficoltosa;
- Rischio Estremo - condizioni molto difficili. Estinzione impegnativa.

L'ingegnerizzazione del modello Indice di Rischio si è basata sull'acquisizione dei dati delle stazioni meteorologiche installate sul territorio regionale e regioni limitrofe e sulla successiva spazializzazione delle variabili meteorologiche utilizzate in input dal modello FWI (temperatura, precipitazione, umidità e vento), ottenute utilizzando l'algoritmo DAYMET (www.daymet.org) implementato dal Consorzio LaMMA, con una risoluzione pari a 250m.

FWI è calcolato su 6 componenti, di cui tre relative all'umidità del combustibile e tre relative al comportamento del fuoco. Le tre componenti relative all'umidità del combustibile (FFMC, DMC e DC) sono modelli dinamici che stimano la variazione di contenuto idrico del combustibile forestale. I secondi tre (ISI, BUI e FWI) sono indici del comportamento del fuoco che rappresentano il tasso di diffusione, il carico di combustibile consumato e l'intensità del fuoco.

Tramite l'utilizzo degli indici Fine Fuel Moisture Code (umidità del combustibile fine - incendiabilità potenziale) e Fire Weather Index (comportamento del fuoco - pericolosità potenziale), vengono quotidianamente calcolate le seguenti tipologie di rischio:

- rischio stazioni: calcolato per il giorno in corso, utilizzando le spazializzazioni dei dati delle stazioni termopluviometriche, con una risoluzione pari a 250m.
- rischio previsionale (3 giorni): calcolato dai modelli previsionali utilizzati dal Consorzio LaMMA (WRF 3km) estraendo giornalmente le variabili di input del modello canadese.

Una volta create le mappe di previsione del rischio viene eseguita una media comunale: per ogni comune della Toscana abbiamo dunque valori di FFMC e FWI che vengono memorizzati automaticamente in un database. Le mappe di rischio così create vengono gestite e pubblicate in rete tramite web services secondo gli standard dell'Open Geospatial

Consortium per i dati spaziali. Tale caratteristica consente di renderle facilmente pubblicabili sia su un bollettino in formato .pdf che su un applicativo webgis (visualizzazione dinamica).

Le informazioni relative al rischio sono rese fruibili alla cittadinanza grazie alla realizzazione del “Bollettino rischio incendi boschivi”, raggiungibile dal seguente link: <http://www.regione.toscana.it/-/il-sistema-di-previsione-in-toscana>.

La classificazione del rischio riportata nei bollettini è il frutto di una procedura condivisa a livello nazionale per individuare quattro livelli di pericolosità, così come già avviene, ad esempio, per le allerte meteo. Alle quattro classi di rischio sono associati altrettanti colori che, per ogni singolo comune della Toscana, consentono di individuare immediatamente il livello di pericolo di innesco e propagazione degli incendi boschivi: basso (verde) – medio (giallo) – alto (arancio) – molto alto (rosso). A ogni colore corrisponde, inoltre, la descrizione dello specifico scenario atteso.

Oltre al monitoraggio del rischio è prevista una sezione che evidenzia i comportamenti corretti che ciascuno di noi deve tenere, sia per evitare l'innesco di un incendio forestale, sia nel caso in cui avvisti un principio di incendio.

La frequenza di aggiornamento del modello e di emissione dei vari bollettini è di 4 volte al giorno.

Regione Liguria

In Liguria la pericolosità di incendi è calcolata attraverso il modello RISICO (Rischio Incendi e Coordinamento), un modello semi fisico basato su un modello dinamico di simulazione del contenuto idrico della necromassa, che tiene debitamente in considerazione le differenti tipologie di combustibile. Il modello integra i contributi della pendenza e del vento al fine di generare mappe triorarie di velocità di propagazione potenziale ed intensità lineare del fronte.

Il modello utilizza come dati di input le variabili meteorologiche ed alcuni parametri statici che descrivono la tipologia di copertura e la morfologia del territorio, in particolare:

- distribuzione combustibili;
- orografia del terreno;
- variabili meteorologiche (Pioggia, vento, umidità relativa e temperatura dell'aria);
- mappa di suscettività all'innescio;
- indici di vegetazione da satellite (Sentinel-2);
- mappa di copertura nevosa.

I moduli principali che costituiscono l'architettura complessiva del sistema RISICO sono:

- un modello fenologico di simulazione delle variazioni del contenuto in umidità dei combustibili morti;
- un modello per la simulazione delle variazioni della quantità di biomassa (viva e morta) e del contenuto in umidità dei combustibili vivi (fitomassa);
- un modello per la simulazione della velocità di propagazione ($m s^{-1}$) e dell'intensità lineare del fronte ($kW m^{-1}$) conseguente al potenziale innescio del fuoco.

A supporto della previsione viene utilizzato l'indice di pericolo definito sulla base delle principali grandezze che caratterizzano la pericolosità potenziale di 'innescio e propagazione di un fuoco, aggregate a scala giornaliera: l'umidità dei combustibili morti fini, l'acclività dei versanti e la velocità del vento prevista. L'indice di pericolo è ottenuto dall'aggregazione spaziale e temporale della velocità di propagazione potenziale definendo delle classi di pericolo definite sulla base di valori soglia. I valori di soglia vengono calcolati tramite un processo di validazione basato sul confronto fra il valore dell'indice e le caratteristiche fisiche di una serie storica di incendi occorsi. La velocità di propagazione è definita su una scala spaziale di 50 m con frequenza temporale trioraria.

La frequenza di aggiornamento del modello può essere definita in funzione della disponibilità di osservazioni meteorologiche e/o aggiornamenti dei modelli meteo. La frequenza di emissione è a discrezione dell'utente finale.

L'accesso agli output del modello e alla generazione dei bollettini avviene attraverso la piattaforma DEWETRA previa richiesta di autorizzazione e rilascio di username e password. Gli output del modello possono altresì essere trasferiti via ftp in formato standard NetCDF al fine di essere visualizzati in altre piattaforme.

