

**Prodotto T2.2.2 “Rapporto sul potenziamento e sull’armonizzazione della modellistica a supporto della previsione degli incendi nei territori del Programma” e Investimento I3 “Potenziamento delle applicazioni modellistiche”**

**Produit T2.2.2 “Rapport sur l'amélioration et l'harmonisation de la modélisation pour supporter la prévision des incendies dans les territoires du Programme” et Investissement I3 "Amélioration des applications de modélisation"**

**Progetto Interreg IT-FR  
 MED-Star  
 Strategie e misure per la mitigazione del rischio di incendio nell'area Mediterranea**

July 2022

**Projet Interreg IT-FR  
 MED-Star  
 Stratégies et mesures d'atténuation des risques d'incendie dans la région méditerranéenne**

Juillet 2022



## Sommario

Introduzione – Introduction.	5
Potenziamento della catena di modellistica meteorologica ad alta risoluzione spaziale.	12
Metodologia.	13
Risultati e valore aggiunto.	19
Nuovi prodotti derivati dalla modellistica meteorologica.	26
Il Bollettino di Analisi Meteo AIB.	26
Metodologia.	27
Risultati e valore aggiunto.	28
Modellistica della probabilità e intensità di incendio.	30
Metodologia.	30
Risultati e valore aggiunto.	31
Modellistica della pericolosità e del rischio.	34
Stato dell’arte della mappatura di variabili di combustibile forestale attraverso rilievi a terra e <i>remote sensing</i> .	34
Metodologie per la mappatura dei combustibili.	35
L’App FuelGeoData - Applicazione di una metodologia speditiva per la caratterizzazione dei combustibili.	36
Raccolta dei dati di combustibile.	41
Individuazione dei punti da rilevare.	41
Rilievo dei dati.	42
Studi preliminari alla mappatura dei combustibili e del rischio.	43
Indagine sulle relazioni tra quantità di combustibile forestale, tipologie vegetazionali e altezza dei popolamenti nelle aree costiere della Toscana settentrionale.	43
Caratterizzazione quantitativa dei combustibili forestali con tecniche di analisi geostatistica applicate alle aree costiere toscane.	44
Analisi comparativa di diversi approcci per la produzione di carte della pericolosità per gli incendi boschivi.	44
Mappe prodotte e metodologie applicate.	44
Mappa del combustibile.	44
Mappa del rischio secondo il Manuale per l’applicazione dello “schema di piano A.I.B. nei Parchi Nazionali – 2018”.	46

Mappe del rischio prodotta secondo la metodologia proposta in ambito del progetto.	48
Mappe finali sviluppate.	49
Mappe di suscettività stagionale agli incendi boschivi.	54
Introduzione alla metodologia adottata.	54
Dati di input.	55
Dettagli sulla variabile tipi di vegetazione (veg).	57
Dettaglio sui dati climatici.	58
Mappe di suscettività.	61
Indicatori di performance.	67
Analisi sulla distribuzione della suscettività.	70
Proposta di revisione delle zone di allerta per la previsione del pericolo di incendio boschivo.	74
Introduzione.	74
Metodologia adottata.	74
Determinazione delle nuove zone.	75
Sviluppo e validazione del Simulatore di propagazione Web-based Wildfire Simulator (WWS).	87
Struttura del simulatore.	87
Validazione del simulatore.	90
Sviluppo e validazione del Simulatore PROPAGATOR.	96
Riferimenti bibliografici.	99

## **Autori – Auteurs.**

Arca Bachisio – Istituto per la BioEconomia (CNR)  
Bottai Lorenzo ,– Consorzio LaMMA  
Canu Annalisa,– Istituto per la BioEconomia (CNR)  
Castiglia Carluccio – RAS, ARPA Sardegna  
Casula Marcello – Istituto per la BioEconomia (CNR)  
Chessa Michele – RAS, Protezione Civile Regionale  
Cinus Salvatore – RAS, Protezione Civile Regionale  
Cristofori Simone ,– Consorzio LaMMA  
Cugusi Giacomo – RAS, Protezione Civile Regionale  
Degli Esposti Silvia – Fondazione CIMA  
Del Giudice Liliana – Istituto per la BioEconomia (CNR)  
Delitala Alessandro Mario Sergio,– RAS, ARPA Sardegna  
Dessy Carlo – RAS, ARPA Sardegna  
Duce Pierpaolo – Istituto per la BioEconomia (CNR)  
Ferrarese Ceruti Federico – RAS, Protezione Civile Regionale  
Ficca Giovanni – RAS, ARPA Sardegna  
Fiorucci Paolo – Fondazione CIMA  
Foderi Cristiano – Università di Firenze  
Frassinelli Nicolò – Università di Firenze  
Jahdi Roghayeh – Istituto per la BioEconomia (CNR)  
Marchi Enrico – Università di Firenze  
Mari Riccardo ,– Consorzio LaMMA  
Marra Elena – Università di Firenze  
Meschi Giorgio – Fondazione CIMA  
Neri Francesco – Università di Firenze  
Paoloni Riccardo – Università di Firenze  
Pecchi Matteo – Università di Firenze  
Peddes Michele – RAS, Protezione Civile Regionale  
Pedes Fabrizio – Istituto per la BioEconomia (CNR)  
Pellizzaro Grazia – Istituto per la BioEconomia (CNR)  
Perello Nicolò – Fondazione CIMA  
Salbitano Fabio – Università di Firenze  
Salis Michele – Istituto per la BioEconomia (CNR)  
Scarpa Carla – Istituto per la BioEconomia (CNR)  
Serra Silvia – RAS, Protezione Civile Regionale  
Soi Fabrizia – RAS, Protezione Civile Regionale  
Trucchia Andrea – Fondazione CIMA  
Trudu Pier Luigi – RAS, ARPA Sardegna  
Usai Antonio – RAS, Protezione Civile Regionale  
Ventura Andrea – Istituto per la BioEconomia (CNR)

## Introduzione – Introduction.

Il report T.2.2.2 "Rapporto sul potenziamento e sull'armonizzazione della modellistica a supporto della previsione degli incendi nei territori del Programma" descrive le attività di sviluppo della modellistica di previsione svolte nell'ambito della componente T2 del progetto MED-Star, attraverso investimenti in infrastrutture, attività di ricerca e trasferimento tecnologico, attività di campo. L'obiettivo principale è stato quello di sviluppare le attività modellistiche rispetto allo stato dell'arte di inizio progetto nei territori di programma, descritto nel report T.2.2.1.

Le attività di sviluppo modellistico hanno avuto le seguenti direttrici: modellistica meteorologica, modellistica a supporto dell'emissione dei bollettini di pericolosità, modellistica della suscettività e del rischio di incendio, modellistica della propagazione degli incendi.

La modellistica meteorologica ha rappresentato uno degli investimenti finanziari più rilevanti (svolto nell'ambito dell'Investimento I3) e ha portato all'acquisizione da parte di Regione Sardegna di un sistema avanzato di Supercalcolo, cioè un computer basato su più nodi di elaborazione e interconnessioni ad alte prestazioni. Questo investimento ha consentito lo sviluppo di una complessa attività tecnico-scientifica finalizzata al potenziamento della catena modellistica meteorologica ad alta risoluzione spaziale, in modo da costituire la base per lo sviluppo di nuovi prodotti per l'AIB (Anti Incendio boschivo) e per incrementare le

Le rapport T.2.2 " Rapport sur l'amélioration et l'harmonisation de la modélisation pour supporter la prévision des incendies dans les territoires du Programme" décrit les activités de développement de la modélisation de la prévision réalisées dans le cadre de la composante T2 du projet MED-Star, à travers des investissements dans les infrastructures, des activités de recherche et de transfert technologique, des activités de terrain. L'objectif principal était de développer les activités de modélisation par rapport à l'état de l'art au début du projet dans les domaines du programme, décrits dans le rapport T.2.2.1.

Les activités de développement de la modélisation ont suivi les lignes directrices suivantes : modélisation météorologique, modélisation pour soutenir l'émission de bulletins de danger, modélisation de la susceptibilité et du risque d'incendie, modélisation de la propagation des incendies.

La modélisation météorologique a représenté l'un des investissements financiers les plus importants (réalisé dans le cadre de l'investissement I3) et a conduit à l'acquisition par la région de Sardaigne d'un système de supercalcul avancé, basé sur des nœuds de traitement multiples et des interconnexions à haute performance. Cet investissement a permis le développement d'une activité technico-scientifique complexe visant à améliorer la chaîne de modélisation météorologique à haute résolution spatiale, de manière à constituer la base du développement de nouveaux produits pour l'AIB (Anti-Bushfire)

elaborazioni quotidiane. La catena modellistica interessa sia l'area delle Regioni del progetto strategico, al fine di fornire prodotti con prestazioni più adeguate alle esigenze di tutti i partner nella lotta agli incendi boschivi, sia un'area circostante la Sardegna per sperimentare da subito una catena operativa. Va notato che i vari run modellistici devono partire dalle diverse elaborazioni dei modelli meteorologici a scala globale (GCM - Global Circulation Model), disponibili a intervalli regolari durante ogni giorno; lo sviluppo ha dimostrato la fattibilità della catena modellistica a partire dai dati ECMWF-IFS, mentre per un'eventuale operatività sarà necessario stipulare accordi onerosi con gli enti nazionali preposti alla diffusione dei dati GCM. In accordo con i partner del progetto, è stata individuata una serie di casi di studio e per ognuno di essi sono state prodotte simulazioni dell'evoluzione meteorologica, trasferendole a Fondazione CIMA per la pubblicazione sulla piattaforma di condivisione dei dati transfrontalieri (Componente T1) e per inizializzare il modello RISICO. Le principali forzanti (temperatura, umidità relativa, vento, radiazione solare, precipitazioni) sono state calcolate a due e a dieci metri dal suolo; inoltre, nell'ottica di un'analisi che tenesse conto anche dell'instabilità termodinamica e delle possibili interazioni tra la dinamica atmosferica e quella degli incendi, sono state calcolate diverse grandezze in quota, l'energia potenziale disponibile per la convezione e l'indice di Haines. La pandemia di coronavirus (COVID19) e la conseguente carenza di componenti hardware, hanno determinato la piena disponibilità del sistema di Supercalcolo

et à augmenter le traitement quotidien. La chaîne de modélisation implique toutes les Régions du projet stratégique, afin de fournir des produits aux performances plus adéquates aux besoins de tous les partenaires dans la lutte contre les incendies de forêt, ainsi qu'une zone environnante de la Sardaigne pour tester immédiatement une chaîne opérationnelle. Il convient de noter que les différents cycles de modélisation doivent partir des diverses élaborations de modèles météorologiques à l'échelle mondiale (GCM - Global Circulation Model), qui sont disponibles à intervalles réguliers au cours de chaque journée ; le développement visait à démontrer la faisabilité de la chaîne de modélisation à partir des données du CEPMMT-IFS, tandis qu'une éventuelle opérationnalisation nécessitera des accords coûteux avec les organismes nationaux chargés de la diffusion des données GCM. En accord avec les partenaires du projet, une série d'études de cas a été identifiée et pour chacune d'entre elles, des simulations de l'évolution météorologique ont été produites et transférées à la Fondation CIMA pour être publiées sur la plateforme transfrontalière de partage de données (Composante T1) et pour initialiser le modèle RISICO. Les principaux facteurs de forçage (température, humidité relative, vent, rayonnement solaire, précipitations) ont été calculés à deux et dix mètres du sol. En outre, en vue d'une analyse qui tienne également compte de l'instabilité thermodynamique et des interactions possibles entre la dynamique atmosphérique et la dynamique du feu, plusieurs grandeurs ont été calculées en altitude, l'énergie potentielle disponible pour la convection et l'indice de Haines. La nouvelle modélisation météorologique est

solo in prossimità della chiusura del progetto; tuttavia, le attività di studio e sviluppo nel campo della modellistica meteorologica e del Supercalcolo hanno permesso, già nella campagna AIB 2022, di aumentare la frequenza dei run operativi giornalieri relativi al territorio della Sardegna e allo stesso tempo di ridurre i tempi di esecuzione. L'ampliamento del panorama delle informazioni fornite e il risparmio di tempo prezioso, grazie all'anticipazione della disponibilità degli output, hanno introdotto ovvie potenziali ripercussioni anche in tutte le attività di previsione del rischio incendio nella Regione Sardegna.

Attività di modellistica meteorologica funzionali all'ampliamento delle informazioni fornite tramite i bollettini di pericolosità di incendio sono state svolte anche dal Consorzio LaMMA, che ha sviluppato una serie di procedure e funzionalità grafiche per una migliore gestione della campagna AIB, ad esempio fornendo i valori di alcuni sub-codici dell'indice FWI, e di una loro forma di presentazione grafica idonea a evidenziare le differenze degli andamenti giornalieri e stagionali rispetto alla serie storica degli stessi valori, e la valutazione della severità delle condizioni degli indici. Le elaborazioni sono state effettuate su dati del modello Moloch a 2.5 km.

Partendo dai dati meteorologici, ma considerando anche le condizioni climatiche, geomorfologiche e vegetazionali, nonché gli aspetti tecnico-amministrativi, Regione Sardegna ha effettuato uno studio territoriale finalizzato alla ridefinizione delle aree di allerta utilizzate per la fornitura dei bollettini di pericolosità. Le modifiche sono state

très coûteuse en termes de calcul et a nécessité la conception spéciale d'un système de supercalcul avancé. Malgré la pandémie de coronavirus (COVID19) et la pénurie de composants matériels qui en a résulté, le système de supercalcul n'a été pleinement disponible que vers la fin du projet. Cependant, les activités d'étude et de développement dans le domaine de la modélisation météorologique et des supercalculateurs ont permis d'augmenter la fréquence des exécutions opérationnelles quotidiennes pour le territoire de la Sardaigne et en même temps de réduire leurs temps d'exécution. L'élargissement du panorama des informations fournies et le gain d'un temps précieux, grâce à la disponibilité anticipée des résultats, ont déjà introduit des répercussions potentielles évidentes dans toutes les activités de prévision des risques d'incendie également. Des activités de modélisation météorologique fonctionnelles à l'extension des informations fournies par les bulletins de risque d'incendie ont également été menées par le Consortium LaMMA, qui a développé une série de procédures et de fonctionnalités graphiques pour une meilleure gestion de la campagne AIB, par exemple en fournissant les valeurs de certains sous-codes de l'indice FWI, et leur forme de présentation graphique adaptée pour mettre en évidence les différences dans les tendances quotidiennes et saisonnières par rapport aux séries historiques des mêmes valeurs, et l'évaluation de la gravité des conditions de l'indice. Les calculs ont été effectués sur les données du modèle Moloch à 2,5 km.

En partant des données météorologiques, mais en considérant également les conditions climatiques, géomorphologiques

effettuate con l'obiettivo di potenziare l'efficacia del "Codice colore" dei bollettini di pericolosità, a vantaggio di tutto il sistema di protezione civile e della popolazione, soprattutto in relazione alle misure da porre in essere per la prevenzione degli incendi boschivi così da salvaguardare il patrimonio forestale e tutelare l'integrità della popolazione.

Il CNR-IBE ha sviluppato un'attività modellistica finalizzata all'applicazione dei modelli di simulazione probabilistici all'area di cooperazione Italia-Francia Marittimo, fornendo mappe della pericolosità e dell'esposizione agli incendi boschivi a risoluzioni elevate (100m) e in ultima analisi caratterizzare le variazioni spaziali della propagazione e del comportamento degli incendi. L'area studio presenta diversi patrimoni ecologici, culturali, antropici e turistici che, soprattutto durante la stagione estiva, sono fortemente minacciati dagli incendi boschivi. Pertanto lo studio rappresenta un'importante base di dati per l'impostazione delle attività di mitigazione e prevenzione degli incendi. La metodologia ed i risultati di questa vengono descritti in dettaglio nel prodotto T2.2.4., ovvero l'atlante della pericolosità degli incendi. La modellistica di propagazione è consistita anche nelle attività di sviluppo e test dei simulatori di propagazione sviluppati dai partner di progetto per finalità di prevenzione ma anche per un uso operativo in tempo reale. CNR-IBE ha sviluppato un simulatore di propagazione WWS. La Fondazione CIMA ha sviluppato PROPAGATOR, un modello di automa cellulare stocastico per la simulazione della propagazione degli incendi boschivi.

Entrambi i simulatori sono stati testati in diversi casi di studio forniti dalle Regioni,

et de végétation, ainsi que les aspects technico-administratifs, la Région Sardaigne a réalisé une étude territoriale visant à redéfinir les zones d'alerte utilisées pour fournir des bulletins de danger. Les modifications ont été apportées dans le but de renforcer l'efficacité du "code couleur" des bulletins de danger, au profit de l'ensemble du système de protection civile et de la population, notamment en ce qui concerne les mesures à mettre en place pour la prévention des incendies de forêt afin de sauvegarder le patrimoine forestier et de protéger l'intégrité de la population.

Le CNR-IBE a développé une activité de modélisation visant à appliquer des modèles de simulation probabilistes à la zone de coopération maritime Italie-France, en fournissant des cartes de danger et d'exposition aux feux de forêt à haute résolution (100m) et en caractérisant finalement les variations spatiales de la propagation et du comportement des feux. La zone d'étude possède plusieurs atouts écologiques, culturels, anthropiques et touristiques qui, surtout pendant la saison estivale, sont fortement menacés par les feux de forêt. Par conséquent, l'étude représente une base de données importante pour la mise en place d'activités d'atténuation et de prévention des incendies. La méthodologie et ses résultats sont décrits en détail dans le produit T2.2.4, l'Atlas des risques d'incendie. La modélisation de la propagation a également consisté à développer et à tester des simulateurs de propagation développés par les partenaires du projet à des fins de prévention mais aussi pour une utilisation opérationnelle en temps réel. CNR-IBE a développé le simulateur de propagation WWS. La Fondation CIMA a développé PROPAGATOR, un modèle

costituiti da incendi di rilevante interesse svoltisi in passato e hanno fornito una buona accuratezza generando un set di tematismi che consentono la caratterizzazione del comportamento delle fiamme.

Per quanto riguarda la modellistica di suscettività e del rischio di incendio si riportano le attività di sviluppo condotte da Fondazione CIMA, che ha analizzato la suscettività di incendi tramite algoritmi di Machine Learning per arrivare a una caratterizzazione territoriale della suscettività da incendio boschivo per la stagione estiva e invernale, sull'intera area di programma. E' stata inoltre valutata l'influenza delle diverse classi di vegetazione sulla suscettività.

L'Università di Firenze ha realizzato una mappatura del combustibile, condotta mediante un'applicazione appositamente sviluppata, finanziata nell'ambito dell'Investimento I3, che ha consentito la raccolta di un ampio set di dati sulle caratterizzazioni del combustibile vegetale delle province costiere della regione Toscana. Grazie ai dati raccolti è stata sviluppata una metodologia per la mappatura del combustibile e, successivamente, per la caratterizzazione della pericolosità e della gravità di incendio, con il fine ultimo di sviluppare una mappa del rischio di incendio. La metodologia sopperisce ai limiti di sviluppo della mappa di rischio secondo le indicazioni del manuale ministeriale, e alla scarsità di strati informativi reperibili con il dettaglio richiesto e per aree estese, come quelle provinciali o regionali. L'introduzione della carta del combustibile ha permesso di raggiungere un livello maggiore di accuratezza e precisione rispetto alla

d'automate cellulaire stochastique pour simuler la propagation des feux de forêt.

Les deux simulateurs ont été testés dans plusieurs études de cas fournies par les régions, consistant en des incendies d'intérêt pertinent qui se sont produits dans le passé, et ont fourni une bonne précision en générant un ensemble de thèmes qui permettent de caractériser le comportement du feu.

En ce qui concerne la modélisation de la susceptibilité et du risque d'incendie, nous rendons compte des activités de développement menées par la Fondation CIMA, qui a analysé la susceptibilité aux incendies au moyen d'algorithmes d'apprentissage automatique afin de parvenir à une caractérisation spatiale de la susceptibilité aux incendies de forêt pour les saisons d'été et d'hiver, sur l'ensemble de la zone du programme. L'influence des différentes classes de végétation sur la susceptibilité a également été évaluée.

L'université de Florence a réalisé une cartographie des combustibles à l'aide d'une application spécialement développée, financée dans le cadre de l'investissement I3, qui a permis de collecter un vaste ensemble de données sur la caractérisation des combustibles végétaux des provinces côtières de la région de Toscane. Grâce aux données recueillies, une méthodologie a été développée pour la cartographie du combustible et, par la suite, pour la caractérisation du danger et de la gravité des incendies, dans le but ultime de développer une carte des risques d'incendie. La méthodologie compense les limites de l'élaboration de la carte des risques selon le manuel ministériel, et la rareté des couches d'information disponibles avec le détail requis et pour de grandes zones, telles que

metodologia tradizionale che prevedeva l'impiego dell'uso del suolo. Infine, è importante sottolineare come la metodologia applicata può essere replicata anche nelle altre aree partner del progetto applicando le opportune modifiche.

A conclusione di questo sommario delle attività svolte si può sottolineare che gran parte delle attività di sviluppo modellistico hanno coinvolto tutti i territori di programma e quindi si ritiene che gli strumenti sviluppati possano essere adottati a scala transfrontaliera; inoltre, lo sviluppo comune di questi prodotti è un arricchimento per le regioni del programma, in termini di sviluppo tecnologico e tecnico-scientifico. Molte delle metodologie proposte, ad esempio la metodologia di mappatura della pericolosità e intensità di incendio, rappresentano una delle poche applicazioni in Europa a scala vasta e sicuramente possono essere considerate equivalenti allo stato dell'arte dei paesi avanzati, a livello mondiale, per le applicazioni di modellistica di propagazione con approccio probabilistico. I partner di progetto hanno inoltre dimostrato di capitalizzare tutte le precedenti esperienze di modellistica, sviluppate anche nei programmi del Programma Operativo Marittimo, e di avere tutte le competenze per aggiornare lo stato delle procedure e delle tecnologie in materia di previsione e prevenzione degli incendi. Il bacino di popolazione che può essere raggiunto da tali sviluppi metodologici e tecnologici, e quindi dai relativi impatti in termini di prevenzione e messa in sicurezza, è molto esteso e questo rappresenta uno dei principali impatti del progetto.

les zones provinciales ou régionales. L'introduction de la carte des carburants a permis d'atteindre un niveau d'exactitude et de précision supérieur à celui de la méthodologie traditionnelle utilisant l'utilisation des sols. Enfin, il est important de souligner que la méthodologie appliquée peut également être reproduite dans les autres zones partenaires du projet en appliquant les modifications appropriées.

Pour conclure ce résumé des activités réalisées, on peut souligner que la plupart des activités de développement de la modélisation ont impliqué tous les territoires du programme et, par conséquent, on pense que les outils développés peuvent être adoptés à une échelle transfrontalière ; en outre, le développement commun de ces produits est un enrichissement pour les régions du programme, en termes de développement technologique et technico-scientifique. Plusieurs des méthodologies proposées, par exemple la méthodologie de cartographie des risques d'incendie et de l'intensité, représentent l'une des rares applications en Europe à grande échelle et peuvent certainement être considérées comme équivalentes à l'état de l'art dans les pays avancés, au niveau mondial, pour les applications de modélisation de la propagation avec une approche probabiliste. Les partenaires du projet ont également montré qu'ils capitalisent toute l'expérience antérieure en matière de modélisation, également développée dans les programmes du programme opérationnel maritime, et qu'ils ont toutes les compétences pour mettre à jour l'état de l'art en matière de procédures et de technologies de prédiction et de prévention des incendies. La zone de chalandise qui peut être atteinte par ces développements méthodologiques

et technologiques, et donc par les impacts connexes en termes de prévention et de sécurité, est très large et cela représente l'un des principaux impacts du projet.

## Potenziamento della catena di modellistica meteorologica ad alta risoluzione spaziale.

La Regione Sardegna ha sviluppato una complessa attività tecnico-scientifica finalizzata al **potenziamento della catena di modellistica meteorologica ad alta risoluzione spaziale**, tale da poter essere alla base dello sviluppo di nuovi prodotti per l'AIB (*Anti Incendio Boschivo*) e per l'**incremento delle elaborazioni quotidiane**.

La modellistica implementata interessa sia l'**intera area del progetto strategico**, onde fornire prodotti con prestazioni più rispondenti alle esigenze di tutti i partner nella lotta agli incendi boschivi, sia un **intorno della Sardegna** per poter **sperimentare fin da subito la catena operativa**.

Si evidenzia che le varie corse modellistiche necessitano di partire dalle diverse elaborazioni di modelli meteorologici a scala globale (GCM – *Global Circulation Model*), disponibili a intervalli regolari durante ogni giornata; lo sviluppo ha inteso mostrare la fattibilità della catena modellistica a partire da dati del ECMWF-IFS (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – Integrated Forecast System*) nel suo run delle 00Z, mentre **per un'eventuale operatività sarà necessario stipulare onerose convenzioni con gli Enti nazionali preposti alla disseminazione dei dati GCM**.

**In accordo con i partner di progetto** è stato individuato un **insieme di casi studio** e sono state prodotte le **simulazioni dell'evoluzione meteorologica per ciascuno di essi**, trasferendole alla Fondazione CIMA per la pubblicazione sulla piattaforma transfrontaliera di condivisione dati (Componente T1), e per **inizializzare il modello RISICO** (Fiorucci et al. 2008). Sono state **calcolate le principali forzanti** (temperatura, umidità relativa, vento, radiazione solare, precipitazione) a due e a dieci metri dal suolo; inoltre, nell'ottica di un'analisi che possa **tener conto anche dell'instabilità termodinamica e delle possibili interazioni tra la dinamica atmosferica e quella dell'incendio**, sono state calcolate varie grandezze in quota, l'energia potenziale disponibile per la convezione e l'indice di Haines (Haines 1998).

La nuova modellistica meteorologica risulta molto onerosa sul piano computazionale ed è stato necessario **progettare un avanzato sistema di Supercalcolo**, basato su più nodi di elaborazione e interconnessioni ad alte prestazioni, la cui realizzazione ad hoc è stata obiettivo dell'investimento I3. La pandemia da coronavirus (COVID19) ha determinato carenze dei componenti hardware specialistici e un aumento di circa il 300% dei loro costi, necessitando una nuova pianificazione in corso d'opera che ha determinato la disponibilità completa del sistema di Supercalcolo solo in prossimità della fase di chiusura di progetto.

Nondimeno, **le attività di studio e sviluppo** negli ambiti modellistico meteorologico e Supercalcolo **hanno permesso l'incremento della frequenza delle corse quotidiane operative relative al territorio della Sardegna** e allo stesso tempo la **riduzione della loro tempistica di esecuzione**. L'aver aumentato il panorama di informazioni previste e aver guadagnato tempo prezioso, grazie all'anticipo della disponibilità degli output, ha già introdotto evidenti potenziali ricadute anche nelle complessive attività di previsione del pericolo incendi.

## Metodologia.

Le **previsioni meteorologiche** sono basate su **complessi modelli fisico-matematici** che cercano di simulare l'evoluzione dei vari parametri fisici caratterizzanti l'atmosfera fino ad un determinato numero di giorni. Le grandezze fisiche rappresentano le variabili di un sistema di equazioni differenziali da risolvere nel tempo sulle tre componenti spaziali, necessariamente avvalendosi del **calcolo numerico vista la mancanza di soluzioni analitiche**. Risolvere le equazioni a una definizione spaziale molto elevata, al fine di simulare un'atmosfera sempre più realistica, comporta che anche il passo temporale d'integrazione di quelle equazioni debba essere molto piccolo; purtroppo c'è una limitazione a tali scelte legata alla **velocità di calcolo dei computer disponibili**.

A partire dalle diverse elaborazioni dei **modelli meteorologici a scala globale** europeo e statunitense, rispettivamente **ECMWF-IFS** e **NCEP-GFS**, disponibili a intervalli regolari durante ogni giornata, sono gestite delle **catene modellistiche di modelli ad area limitata** (LAM – *Limited Area Model*). Ciascuna catena consiste di passaggi sequenziali che, partendo dalla previsione su tutto il Globo dei GCM attraverso successive elaborazioni, in particolare con passi di griglia orizzontale via via più piccoli, consentono di focalizzare la previsione numerica su un'area specifica d'interesse. La complessità fisico-matematica di ciascuna catena risiede anche nelle **continue “messe a punto” necessarie per mantenerla allo stato dell'arte e ottimizzarla al contesto operativo**. I modelli ad area limitata utilizzati sono BoLAM, Moloch e WRF, con passi di griglia orizzontale che da circa 8 km scendono fino a circa 1 km.

Dopo una fase di prova per la messa a punto della nuova catena modellistica, è stato implementato il modello meteorologico **WRF** in configurazione *distributed memory*, cioè in parallelo, con risoluzione esplicita della convezione senza parametrizzazioni; altrettanto è stato fatto per le catene modellistiche **BoLAM** (con parametrizzazione della convezione) e **Moloch**. Sono stati configurati anche i programmi e le librerie necessari alla pre e post elaborazione. Per ottenere le migliori prestazioni si è ricorso a compilatori proprietari Intel e alle librerie open source MPICH e OpenMPI.

Sono state percorse **due linee di sviluppo: la prima sull'area di progetto<sup>1</sup>** per il test prototipale e per dei casi studio utilizzando la catena modellistica **WRF**, **la seconda** su un **intorno della Sardegna per l'impiego operativo** con più corse giornaliere delle catene **BoLAM, Moloch, WRF**. Le catene BoLAM e Moloch sono costituite da modelli sviluppati all'ISAC-CNR di Bologna a partire dagli anni '90, mentre quella WRF si fonda sul modello non idrostatico sviluppato dalla NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) e da NCEP (National Centre for Environmental Prediction).

Il modello meteorologico **WRF**, qui nella versione 4.3.3, consta di due core dinamici, dei quali l'**ARW** (Advanced Research WRF) è quello implementato. Il modello WRF mostra una grande duttilità per campi di applicazione che vanno da simulazioni alla scala locale a quelle alla mesoscala. Le catene WRF-ARW si diversificano anche secondo il GCM dei dati iniziali (**ECMWF-IFS HRES** oppure **NCEP-GFS**).

Tra le varie **configurazioni e implementazioni adottate** quali migliorie della configurazione **WRF** ante progetto (descritta nel *deliverable* T.2.2.1) da utilizzare per l'**area MED-Star**, si segnalano le seguenti:

- aggiornamento di dati statici: trasformazione in un formato leggibile dal preprocessing di WRF dei dati riguardanti l'orografia GMTED2010 a 15" (circa 500 metri) optando per la quota mediana in luogo di quella media, e corrispondente varianza di sottogriglia;
- mappe a **30" di risoluzione**, messe a disposizione dalla Beijing Normal University, per le informazioni **sul tipo di suolo**;
- variazioni nella procedura di ingestione della *Sea Surface Temperature*, con una nuova *land-sea mask* e una nuova interpolazione;
- schema per la microfisica: WSM6 (*WRF Single-moment 6 class*) con sei classi di idrometeorie calcolate;
- opzioni per il vento topografico, la *slope radiation* e il *topo shading*;
- inizializzazione con la corsa operativa del **ECMWF-IFS HRES a 0,1°**; le condizioni al contorno sono acquisite a **scadenza oraria** per le successive 48 ore;
- l'elaborazione si avvale di un **two-way nesting** per portare il passo di griglia orizzontale sull'area di interesse a **1,5 km con 50 livelli verticali**.

Invece nell'**area Sardegna**, per le varie **configurazioni e implementazioni adottate** quali migliorie della configurazione **WRF** ante progetto (descritta nel *deliverable* T.2.2.1) si è stati più prudenti sia nell'implementazione di nuovi dati, siano essi statici o di altra natura, sia di nuovi schemi, al fine di valutarne su tempi più lunghi e quindi con una casistica più estesa le effettive prestazioni. Occorre inoltre evidenziare che **in operatività**, com'è il caso dell'area

---

<sup>1</sup> Per "area di progetto" intendiamo una zona geografica che comprende ampiamente le regioni di partenariato e nella quale sono state svolte le simulazioni modellistiche al passo di griglia più piccolo (circa 1,5 km); quindi grosso modo da 37° N a 47° N in latitudine e da 2° E a 16° E in longitudine, sebbene l'inizializzazione parta da un'area che si estende circa da 28° N a 54° N in latitudine e da 17° W a 34° E in longitudine.

Sardegna, c'è anche la necessità di ottemperare agli **stringenti vincoli temporali imposti dalle attività a fini di protezione civile**.

Le catene sono basate sui dati delle 18Z e delle 00Z (rispettivamente **EC18Z** e **EC00Z**) e sono innestate su livelli di pressione a partire dal forecast +00h con condizioni al bordo triorarie; la simulazione è effettuata attraverso un **two-way nesting** su due scale spaziali, a **5,4 km** e a **1,8 km** e **verticalmente su 45 livelli**. Nell'area Sardegna e mari circostanti il passo spaziale orizzontale è di 1,8 km. L'ultima scadenza elaborata è la + 54h per la corsa delle 18Z e la +48h per quella delle 00Z.

Al fine di **capitalizzare le differenze insite tra le sorgenti GCM**, sebbene quella primaria rimanga ECMWF, **è stata implementata anche una nuova catena WRF nell'area Sardegna** inizializzata con dati globali **NCEP-GFS**; tale catena è eseguita **quattro volte al giorno** (corse delle **00Z, 06Z, 12Z, 18Z**). I dati NCEP-GFS hanno un passo spaziale orizzontale di 0,25° con condizioni al bordo orarie. La simulazione è analoga a quella implementata con dati del ECMWF, ma il two-way nesting è di 9 km e 3 km. L'intervallo di elaborazione è +72h per ogni corsa; il **passo spaziale orizzontale** per l'area Sardegna e mari circostanti è **3 km** circa.

Il **BoLAM** è un modello idrostatico ad area limitata che integra le equazioni primitive, con parametrizzazione della convezione atmosferica, mentre il **Moloch** è un modello in grado di fornire previsioni spazialmente dettagliate con rappresentazione esplicita dei fenomeni convettivi e integra le equazioni per un'atmosfera non idrostatica e compressibile. Le catene BoLAM e Moloch si poggiano esclusivamente su dati del **ECMWF-IFS HRES a 0,125° su livelli verticali ibridi**.

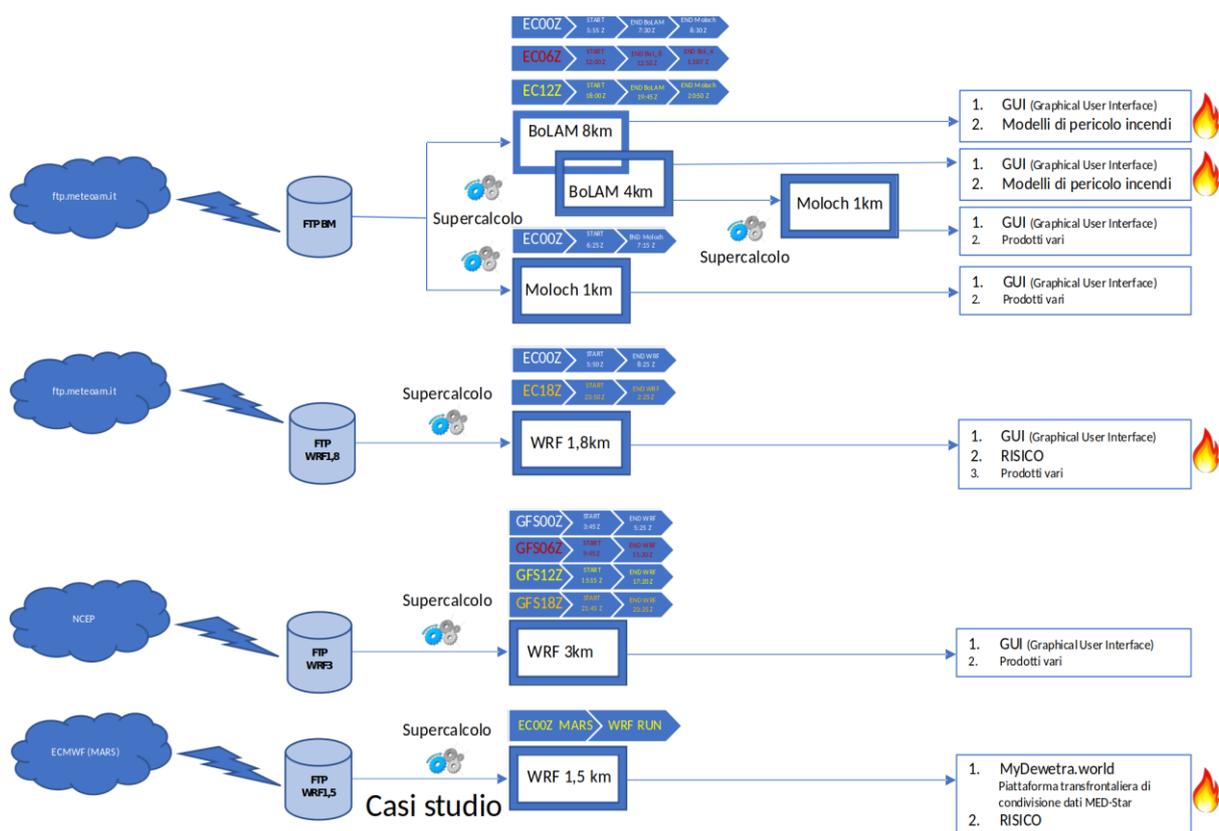
Il forecast +06h della **corsa EC00Z** è input per il BoLAM su **area euro-atlantica** nella versione B08L48 (circa **8 km di passo di griglia orizzontale e 48 livelli verticali**). La previsione che esso fornisce è di 66 ore a partire dalle 06Z del giorno corrente. Il secondo modello della catena, direttamente interfacciato al forecast +03h della precedente corsa B08L48, è il **BoLAM sull'area geografica del Mediterraneo** nella versione B04L56 (circa **4 km di passo di griglia orizzontale e 56 livelli verticali**). La previsione che esso fornisce è di 45 ore a partire dalle 09Z del giorno corrente. Il terzo modello della catena, direttamente interfacciato al forecast +03h della precedente corsa B04L56, è il **Moloch su area Sardegna** e mari circostanti nella versione M01L60 (circa **1 km di passo di griglia orizzontale e 60 livelli verticali**). La previsione che esso fornisce è di 42 ore a partire dalle 12Z del giorno corrente.

Elaborazioni analoghe si hanno anche per le corse **EC12Z**: il forecast iniziale è +12h e l'ultima scadenza elaborata dal **BoLAM-8km** è la +72h, la +48h per **BoLAM-4km**, la +45h per il **Moloch**; per la corsa **EC06Z**: il forecast iniziale è +06h e le ultime scadenze elaborate sono rispettivamente la +36h per il **BoLAM-8km** e la +33h per il **BoLAM-4km, finalizzato**

all'attività di **Monitoraggio e Sorveglianza** definita dalla **Direttiva PCM del 27.02.2004**. Gli output sono orari.

Un'ulteriore elaborazione **Moloch** è disponibile verso le 7:15Z. Essa si distingue dalle catene omonime per essere **innestata direttamente sulla corsa 00Z del ECMWF-IFS HRES** interfacciandosi con il forecast +06h. La previsione che essa fornisce è di 48 ore a partire dalle 06Z del giorno corrente sull'**area Sardegna** e mari circostanti con passo spaziale orizzontale di circa **1 km e 60 livelli verticali**.

Nella **Figura 1** è schematicamente illustrato il flusso delle catene modellistiche; sono riportati gli orari (Z, cioè GMT) indicativi di avvio e fine di ciascun processo che, ciclicamente, si ripete ogni giorno con i vari dati iniziali e ai bordi come indicato dai diversi colori nelle frecce del tempo; è infine indicato il flusso di elaborazioni per i casi studio.



MED-Star - Catene modellistiche meteorologiche aggiornate  
 Figura 1: Flusso processi modellistici.

È stato necessario **progettare un avanzato sistema di Supercalcolo**, basato su più nodi di elaborazione e interconnessioni ad alte prestazioni, la cui realizzazione ad hoc è stato **obiettivo dell'investimento I3**.

Il cosiddetto Sistema di Supercalcolo, strumento costituito da un *Cluster Linux* di tipo *Beowulf Class II* (Cluster Tirso) come schematizzato nella sottostante, è stato progettato e reso operativo per garantire la potenza di calcolo e lo spazio di archiviazione necessari. La configurazione software comprende uno strumento open source, distribuito e scalabile, per il monitoraggio del cluster (*Ganglia*), uno di gestione e di scheduling avanzato (*SGE - Sun Grid Engine*), anch'esso open source così come un ambiente di virtualizzazione (*libvirt*) e alcune librerie MPI per il calcolo distribuito; sono invece proprietari i compilatori Fortran e C++ della Intel e della PGI. Le infrastrutture principali sono un CED, dotato d'impianto di condizionamento e di continuità elettrica tramite gruppo elettrogeno, e le connessioni di rete in fibra ottica stabili, ridondate e con velocità sufficiente a garantire l'approvvigionamento della linfa vitale costituita dai dati GCM.

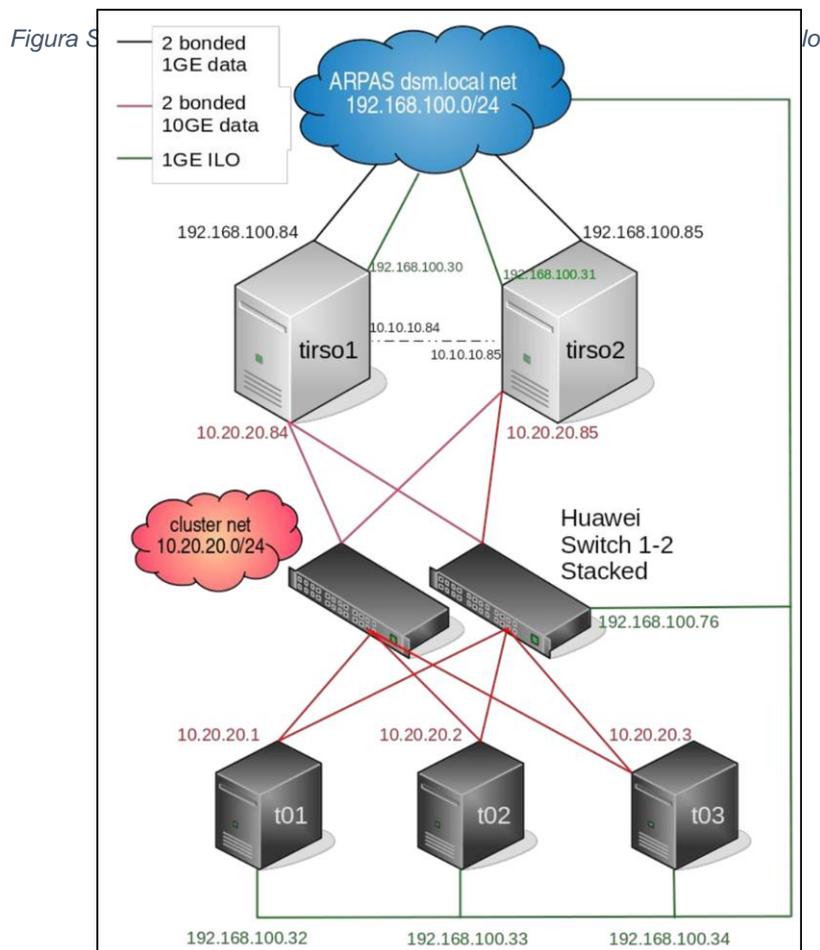


Figura 1: Schema semplificato Sistema Supercalcolo (Cluster Tirso).

Il Cluster Tirso, acquistato in diversi lotti a partire dal 2019, quale prodotto MED-Star destinato al miglioramento della modellistica meteorologica, ha una garanzia estesa di 24 mesi, portando il periodo di copertura a cinque anni. La rappresentazione in Figura 2 mostra l'essenziale necessario per l'attuale catena di modellistica operativa; sono poi installati e configurati nella stessa rete altri quattro nodi di calcolo (t04, t05, t06, t07) per l'attività di Sviluppo e per sopperire a eventuali criticità. L'acquisizione di uno switch InfiniBand consente di disporre di una interconnessione ad alte prestazioni (bassa latenza e ampia larghezza di banda) e quindi di poter distribuire l'elaborazione non solo su diversi core di uno stesso nodo di calcolo ma anche su vari nodi.

I nodi di front-end, *tirso1* e *tirso2*, sono configurati in HA (*High Availability*) quindi garantiscono lo start dei servizi sul nodo Master e contemporaneamente assicurano che il nodo Backup sia pronto ad entrare in possesso delle risorse in caso di down del nodo Master. Sono raggiungibili con nome virtuale *tirso* e hanno le seguenti caratteristiche principali:

#### Server 4U HPE

- Linux CentOS 7.6
- 4 CPU 12 core intel Xeon Gold 5518M  
2.30Ghz
- 768 GB RAM
- 2 hard disk 300GB SAS RAID1
- 24 hard disk 1.8TB SAS RAID 6
- 4 Schede rete Gigabit Ethernet
- 6 Schede rete 10 Gigabit Ethernet
- Scheda InfiniBand
- Interfaccia di management “ilo”
- Alimentatori ridondati



I sette nodi di calcolo hanno invece le seguenti specifiche principali:

#### Server 2U HPE

- Linux CentOS 7.6
- 4 CPU 18 core Intel Xeon Gold 6140M  
2.30GHz
- 768 GB RAM
- 2 hard disk 300GB SAS RAID1
- 6 Schede rete Gigabit Ethernet
- 6 Schede rete 10 Gigabit Ethernet
- Scheda InfiniBand
- Interfaccia di management “ilo”
- Alimentatori ridondati



L'attuale spazio residuo disponibile per l'archiviazione è di circa 7 TB; la */home* su *tirso* è condivisa da tutti i nodi di calcolo.

### Risultati e valore aggiunto.

In corso di progetto i **partner hanno convenuto d'individuare un insieme di giornate** nelle quali sull'area comune si sono verificati gli **incendi di maggior rilevanza in termini di quantità o di superficie percorsa** degli ultimi anni; ciò al fine di **simulare con elevato dettaglio spaziale gli scenari meteorologici su tutta l'area di progetto per le 48 ore successive alla giornata individuata e fornire le previsioni con passo orario**. Il set

d'interesse comune individuato consta di circa **60 giornate dell'estate 2017**; per ricreare le condizioni tipiche di una fase previsionale operativa nella quale l'analisi GCM disponibile è la corsa delle 00Z del modello deterministico ECMWF-IFS HRES (0,1°), sono stati **acquisiti dall'archivio MARS del Centro Europeo i dati necessari per ciascun caso studio** avvalendosi della Convenzione onerosa con Difesa Servizi S.p.A. già in essere con ARPAS in qualità di *Official Duty*. Il prelievo suddetto è ricaduto in un momento di transizione del centro di calcolo del ECMWF dalla sua sede storica a Reading (UK) a quella nuova di Bologna (Italia), comportando tempi relativamente lunghi per le numerose interruzioni pianificate del servizio e per l'instabilità delle connessioni. **Ciascun partner** ha anche reso disponibili le misure orarie delle **principali grandezze fisiche registrate nelle stazioni** rappresentative dell'area percorsa da ciascun incendio, di modo da accedere **tramite la piattaforma transfrontaliera di condivisione dati** (Componente T1, myDewetra) agli strati informativi necessari per l'**analisi del caso studio**.

Le **simulazioni** dell'evoluzione meteorologica per **ciascun caso studio** sono state elaborate con il **modello WRF sul sistema di Supercalcolo** e poi trasferite alla **Fondazione CIMA** per la **pubblicazione sulla piattaforma transfrontaliera**, di modo che ciascun partner potesse svolgere autonomamente le proprie valutazioni, e per **inizializzare il modello RISICO**. Si riportano nella Figura 3 un esempio di previsione del campo di temperatura a due metri per un caso studio, da esso si evince anche l'estensione dell'area comune considerata per tutte le simulazioni, e nella Figura 4 un esempio di campo di velocità di propagazione del fronte d'incendio previsto da RISICO. Per tutti i casi studio sono state calcolate le principali forzanti (temperatura, umidità relativa, vento, radiazione solare, precipitazione) a due e a dieci metri dal suolo; inoltre, nella prospettiva di un'**analisi che possa esaminare anche l'instabilità termodinamica e le possibili interazioni tra la dinamica atmosferica e quella dell'incendio**, per diversi casi sono state previste anche l'**energia potenziale disponibile per la convezione**, l'**indice di Haines** (un esempio in Figura 5) e varie **grandezze in quota** (temperatura, temperatura potenziale, umidità relativa e specifica, vento, velocità verticale, vorticità).

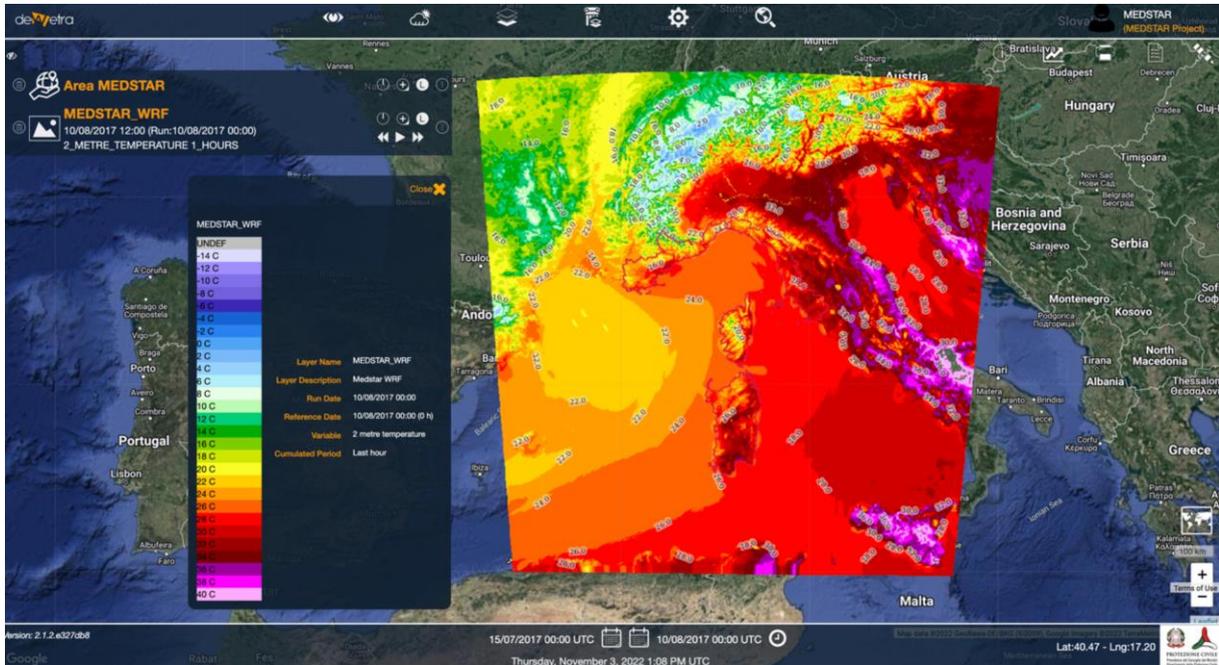


Figura 2: Esempio di previsione del campo di temperatura a due metri per un caso studio sull'area MED-Star.