Regione PACA e Corsica

In entrambe le regioni, gli indici di pericolo sono gli strumenti numerici che fungono da base per la previsione del pericolo meteorologico. I 3 indici di pericolo utilizzati nell'analisi Météo France (IFM, IPse, indice di soglia) sono pubblicati su Extranet FDFSE o nei messaggi trasmessi da EMIZ Sud.

I meteorologi calcolano gli indici di pericolo per tutte le ore al fine di trovare gli indici MASSIMI della giornata per ogni zona e, quindi, di caratterizzare il MASSIMO pericolo della giornata. Inoltre, è necessario valutare questi indici di pericolo, poiché, se in genere forniscono una buona simulazione del livello di pericolo, ci sono casi particolari in cui possono dare risultati poco affidabili. Per questo motivo, essi rappresentano informazioni aggiuntive per coloro che desiderano approfondire la previsione di pericolo valutata (F L M S T E), ma non possono sostituirla.

L'IFM (Indice Forêt-Météo) è un indice di pericolo ambientale ed è l'ultimo indice di pericolo integrato nel sistema operativo di Météo France (1995). Questa scelta è stata fatta alla fine del programma di ricerca europeo MINERVE, che ha dimostrato che l'IFM, sviluppato dai servizi canadesi, è, per l'area del Mediterraneo, un indice ad alte prestazioni, ad eccezione dei periodi di grande siccità. L'IFM ha la particolarità di disporre del proprio calcolo della siccità e fornisce buoni risultati, anche in caso di piogge recenti, essiccazione molto superficiale (in particolare all'inizio della stagione), nonché in montagna o nell'entroterra. È stato convalidato nell'area mediterranea solo durante il periodo estivo e in caso di grande siccità non dovrebbe più essere utilizzato.

Il calcolo di IFM viene effettuato in diversi momenti della giornata per valutare il valore massimo. Il calcolo prende in considerazione anche il tipo di vento: un vento a raffiche è più pericoloso di un vento laminare.

L'IFM non rileva le cosiddette situazioni "estreme", durante le quali riporta spesso valori tra 80 e 180. Il carattere "estremo" viene rilevato dall'esistenza simultanea:

- siccità molto prolungata;
- indici di propagazione del fuoco molto elevati.

Da notare, infatti, che con una leggera siccità e un forte vento, l'IFM può superare la soglia di 100 senza che vi sia alcun pericolo meteorologico di incendio.

L'indice di propagazione di Drouet (IPse) viene calcolato in base alla riserva d'acqua media del suolo, alla velocità media del vento sull'area e alla temperatura. Fornisce una stima della velocità teorica di propagazione del fuoco sul soprassuoli di *Quercus coccifera* in terreno

pianeggiante, mediata sull'area. Non può essere utilizzato in inverno e dopo i periodi di pioggia tende a sopravvalutare il pericolo per periodi più o meno lunghi. All'inizio dell'estate, invece, con l'inizio della stagione secca potrebbe sottovalutare la velocità effettiva.

La soglia di probabilità di espansione dell'innesco (seuil d'éclosion) è il solo indice utilizzato da meteo France.

Dipende esclusivamente dalle condizioni ambientali: temperatura, umidità, insolazione (esposizione alla luce solare) e vento.

Si può considerare minima subito dopo un episodio piovoso. Dei valori molto negativi indicano un indice di probabilità di espansione dell'innesco (seuil d'éclosion) molto debole. Dei valori superiori a -7 rappresentano delle situazioni meteorologiche con un rischio di espansione dell'innesco (seuil d'éclosion) marcato. Se l'indice diventa positivo, il rischio di espansione dell'innesco (seuil d'éclosion) diventa molto forte. La soglia di probabilità di espansione dell'innesco (seuil d'éclosion) prevista corrisponde a un valore medio per la zona meteorologica.

La valutazione del pericolo viene effettuata dal meteorologo FDF dell'antenna Météo France di EMIZ Sud. Questa è la fase finale dell'analisi del pericolo di incendio in cui il meteorologo FDF cerca di riflettere al meglio le variazioni del pericolo meteorologico degli incendi boschivi nello spazio e nel tempo. Si basa su:

- Analisi dei 3 indici di pericolo IFM, IPse (Indice Propagation SE) e la probabilità di espansione dell'innesco (seuil d'éclosion) calcolati dalle previsioni meteorologiche e dagli indici di siccità. L'analisi è condotta tenendo conto dei limiti noti di utilizzo di ciascun indice di pericolo. Per ciascuna zona, dopo la valutazione della siccità, il meteorologo valuta il pericolo meteorologico utilizzando 2 metodi:
 - Siccità da leggera a moderata: metodo IFM utilizzato in molti paesi, ma con soglie adattate al contesto mediterraneo e calcolate per il valore massimo della giornata.
 - Siccità da grave a molto grave: metodo IPse, metodo sud-est specifico dall'indice di propagazione e indice di probabilità di espansione dell'innesco (seuil d'éclosion) calcolato per il valore massimo della giornata.
- Modelli di pioggia e loro conseguenze sugli indici di siccità, la distribuzione spaziale delle piogge all'interno di ciascuna zona, la rappresentatività delle informazioni e degli indici delle stazioni di riferimento, l'effetto delle piogge recenti o previste.

- L'evoluzione temporale prevista dei parametri meteorologici durante il giorno (ad esempio la nuvolosità che non viene presa in considerazione nei calcoli dell'indice).
- Eventuali discrepanze degli indici di pericolo con la realtà (monitoraggio della situazione operativa, misurazioni dirette del contenuto di acqua o infiammabilità delle piante).

Come supporto in questa analisi, il meteorologo di EMIZ Sud ha a disposizione una workstation e software specifici.

Il nuovo indice IEP, che combina l'ICL (Indice de Combustible Léger) e il vento, è stato introdotto sul sito FDF da 3 anni. Si è dimostrato molto utile sugli incendi invernali e soprattutto sulle ondate di calore (alta temperatura accompagnata da bassa umidità). È calcolato alla massima intensità del giorno ed è noto con l'acronimo IEPx. Questo indice, convalidato nel 2017, 2018 e 2019, fornisce diverse informazioni utili e può essere utilizzato durante tutto l'anno.