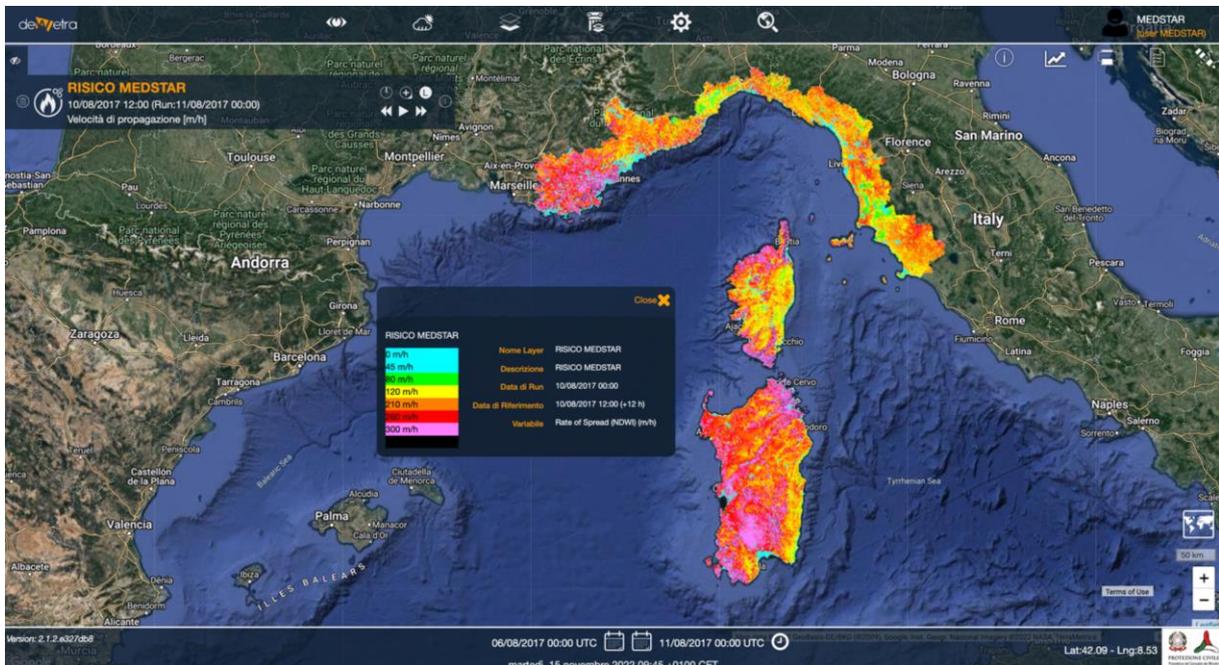
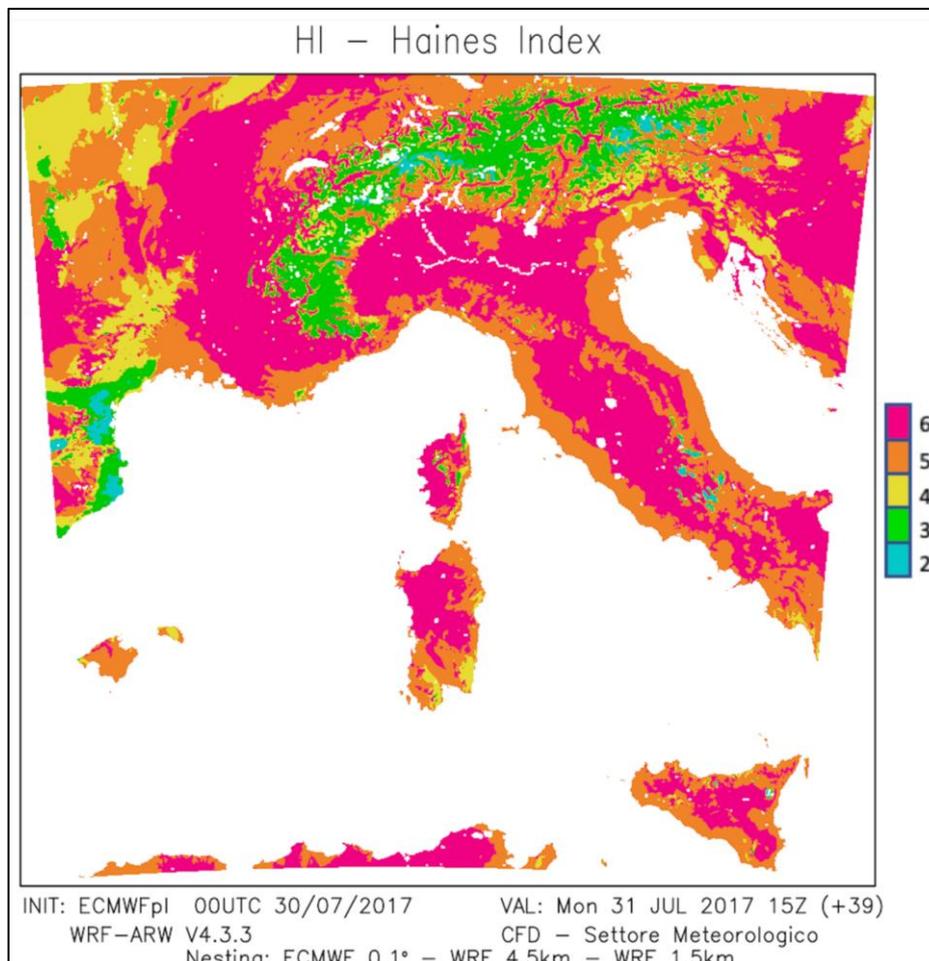


Figura 3: Esempio di campo di velocità di propagazione del fronte d'incendio previsto da RISICO alimentato da WRF per un caso studio sull'area MED-Star.



Relativamente al territorio della **Sardegna** sono stati analizzati, in particolare, **tre casi estremi nei quali la superficie percorsa dal fuoco è stata superiore a 1000 ha** e per comodità di sintesi è stato anche introdotto un indice sperimentale di pericolo di sviluppo d'incendi dal carattere potenzialmente estremo, EFMI – *Extreme wildFire Meteorological Index* (Dessy et al. 2022). Si tratta di situazioni nelle quali, presumibilmente, le difficoltà nelle opere di spegnimento sono derivate da un comportamento anomalo, esplosivo ed erratico come talvolta riportato dalle squadre d'intervento, che può anche discendere dall'azione sinergica delle condizioni meteo avverse (onda di calore, vento) e dall'interazione della dinamica dell'incendio con l'atmosfera circostante. L'analisi ha quindi tenuto conto sia delle classiche condizioni confrontabili con gli strumenti posti a poca distanza dal suolo (2 m o 10 m), sia del profilo verticale dell'atmosfera per prendere in esame anche le eventuali condizioni d'instabilità convettiva favorevoli allo sviluppo di incendi grandi e severi.

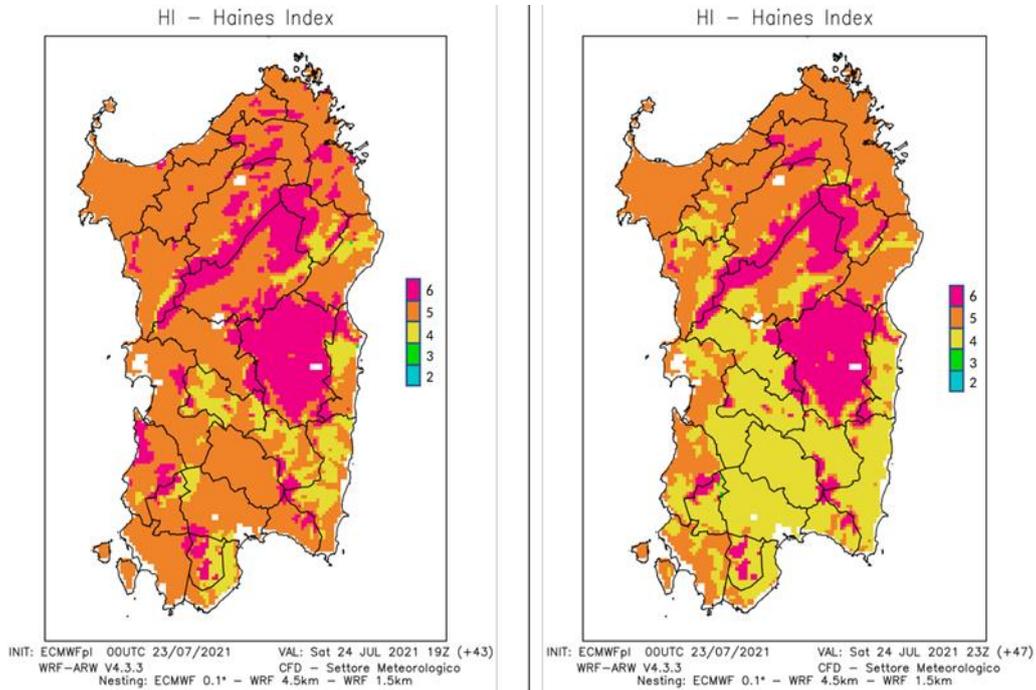


Figura 6: Esempi di previsione sul territorio della Sardegna di alcune grandezze e indici per dei casi studio sull'area MED-Star.

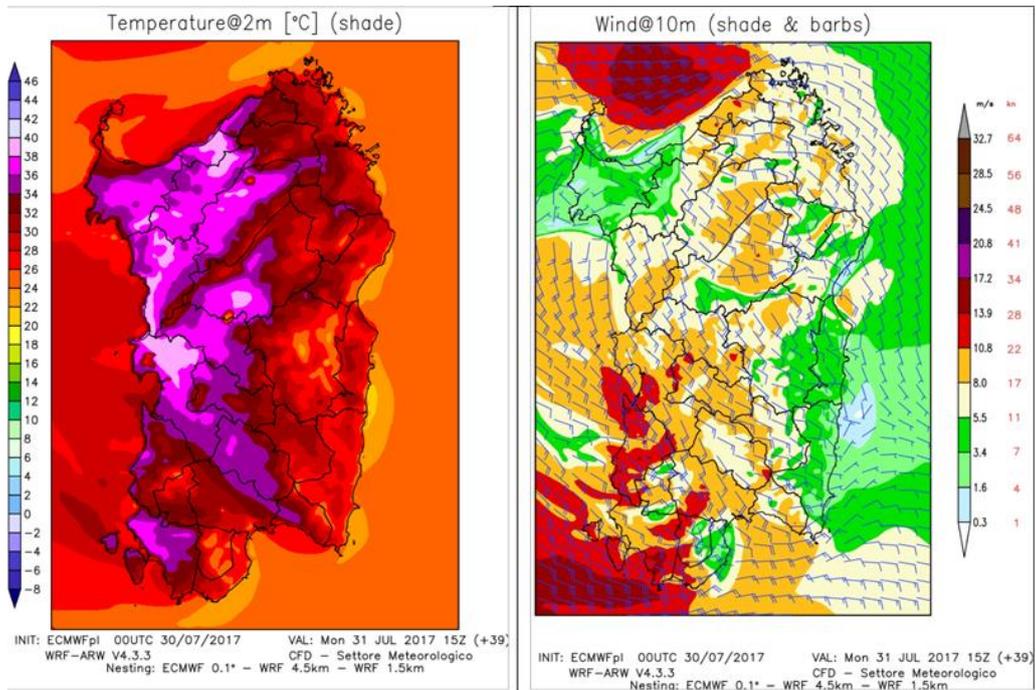


Figura 7: Esempi di previsione sul territorio della Sardegna di alcune grandezze e indici per dei casi studio sull'area MED-Star.

L'analisi è incentrata esclusivamente sulle forzanti meteorologiche favorevoli alla massima propagazione di un eventuale incendio; come si può vedere nella Figure 6 e 7 sono stati graficati alcuni campi di grandezze correlate allo sviluppo d'incendi dal carattere potenzialmente estremo (dipendente da temperatura, umidità e vento nei bassi strati): ciascuna coppia d'immagini si riferisce all'incendio che ha interessato rispettivamente il Montiferru nel 2021 e Gonnosfanadiga nel 2017. **La stabilità atmosferica deducibile dalla modellistica numerica è stata raffrontata criticamente in fase di analisi con il classico indice di Haines**, sebbene ne siano note le limitazioni (Potter 2018), e con il summenzionato indice sperimentale di pericolo **EFMI** – *Extreme wildFire Meteorological Index*.

I casi esaminati sono solo un primo passo nella verifica della complessa catena di previsione, perché **conclusioni robuste richiedono evidentemente una statistica relativamente lunga**; l'analisi di questi singoli eventi d'incendio boschivo sulla Sardegna **suggeriscono** che la nuova modellistica meteorologica consenta di **prevedere meglio gli scenari di potenziale pericolo rispetto alle corse operative finora utilizzate**.

Per **sperimentare** le procedure necessarie a una catena operativa costituita dall'**accoppiamento della modellistica meteorologica e di quella di pericolo incendi**, in collaborazione con la Fondazione CIMA è stata predisposta l'interfaccia tra il WRF, sull'area Sardegna, e il RISICO; nel corso della corrente campagna AIB della Sardegna, dall'agosto 2022, vengono così calcolate e rese quotidianamente disponibili alla Protezione civile le corse del **RISICO a scala regionale inizializzato con il modello meteorologico WRF** su area Sardegna. Tale configurazione sarebbe **scalabile all'intera area di progetto**, stanti i vincoli sopra menzionati.

Altresì nel corso dell'**operatività** associata alle **campagne AIB del periodo 2019-2022**, dalla **catena meteorologica BoLAM** si è continuato a derivare un indice sperimentale di pericolo incendi basato esclusivamente su grandezze meteorologiche (**IMI** - *Indice Meteo Incendi*; introdotto da Ficca e utilizzato sperimentalmente dalla Protezione civile regionale in applicazione del *Piano regionale di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi boschivi 2014-2016 – revisione 2014*, approvato con DGR n.18/17 del 20 maggio 2014). La Protezione civile regionale della Sardegna ha **inizializzato tutti i propri modelli di pericolo incendi** con le previsioni quotidiane della catena meteorologica BoLAM.

In estrema sintesi si può concludere che le attività di studio e sviluppo negli ambiti modellistico meteorologico e Supercalcolo, rispetto alla situazione ex ante (*deliverable* T.2.2.1), abbiano permesso di:

- costruire un prototipo di catena modellistica (WRF) sull'area MED-Star eseguita su casi studio;

- realizzare una procedura operativa d'interfacciamento tra un modello meteorologico (WRF) e un modello di pericolo incendi (RISICO) in una configurazione scalabile all'intera area di progetto;
- realizzare un sistema di Supercalcolo idoneo a sostenere il carico computazionale e l'annessa archiviazione delle simulazioni;
- aggiornare le catene di modellistica meteorologica operative sulla Sardegna (BoLAM, Moloch, WRF), diversificando le sorgenti GCM e incrementando la frequenza di emissione.

## Nuovi prodotti derivati dalla modellistica meteorologica.

Il Settore AIB di Regione Toscana, in collaborazione con il Consorzio LaMMA e l'Istituto per la BioEconomia del CNR (IBE), ha da anni predisposto l'implementazione di un sistema di previsione delle condizioni di suscettività all'innescò e alla propagazione degli incendi boschivi che utilizza l'indice canadese per determinare il livello di pericolo di incendio giornaliero sul territorio toscano, sulla base di osservazioni e previsioni meteorologiche. Una parte delle previsioni elaborate sono rese pubbliche dalle pagine del sito del Consorzio LaMMA - [Bollettino rischio incendi](#), mentre al settore AIB di Regione Toscana vengono forniti servizi aggiuntivi ad accesso riservato, tra i quali il cosiddetto Bollettino di Analisi Meteo AIB. Grazie al lavoro e agli approfondimenti dell'ultimo anno tale bollettino è stato arricchito di nuove mappe e di nuove funzionalità:

- Mappa dei percentili Drought Code
- Tool per la visualizzazione, a livello comunale, dell'andamento del Drought Code

### Il Bollettino di Analisi Meteo AIB.

Uno degli strumenti utilizzati durante i periodi a rischio (luglio-agosto-settembre) è il cosiddetto **Bollettino di Analisi Meteo AIB**, nel quale vengono analizzati i principali indici e parametri meteo (Figura 8). Attraverso questa analisi l'analista AIB di sala di Regione Toscana fornisce indicazioni operative sugli incendi attesi, sul comportamento del fuoco e considerazioni sulle zone regionali che devono essere attenzionate.

In presenza di condizioni di rischio molto alto (indice FWI rosso) in uno o più comprensori territoriali della Toscana, il Settore AIB, entro le ore 12:00, invia tramite posta elettronica il bollettino di Analisi Meteo AIB agli Analisti AIB, ai Direttori delle operazioni di spegnimento, alla SOUP e ai COP AIB.

Oltre alle mappe il bollettino viene corredato anche di due parti testuali descrittive:

- Cosa abbiamo avuto:  
dove vengono riportate le informazioni riguardanti il numero, la distribuzione territoriale e le caratteristiche degli incendi boschivi che si sono verificati in Toscana nella giornata precedente;
- Cosa ci aspettiamo:  
contiene un'analisi puntuale delle condizioni meteo previste per la giornata, suddivisa in fasce orarie. Particolare attenzione viene posta 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.

È inoltre possibile inserire dinamicamente delle foto e la tipologia d'incendio prevista.

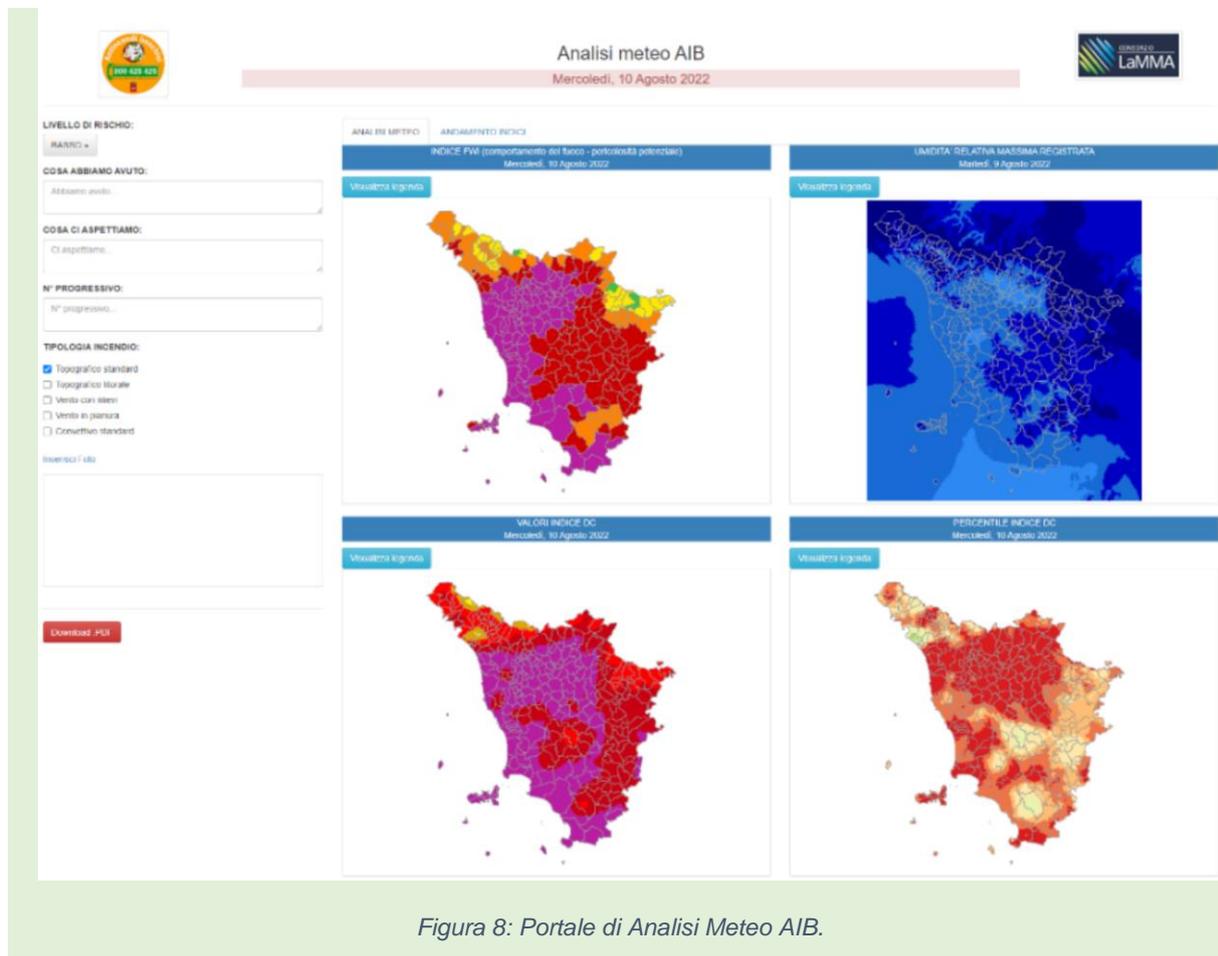


Figura 8: Portale di Analisi Meteo AIB.

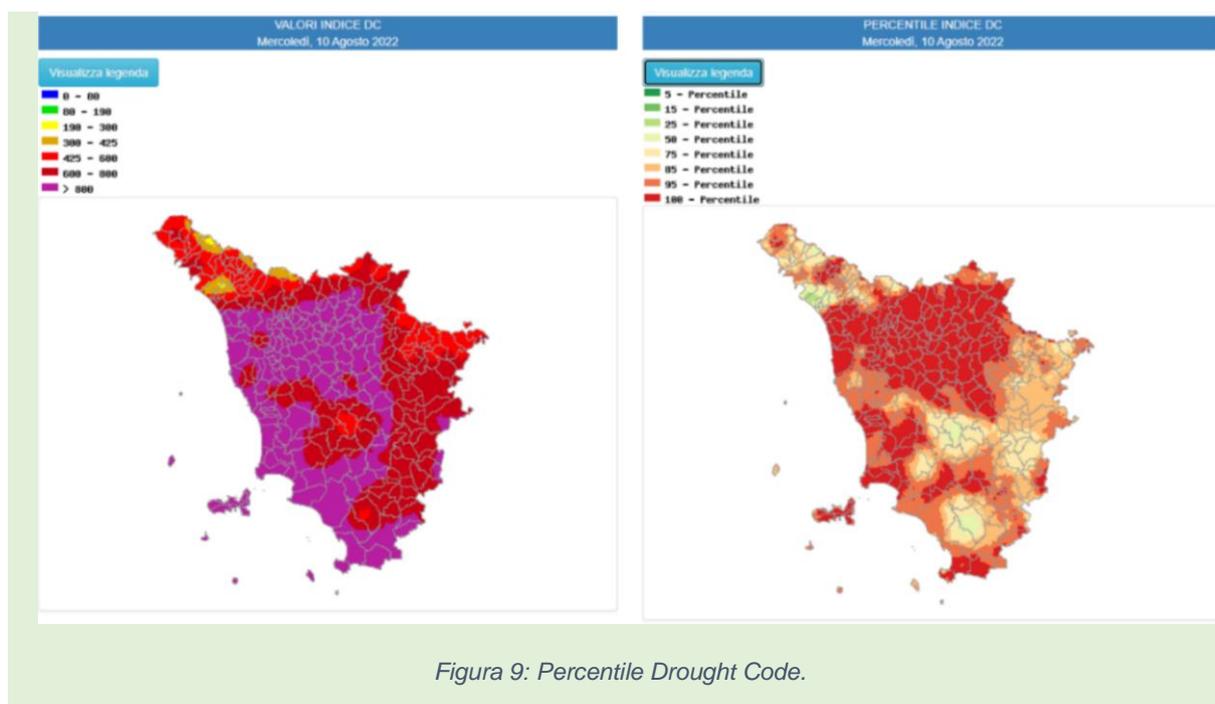
### Metodologia.

La realizzazione delle nuove mappe di percentile è stata possibile grazie alla disponibilità, per il territorio toscano, di un archivio di dati meteo osservati dalle stazioni meteorologiche che va dal 1991 ad oggi. Giornalmente, oltre alla creazione dei vari indici di pericolo giornaliero d'incendio, viene creato anche un archivio delle mappe di percentile del Drought Code. Per tali mappe, che hanno una risoluzione spaziale di 1km x 1km, viene inoltre calcolata una statistica zonale per superficie comunale. Tale statistica viene memorizzata all'interno di un database relazionale, nel nostro caso utilizzando il dbms PostgreSQL, per successive analisi, e ci ha permesso la realizzazione del nuovo tool di visualizzazione dell'andamento del Drought Code. La parte di interazione dinamica del tool ha richiesto l'utilizzo del linguaggio python per la parte di processamento ed analisi dati lato backend mentre per la parte frontend sono state utilizzate librerie javascript come leaflet, per l'interazione con la mappa dei comuni e plotly per la generazione dei grafici.

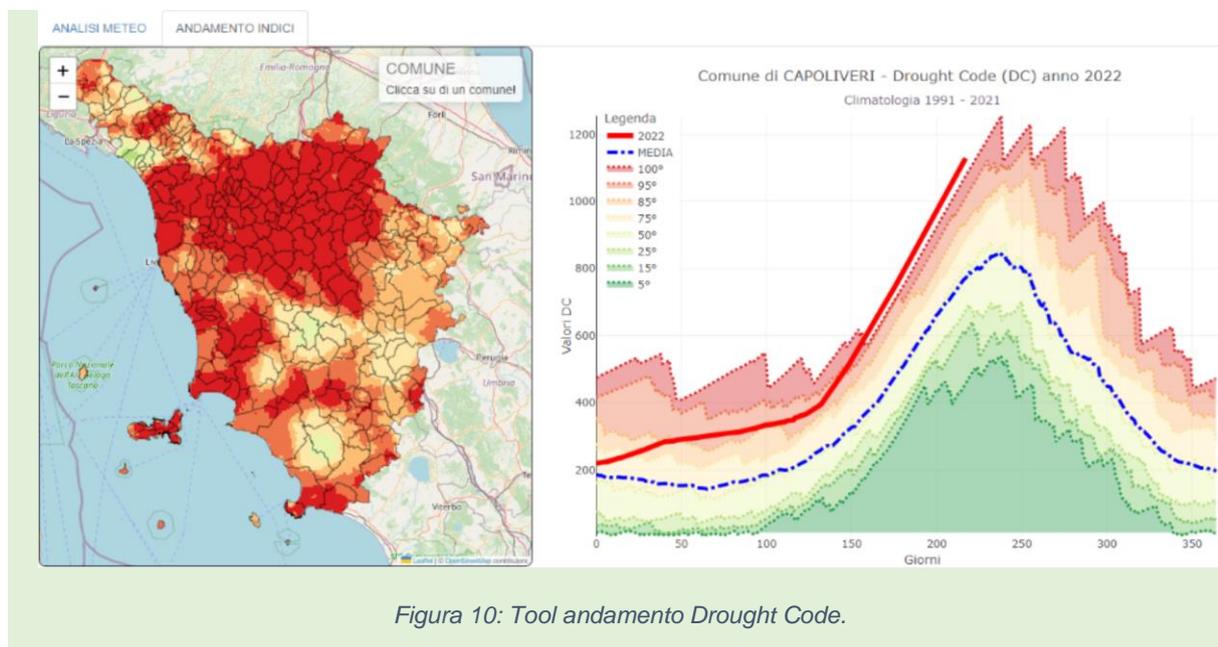
## Risultati e valore aggiunto.

Il Drought Code è un ottimo indicatore per gli incendi estivi perché valuta il contenuto medio di umidità degli strati organici della lettiera più profonda della foresta e dei combustibili di maggiore dimensione. Questo tipo di combustibile durante il periodo estivo e siccitoso si asciuga lentamente, di conseguenza il monitoraggio del suo contenuto di umidità (DC), risulta un indicatore indispensabile per la stima del rischio di innesco degli incendi. Essendo anche meno sensibile alle variazioni delle condizioni meteorologiche giornaliere (presenta una maggiore inerzia) viene utilizzato dagli analisti per previsioni su lungo periodo.