Attualmente, in Corsica è in fase di sviluppo un modello di applicazione di IFM ad alta risoluzione, nell'ambito del sviluppo del progetto FireCaster (<http://firecaster.universita.corsica>) condotto dall'Università di Corsica, nel quale si prevede, al fine di collegare i rischi e i modelli di crisi a indicatori innovativi, di integrare le simulazioni degli scenari di rischio con indici economici, umani e ambientali sviluppati dal laboratorio Lieux, Identités, eSpaces et Activités (UMR CNRS 6240 LISA).

Modelli di propagazione degli incendi

La stima dei parametri che caratterizzano l'incendio, come ad esempio la velocità di propagazione e l'intensità generata del fuoco, è importante, determinando le modalità spostamento dei fronti di fiamma e consentendo la valutazione dei limiti delle capacità di estinzione degli operatori e dei mezzi impegnati nelle operazioni di spegnimento. Il comportamento degli incendi è descritto da complesse interazioni tra i fattori ambientali, come le caratteristiche e il tipo di vegetazione, le condizioni meteorologiche, l'orografia e i fattori umani, che possono essere valutati dai modelli di simulazione.

I modelli di propagazione risultano fondamentali per diverse applicazioni che vanno dalla prevenzione degli incendi, alla gestione e pianificazione strategica territoriale. Tali strumenti possono consentire la valutazione delle migliori opportunità per contrastare gli incendi o per identificare le aree a maggiore rischio, così come possono contribuire all'individuazione delle aree di intervento strategiche per incrementare l'efficacia delle attività di prevenzione e mitigazione degli effetti.

Sebbene l'importanza dell'utilizzo di modelli che descrivano quantitativamente il comportamento del fuoco durante un incendio sia evidente, dall'indagine effettuata tra i territori di Programma risulta che solo in Liguria, in Corsica e in Sardegna siano stati implementati, o siano oggetto di sviluppo, specifici modelli di propagazione ad uso operativo.

Regione Liguria

I ricercatori di Fondazione CIMA hanno sviluppato Propagator, un modello ad automi cellulari con output probabilistico che utilizza regole empiriche per la simulazione del comportamento del fuoco. Il simulatore nasce con l'obiettivo di fornire una mappa di probabilità dell'area bruciata dato un punto di innesco, una linea del fronte o l'intero perimetro di un incendio in atto. Opportunamente adattato il simulatore è in grado di simulare la propagazione di un numero significativo di incendi con innesco randomico su una zona di studio, in differenti condizioni di vento al fine di fornire una mappa di rischio incendi e la valutazione degli impatti sulle zone di interfaccia urbano-foresta.

La scala di applicazione è vincolata alla disponibilità dei dati (copertura vegetale e orografia). Il modello è già operativo su tutto il territorio italiano e sulla Corsica. La scala di applicazione spaziale permette di simulare incendi dai pochi ettari a 10.000 ha in pochi minuti.

Il dominio della simulazione viene discretizzato usando una griglia quadrata regolare con dimensioni delle celle di 20x20 metri. Il modello utilizza informazioni ad alta risoluzione come l'elevazione e il tipo di vegetazione sul terreno. I parametri di input sono la direzione del vento, la velocità e il punto di accensione del fuoco. Il fuoco si diffonde da una cella ai suoi vicini con una certa probabilità di base, definita usando tipi di vegetazione di due celle adiacenti e modificata tenendo conto della pendenza tra loro, direzione e velocità del vento. La simulazione è sincrona e tiene conto del tempo necessario al fuoco per attraversare ogni cella. Copertura vegetativa, pendenza, velocità del vento e direzione influenzano la velocità di propagazione del fuoco da una cella all'altra.

Le caratteristiche dei combustibili sono implementate attraverso 7 custom model (7 classi di combustibile) validati e calibrati sul territorio italiano, compatibili con i dati Corine Land Cover di livello 5 o con le mappature di vegetazione forestale regionali più dettagliate.

Il modello è accessibile attraverso la piattaforma DEWETRA previa richiesta di autorizzazione e rilascio di username e password.

Regione Corsica

L'Università della Corsica utilizza ed ha sviluppato diversi modelli per la caratterizzazione del comportamento del fuoco, di modo da poter valutare le condizioni di propagazione dei fronti di fiamma in diversi contesti operativi. In particolare viene utilizzato il modello WFDS (Wildland Urban Interface Fire Dynamics Simulator) per la pianificazione territoriale in aree di interfaccia urbano-foresta, il modello DIMZAL per la pianificazione degli interventi di riduzione del rischio e il modello ForeFire, implementato nell'ambito del progetto FireCaster e che permette l'utilizzo operativo in fase di incendio attivo, entrambi sviluppati dall'Università della Corsica.

WFDS (Wildland Urban Interface Fire Dynamics Simulator), sviluppato dalla collaborazione del Dipartimento per l'Agricoltura (USDA) e dal National Institute of Standards and Technology (NIST) degli Stati Uniti, è un modello fisico del comportamento del fuoco. WFDS utilizza metodi di fluidodinamica computazionale per risolvere le equazioni che governano il flusso di energia, il trasferimento di calore, la combustione e degrado termico dei combustibili vegetativi. Il dominio di calcolo di propagazione è di 200 m con risoluzione spaziale di 10 cm e tempi di calcolo che superano le tempistiche di un incendio reale. Per questo motivo la principale applicazione che ne viene fatto, in Corsica, è legata alle attività pianificazione territoriale in aree in cui le superfici forestali sono prossime agli insediamenti abitativi e alle infrastrutture, come ad esempio, il calcolo delle distanze su cui imporre gli obblighi di decespuglia ai proprietari di strutture (in fig. 8). L'aggiornamento dei modelli ha cadenza annuale.

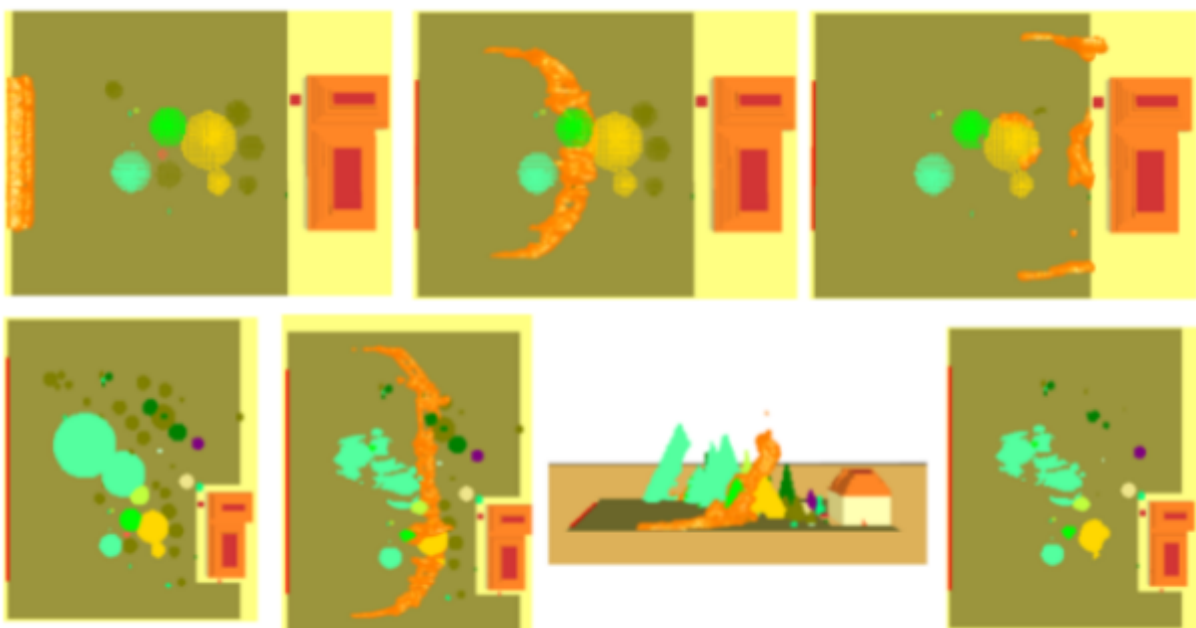


Figura 8: esempio di simulazione di propagazione elaborato con WFDS.

DIMZAL è uno strumento utilizzato in fase di pianificazione degli interventi di riduzione del rischio incendi per il dimensionamento delle zone di supporto per la lotta agli incendi boschivi (fig. 9). Le zone di supporto sono aree o fasce su cui vengono effettuati trattamenti di riduzione del carico dei combustibili col fine di ridurre l'intensità e la velocità di propagazione di un potenziale incendio. Tali zone di supporto sono fondamentali poiché limitando la propagazione del fronte di fiamma, danno la possibilità agli operatori di intervenire, in caso di incendio, con maggiore sicurezza.

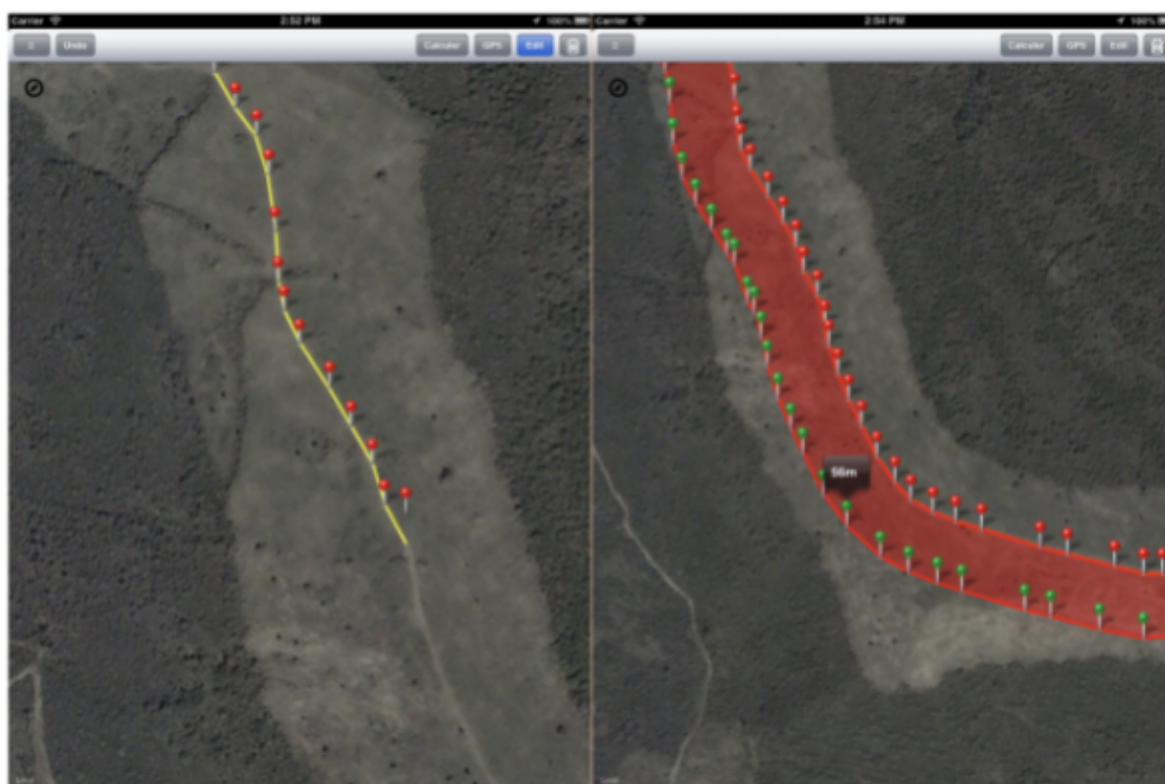


Figura 9: applicazione del modello DIMZAL per il dimensionamento delle zone di supporto.