In Figura 9 è possibile vedere la mappa del DC a confronto con la mappa dei percentili DC per il giorno corrente (Climatologia anni 1991 - 2021).



In Figura 10 è invece riportato il tool che permette di confrontare, per superficie comunale, l'andamento del DC dell'anno in corso (linea rossa) sia con il valore medio (linea blu) che con i valori di percentile, per una visione d'insieme più consapevole (Climatologia anni 1991 - 2021).



Nel futuro prossimo saremo impegnati in ulteriori approfondimenti, focalizzati soprattutto al cambiamento delle scale e dei valori di riferimento dei vari indici in modo da ottimizzarli anche per gli incendi invernali toscani.

In Tabella 1 vengono elencati i dati utilizzati per le elaborazioni.

Tabella 1: Modellistica utilizzata per l'elaborazione dei prodotti finali.

	<b>Indici meteorologici di pericolo d'incendio</b>
Modello	Moloch 2.5 km <a href="http://www.lamma.toscana.it/modelli/atmo/bolam-e-moloch-info-sui-modelli">http://www.lamma.toscana.it/modelli/atmo/bolam-e-moloch-info-sui-modelli</a>
Osservazioni	Stazioni Meteorologiche Regione Toscana. Circa 436 stazioni pluviometriche e circa 248 stazioni termometriche
Risoluzione spaziale finale	1km
Risoluzione temporale	Giornaliera con previsione a tre giorni
Dominio spaziale	Regione Toscana
Variabili utilizzate	Umidità, precipitazione, vento e temperatura

## Modellistica della probabilità e intensità di incendio.

L'obiettivo principale di questa attività sviluppata dal CNR-IBE è stato quello di applicare i modelli di simulazione probabilistici all'area di cooperazione Italia-Francia Marittimo (Sardegna, Corsica, Toscana, Liguria e Provenza-Alpi-Costa Azzurra), che coprono circa 93.000 km<sup>2</sup> di territorio, per analizzare ad una risoluzione elevata di 100 m la pericolosità e l'esposizione agli incendi boschivi e caratterizzare le variazioni spaziali della propagazione e del comportamento degli incendi fra e all'interno delle province e delle regioni. L'area studio presenta diversi patrimoni ecologici, culturali, antropici e turistici che, soprattutto durante la stagione estiva, sono fortemente minacciati dagli incendi boschivi. Future proiezioni dicono che il problema degli incendi nell'area studio sarà sempre più difficile da gestire a causa di una serie di fattori predisponenti, tra cui il cambiamento climatico, l'abbandono delle aree agro-silvopastorali con il conseguente aumento del carico e della continuità del combustibile e l'espansione delle interfacce urbane nelle aree forestali a rischio di incendio. Per cui è necessario trovare e pianificare azioni volte a mitigare e a prevenire questo problema. La metodologia ed i risultati di questa attività sono stati presentati nel lavoro di Salis et al. 2022 e nell'Atlante della pericolosità degli incendi (Prodotto T2.2.4).

### Metodologia.

Per eseguire l'analisi, è stato selezionato l'algoritmo Minimum Travel Time (MTT) di Finney (2002), implementato in FConstMTT. Per effettuare le simulazioni attraverso il MTT sono necessari una serie di inputs di varia natura e correlati fra loro, ovvero dati spaziali di base (topografia e modelli di combustibile), dati relativi a meteo e clima e derivanti anche dal database storico degli incendi (umidità del combustibile, direzione ed intensità del vento associati ad eventi storici estremi) ed infine punti di insorgenza storici.

Uno dei file fondamentali per l'esecuzione delle simulazioni è il file "landscape", che raccoglie tutti gli inputs spaziali necessari. Per la costruzione di questo file, i dati di inputs topografici sono: il modello digitale terrestre, la pendenza e l'esposizione. In questo studio questi inputs sono derivati dal raster a 100 m di risoluzione del Modello Digitale di Elevazione (DEM) in metri sopra il livello del mare (s.l.m.) dell'area di Programma disponibile nel sito Copernicus (<https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1>).

Relativamente ai dati dei modelli di combustibile è stata utilizzata una carta armonizzata dei tipi di combustibili per tutta l'area di programma, ottenuta dall'unione delle varie carte forestali (Inventario Forestale 2009 – Regione Toscana (<https://www.regione.toscana.it/-/geoscopio>), Carta dei Tipi Forestali 2013 – Liguria (<https://geoportal.regione.liguria.it/catalogo/mappe.html#>), DB Forêt 2015 – Corsica e Paca (<https://www.geoportail.gouv.fr/>) con la Corine Land Cover 2012 (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>), in modo da ottenere

maggior dettaglio possibile per la copertura arborea ma anche per i dati relativi a tutto ciò che non fa parte delle foreste. Per la Regione Sardegna, poiché non è presente una carta forestale aggiornata, è stata utilizzata la carta di Uso del Suolo 2009 al V livello (<https://www.sardegnaeoportale.it/>), più dettagliato per quanto riguarda la copertura arborea, combinata con la Carta Bioclimatica, in modo da differenziare le caratteristiche del bosco. Dopo aver unito tutti i tematismi le varie categorie sono state unite in 20 tipologie comuni di combustibile.

In seguito, è stato creato il raster a 100 m di risoluzione dei modelli di combustibile di superficie dell'area di Programma utilizzato in seguito come input per le simulazioni del comportamento e della propagazione degli incendi boschivi attraverso il modello FConstMTT, attribuendo alle tipologie sia dei modelli di combustibile standard (Scott&Burgan, 2005, Anderson, 1982), sia modelli personalizzati, derivanti da campionamenti ed analisi di laboratorio nelle aree oggetto di studio.

L'aggregazione delle diverse tipologie vegetazionali di ogni Regione e l'attribuzione dei modelli di combustibile per ottenere tematismi standardizzati per le 5 Regioni sono state possibili grazie ai suggerimenti e alle indicazioni dei tecnici e degli esperti di ogni Regione, che hanno contribuito anche alla creazione dei tematismi relativi alla copertura arborea, alla altezza della pianta, all'inserzione della prima impalcatura e alla densità della chioma, necessari per la costruzione del "landscape" file.

Per evidenziare le differenze altimetriche presenti nell'area studio fra e all'interno delle regioni sono state settate le condizioni di umidità del combustibile differenziandole sulla base della diversa topografia, secondo le seguenti classi altimetriche: mediterranea < 200 m, bassa collina 200-400 m, alta collina 400-750 m, montagna > 750 m.

Per quanto riguarda la direzione del vento utilizzata per le simulazioni sono state selezionate le condizioni associate agli eventi storici per ogni regione, considerando il periodo 1998 – 2019, con superficie bruciata maggiore di 200 ha, costruendo un file nel quale oltre alla direzione veniva anche specificata la probabilità di avere un vento con quella direzione, mentre la velocità del vento è stata settata a circa 30 kmh-1, che in genere è una situazione associata ad incendi boschivi di grandi dimensioni ed intensità.

I database dei punti di insorgenza utilizzati sono stati forniti da ogni Regione per l'Italia ed elaborati dai dati presenti nel sito promethee per le Regioni francesi (<https://www.promethee.com/incendies>) e sono stati utilizzati anche per la creazione del raster a 100 m di risoluzione della densità dei punti di insorgenza degli incendi con superficie bruciata > 1 ha dell'area di Programma, utilizzato come input dal modello di simulazione FConstMTT.

## Risultati e valore aggiunto.

I risultati ottenuti con questo lavoro sono raccolti principalmente nell'Atlante della pericolosità degli incendi (Prodotto T2.2.4) e nel lavoro di Salis et al. (2022) e consistono in: burn

probabilità annuale, lunghezza media di fiamma (CFL), source-sink ratio e probabilità che si verifichi un incendio di chioma.

I risultati evidenziano le differenze degli indicatori di propagazione e comportamento degli incendi boschivi fra le varie Regioni, dovute alle differenze sia dal punto di vista topografico, quindi di umidità del combustibile, che nella distribuzione spaziale dei modelli di combustibile ma anche alle differenze nel regime degli incendi. Si tratta della prima applicazione a scala così elevata (93.000 km<sup>2</sup>) e ad alta risoluzione (100 m) dei modelli di simulazione probabilistici.

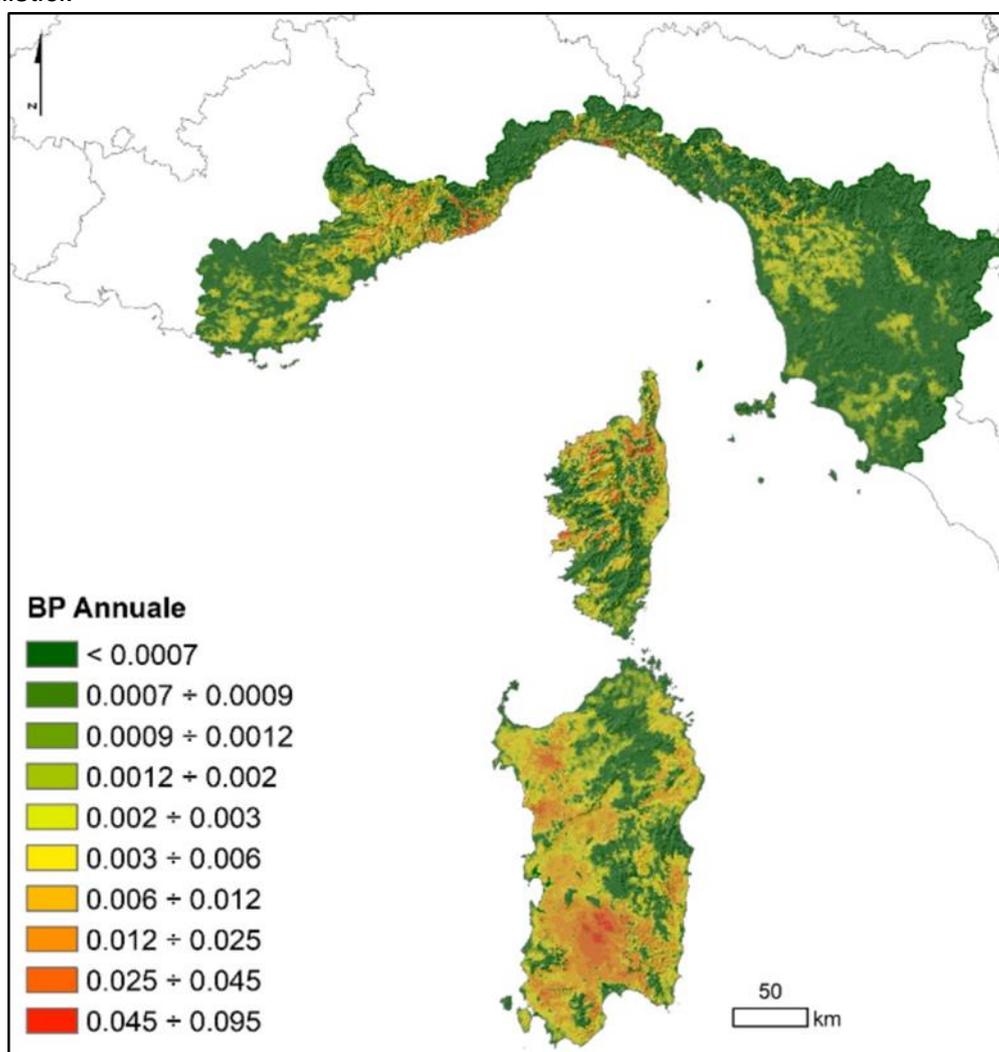


Figura 11. Mappa (100 m di risoluzione) della burn probability annuale per l'area di Programma. Questo output rappresenta la probabilità annuale di avere un incendio considerando le condizioni di riferimento di input per le simulazioni modellistiche. La BP può variare fra 0 (il pixel non brucia) a 1 (il pixel brucia ogni anno).

Inoltre, si tratta del primo studio effettuato attraverso l'utilizzo di mappe standardizzate dei modelli di combustibile ottenute tramite una metodologia oggettiva per tutta l'area di Programma.



Questi risultati possono essere utili alla pianificazione di azioni comuni rivolte alla gestione e alla prevenzione degli incendi boschivi all'interno dell'area di cooperazione Italia-Francia Marittimo.

## Modellistica della pericolosità e del rischio.

L'attività sviluppata da UNIFI ha previsto la realizzazione di una mappatura del combustibile, condotta mediante un'applicazione appositamente sviluppata, che è stata propedeutica alla realizzazione di una carta del rischio per le regioni costiere della regione Toscana.

### Stato dell'arte della mappatura di variabili di combustibile forestale attraverso rilievi a terra e *remote sensing*.

L'attuale tendenza nella mappatura del combustibile è quella di utilizzare sia dati rilevati a terra sia da tecniche di telerilevamento e di elaborarli attraverso l'utilizzo di differenti approcci modellistici e di intelligenza artificiale. Integrare all'interno dello studio differenti sorgenti di dati permette infatti di ottenere risultati finali migliori in quanto consente di combinare fra loro i vari vantaggi dei differenti metodi. L'utilizzo di approcci modellistici rende possibile affrontare due distinti approcci: I) di regressione dove l'obiettivo principale è stimare la quantità di combustibile presente (D'Este et al. 2021 e Bright et al. 2017) e II) di classificazione dove si prevede la categoria di appartenenza dell'elemento in input (Heising et al. 2022 e Domingo et al. 2020).

L'utilizzo di un approccio di regressione viene utilizzato da D'Este et al. (2021), applicando tre differenti algoritmi (Multiple Linear regression - MLR, Random Forest - RF e Support Vector Machine - SVM) per la stima e la mappatura del quantitativo di combustibile a 1h presente all'interno di una area pilota. Lo studio integra le variabili ottenute da remote sensing (Sentinel-1 e Sentinel-2) e Lidar con i dati di combustibile rilevato attraverso l'utilizzo di transetti. I risultati evidenziano, in questo caso, una buona performance predittiva del RF rispetto agli altri modelli utilizzati. Lo studio inoltre, sottolinea l'importanza dell'utilizzo di dati Lidar nella stima del quantitativo di combustibile presente a terra. Mentre in Bright et al. (2017) gli autori utilizzano il solo modello RF per realizzare delle mappe di combustibile di superficie all'interno di una area studio situata in Colorado (USA), utilizzando come covariate una serie temporale Landsat e dati Lidar acquisiti attraverso volo aereo. Lo studio considera il combustibile time lag 1h, 10h, 100h e infine 1.000h. I risultati mostrano un basso valore di varianza spiegata per il modello, per ognuna delle variabili considerate con valori che oscillano fra il 16 e il 32%.

L'utilizzo di un approccio di classificazione viene utilizzato da Heising et al. (2022), dove gli autori propongono l'utilizzo di un modello *RF* per classificare le diverse tipologie di combustibile presenti all'interno di un'area forestale. Il modello utilizza 119 differenti variabili predittive ottenute a partire dall'uso di differenti tipologie di dati (come, immagini *radar* da Sentinel-1, immagini multispettrali da Sentinel-2 e dati Lidar da aereo) con valori di accuratezza e affidabilità del modello elevati (coefficiente di kappa di Cohen del 90% circa). Le mappe così prodotte sono state poi utilizzate per lo studio del rischio di incendio, attraverso l'utilizzo di un modello di comportamento del fuoco (Flammap).

Lo studio di Domingo *et al.* (2020) propone un confronto sulla base dei diversi valori di accuratezza ottenuti da due distinti approcci modellistici: il *support vector machine* (SVM) e il *RF* per la classificazione di differenti tipologie di combustibile in base alla classificazione “Prometheus” all’interno di un’area forestale in Spagna. Entrambi i distinti modelli utilizzano come variabili covariate dati Lidar da aereo e immagini multispettrali Sentinel-2, mentre i dati di combustibili sono stati raccolti attraverso l’impiego di transetti. I risultati dello studio mostrano migliori risultati per il modello SVM (accuratezza della classificazione di 59%) rispetto al *RF* (accuratezza della classificazione di 54%).

Metodologie per la mappatura dei combustibili.

Il rilievo dei combustibili forestali è una delle parti fondamentali alla base di qualsiasi indagine di previsione e prevenzione dagli incendi. Negli anni sono stati messi a punto vari metodi di rilievo che possono essere sintetizzati in quattro tipologie (Woodall *et al.* 2009):

- aree di saggio,
- aree di saggio circolari a raggio variabile,
- transetti lineari,
- stima visiva.

La prima tipologia, anche se applicata con diversi modi e applicazioni, prevede il rilievo del combustibile forestale in aree di saggio di varie forme e dimensioni. Più comunemente vengono impiegate micro aree di saggio quadrate di 1 m x 1 m. In queste aree viene asportato tutto il materiale a terra per poi, spesso in laboratorio, suddividerlo nei vari tipi di combustibile, essiccarlo e pesarlo. I valori di peso di sostanza secca ottenuti vengono così facilmente riportati a ettaro.

La seconda tipologia di rilievo è simile alla prima ma viene effettuata su aree di saggio circolari, spesso concentriche, con raggio variabile a seconda del tipo di combustibile da rilevare. Generalmente il raggio dell’area aumenta con l’aumentare delle dimensioni del combustibile.

La terza tipologia di rilievo, per transetti, prevede invece di registrare tutti i combustibili che intersecano un linea retta posta sul terreno. Di ogni combustibile ne viene annotata l’appartenenza ai vari tipi o, direttamente, la dimensione. Vari sono le applicazioni del metodo che variano fondamentalmente nella lunghezza del transetto, l’orientamento e il numero di transetti e sovrapposizione (a croce o asterisco).

L’ultima metodologia prevede l’applicazione delle aree di saggio con stima del combustibile eseguita a vista, quindi in maniera non distruttiva e veloce.

Come ovvio che sia tutti e quattro i metodi di rilievo variano nell’applicazione nella numerosità del campione in base alla precisione dell’inventario che si vuol ottenere.

## L'App FuelGeoData - Applicazione di una metodologia speditiva per la caratterizzazione dei combustibili.

All'interno del progetto MED-Star è stata prodotta una applicazione che permetta il rilievo dei combustibili forestali in maniera semplice, veloce e automaticamente georiferito. L'applicazione FuelGeoData, realizzata dal Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali dell'Università degli Studi di Firenze (DAGRI) in collaborazione con la società Vanzotech srl, prevede un approccio al combustibile forestale dal punto di vista quantitativo ispirandosi alla tecnica di rilievo dei combustibili forestali "Photoload Sampling Technique" (Keane e Dickinson 2007). Il metodo prevede una stima quantitativa dei carichi di combustibile forestale presente effettuando un'analisi visiva della situazione reale e confrontandola con varie immagini rappresentative delle possibili quantità di combustibile presente. Il rilevatore raccoglie i dati e analizza un plot di 1 m x1 m rappresentativo dell'area di studio. L'operazione viene ripetuta per tutte le varie tipologie di combustibili forestali (Figura 12).

Latitudine:	Latitudine	
Longitudine:	Longitudine	
Time Lag 1h:	Time Lag 1h	scegli immagine associata
Time Lag 10h:	Time Lag 10h	scegli immagine associata
Time Lag 100h:	Time Lag 100h	scegli immagine associata
Erbacee monocotiled. vive:	Erbacee monocotiled. vive	scegli immagine associata
Erbacee dicotiled. vive:	Erbacee dicotiled. vive	scegli immagine associata
Erbacee secche:	Erbacee secche	scegli immagine associata
Arbusti:	Arbusti	scegli immagine associata
Altezza arbusti (in m):	Altezza arbusti (in m)	
Struttura del bosco:	Struttura del bosco	scegli immagine associata
Altezza Lettieria:	Altezza Lettieria	

Figura 12: Schermata data entry dell'applicazione FuelGeoData dalla quale si evincono tutte le tipologie di combustibile considerate nel rilievo

Il metodo proposto da Keane e Dickinson (2007) è stato modificato e semplificato per tenere conto delle caratteristiche dei soprassuoli forestali da indagare (ad esempio non è stata considerata la classe di *timelag* 1.000h caratterizzata dal diametro maggiore di 3 pollici/7,5 cm).

La prima tipologia di combustibile considerata nel rilievo è il combustibile più fine (con diametro <0,6 cm), corrispondente alla *timelag classes* di 1 ora, per la sua quantificazione si confronta la situazione riscontrata sul terreno, all'interno di un'area di 1 m<sup>2</sup>, con una delle 12 immagini ricavate dal metodo del "Photoload Sampling Technique" (Keane e Dickinson 2007), ognuna delle quali è abbinata ad un dato quantitativo di materiale, espresso in kg/m<sup>2</sup> (Figura 13).

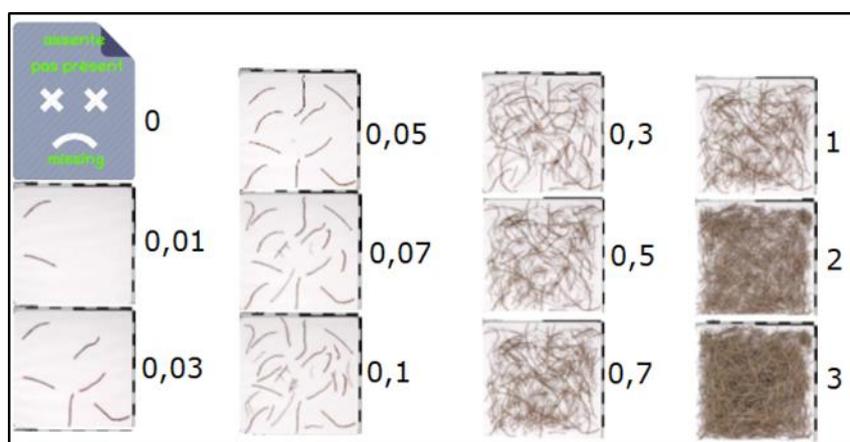


Figura 13: Immagini di riferimento per la quantificazione del combustibile (valore espresso in kg/m<sup>2</sup>) *timelag* 1h.

La medesima operazione viene poi effettuata per la classe di combustibile di diametro superiore (tra 0,6 e 2,5 cm) corrispondente alla *timelag classes* di 10h e con la classe ancora superiore (diametro compreso tra 2,5 e 7,5 cm) corrispondente al *timelag* di 100h (Figura 14).

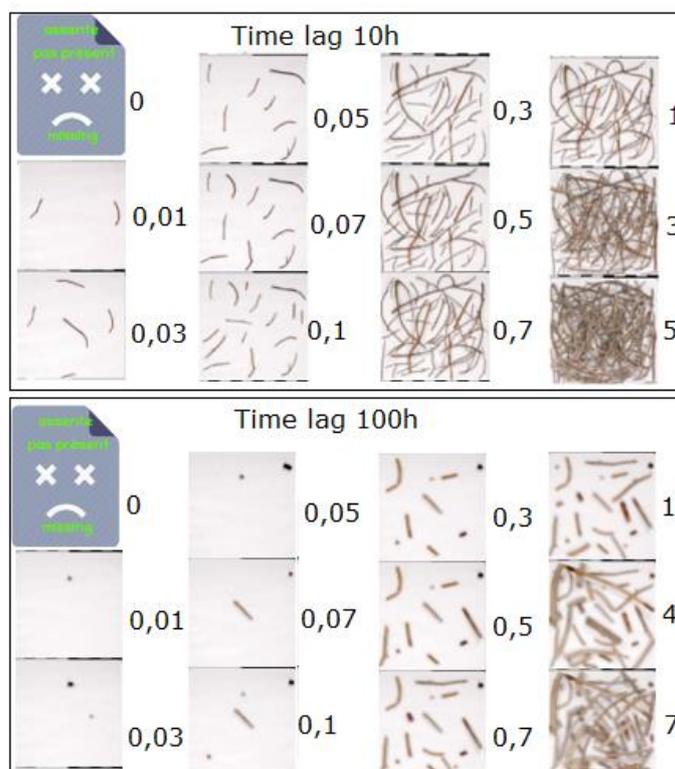


Figura 14: Immagini di riferimento per la quantificazione del combustibile (valore espresso in  $\text{kg/m}^2$ ) timelag 10h (sopra) e 100h (sotto)

Successivamente è possibile passare ad analizzare la quantità di combustibile erbaceo vivo, distinto tra monocotiledoni e dicotiledoni ed il combustibile erbaceo secco. Anche qui si effettua una comparazione visiva tra l'eventuale combustibile presente nell'area di rilievo puntuale e le diverse quantità possibili riportate nelle 10 immagini per ciascuna categoria di combustibile erbaceo (Figura 15).

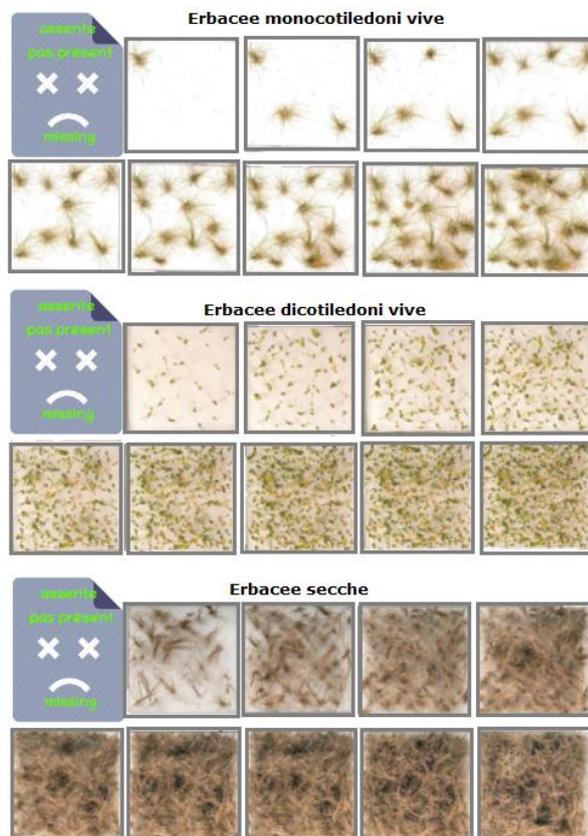


Figura 15: Immagini di riferimento per la quantificazione del combustibile erbaceo monocotiledone vivo (in alto), dicotiledone vivo (in mezzo) e del combustibile erbaceo secco (in basso)

Il passaggio successivo prevede il censimento di eventuali arbusti presenti, come sempre andando a confrontare la situazione reale con le 10 immagini precaricate nell'applicazione, di questi si registra anche un valore di altezza media espressa in metri (Figura 16).

Per la categoria "Arbusti" è necessario inserire anche l'altezza media degli stessi, espressa in metri (Figura 16).