Sviluppato dai ricercatori del progetto "Feux" in collaborazione con i ricercatori del progetto "SISU" dell'Università della Corsica, DIMZAL consente di prevedere le dimensioni da applicare a qualsiasi area calcolando il flusso di calore emesso da un potenziale incendio e la distanza dall'incendio da rispettare per evitare infortuni. Si basa su modelli fisici semplificati per sfruttare i tempi di calcolo compatibili con le applicazioni sul campo utilizzando i 13 modelli di combustibile elaborati da Anderson nel 1982 ed è capace di

elaborare previsioni su superfici estese nell'ordine del km². Aggiornato annualmente, è di consultazione pubblica previa richiesta di accesso all'Università della Corsica.

ForeFire, implementato dal progetto FireCaster è un modello fisico di propagazione degli incendi. È calcolato a partire dalla formulazione fornita da Balbi nel 2009 che si basa sulla risoluzione di tre equazioni di equilibrio che derivano massa, energia e quantità di moto. Due sotto-modelli descrivono ulteriormente in dettaglio la rappresentazione fisica della propagazione: un sotto-modello di radiazione che stima la quantità di energia trasferita alla vegetazione davanti al fronte di fiamma e un sottomodello di preriscaldamento che descrive gli effetti radiativi all'interno dello strato di vegetazione davanti al fronte. Le caratteristiche dei combustibili sono rappresentate da custom model creati adattando i modelli di Anderson al territorio francese.

Il modello fisico di ForeFire può essere, inoltre, elaborato in combinazione con un modello atmosferico per simulare l'interazione del fronte di fiamma e il comportamento del fuoco con l'atmosfera e stimarne i comportamenti convettivi.

Utilizzato in fase di pianificazione territoriale degli interventi di prevenzione, può essere utilizzato anche in tempo reale durante l'attività di estinzione di un incendio (fig. 10). Il modello è strutturato per poter elaborare stime di propagazione in tutto il Sud della Francia e in Corsica.

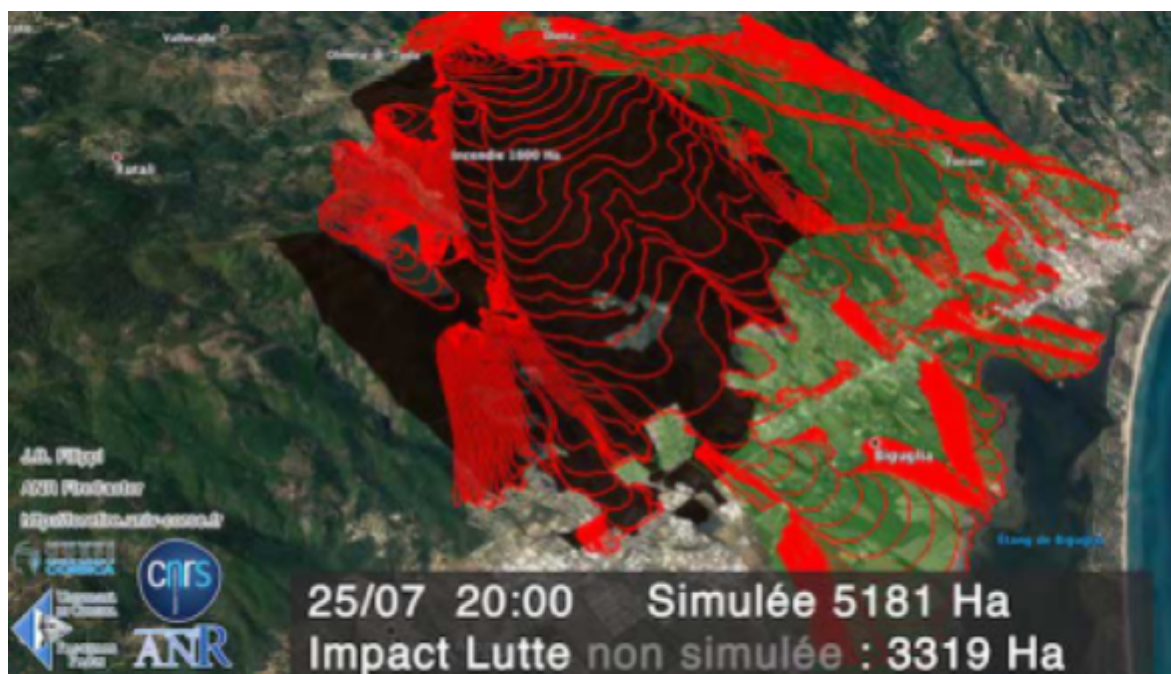


Figura 10: propagazione di incendio simulata con ForeFire.

Attualmente il modello è ancora oggetto di ricerca, prevedendo una main release ogni 4 anni, anche se già operativo.

Inoltre, la piattaforma di simulazione interattiva è sviluppata in codice open-source (ForeFire) aperta a tutti e consente la simulazione anche con modelli di propagazione semi-empirici.

Regione Sardegna

I ricercatori dell'Istituto per la BioEconomia del CNR (sede di Sassari) hanno sviluppato un modello di simulazione della propagazione degli incendi specificamente progettato per applicazioni in tempo reale; tuttavia, il modello integra anche funzionalità per l'analisi di strategie di prevenzione e lotta agli incendi e per la formazione degli operatori preposti alla gestione della campagna antincendio. La prima versione del modello è stata sviluppata nell'ambito del progetto Proterina-DUE, finanziato dal programma di Cooperazione transfrontaliera Italia-Francia Marittimo. Successivamente, il modello è stato sottoposto a ulteriori implementazioni, finalizzate principalmente all'integrazione con la catena modellistica meteorologica che fornisce al modello dati essenziali per l'esecuzione delle simulazioni, in particolare relativamente ai campi di vento.

Il modello, denominato WWS (Web-based Wildfire Simulator) è caratterizzato da un set di funzionalità che consentono di eseguire le simulazioni in maniera semi automatica, senza che sia necessaria la fase di preparazione dei tematismi di input per ogni nuovo dominio di simulazione (ricampionamento e riclassificazione che richiedevano l'uso di funzionalità implementate nei sistemi informativi geografici).

Il simulatore è dotato delle seguenti funzionalità principali: acquisizione dei dati di input forniti dal modello meteorologico WRF; applicazione di un modello mass-consistent per il downscaling del campo di vento; applicazione del modello di propagazione di Rothermel; applicazione di tecnica di propagazione basata sull'approccio Level-set; restituzione dei dati di output su un'interfaccia grafica basata sulle API di Google Maps.

Il diagramma a blocchi riportato in figura 11 illustra i principali componenti della catena modellistica. L'interfaccia grafica costituisce il lato client da utilizzare per l'esecuzione delle simulazioni. E' stata sviluppata in linguaggio HTML e, attraverso un set di JavaScript e le funzionalità delle Google Maps API (Application Programming Interface), dialoga con il lato server per le funzionalità di input/output.

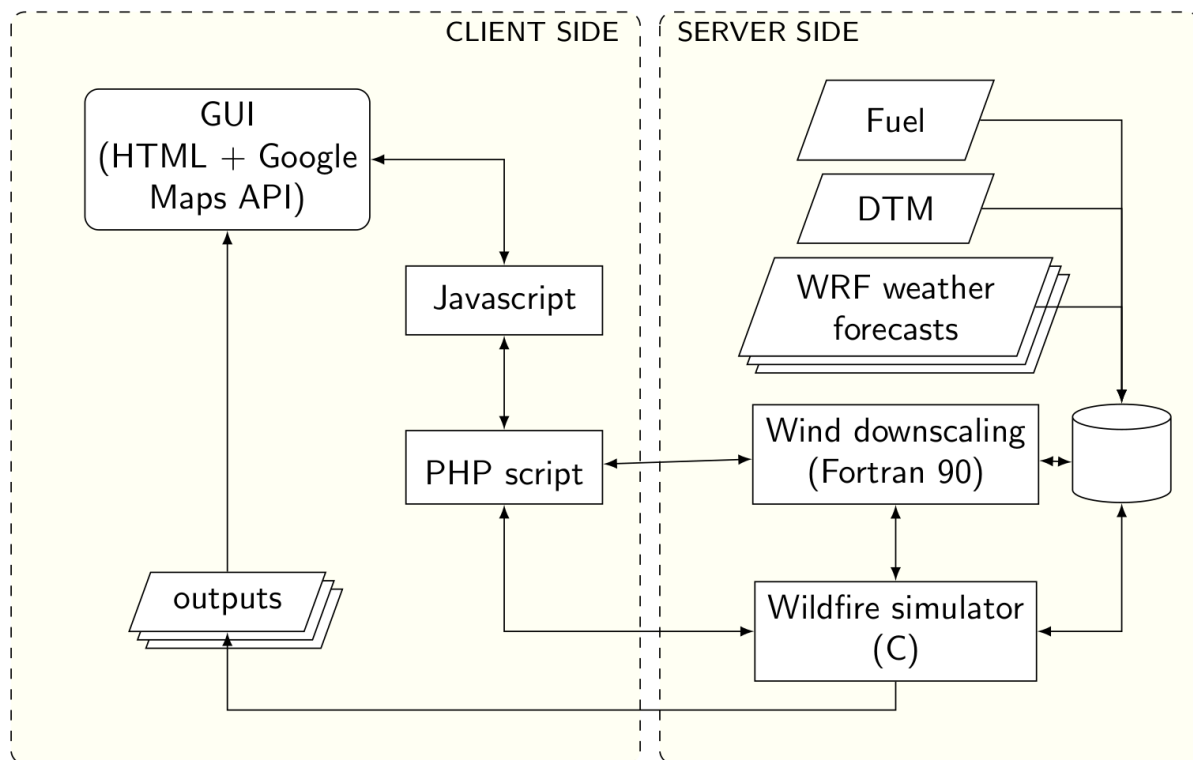


Figura 11: architettura client-server del simulatore di propagazione WWS.

Sul lato server, il simulatore avvia l'inizializzazione della simulazione in base ai parametri impostati dall'operatore (coordinate del punto centrale e ampiezza del dominio di simulazione) attraverso l'estrazione da uno storage dei dati territoriali sulle caratteristiche della vegetazione e di quelli meteorologici, in particolare l'intensità e la direzione del vento generati attraverso il modello WRF, operante giornalmente presso il Dipartimento Specialistico Idrometeorologico dell'ARPA Sardegna. Attraverso un menu a video si può selezionare la modalità di generazione dei dati sul campo di vento avviando un meccanismo di inizializzazione del mass-consistent che, partendo dai dati meteorologici con risoluzione di 1,5 km, consente di ottenere valori realistici della velocità del vento a una risoluzione dell'ordine dei 100 metri a intervalli temporali orari.

Il codice di calcolo della velocità di propagazione è basato sul modello di Rothermel, mentre la previsione della propagazione nello spazio del fronte di fiamma viene effettuata mediante un algoritmo denominata Level-Set, basato su un'equazione differenziale la cui soluzione consente di identificare il fronte di fiamma e pertanto le aree già bruciate o non bruciate. La combinazione di queste due componenti, modello di Rothermel e tecnica di propagazione Level-Set, forniscono mappe spazialmente esplicite della velocità di propagazione e del comportamento degli incendi (figura 12).