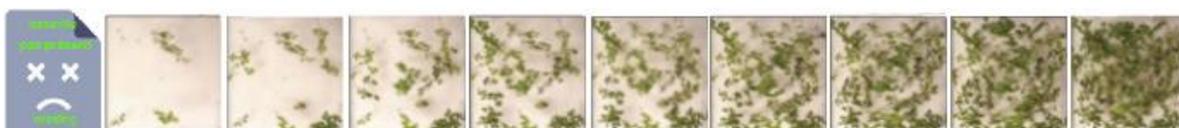


Figura 16: Immagini di riferimento per la classificazione del combustibile per la categoria "Arbusti"

Per concludere il rilievo del singolo punto è inoltre necessario classificare la struttura del bosco e riportare l'altezza della lettiera, espressa in centimetri (Figura 17).

Per classificare la struttura del bosco sono state inserite delle immagini di riferimento che rendono più semplice l'operazione (Figura 17)

E' presente anche la possibilità di scattare una foto al microplot rilevato in modo da poter effettuare delle verifiche a posteriori alla classificazione dei vari tipi di combustibile.

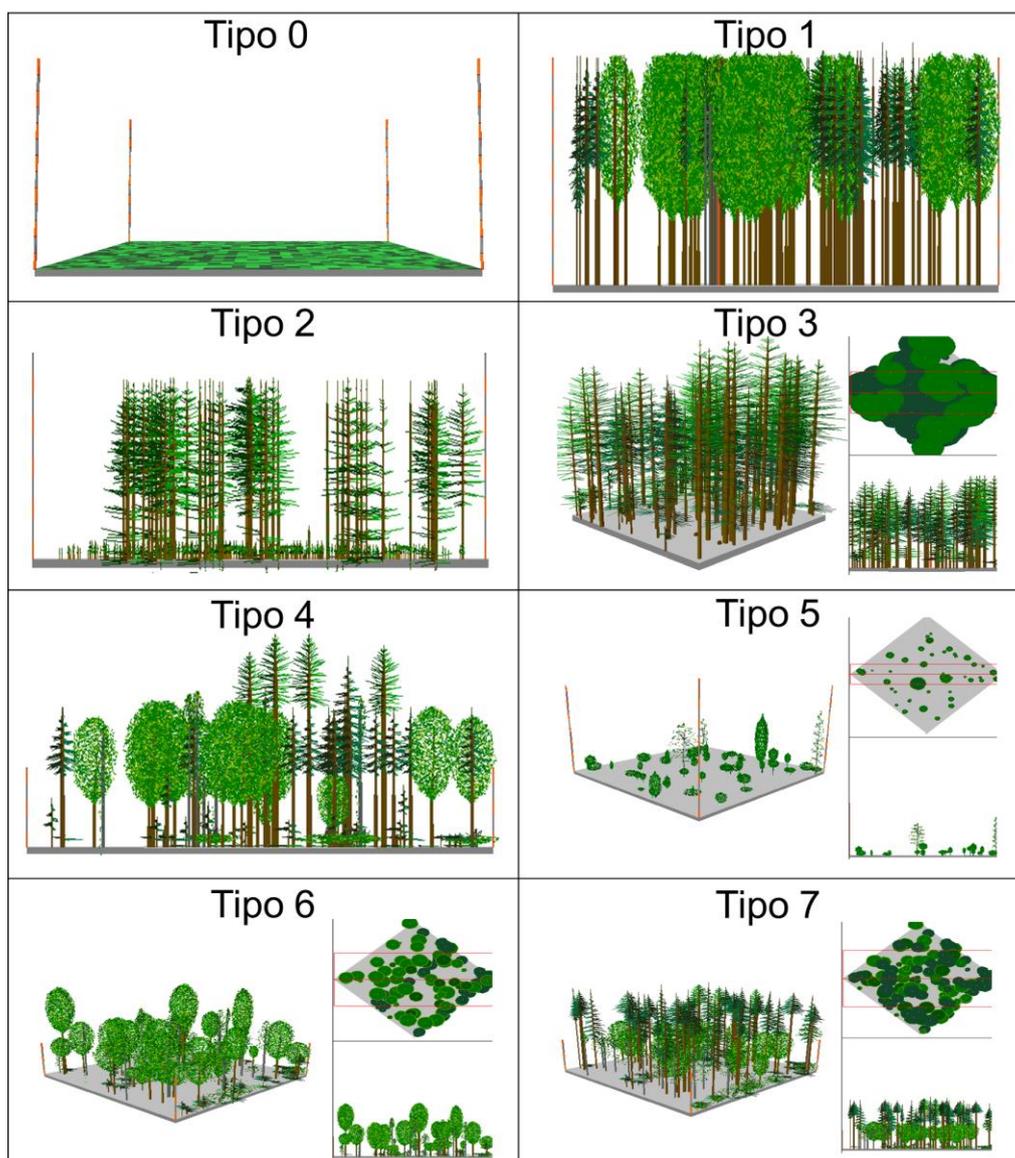


Figura 17: Immagini di riferimento per classificare la struttura del bosco. Nel dettaglio, superficie con assenza di vegetazione arborea/arbustiva o presenza di vegetazione molto rada (prati, pascoli, coltivi ecc. (tipo 0), bosco monoplano (tipo 1), bosco biplano (tipo 2), bosco multiplano fitto (tipo 3), bosco rado (tipo 4), zona con vegetazione bassa, rada, perlopiù arbustiva (tipo 5), bosco multiplano a media densità (tipo 6) oppure se in bosco misto, abbastanza fitto (tipo 7).

In Tabella 2 si riporta la sintesi dei valori di carico delle varie tipologie di combustibili associate alle diverse immagini.

Tabella 2: Valori di carico ( $\text{kg m}^{-2}$ ) delle varie tipologie di combustibili associate alle diverse immagini.

<b>1h</b> <b>(<math>\text{kg m}^{-2}</math>)</b>	<b>10h</b> <b>(<math>\text{kg m}^{-2}</math>)</b>	<b>100h</b> <b>(<math>\text{kg m}^{-2}</math>)</b>	<b>monocotiledoni</b> <b>(<math>\text{kg m}^{-2}</math>)</b>	<b>dicotiledoni</b> <b>(<math>\text{kg m}^{-2}</math>)</b>	<b>erbacee</b> <b>(<math>\text{kg m}^{-2}</math>)</b>	<b>arbusti</b> <b>(<math>\text{kg m}^{-2}</math>)</b>
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,01
0,03	0,03	0,03	0,03	0,01	0,10	0,03
0,05	0,05	0,05	0,05	0,02	0,15	0,05
0,07	0,07	0,07	0,07	0,03	0,20	0,07
0,10	0,10	0,10	0,09	0,04	0,25	0,09
0,30	0,30	0,30	0,12	0,05	0,30	0,12
0,50	0,50	0,50	0,15	0,06	0,35	0,15
0,70	0,70	0,70	0,18	0,07	0,40	0,18
1,00	1,00	1,00	0,25	0,08	0,45	0,25
2,00	3,00	4,00				
3,00	5,00	7,00				

### Raccolta dei dati di combustibile.

Individuazione dei punti da rilevare.

All'interno del territorio delle province costiere della Toscana, utilizzando la carta d'uso del suolo del 2019, sono state evidenziate le superfici suscettibili da incendi boschivi, ovvero dove si possa *presentare un fuoco, con suscettività ad espandersi, che interessa il bosco, le aree assimilate e gli impianti di arboricoltura da legno di cui all'articolo 66, oppure i terreni incolti, i coltivati, ed i pascoli situati entro 50 metri da tali aree* (Art. 69 L.R.Toscana 39/2000).

Una volta isolate queste zone vi è poi stato sovrapposto il reticolo della viabilità proveniente da OpenStreetMap per evidenziare le aree più facilmente raggiungibili. Infine è stata eseguita la differenza fra i due layer per poi posizionare un punto ogni 100 m e a 20 m circa dal bordo della carreggiata in modo da evitare il rilievo nelle aree suscettibili a "effetto margine" o, comunque, oggetto di manutenzione viaria ordinaria.

Applicando tale metodologia sono stati identificati circa 16.000 punti (Figura 18). Durante il rilievo i punti non raggiungibili per presenza di ostacoli fisici o divieti di accesso in proprietà private sono stati sostituiti, quando possibile, con altrettanti punti in zone limitrofe.

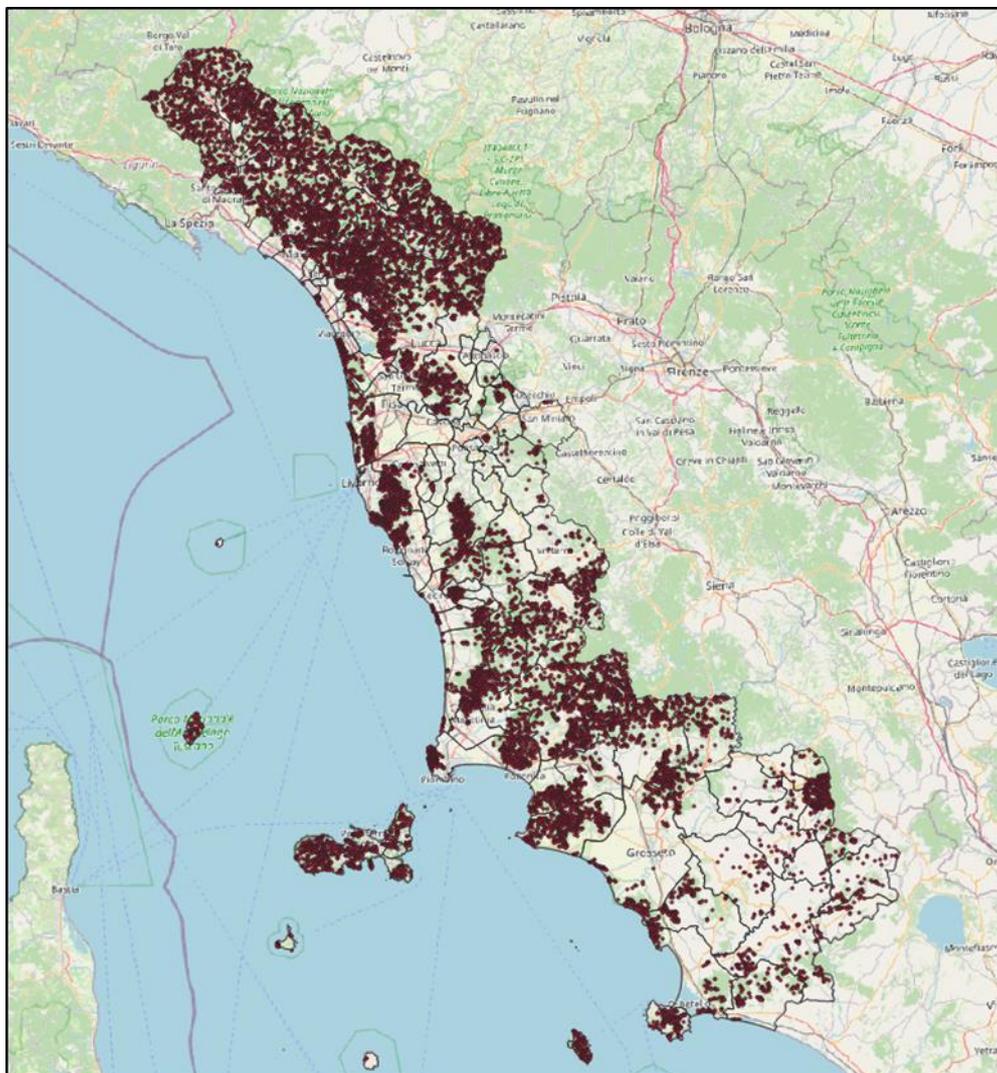


Figura 18: Individuazione di circa 16.000 punti da rilevare all'interno del territorio delle province costiere della Toscana.

#### Rilievo dei dati.

I rilievi sono stati effettuati principalmente dai tecnici e gli operatori forestali delle Unioni di Comuni presenti nelle province di progetto. Per le zone non coperte da queste è stato affidato il rilievo ad una società esterna oltre che essere svolto dal personale del DAGRI stesso e degli studenti coinvolti nel progetto per l'elaborazione della tesi di laurea magistrale. Tutti i rilevatori sono stati formati specificatamente sia da un punto di vista teorico sia in campo su come portare avanti il rilievo. Durante tutta la campagna di rilievo è stata fornita assistenza costante oltre che controllo dei dati effettivamente rilevati. In alcuni casi si sono verificati dei problemi di sincronizzazione dei dati che ha richiesto il trasferimento manuale dei dati dal dispositivo di rilievo alla banca dati.

## Studi preliminari alla mappatura dei combustibili e del rischio.

Indagine sulle relazioni tra quantità di combustibile forestale, tipologie vegetazionali e altezza dei popolamenti nelle aree costiere della Toscana settentrionale.

Lo scopo dell'indagine portata avanti su questo filone è stato investigare la relazione fra quantitativi di combustibili rilevati a terra, il corrispondente tipo vegetazionale e l'altezza dei popolamenti. I dati relativi alla differente tipologia vegetazionale sono stati ottenuti dalla attuale carta della vegetazione forestale della regione Toscana, la quale rappresenta le principali tipologie di bosco della regione, classificate per specie arboree dominanti. I dati relativi all'altezza dei popolamenti sono stati ottenuti dall'uso di un *crown height model* (*CHM*), in particolare quello prodotto dalla NASA nell'ambito del progetto GEDI. Le analisi sono state elaborate utilizzando il linguaggio di programmazione statistico R-cran. I risultati hanno messo in evidenza un quadro di forte disomogeneità nella distribuzione delle diverse categorie di combustibile, evidenziando una tendenza all'aumento dei loro valori in funzione dell'altezza e quindi dell'età dei popolamenti. L'elaborazione dei risultati è stata condotta tramite l'algoritmo *CART* (*classification and regression tree*) ed ha permesso di distinguere classi di altezza per tipo forestale basate su valori soglia dei tipi di combustibili caratterizzanti la specifica struttura dei popolamenti. L'area di studio del progetto, corrispondente al territorio delle 5 province interessate nel progetto MED-Star (nell'ordine Massa-Carrara, Lucca, Pisa, Livorno e Grosseto), è fortemente eterogenea e caratterizzata da differenti condizioni climatiche (da aree con clima mediterraneo a aree con clima temperato-umido) e quindi con differente composizione vegetazionale dei boschi. I dati di combustibile sono stati ottenuti attraverso l'utilizzo dell'app "FuelGeoData" (vedi § 2), mentre il dato di altezza è stato ottenuto attraverso l'utilizzo di un *CHM*, in particolare la scelta è caduta sull'utilizzo di una mappa nota come "*global forest canopy height*" realizzata da Potapov *et al.* (2020) che integra dati Lidar realizzati all'interno del progetto NASA GEDI con una serie temporale Landsat. Il *database* delle diverse tipologie vegetazionali utilizzato è stato rilasciato dalla regione Toscana nel 2004, ma tenendo in considerazione il numero di punti per ogni tipologia vegetazionale sono state oggetto di analisi soltanto le seguenti: Lecce, Cerreti, Castagneti, Faggete, Boschi di sclerofille, Boschi a dominanza di latifoglie termofile, boschi a dominanza di latifoglie mesofile e sciafile, pinete pure o miste di specie indigene. L'analisi dei dati è stata svolta utilizzando l'algoritmo di *machine learning CART* con un approccio di regressione. L'analisi ha evidenziato una forte variabilità riguardo al diverso quantitativo di combustibile, essa è potenzialmente legata a una serie di aspetti problematici all'interno dei dati di partenza (vedi il GEDI e bassa accuratezza del *dataset* della tipologia vegetazionale).

Caratterizzazione quantitativa dei combustibili forestali con tecniche di analisi geostatistica applicate alle aree costiere toscane.

Un'altra importante indagine preliminare è stata quella volta alla produzione di carte di combustibile. Come si è detto nel primo capitolo, i dati rilevati in campagna sono stati integrati e elaborati con dati rilevati con tecniche di telerilevamento, in modo da estendere i valori rilevati anche alle zone deficitarie di dati. Lo strumento scelto per effettuare questa operazione è stato il *RF*, il più largamente impiegato anche in letteratura (Piyush *et al.* 2020). Nel capitolo relativo alle mappe del combustibile si tratterà in maniera puntuale il metodo impiegato per la produzione.

Analisi comparativa di diversi approcci per la produzione di carte della pericolosità per gli incendi boschivi.

Dall'analisi della letteratura presente per la produzione di carte del rischio di incendio si evidenzia come i fattori più analizzati siano: pendenza, esposizione, altitudine, copertura del suolo e tipologie forestali, distanza da strade e/o da insediamenti abitativi. A questi fattori se ne aggiungono altri nel caso di rischio dinamico: piovosità, temperature medie giornaliere e mensili, venti dominanti.

L'obiettivo di questo lavoro è la produzione di una carta del rischio statico, che quindi non tiene conto dei fattori termo-pluviometrici.

Essendo già presente in Italia una metodologia approvata a livello ministeriale e applicata all'interno delle aree protette, si è quindi scelto questa come punto di partenza.

## Mappe prodotte e metodologie applicate.

Mappa del combustibile.

Per la costruzione delle mappe di combustibile sono state prese in considerazione le seguenti variabili: combustibile *timelag* 1h, 10h, 100h, piante erbacee monocotiledoni vive, piante erbacee dicotiledoni vive, piante erbacee morte e infine arbusti.

Per ognuna di queste variabili è stato creato un modello *RF* classificatore, utilizzando come variabili covariate dati ottenuti da strumenti di telerilevamento attraverso l'utilizzo di Sentinel-2. I valori di riflettanza sono stati ottenuti da una *composite* annuale di immagini attraverso l'utilizzo di Google Earth Engine impiegando la mediana dei valori dei *pixels*. In aggiunta ai valori di riflettanza delle diverse variabili è stato impiegato il *Digital Elevation Model* "TinItaly", disponibile per tutto il territorio nazionale con una risoluzione spaziale di 10 m, prodotto dall'Istituto Nazionale di Geologia e Vulcanologia di Pisa. A partire da questo dato sono stati ottenuti informazioni riguardo concavità, pendenza ed esposizione anch'esse utilizzate nel modello. I valori riguardanti l'altezza del soprassuolo sono stati ottenuti a partire dalla mappa

delle “altezze della copertura forestale globale” realizzata da Potapov *et al.* (2021), derivata dall'unione di una serie temporale Landsat e dati ottenuti dall'impiego del satellite NASA - GEDI.

In primo luogo è stata svolta, per ognuna delle variabili oggetto dello studio, un'analisi delle componenti principali sul *database* di partenza per identificare quelle variabili più rappresentative.

Le *performance* del modello di classificazione sono state valutate in termini di accuratezza. Nella tabella di seguito sono riportati i valori di accuratezza ottenuti per le diverse variabili oggetto di studio.

Tabella 3: Valori di accuratezza ottenuti a partire dai valori raccolti con l'app FuelGeoData

1h (kg m <sup>-2</sup> )	10h (kg m <sup>-2</sup> )	100h (kg m <sup>-2</sup> )	monocotiledoni (kg m <sup>-2</sup> )	dicotiledoni (kg m <sup>-2</sup> )	erbacee (kg m <sup>-2</sup> )	arbusti (kg m <sup>-2</sup> )
0,18	0,18	0,28	0,26	0,49	0,56	0,18

Al fine di cercare di aumentare l'accuratezza del modello, si è intrapreso un primo tentativo andando a stratificare il rilievo effettuato per usi del suolo. I valori di accuratezza risultanti sono riportati in Tabella 4.

Tabella 4: Valori di accuratezza ottenuti dalla stratificazione dei punti rilevati in classi di uso del suolo

Classe uso suolo	1h (kg m <sup>-2</sup> )	10h (kg m <sup>-2</sup> )	100h (kg m <sup>-2</sup> )	mono cotiledoni (kg m <sup>-2</sup> )	dico tiledoni (kg m <sup>-2</sup> )	erbacee (kg m <sup>-2</sup> )	arbusti (kg m <sup>-2</sup> )
aree aperte	0,34	0,35	0,45	0,29	0,56	0,51	0,03
bosco latifoglie	0,17	0,16	0,24	0,25	0,56	0,58	0,17
zone di pertinenza	0,17	0,18	0,45	0,23	0,52	0,49	0,18
boschi misti	0,15	0,17	0,25	0,34	0,43	0,56	0,14
boschi conifere	0,19	0,16	0,30	0,28	0,43	0,56	0,17
media	0,20	0,20	0,34	0,28	0,50	0,54	0,14

Non avendo raggiunto valori di accuratezza migliori e/o confrontabili con quelli presenti in letteratura, si è scelto di intraprendere una seconda elaborazione volta al raggruppamento dei valori rilevati per ogni tipologia di combustibile in tre categorie e, successivamente, stratificare le stesse per uso del suolo. Di seguito in Tabella 5 e Tabella 6 si riportano i valori di accuratezza.

Tabella 5: Valori di accuratezza ottenuti raggruppando ogni variabile in 3 diverse classi

1h (kg m <sup>-2</sup> )	10h (kg m <sup>-2</sup> )	100h (kg m <sup>-2</sup> )	monocotiledoni (kg m <sup>-2</sup> )	dicotiledoni (kg m <sup>-2</sup> )	erbacee (kg m <sup>-2</sup> )	arbusti (kg m <sup>-2</sup> )
0,53	0,60	0,56	0,73	0,80	0,96	0,80

Tabella 6: Valori di accuratezza ottenuti raggruppando ogni variabile in 3 diverse classi e stratificando per uso del suolo.

Classe uso suolo	1h (kg m <sup>-2</sup> )	10h (kg m <sup>-2</sup> )	100h (kg m <sup>-2</sup> )	mono cotiledoni (kg m <sup>-2</sup> )	dico tiledoni (kg m <sup>-2</sup> )	erbacee (kg m <sup>-2</sup> )	arbusti (kg m <sup>-2</sup> )
aree aperte	0,63	0,65	0,62	0,66	0,83	0,94	0,80
bosco latifoglie	0,54	0,58	0,54	0,74	0,80	0,96	0,81
zone di pertinenza	0,53	0,67	0,07	0,68	0,78	0,91	0,79
boschi misti	0,50	0,62	0,54	0,82	0,79	0,97	0,79
boschi conifere	0,49	0,59	0,56	0,76	0,77	0,96	0,76
media	0,54	0,62	0,47	0,73	0,79	0,95	0,79

Il risultato migliore è stato ottenuto raggruppando ogni variabile di combustibile in 3 diverse classi. Si è proceduto quindi all'impiego di questa carta per le elaborazioni successive.

Mappa del rischio secondo il Manuale per l'applicazione dello "schema di piano A.I.B. nei Parchi Nazionali – 2018".

La prima carta del rischio prodotta è quella ottenuta con l'impiego della metodologia riportata da Bertani *et al.* (2018), opportunamente modificata per estenderla anche al di fuori dei Parchi Nazionali. L'unica modifica apportata a tale processo riguarda l'uso del suolo, avendo utilizzato la classificazione proposta nel manuale ministeriale precedente ([https://www.mite.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/aib/Manuale\\_tecnico\\_per\\_la\\_pianificazione\\_anti\\_incendi.pdf](https://www.mite.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/aib/Manuale_tecnico_per_la_pianificazione_anti_incendi.pdf)).

Il rischio di incendio boschivo è inteso come la somma di due componenti: la pericolosità, che esprime la probabilità che si verifichi un incendio assieme alla difficoltà di estinzione dello stesso, e la gravità, che esprime le conseguenze negative che subiscono gli ecosistemi naturali e le infrastrutture in seguito ad un incendio.

Quindi:

Carta del rischio = carta della pericolosità + carta della gravità

La carta della pericolosità viene realizzata tenendo conto dell'insorgenza, della propagazione e della difficoltà di estinzione degli incendi dell'unità elementare (*pixel* di dimensioni di riferimento). Inoltre, nell'elaborazione della carta sono inserite le informazioni sia degli eventi di fuoco pregressi (quantità e frequenza degli incendi) sia dei fattori morfologici e climatici dell'area.

I parametri utilizzati per l'elaborazione della carta della pericolosità sono stati associati agli indici di pericolosità come riportato nel manuale di riferimento.

Quindi:

Carta della pericolosità = fattori predisponenti x incendi pregressi

Dove:

fattori predisponenti =  $0,40 \times C + 0,30 \times UdS + 0,15 \times E + 0,15 \times P$

C = Fitoclima

UdS = Uso del suolo con approfondimenti su vegetazione silvo-pastorale

E = Esposizione

P = Pendenza

La carta della gravità esprime il danno e/o le variazioni negative apportate dal passaggio di un incendio boschivo. La sovrapposizione e la somma dei vari *layers* informativi utilizzati (vedi formula sottostante), sono riclassificati e trasformati in formato *raster* secondo il "criterio di prevalenza". Il risultato di tale operazione restituisce una carta rappresentante la classificazione della gravità di ogni unità elementare (*pixel* di dimensioni di riferimento). Il valore ottenuto viene associato ad una classe di gravità (bassa, medio-bassa, media, medio-alta o alta).

Quindi:

Carta della gravità = UdS + Carta SIC/ZPS/RNS + Carta HABITAT/SPECIE

Dove:

UdS = Carta della copertura silvo-pastorale

Carta SIC/ZPS/RNS = Carta dei SIC/ZSC e RNS

Carta HABITAT/SPECIE = Carta degli habitat e delle specie prioritarie

La carta del rischio deriva dalla somma ponderata dei valori nel singolo *pixel* delle carte di pericolosità e gravità. Si attribuisce un peso di 10 alla pericolosità e di 1 alla gravità, la carta così ottenuta viene riclassificata, passando dalle 5 classi iniziali, in 3 classi di rischio (basso, medio e alta) seguendo la tabella 6 riportata nel manuale di riferimento.

Tabella 7: Matrice per la definizione della classe di rischio nei 3 livelli descrittivi sulla base dei valori di pericolosità e gravità ottenuti. Verde = livello rischio basso, giallo = livello rischio medio e rosso = livello rischio alto (fonte: [https://www.mite.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/aib/Manuale\\_schema\\_Piano\\_AIB\\_PN\\_ottobre2018.pdf](https://www.mite.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/aib/Manuale_schema_Piano_AIB_PN_ottobre2018.pdf)).

			<u>Pericolosità</u>				
			Bassa	Medio - Bassa	Media	Medio - Alta	Alta
			10	20	30	40	50
Gravità	Bassa	1	11	21	31	41	51
	Medio - Bassa	2	12	22	32	42	52
	Media	3	13	23	33	43	53
	Medio - Alta	4	14	24	34	44	54
	Alta	5	15	25	35	45	55

Mappe del rischio prodotta secondo la metodologia proposta in ambito del progetto.