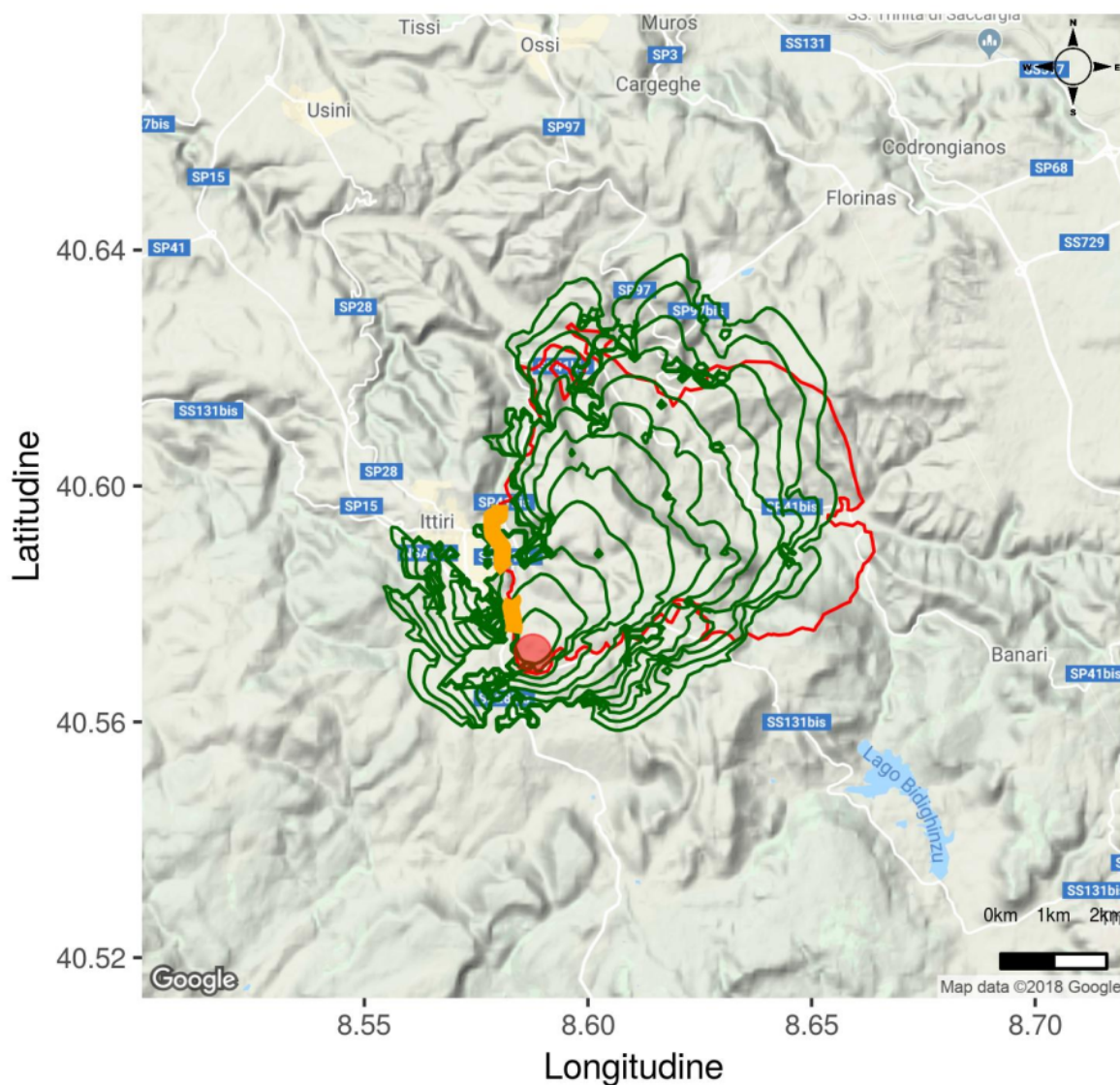


Figura 12: Comparazione tra la simulazione di propagazione fornita dal simulatore WWS (linee verdi) e l'area (3900 ha) effettivamente bruciata nel 2009 dall'incendio di Ittiri (linea rossa). La linea arancione rappresenta i punti in cui sono stati condotti attacchi diretti sulle fiamme.

Il modello WWS non è attualmente utilizzato a fini operativi ma durante il progetto Proterina-DUE e successivamente è stato oggetto di test e validazione su incendi reali verificatisi in Sardegna negli ultimi anni. Il simulatore è raggiungibile all'indirizzo <http://servercalcolo.ss.ibimet.cnr.it/>. Ulteriori informazioni sul modello possono essere trovate in Arca et al. (2019).

Esperienze di calibrazione e validazione di modelli di propagazione degli incendi sono state condotte dal Corpo Forestale e di Vigilanza Ambientale delle Regione Sardegna (CFVA) insieme a CNR e Università di Sassari. Sono stati testati i modelli FARSITE e FlamMap, e il modello di Campbell, in presenza di differenti scenari sinottici e di caratteristiche del

combustibile vegetale. I test sono stati condotti a scala locale, simulando incendi realmente verificatisi in Sardegna, e hanno riguardato anche la validazione dei modelli di combustibile di Scott e Burgan e di modelli adattati per le tipologie vegetazionali della Sardegna.

Conclusioni

Dall'indagine emerge chiaramente quanto le applicazioni modellistiche siano importanti nelle attività di prevenzione degli incendi, ma soprattutto come siano fondamentali nella previsione delle condizioni predisponenti il rischio di incendi nei cinque territori di Programma.

In ogni territorio sono state, infatti, sviluppate applicazioni modellistiche per l'analisi meteorologica delle condizioni, implementate e adattate per incrementarne la capacità previsionale a scala regionale. Gli approcci sono principalmente legati alla combinazione di modelli atmosferici a scala globale con modelli meteorologici a scala regionale aventi maggiore risoluzione..

Dall'analisi meteorologica, in tutte le regioni vengono elaborati indici sintetici di rischio: Toscana, PACA e Corsica hanno sviluppato modelli di valutazione della pericolosità basati sull'indice canadese di rischio incendi (FWI - IFM), calibrandoli e adattandoli ai rispettivi territori; in Liguria è stato implementato il modello RISICO, utilizzato anche in Sardegna, regione in cui sono stati sviluppati e sono utilizzati anche l'Ichnusa Fire index (IFI) e l'indice speditivo elaborato dal Corpo Forestale e Vigilanza Ambientale Sardo.

Nonostante siano noti i vantaggi apportati dalle applicazioni modellistiche di simulazione del comportamento del fuoco, sia in fase operativa durante la lotta attiva degli incendi, sia in fase di pianificazione territoriale degli interventi di riduzione del rischio e mitigazione degli effetti degli incendi, solo in Liguria, Corsica e Sardegna sono stati sviluppati, o sono utilizzati, modelli di propagazione del fuoco.

In Liguria è stato sviluppato Propagator, un modello stocastico su regole empiriche basato su automi cellulari che consente di elaborare una mappa di probabilità dell'area bruciata dato un punto di innesco, una linea del fronte o l'intero perimetro di un incendio in atto.

In Corsica vengono utilizzati tre diversi modelli di propagazione utilizzabili in diversi contesti: WFDS, sviluppato da USDA e NIST, per la pianificazione degli interventi in area di interfaccia urbano-foresta; DIMZAL, dell'Università della Corsica, utilizzato per la progettazione degli interventi di riduzione del combustibile in aree strategiche per la lotta; ForeFire, sviluppato nell'ambito del progetto FireCaster, sempre dell'Università della Corsica, che consente anche un uso in fase operativa, oltre che in fase di pianificazione, che si basa su modelli fisici di propagazione del fuoco. In Sardegna il simulatore di propagazione

WWS sviluppato da CNR-IBE non viene utilizzato operativamente ma è stato sviluppato soprattutto per applicazione in tempo reale, e quindi per fini operativi.

Infine, risulta necessario porre l'attenzione su come, in diversi territori, spesso si utilizzino i termini di "rischio" e "pericolo" come sinonimi, riferendosi, di fatto, al concetto di "pericolo".

Il concetto di "pericolo" è definito come una proprietà o qualità intrinseca di una determinata entità o condizione che ha la potenzialità di causare danni.

Il pericolo può essere presente o assente: se esso è associato intrinsecamente a un determinato fenomeno od evento, l'unico modo per eliminarlo è quello di eliminare il fenomeno o l'evento.

Il rischio si origina nella presenza di un pericolo, ma è legato alla probabilità che esso raggiunga la capacità di produrre un danno, nonché all'entità del danno stesso. Risulta quindi auspicabile una riflessione, a livello dei territori coinvolti, su una possibile standardizzazione della terminologia utilizzata al fine di una maggiore chiarezza e correttezza.

Come sintesi, nella tabella sottostante, sono riportate le caratteristiche principali delle applicazioni modellistiche descritte nel presente rapporto.

Regione	Modello meteorologico	Modello di pericolosità / rischio	Modello di propagazione
Sardegna	<i>BOLAM / WRF- ARW V3.9 su ECMWF</i>	<i>Ichnusa Fire index</i> <i>Speditivo CFVA</i> <i>RISICO</i>	<i>WWS (real-time / pianificazione)</i>
Toscana	<i>WRF su GFS + ECMWF</i>	<i>FWI</i>	
Liguria	<i>MOLOCH_Liguria</i> <i>WRF a diverse risoluzioni (a livello nazionale)</i>	<i>RISICO</i>	<i>Propagator (operativo / pianificazione)</i>
PACA	<i>AROME</i>	<i>IFM</i> <i>IPse</i> <i>Probabilità di</i>	

	<i>ARPEGE</i> <i>ECMWF</i>	<i>espansione dell'innescio (seuil d'éclosion) IEP</i>	
Corsica	<i>AROME</i> <i>ARPEGE</i> <i>ECMWF</i> <i>FireCaster su base Meso-NH / SURFEX</i>	<i>IFM</i> <i>IPse</i> <i>Probabilità di espansione dell'innescio (seuil d'éclosion) IEP</i>	<i>ForeFire (operativo pianificazione)</i> <i>DIMZAL (pianificazione interventi)</i> <i>WFDS (aree interfaccia)</i>

Tabella 1: sintesi delle principali caratteristiche delle applicazioni modellistiche utilizzate nei territori di Programma.

Riferimenti bibliografici

Arca B., Ghisu T., Casula M., Salis M., Duce P. (2019) A web-based wildfire simulator for operational applications. *International Journal of Wildland Fire* 28, 99-112. doi:10.1071/WF18078.

Durand, Y., et al. "A Meteorological Estimation of Relevant Parameters for Snow Models." *Annals of Glaciology*, vol. 18, 1993, pp. 65–71., doi:10.3189/s0260305500011277.

Spano D., Georgiadis T., Duce P., Rossi F., Delitala A., Dessy C., Bianco G. (2003) A fire index for Mediterranean vegetation based on micrometeorological and ecophysiological measurements. Extended abstract P3.1 of the —Fifth Symposium on Fire and Forest Meteorology, 16-20 November 2003, Orlando, FL, USA. (American Meteorological Society, Boston).

Sirca C., Spano D., Duce P., Delogu G., Cicalò G.O. (2007) Performance of a newly developed integrated fire rating index in Sardinia, Italy. In —Proceedings of Wildfire 2007 - 4th International Wildland Fire Conference, 13-17 May 2007, Seville, Spain (Ed. DX Viegas) (CD-ROM) (Minist. Environ., Madrid, Spain and Junta de Andalucía,

Seville, Spain).

Sirca C., Spano D., Pisanu P., Duce P., Delogu G., Cicalò G.O. (2006) Ichnusa Fire Index: Development and Preliminary Evaluation at Local Scale. In 'Proceedings of 5th International Conference on Forest Fire Research', 27–30 November 2006, Figueira da Foz, Portugal (Ed. DX Viegas) (CD-ROM) (Elsevier BV: Amsterdam, the Netherlands).

Sirca C., Salis M., Arca B., Duce P., Spano D. (2018). Assessing the performance of fire danger indexes in a Mediterranean area. *iForest* 11: 563-571. – doi: 10.3832/ifor2679-011 [online 2018-09-01]

Cadoni E. (2014) IFI - Ichnusa Fire Index: Reingegnerizzazione e implementazione. Master Thesis, University of Sassari, Italy.

Fiorucci P., D'Andrea M., Negro D., Severino M. (a cura di) (2011) Manuale d'uso del sistema previsionale della pericolosità potenziale degli incendi boschivi RIS.I.CO., Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento della protezione civile e Fondazione CIMA.

Assistance métrologique FDF zone sud, guide pour nouvel arrivant, Edition 2019. Météo France.

L'analyse prévisionnelle du danger météorologique d'incendies. Météo France.

Anderson, Hal E. "Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior." 1982, doi:10.2737/int-gtr-122.

Balbi, J.h., et al. "A Physical Model for Wildland Fires." *Combustion and Flame*, vol. 156, no. 12, 2009, pp. 2217–2230., doi:10.1016/j.combustflame.2009.07.010.