Al fine di integrare i valori derivati dalla carta dei combustibili alla carta dei rischio, si è provveduto a modificare l'inter di elaborazione della carta ottenuta con l'impiego della metodologia riportata da Bertani *et al.* (2018).

La carta della pericolosità è stata ottenuta con la stessa formula riportata da Bertani *et al.* (2018).

Quindi:

Carta della pericolosità = fattori predisponenti x incendi pregressi

Invece, la carta dei fattori predisponenti (facente parte della carta della pericolosità) è stata modificata eliminando la componente del fitoclima. L'esclusione di questa variabile si è vista necessaria a causa della copertura incompleta delle province interessate nel progetto e la discriminazione, per la Regione Toscana, solamente di due zone fitoclimatiche.

I dati dei combustibili forestali sono stati inseriti come segue:

Fattori predisponenti =  $0,55 \times \text{Comb.} + 0,20 \times \text{E} + 0,25 \times \text{P}$

$\text{Comb.} = (h_1 + h_{10} + \text{Erb.}_{\text{tot}}) \times 0,5 + (h_{100} \times 5) \times 0,15 + (\text{Arbusti} \times 5) \times 0,35$

Erb.<sub>tot</sub> = la sommatoria di tutti i combustibili erbacei (monocotiledoni, dicotiledoni e erbacee morte)

E = Esposizione

P = Pendenza

La carta della gravità è stata in parte rivista rispetto alla formula ministeriale.

Quindi:

Carta della gravità = UdS x 0,25 + (Carta SIC/ZPS/RNS/SitiUnesco + Carta HABITAT/SPECIE) x 0,25 + Interfaccia x 0,5

Dove:

UdS = Carta della copertura silvo-pastorale come da circolare ministeriale, riclassificando le aree extra silvo-pastorali con valori da 5 a 25

Carta SIC/ZPS/RNS/SitiUnesco = Carta dei SIC/ZSC, RNS e dei Siti Unesco

Carta HABITAT/SPECIE = Carta degli habitat e delle specie prioritarie riclassificato secondo il layer di ISPRA del valore ecologico

Interfaccia = distanza da edificato

La carta del rischio viene quindi ottenuta dalla somma della carta della pericolosità (riclassificata in 5 classi) con la carta della gravità (anch'essa riclassificata in 5 valori), diviso due.

Quindi:

Carta del rischio = (Pericolosità + Gravità)/2.

### Mappe finali sviluppate.

In conclusione, con la metodologia proposta in ambito di progetto si è cercato di sopperire ai limiti della carta del rischio derivante dal manuale ministeriale. Infatti, sono scarsi gli strati informativi reperibili con il dettaglio richiesto per aree estese, come quelle provinciali o regionali. In particolare, per quanto riguarda il fitoclima, sono stati riscontrati numerosi NA data nel layer indicato nel manuale. Inoltre, a questo dato veniva attribuito un peso eccessivo, andando così ad appiattire l'influenza delle altre variabili.

L'introduzione della carta del combustibile ha permesso di raggiungere un livello maggiore di accuratezza e precisione rispetto alla metodologia tradizionale che prevedeva l'impiego dell'uso del suolo.

Infine, è importante sottolineare come la metodologia applicata può essere replicata anche nelle altre aree partner del progetto applicando le opportune modifiche.



**Interreg**



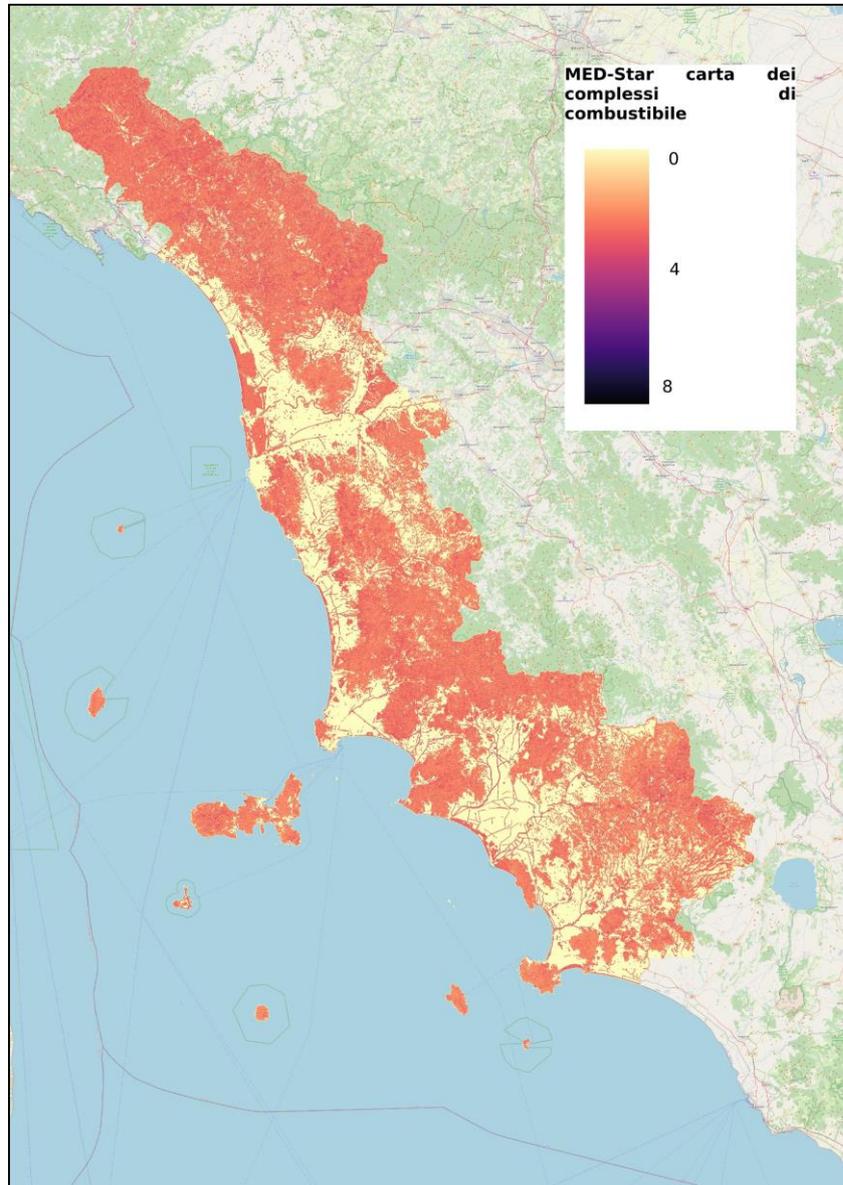
UNION EUROPEENNE  
UNIONE EUROPEA

**MARITTIMO-IT FR-MARITIME**

Fonds européen de développement régional  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



**MED-Star**



*Figura 4: Mappa dei complessi di combustibile.*



**Interreg**



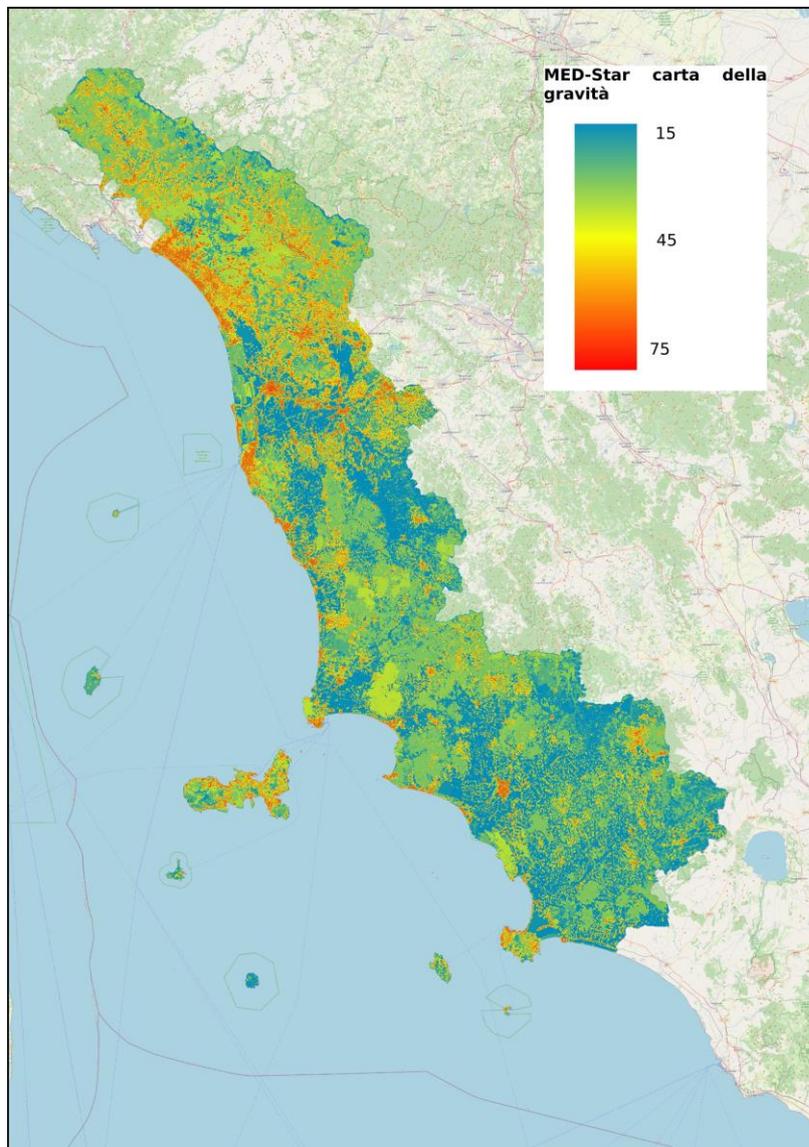
UNION EUROPEENNE  
UNIONE EUROPEA

**MARITTIMO-IT FR-MARITIME**

Fonds européen de développement régional  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



**MED-Star**



*Figura 5: Mappa della gravità.*



**Interreg**



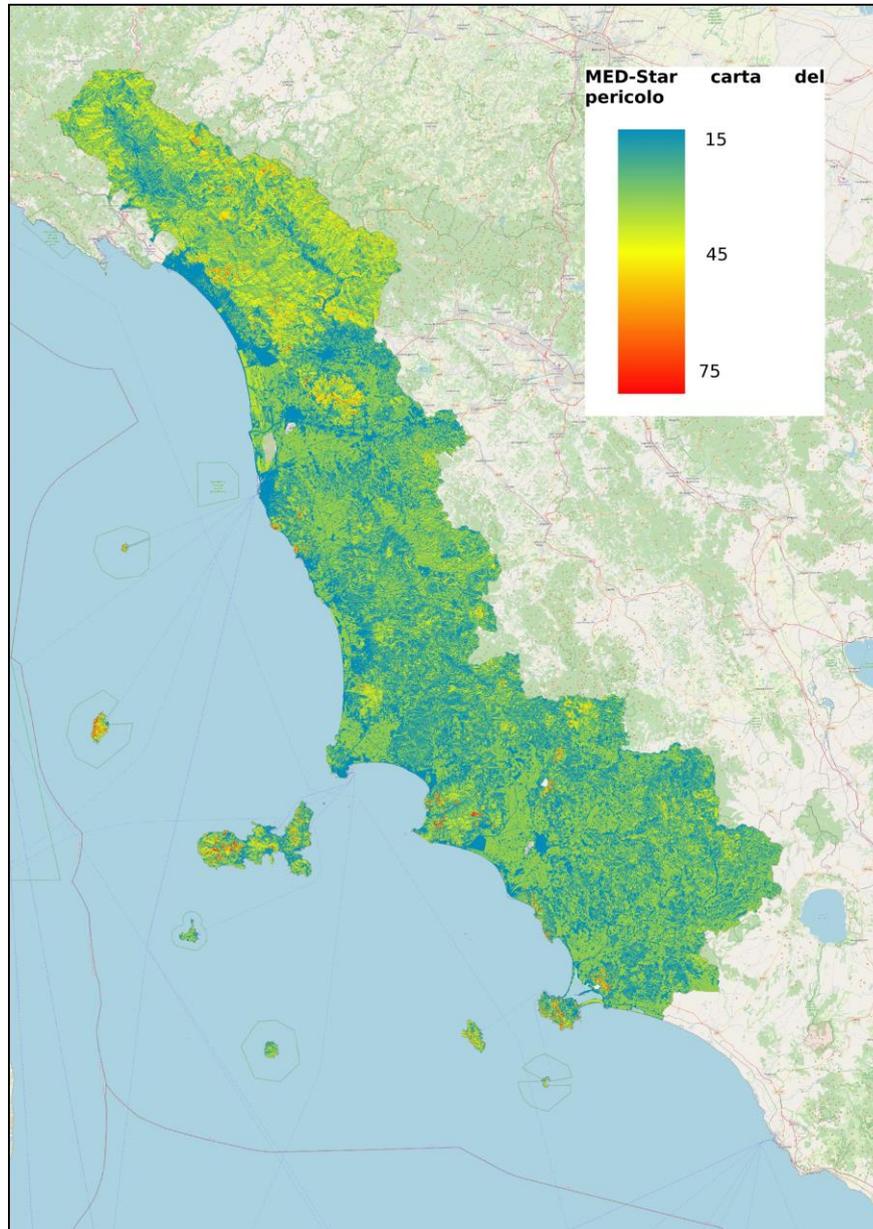
UNION EUROPEENNE  
UNIONE EUROPEA

**MARITTIMO-IT FR-MARITIME**

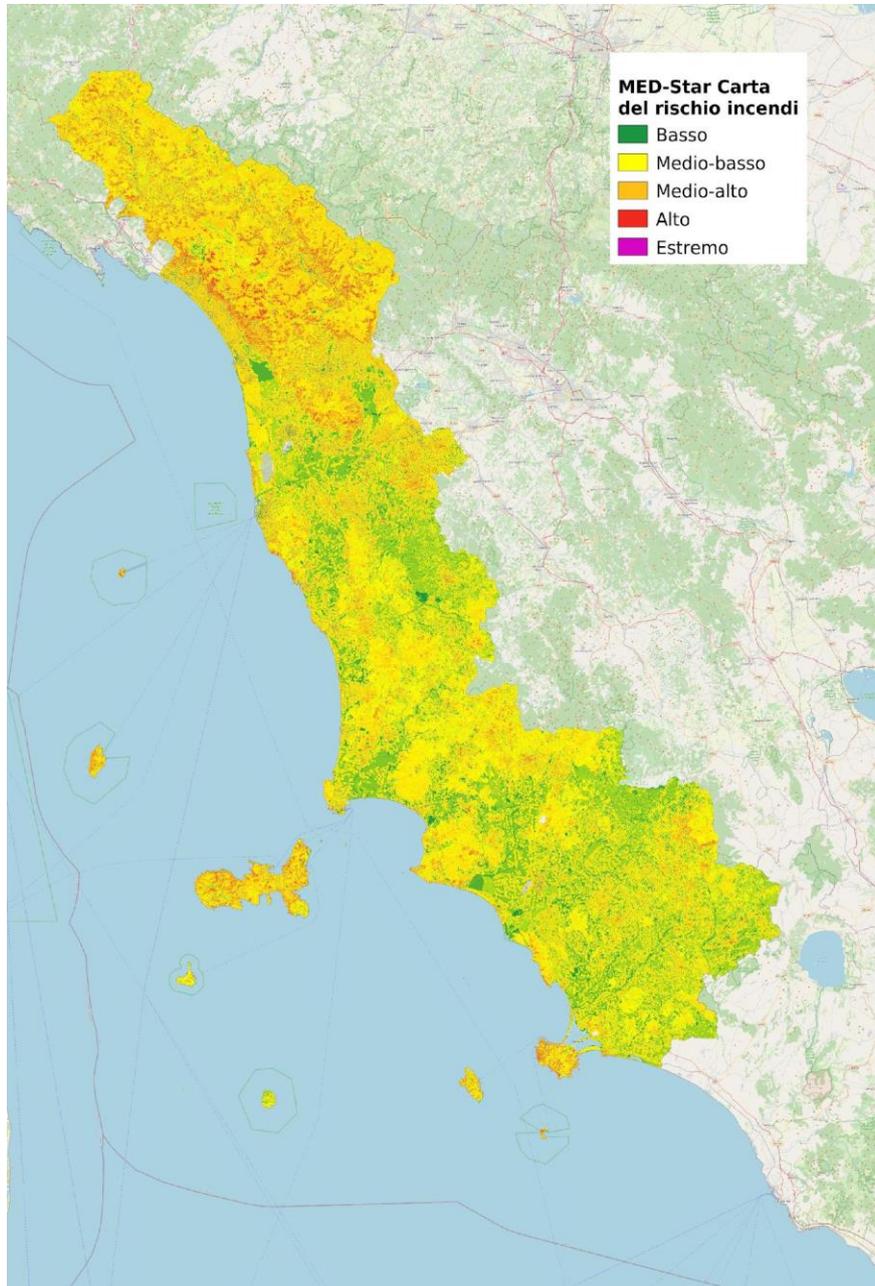
Fonds européen de développement régional  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



**MED-Star**



*Figura 6: Mappa del pericolo.*



*Figura 7: Mappa del rischio.*

## Mappe di suscettività stagionale agli incendi boschivi.

La Fondazione CIMA ha sviluppato una metodologia basata su algoritmi di Machine Learning per la realizzazione di mappe di suscettività da incendio boschivo per la stagione estiva e invernale. Di seguito si descrive la metodologia, i dati di input utilizzati e i risultati forniti dalla metodologia.

### Introduzione alla metodologia adottata.

Il report ha l'obiettivo di presentare due mappe di suscettività (una per stagione) da incendio boschivo relativa all'area studio definita dal progetto MedStar. Verrà seguita la seguente suddivisione stagionale:

Stagione invernale: novembre, dicembre, gennaio, febbraio, marzo, aprile.

Stagione estiva: maggio, giugno, luglio, agosto, settembre, ottobre.

La mappa di suscettività ha lo scopo di evidenziare le zone a maggiore probabilità di passaggio di un incendio boschivo sul territorio in esame.

Il metodo utilizzato per la produzione di tale mappe consiste nell'applicazione di un modello di Machine Learning basato sull'algoritmo Random Forest Classifier. L'analisi viene effettuata a risoluzione spaziale di 100 metri sull'intero territorio di progetto. Ogni pixel viene caratterizzato da un set di variabili di input che possono essere geografiche, antropiche o climatiche. L'insieme di pixel sull'intera area di progetto costituisce il dataset geoclimatico. L'algoritmo utilizza poi un dataset storico degli incendi boschivi per esplorare le caratteristiche delle aree percorse dal fuoco nel passato. Lo scopo del modello utilizzato è di fornire un valore della propensione ad essere percorse dal fuoco (per ogni pixel), definita come suscettività agli incendi.

Per fare questo vengono costruiti il dataset di training e il dataset di test mediante un campionamento casuale in cui il 25% dei punti è stato utilizzato come set di test sempre tenendo in considerazione che entrambi i dataset (test dataset e training dataset) sono bilanciati. Essi sono infatti costituiti dal 50% di punti mai rilevati come bruciati per il dataset storico utilizzato, e dal restante 50% di punti corrispondenti ad un evento di incendio.

Nel seguente capitolo vengono presentati i dati utilizzati per estrarre le variabili di input del modello.

## Dati di input.

Tutti i layer di input seguiranno le caratteristiche del DEM, quali estensione, risoluzione, proiezione.

Tutti i layer di input in formato raster hanno risoluzione 100 m e proiezione EPSG:32632 UTM 32 N. I dati di input in formato vettoriale seguono la medesima proiezione.

Nella seguente tabella vengono presentati dei dati di input selezionati per l'analisi di suscettività da incendi boschivi per l'area MedStar così come i dati in input del modello di machine learning che verrà utilizzato per produrre la mappa finale di suscettività.

I dati in input selezionati per l'analisi sono i seguenti:

Dato di Input	Descrizione
land cover (CORINE 2018)	<i>Carta di copertura suolo CORINE 2018 al terzo livello di dettaglio</i>
dem	<i>Raster relativo alla quota (m)</i>
Aree NATURA 2000	<i>aree NATURA 2000 sull'area di progetto MedStar</i>
strade principali	<i>Shapefile relativo alle strade principali dell'area di progetto MedStar</i>
temperatura media giornaliera mondiale	<i>Dati di temperatura provenienti da copernicus E-OBS dal 1995 al 2020</i>
precipitazione cumulata giornaliera mondiale	<i>Dati di precipitazione provenienti da copernicus E-OBS dal 1995 al 2020</i>
incendi storici	<i>Dataset storico degli incendi proveniente da un merging tra i seguenti datasets:            dataset francese (Provenza e Corsica) dal 1973 al 2020            dataset regione Liguria dal 1996 al 2019            dataset italiano (Toscana e Sardegna) dal 2007 al 2018            Al dataset finale è stata eseguita un'operazione di dissolve</i>

I dati (features) in input del modello di machine learning che vengono estratti dai dati sopra indicati sono i seguenti:

Input Modello ML	Descrizione
dem	<i>quota in metri</i>
slope	<i>pendenza</i>
east	<i>esposizione sul versante est</i>
north	<i>esposizione sul versante nord</i>
urban_d	<i>ogni pixel ha un valore relativo alla distanza dalle aree urbane (q estratte dalla CORINE 2018)</i>
crops_d	<i>ogni pixel ha un valore relativo alla distanza dalle aree coltivate (q estratte dalla CORINE 2018)</i>
roads_d	<i>ogni pixel ha un valore relativo alla distanza dalle strade principali</i>
temp_1	<i>temperatura media per la stagione invernale (Celsius)</i>
temp_2	<i>temperatura media per la stagione estiva (Celsius)</i>
prec_1	<i>precipitazione cumulata giornaliera media invernale (mm)</i>
prec_2	<i>precipitazione cumulata giornaliera media estiva (mm)</i>
park	<i>il valore di ogni pixel può essere 1 o 0 a seconda se appartiene ad un'area appartenente a NATURA 2000</i>
veg	<i>la variabile categorica relativa al tipo di vegetazione di ciascun pixel, estratta dalla CORINE 02018 al terzo livello di dettaglio</i>

perc\_x

*la variabile continua relativa alla percentuale di vegetazione x nell'intorno del pixel in esame. Le percentuali di vegetazione sono riferite alla variabile veg sopra presentata.*

### Dettagli sulla variabile tipi di vegetazione (veg).

é stata utilizzata la CORINE land cover 2018 come carta di copertura suolo per estrarre le variabili categoriche di vegetazione associate ad ogni pixel dello spazio. Le classi prese in considerazioni sono al terzo livello di dettaglio, e sono state escluse principalmente le classi appartenenti alle superfici artificiali (codice 1), le zone umide (codice 4) e i corpi idrici (codice 5), considerate sempre non bruciabili. Di seguito vengono presentate le calssi con i codici corine ad esse associate che sono state considerate nell'analisi.

Codice vegetazione	tipi	Descrizione
0		Area urbanizzate, non bruciabili
211		Seminativi in aree non irrigue
212		Seminativi in aree irrigue
213		Risaie
221		Vigneti
222		Frutteti e frutti minori
223		Oliveti
224		Altre colture permanenti
231		Prati stabili
241		Colture annuali associate a colture permanenti
242		Sistemi colturali e particellari complessi
243		Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti

244	Aree agroforestali
311	Boschi di latifoglie
312	Boschi di conifere
313	Foresta mista
321	Aree a pascolo naturale e praterie
322	Brughiere e cespuglieti
323	Aree a vegetazione sclerofilla
324	Aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione
331	spiagge, dune
332	rocce nude
333	Aree con vegetazione rada
334	Aree percorse da incendi

### Dettaglio sui dati climatici.

In relazione ai dati climatici sono stati estratti i dati relativi alla temperatura e alla precipitazione giornaliera utilizzando dai dataset di copernicus (E-OBS) con copertura mondiale. In particolare, sono state estratte le informazioni relative all'area di progetto ed è stata calcolata una media dei dati giornalieri relativa alla stagionalità definita nell'analisi. I dati copernicus hanno una risoluzione di circa 8 km e sono stati ricampionati con interpolazione (bilineare) a 100 m, con l'accortezza dell'inserimento di un valore medio stagionale nei pixel con assenza di dati: processo che si è reso necessario per evitare l'esclusione di alcuni pixel con tutte le altre informazioni disponibili, specialmente nelle isole. Il risultato sono 2 layer di temperature per la stagione invernale ed estiva che mostrano il valore medio di temperatura per quella determinata stagione e 2 layer di precipitazione cumulata giornaliera mediata sulla stagione estiva e invernale.

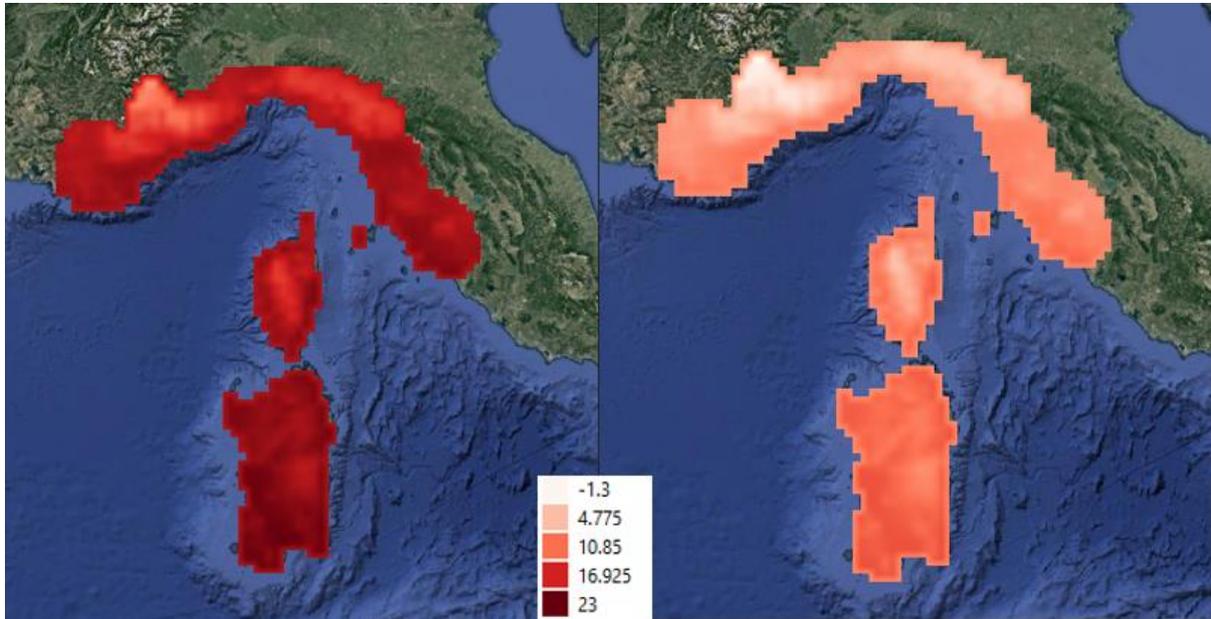


Figura 23: A sinistra le temperature estive, a destra il layer di temperature invernali.

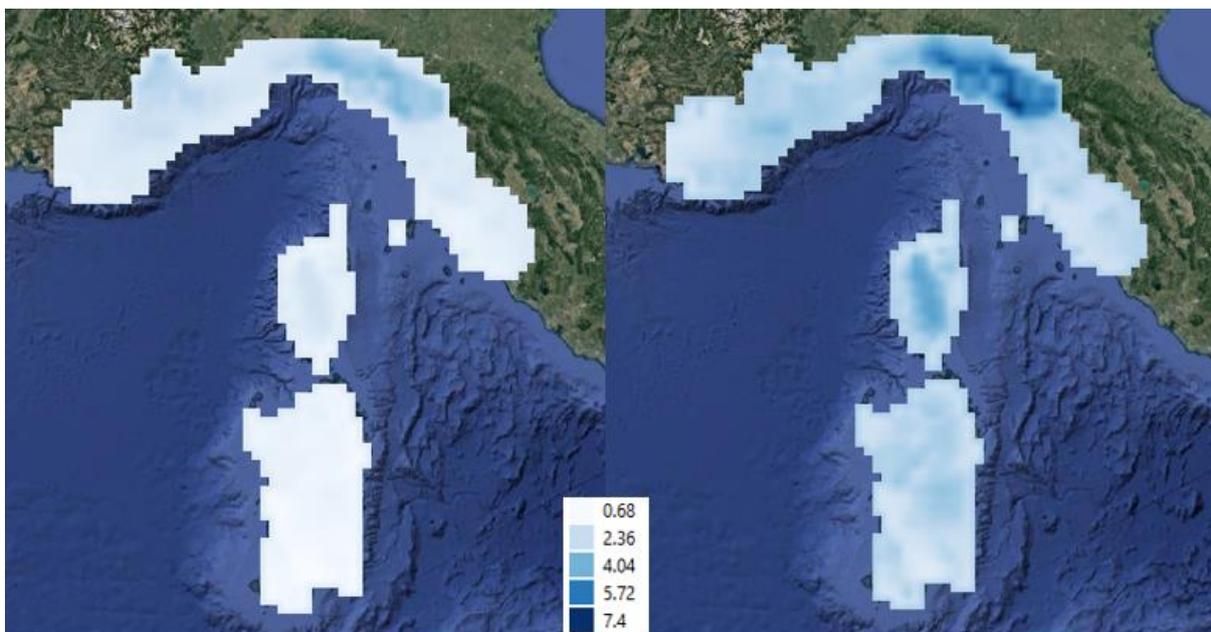


Figura 24: A sinistra le precipitazioni estive, a destra il layer di precipitazioni invernali.

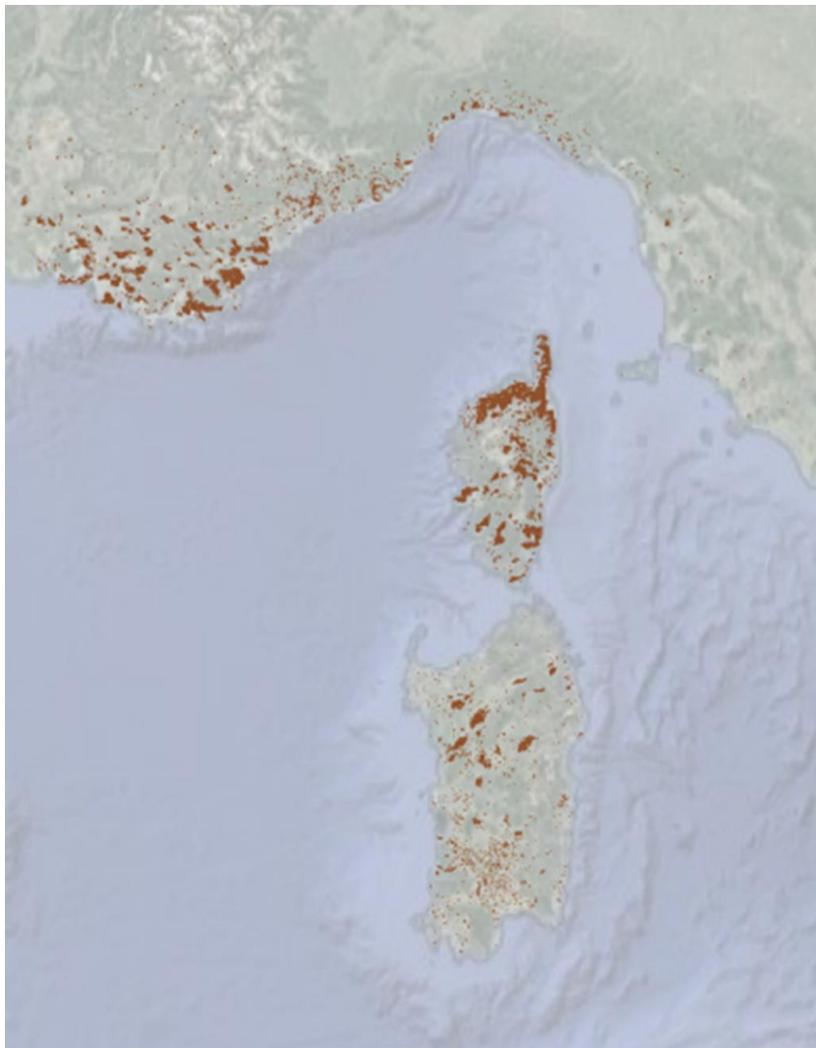
## 2.3 Dettagli sugli incendi

Il dataset degli incendi storici è di prioritaria importanza per il modello di machine learning che si andrà ad utilizzare. Ad ogni pixel dello spazio infatti viene associata l'informazione binaria riguardo al passaggio di un incendio durante la finestra temporale analizzata, che sarà utilizzata come variabile dipendente dal modello stesso. Questa verrà in un primo momento utilizzata all'interno del dataset di training, e poi sarà stimata dall'algoritmo per ogni punto dell'area di progetto.

Sono disponibili 3 dataset storici degli incendi in formato shapefile all'interno dell'area di studio:

- *dataset francese (Provenza e Corsica) dal 1973 al 2020*
- *dataset regione Liguria dal 1996 al 2019*
- *dataset italiano (Toscana e Sardegna) dal 2007 al 2018*

Questi sono stati uniti tramite un'operazione di merging e successivamente dissolti tramite un'operazione di Dissolve.



*Figura 25: Incendi storici dopo l'operazione di merging e dissolve sui 3 dataset descritti.*

In questo contesto viene persa l'informazione relativa alla frequenza degli incendi relativa ad ogni pixel ma tenuto in considerazione tutta la perimetrazione delle aree bruciate disponibili nei differenti dataset. Poligoni sovrapposti vengono infatti uniti in un unico poligono. Questa operazione viene eseguita con l'obiettivo di dare minore importanza agli incendi ricorrenti sulle stesse aree, spesso dovuti a cause antropiche riconducibili al rinnovamento dei pascoli.

### Mappe di suscettività.

In questo capitolo vengono presentate le mappe di suscettività stagionali sull'area di studio MedStar risultanti dal modello di machine learning. ogni mappa viene associata a 3 grafici di importanza delle variabili di input: le importanze generali di ogni variabile, le importanze delle variabili categoriche vegetazionali, le importanze delle variabile di vicinato (percentuale di vegetazione nell'intorno di ogni pixel corrispondente ad una finestra 5x5 pixels). Le

importanze estratte mostrano quanto ogni determinata variabile è risultata significativa nel decidere l'output del modello, sia positivo (il pixel verrà attraversato da un incendio) che negativo (il pixel non verrà attraversato da un incendio). Di seguito si riportano le mappe delle suscettività estiva e invernale, e gli istogrammi delle importanze delle variabili.

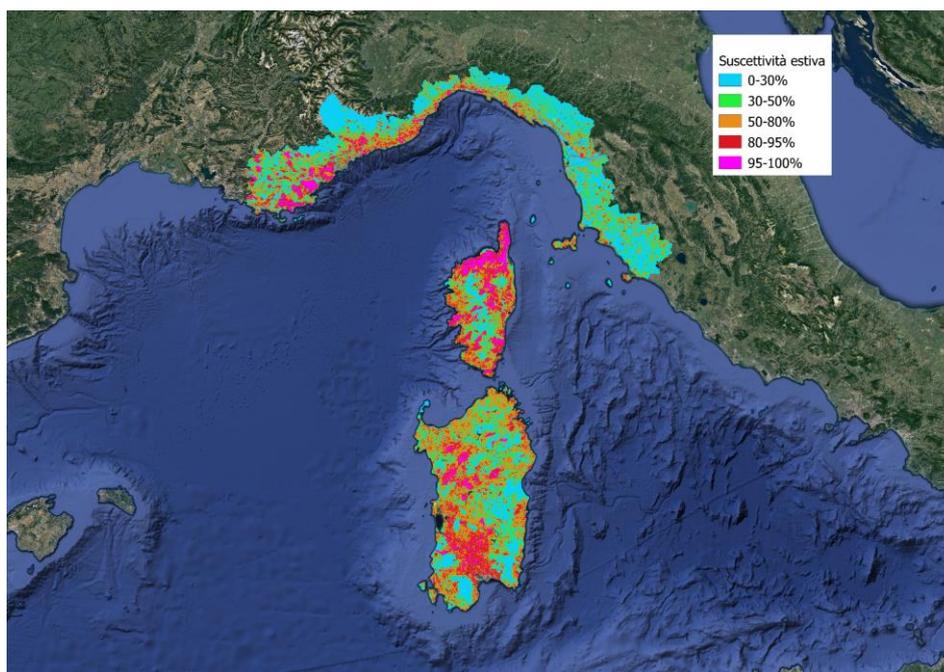


Figura 26: Mappa della suscettività estiva.

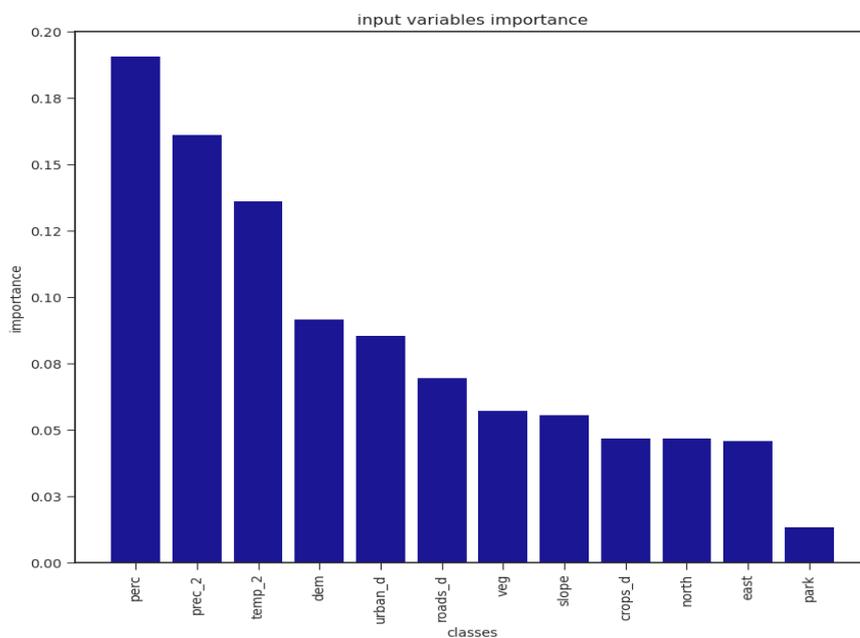


Figura 27: Istogramma delle importanze normalizzate delle variabili di input del modello ML per la stagione estiva: dalle più influenti alle meno, le varie perc\_x sommate, le variabili climatiche, quota, distanze dalle strade e aree urbanizzate, vegetazioni e infine le variabili di esposizione.

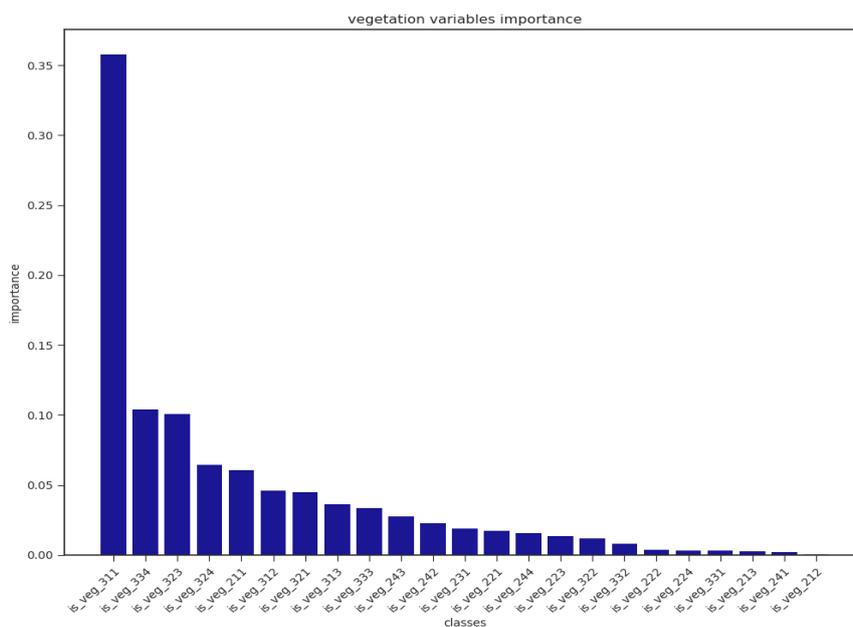


Figura 28: Istogramma delle importanze delle variabili vegetazionali di input del modello ML per la stagione estiva. Tali variabili corrispondono alla vegetazione in ciascun pixel e ogni valore di importanza è normalizzato rispetto all'importanza della variabile veg (figura precedente)

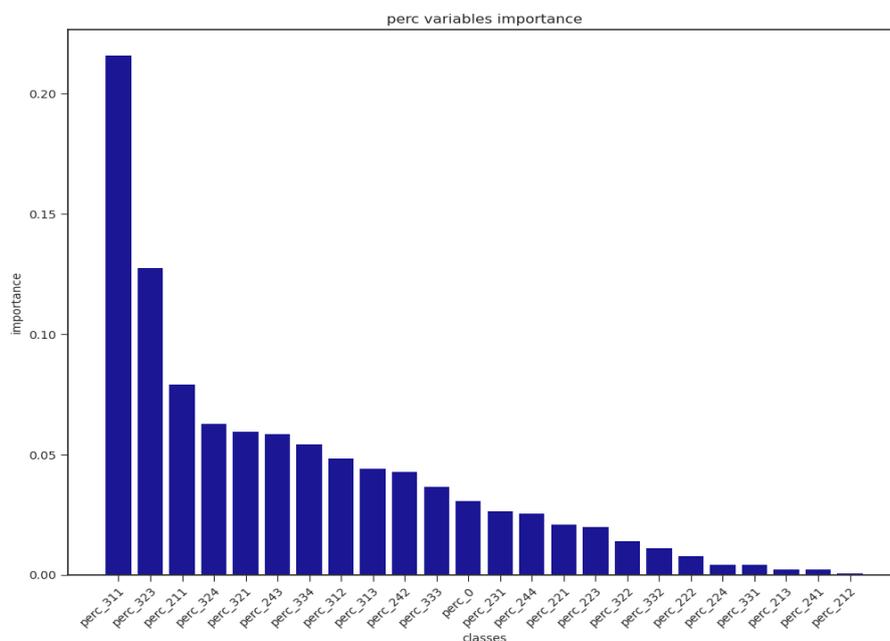


Figura 29: Istogramma delle importanze delle variabili vegetazionali di vicinato in input del modello ML per la stagione estiva. Tali variabili corrispondono alla percentuale di vegetazione in un intorno 5x5 per ciascun pixel e ogni valore di importanza è normalizzato rispetto all'importanza della variabile perc.

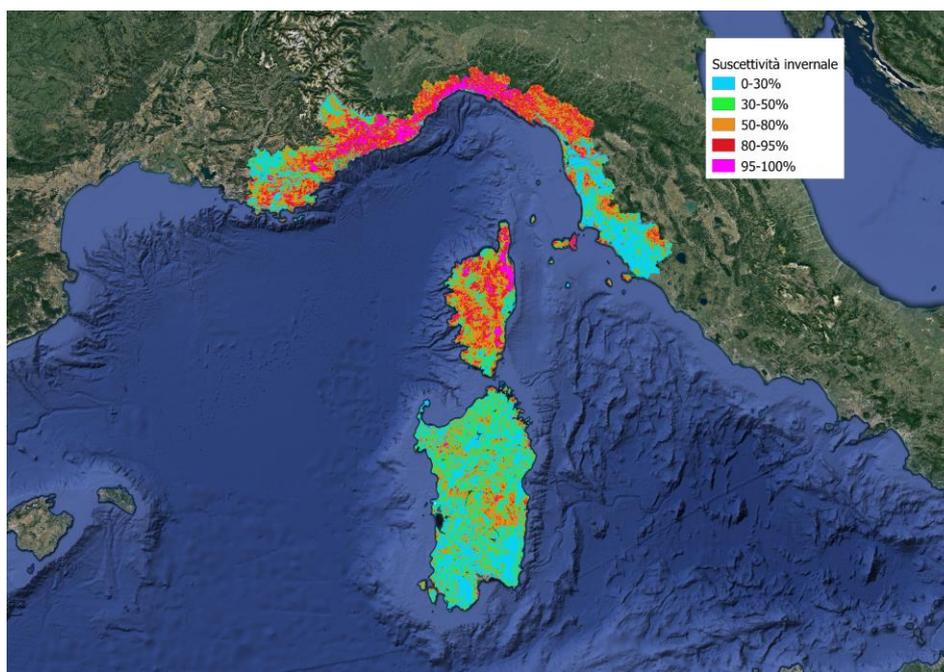


Figura 30: Mappa della suscettività invernale.

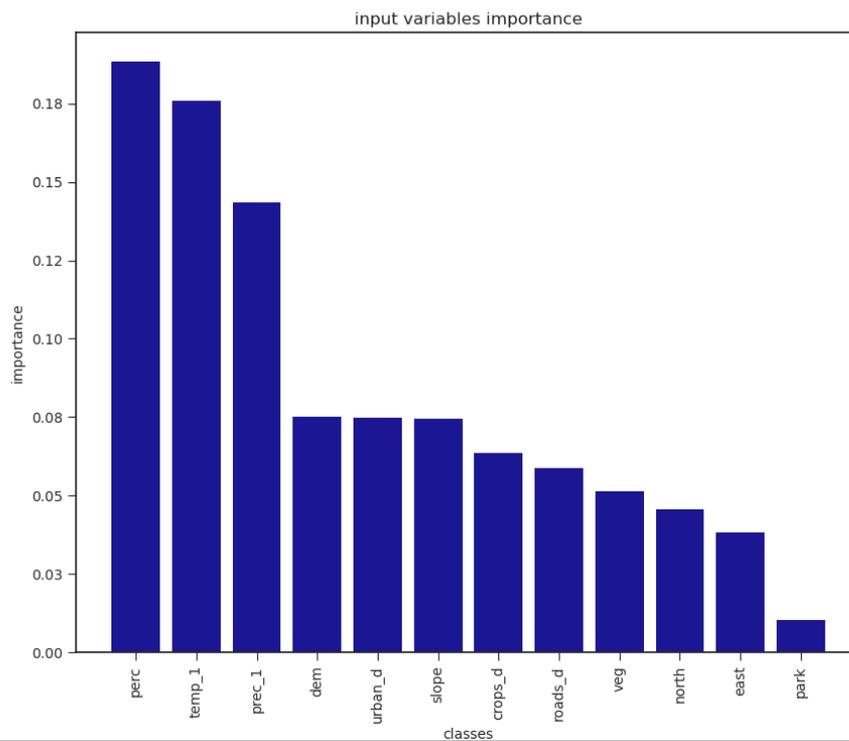


Figura 31: Istogramma delle importanze normalizzate delle variabili di input del modello ML per la stagione invernale: dalle più influenti alle meno, le varie perc\_x sommate, le variabili climatiche, quota e pendenza, distanze dalle strade e aree urbanizzate, vegetazioni e infine le variabili di esposizione.

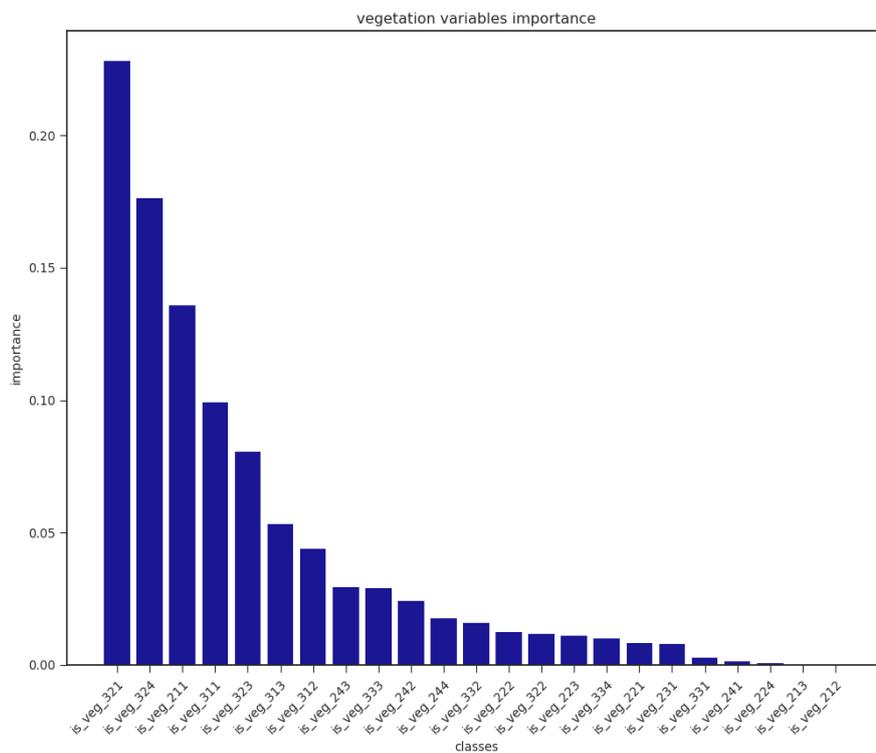


Figura 32: Istogramma delle importanze delle variabili vegetazionali di input del modello ML per la stagione invernale. Tali variabili corrispondono alla vegetazione in ciascun pixel e ogni valore di importanza è normalizzato rispetto all'importanza della variabile veg (figura precedente)

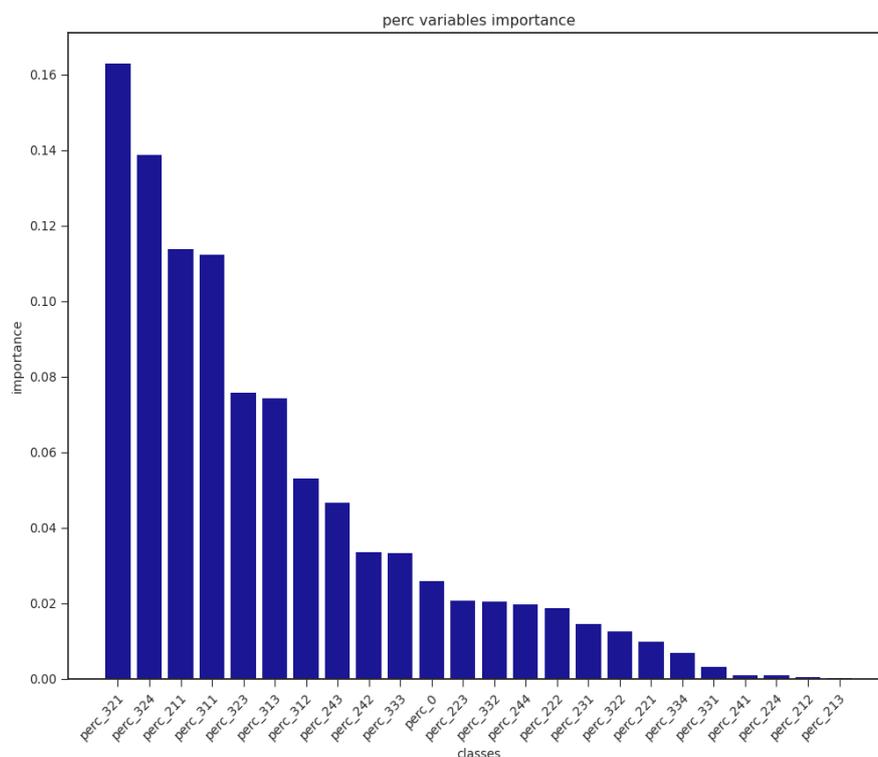


Figura 33: Istogramma delle importanze delle variabili vegetazionali di vicinato in input del modello ML per la stagione invernale. Tali variabili corrispondono alla percentuale di vegetazione in un interno 5x5 per ciascun pixel e ogni valore di importanza è normalizzato rispetto all'importanza della variabile perc.

come si può notare dai grafici precedenti, la variabile di copertura suolo riferita alle classi di vegetazione di vicinato (perc) vengono considerate più importanti rispetto alle singoli tipi di vegetazione associate al singolo pixel (veg) e risulta anche la variabile più importante per il l'algoritmo random forest. Seguono come importanza i layer climatici di precipitazione e temperatura, seguono poi le variabili quota e pendenza, distanza da strade e aree urbane, e variabili di esposizione.

Per quanto riguarda invece le variabili di vegetazione di maggiore importanza, per la stagione estiva risultano le classi latifoglie, sclerofille e seminativi in aree non irrigue (rispettivamente 311 323 211) mentre per la stagione invernale risultano essere aree a pascolo naturale, aree a vegetazione boschiva arbustiva, seminativi in aree non irrigue e latifoglie (rispettivamente 321 324 211 311).

### Indicatori di performance.

In questa sezione vengono analizzati diversi indicatori di performance relativa ai risultati del modello nel produrre le mappe di suscettività. In particolare è stato selezionato un dataset di test contenente circa il 25% dei punti totali utilizzati per definire i dataset di training e di

testing. Questi punti non sono mai stati utilizzati dall'algoritmo in fase di allenamento, i risultati dell'algoritmo in questi punti vengono confrontati con il true label per estrarre risultati di performance quali ROC AUC (area under the curve), MSE (mean squared error) e accuratezza generale.

stagione estiva:

AUC: 0.98  
 MSE: 0.062  
 accuracy: 0.93

stagione invernale:

AUC: 0.98  
 MSE: 0.051  
 accuracy: 0.94

l'AUC deriva dal calcolo dell'area sotto alla ROC curve, che viene presentata per entrambe le stagioni nella seguente immagine:

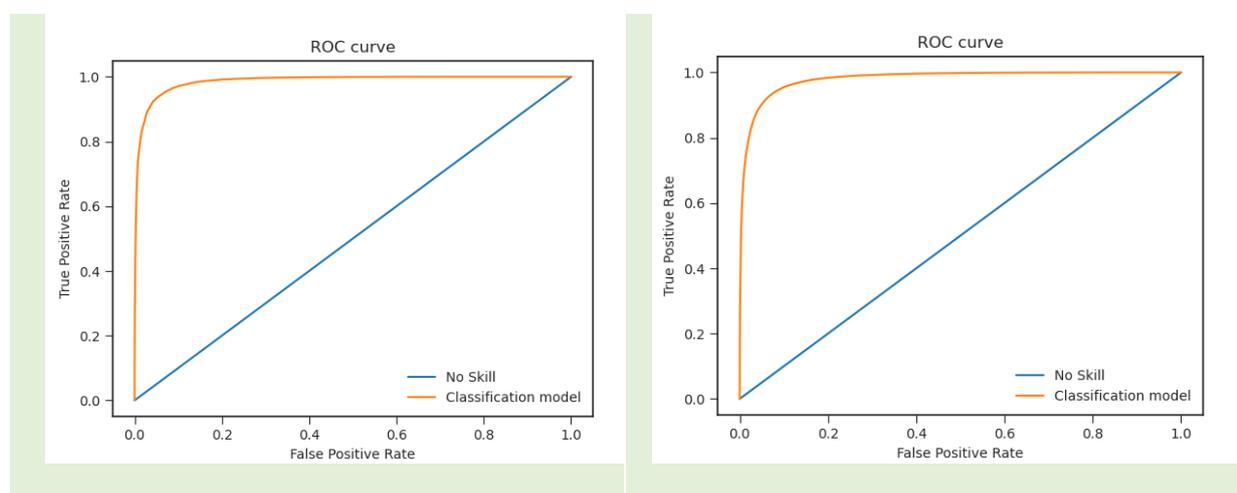


Figura 34: Curva relativa all'analisi invernale (sinistra) ed estiva (destra).

MSE, mean squared error è invece definito come:

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

**MSE** = mean squared error

**$n$**  = number of data points

**$Y_i$**  = observed values

**$\hat{Y}_i$**  = predicted values

dove nel caso specifico,  $n$  si riferisce al numero di pixels usati nel dataset di test,  $Y_i$  rappresenta il valore di output osservato discreto (0 se il punto non è andato a fuoco, 1 se è andato a fuoco) e  $\hat{Y}_i$  rappresenta il valore di suscettività (continuo) stimato dall' algoritmo.

Infine viene calcolato il valore di accuratezza generale tra l'output osservato e l'output calcolato dall'algoritmo (questa volta entrambi discreti) come rapporto tra il numero di pixel di test classificati correttamente e il numero di pixel di test.

l'immagine seguente mostra la matrice di confusione per le analisi stagionali che portano a tale risultato di accuratezza.

*Figura SEQ Figura \\* ARABIC35: Matrici di confusione per le analisi stagionali.*

a sinistra, la matrice di confusione relativa all'analisi invernale, a destra quella relativa all'analisi estiva

I valori ottenuti mostrano che il modello costruito è molto accurato, i pixel riferiti al dataset di test, sono classificati con pochissimo margine di errore dal modello di machine learning: il valore elevato dell'indicatore AUC sottolinea come i *True positive* (pixel classificati come bruciati che sono effettivamente bruciati) siano alti e, allo stesso tempo, i *False positive* (pixel classificati come bruciati ma non lo erano da osservazione) siano bassi. Il valore basso di MSE, invece, mostra come la differenza tra il valore di output osservato e il valore di output probabilistico fornito sia accettabile.

### Analisi sulla distribuzione della suscettività.

In questo capitolo vengono presentati 2 tipi di analisi svolte sulle mappe di suscettività stagionali relative al calcolo della distribuzione della suscettività sia nelle aree bruciate che nelle aree con un certo tipo di vegetazione.

In primo luogo è stata calcolata la distribuzione di suscettività all'interno delle aree bruciate utilizzate nel dataset di test. In particolare, i valori di suscettività sono stati raggruppati in diverse classi definite dai percentili già visti per definire la palette delle mappe di suscettività:

- 0 - 30
- 30 - 50
- 50 - 85
- 85 - 95
- 95 - 100

L'istogramma risultante mostra la distribuzione percentuale dei pixel bruciati raggruppati per classe di suscettività per le mappe estive e invernali.

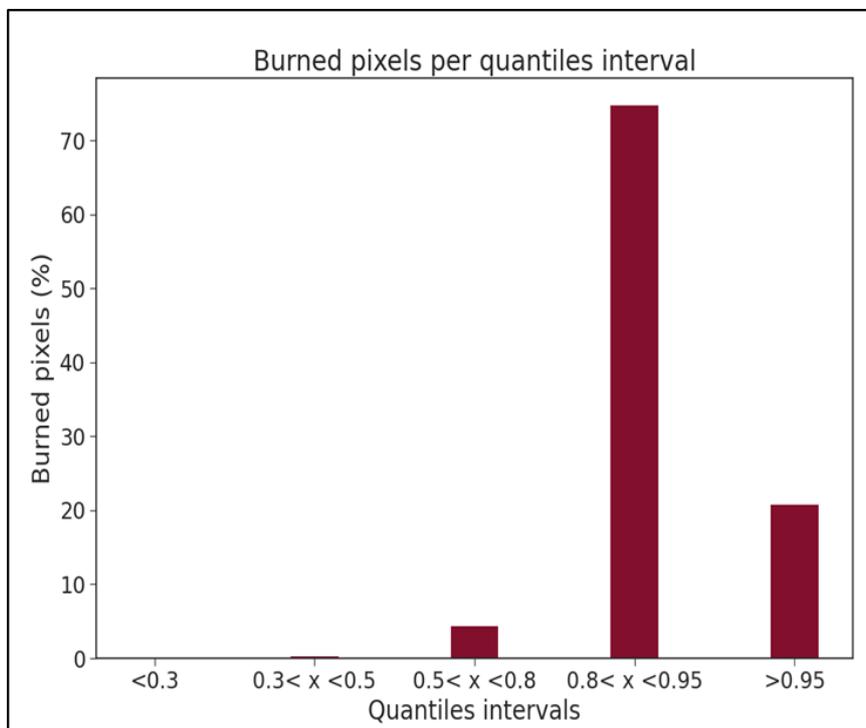


Figura 36: distribuzione percentuale dei pixel bruciati nel dataset di test dell'algoritmo di machine learning raggruppati in varie classi di suscettività per la mappa estiva

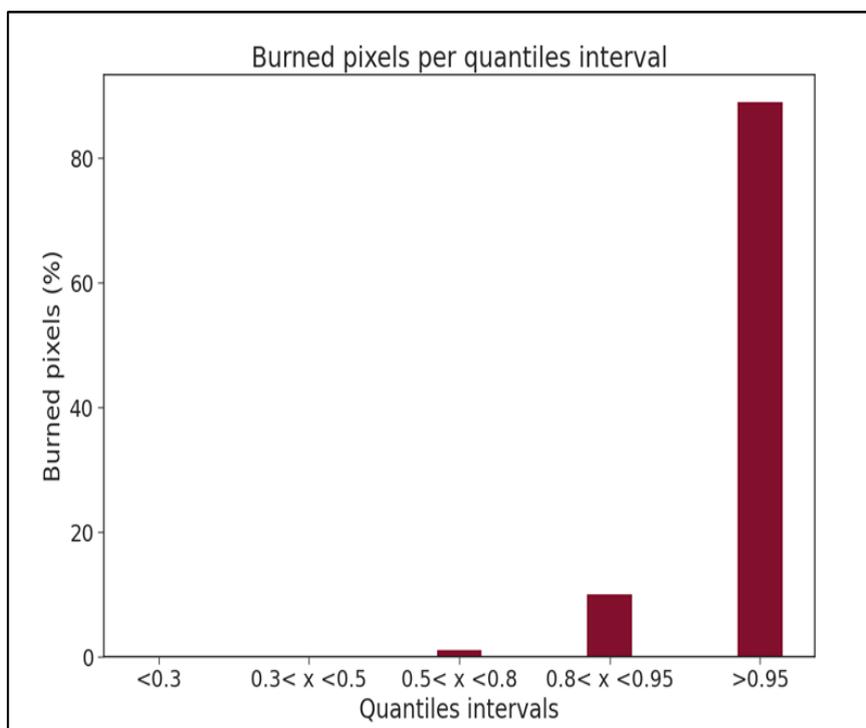


Figura 37: distribuzione percentuale dei pixel bruciati nel dataset di test dell'algoritmo di machine learning raggruppati in varie classi di suscettività per la mappa invernale

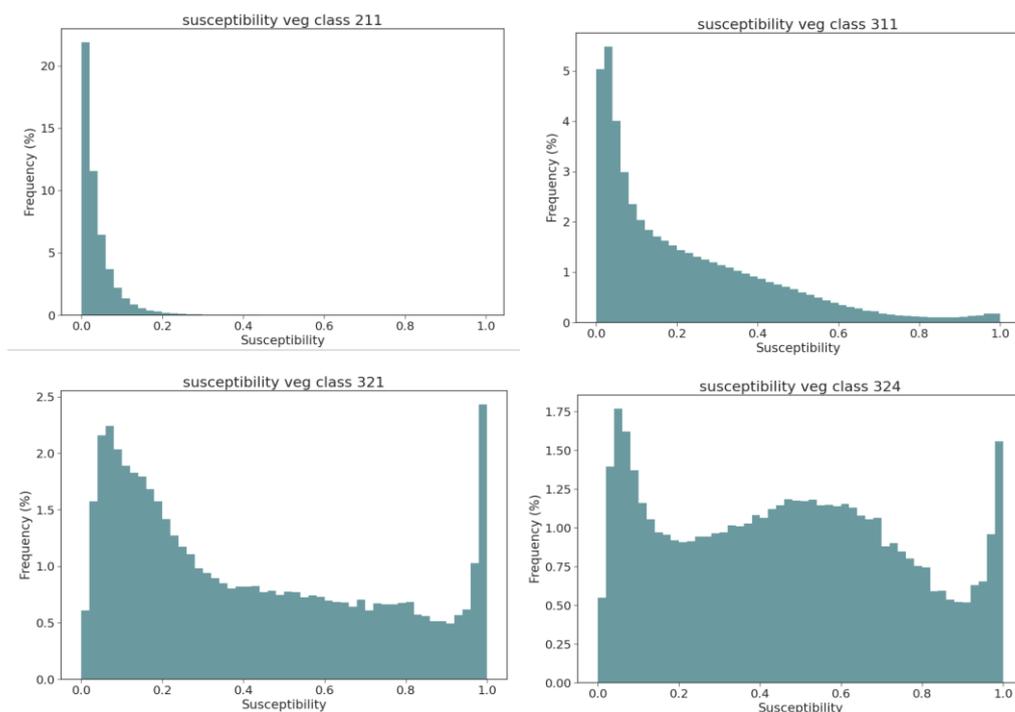
Questa analisi è utile per definire l'accuratezza generale della mappa prodotta, infatti la quasi totalità dei pixel nelle aree bruciate facenti parte del dataset di test del modello (non appartenenti quindi al dataset usato per allenare l'algoritmo) cadono su parti della mappa prodotta aventi valori di suscettività superiori al 80° percentile nel caso estivo e sopra al 95% nel caso invernale.

Una seconda analisi riguarda la distribuzione di suscettività all'interno delle classi di vegetazione considerate più importanti dall'algoritmo di machine learning.

Questi istogrammi sono utili per capire se una classe di vegetazione è importante per l'algoritmo nel classificare un punto come 0 (non soggetto a passaggio del fuoco) o 1 (soggetto al passaggio del fuoco) in quanto l'istogramma delle importanze in sé non discrimina tra le 2 casistiche.

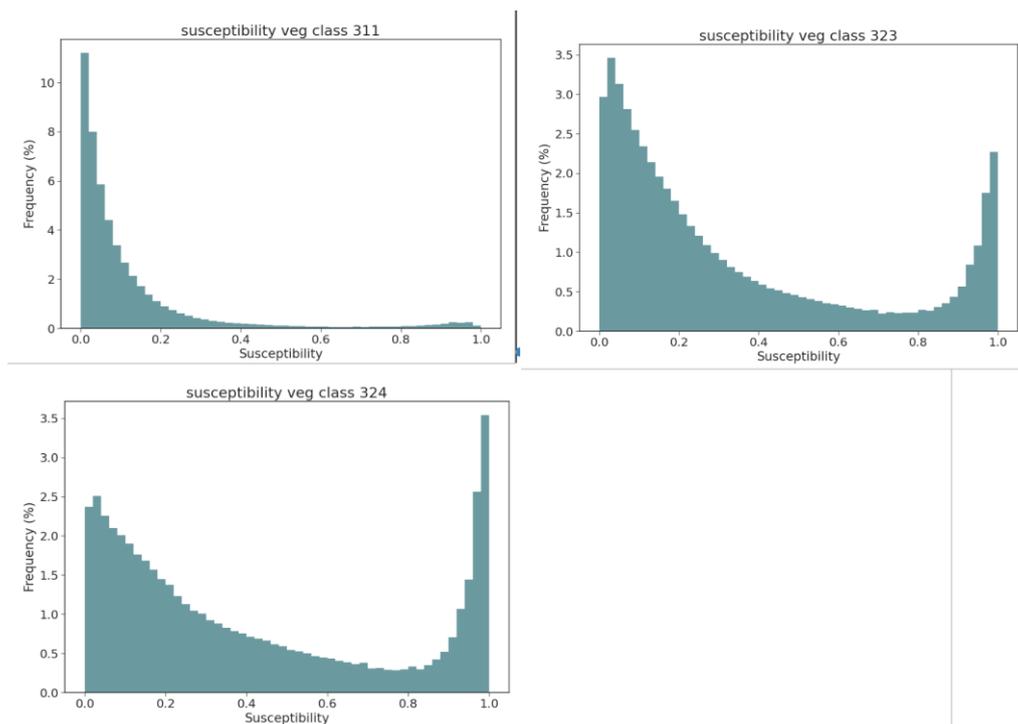
sono state analizzate le seguenti classi di vegetazione:

per la stagione invernale: 311, 211, 321, 324 (latifoglie, seminativi in aree non irrigue, aree a pascolo naturale, aree a vegetazione boschiva arbustiva)



*Figura 38: distribuzione della suscettività all'interno delle 4 classi di vegetazione di maggiore importanza per produrre la mappa invernale. In alto a sinistra i seminativi in aree non irrigue con suscettività molto bassa, in basso a sinistra le aree a pascolo naturale, caratterizzate da media suscettività, in alto a destra le latifoglie, poco soggette al fuoco. Infine in basso a destra aree a vegetazione boschiva arbustiva dove alcune aree risultano poco propense al passaggio del fuoco mentre altre molto propense.*

per la stagione estiva: 311, 323, 324 (latifoglie, sclerofille, area pascolo naturale, aree a vegetazione boschiva arbustiva)



*Figura 39: distribuzione della suscettività all'interno delle 3 classi di vegetazione di maggiore importanza per produrre la mappa estiva. In alto a sinistra le latifoglie, come nella stagione invernale a bassa suscettività, in basso a sinistra le aree a vegetazione boschiva arbustiva che mostrano zone ad alta suscettività ed altre invece meno propense al passaggio del fuoco, infine in alto a destra le aree pascolo naturale, con andamento simile alle zone arbustive ma mediamente a più bassa suscettività.*

## Proposta di revisione delle zone di allerta per la previsione del pericolo di incendio boschivo.

### Introduzione.

La protezione Civile della Regione Sardegna, in collaborazione con ARPA Sardegna, ha ritenuto opportuno revisionare le zone di allerta utilizzate negli ultimi 6 anni, fino alla campagna di lotta attiva 2021. Le modifiche sono state effettuate con l'obiettivo di potenziare l'efficacia del "Codice colore" dei bollettini di pericolosità, a vantaggio di tutto il sistema di protezione civile e della popolazione, soprattutto in relazione alle misure da porre in essere per la prevenzione degli incendi boschivi così da salvaguardare il patrimonio forestale e tutelare l'integrità della vita.

### Metodologia adottata.

Le 26 zone di allerta finora utilizzate dal Centro Funzionale Decentrato nella previsione della pericolosità di innesco e propagazione degli incendi boschivi, sono in vigore ufficialmente dalla campagna antincendi del 2016, dopo un periodo di sperimentazione interna di un anno avviato nell'estate del 2015. Precedentemente, la valutazione della pericolosità veniva effettuata su base esclusivamente amministrativa, avendo come riferimento i territori delle otto province regionali.

Dal 2016 si è potuto operare con maggior dettaglio, in quanto le 26 zone, rispetto alle otto precedenti, si caratterizzano per una maggiore uniformità del territorio in riferimento alle condizioni predisponenti gli incendi (condizioni climatiche, geomorfologiche e caratteristiche vegetazionali) e secondariamente su aspetti tecnico-amministrativi.

Nel corso delle ultime sei campagne antincendio si è potuto verificare quali miglioramenti poter apportare alle zone di allerta.

Come metodo, in linea generale, la ridelimitazione che si propone è stata operata con l'accorpamento di qualche zona di allerta e/o con la ripermetrazione di altre zone mediante spostamento di alcuni Comuni da una zona ad un'altra.

In particolare, l'esperienza diretta del CFD e lo studio dei dati statistici relativi alle ultime sei campagne AIB, ha fatto emergere l'opportunità di eseguire prioritariamente delle **riperimetrazioni** che riguardassero:

- la parte a nord-est della Sardegna (**zone C e D**);
- la zona centrale della Sardegna (**zone M ed N**);
- l'Oristanese (**zone L ed S**);
- il Sulcis Iglesiente (**zone X, U e Z**)

- l'Ogliastra (**Zone T, Q ed O**).

Per quanto attiene l'accorpamento di alcune zone di allerta di ausilio è stata, come detto, anche l'analisi statistica delle assegnazioni nel tempo dei codici colore. Ciò ha permesso di individuare quelle zone limitrofe per le quali complessivamente la valutazione del pericolo è stata identica per valori intorno al 90% delle giornate (es. le **zone H e J** hanno una corrispondenza del **93%**).

Nella presente revisione si è, inoltre, ottenuto di ridurre il numero di Comuni il cui territorio ricade su più zone di allerta conseguendo i seguenti vantaggi:

- semplificare la lettura dei bollettini di previsione del pericolo da parte delle istituzioni a vario titolo impegnate nella lotta attiva, nel controllo del territorio, da parte dei cittadini, ecc.;
- garantire una maggiore efficacia nell'applicazione dei comportamenti di contrasto alle azioni e agli inadempimenti agli obblighi che possono determinare, anche solo potenzialmente, l'insacco di incendio;
- consentire una più corretta applicazione dell'azione preventiva da parte della popolazione locale e anche alla corretta applicazione delle eventuali sanzioni, visto che i limiti delle zone sono correlati al catastale come suggerito dalla esperienza delle istituzioni a vario titolo competenti nelle azioni di prevenzione e contrasto agli incendi boschivi.

Nel successivo paragrafo sono illustrate nel dettaglio le nuove zone proposte e le motivazioni che hanno portato alla proposta della loro ridefinizione.

Alle zone ripериметrate sono state assegnate le vecchie sigle ad eccezione delle zone H e J, ora accorpate, alle quali è stata assegnata la sigla H, portando le zone di allerta da 26 a 25.

### Determinazione delle nuove zone.

Revisione zone C e D.

Per migliorare l'omogeneità meteorologica si propone di apportare delle modifiche alle zone C e D. Negli anni in cui il CFD è attivo si è riscontrato, infatti, che la parte più a nord della zona D è maggiormente esposta ai venti provenienti dai settori settentrionali (in particolare da direzione ovest e nord-ovest) rispetto alla zona a sud.

Tale parte a nord, maggiormente esposta, arriva a coinvolgere i territori dei Comuni di Santa Teresa di Gallura, La Maddalena, Palau e Arzachena. Per questa porzione del territorio

considerata, nei casi in cui per la pericolosità è determinante il fattore vento, la parte settentrionale della zona D in termini di pericolosità è assimilabile alla zona C e maggiore della parte a sud della stessa zona D. Nei casi in cui invece la temperatura è una variabile chiave ai fini della valutazione del pericolo, sono state riscontrate molte giornate in cui il pericolo si sarebbe potuto valutare maggiore nella parte sud rispetto a quella nord della D ed alla C.

Per le ragioni sopra esposte, i Comuni di Santa Teresa di Gallura, La Maddalena, Palau e Arzachena vengono spostati dalla zona D alla zona C.



Figura 40: Limite zone C-D attuale.

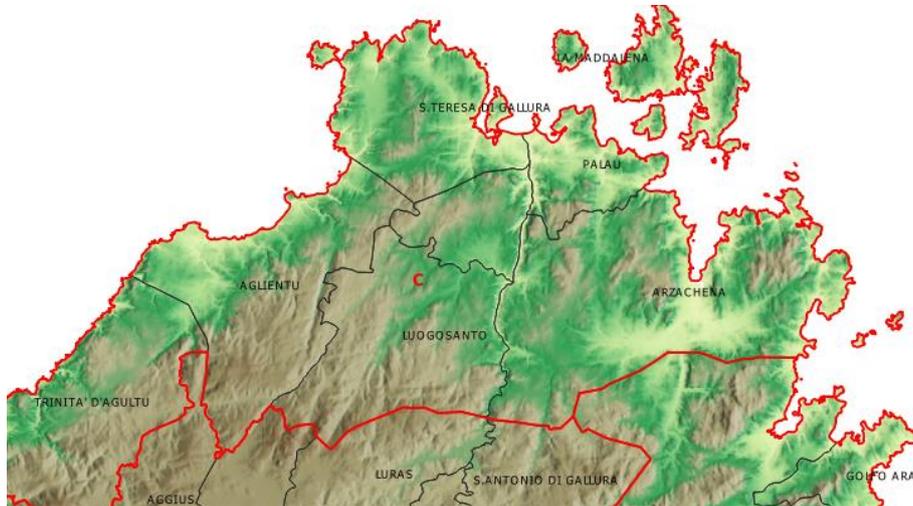


Figura 41: Limite zone C-D ridefinito.

Revisione zone M ed N.

I Comuni di Teti, Austis e Sorgono, che hanno caratteristiche prevalentemente collinari piuttosto che montuose, vengono separati dalla zona N che comprende il Gennargentu e incluse nella zona M, più calda.



Figura 42: Limite zone M-N attuale.



Figura 43: Limite zone M-N ridefinito.

#### Revisione zone H e J.

Le zone H e J hanno caratteristiche molto simili da un punto di vista morfologico e vegetazionale. Le zone di pianura (piana di Ottana nella zona J e piana di Ozieri nella zona H) si caratterizzano per le alte temperature e la bassa umidità relativa, che danno luogo ad un fattore di pericolo maggiore di quello delle relative zone montane, che indirettamente subiscono l'assegnazione di un codice colore generalmente più alto.

L'analisi statistica di assegnazione dei codici colore delle zone H e J, risultata pari al 93% di coincidenza su tutte le giornate relative ai sei anni di previsione, suggerisce anch'essa l'accorpamento delle due zone. Sulla base delle motivazioni sopra esposte si ritiene ragionevole accorpate le zone H e J attuali.

Inoltre, con l'accorpamento, per ben 9 comuni (Illorai, Esporlatu, Burgos, Bottida, Bono, Anela, Bultei, Pattada e Buddusò) il territorio ricadrà in unica zona di allerta anziché due con i vantaggi riportati nel paragrafo precedente in cui si è descritta la metodologia adottata.





**Interreg**



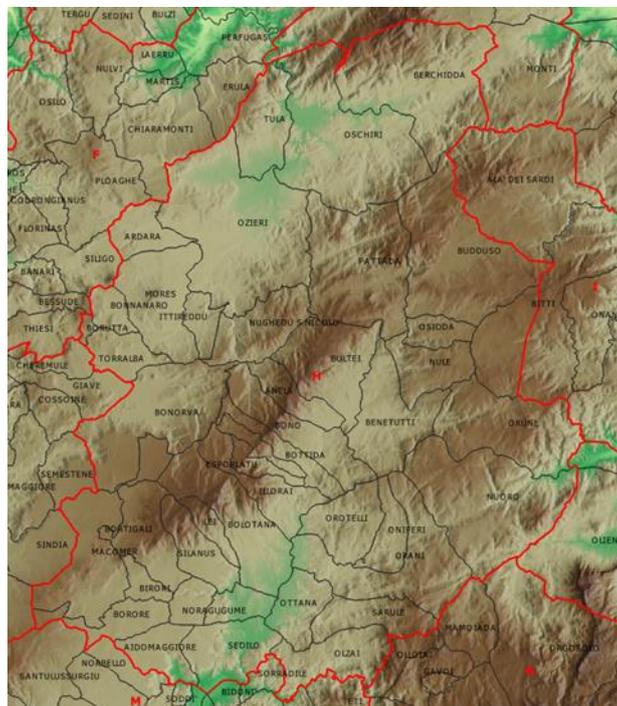
UNION EUROPEENNE  
UNIONE EUROPEA

**MARITTIMO-IT FR-MARITIME**

Fonds européen de développement régional  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



**MED-Star**



*Figura 45: Zona H ridefinita.*

## Revisione zone L ed S.

La zona L si caratterizza per il territorio pianeggiante. La parte più occidentale della zona L è contraddistinta, tipicamente, da temperature più miti, perché influenzata dalla presenza del mare, rispetto alla restante parte del territorio, più meridionale, dove vengono registrate spesso temperature più elevate. Considerando la variabile vento, la parte più occidentale è maggiormente esposta, per quanto riguarda la valutazione del pericolo, al maestrale rispetto alla zona più interna dove penetra con meno intensità. La parte più meridionale della zona L (Comuni di Uras, S. Nicolò Arcidano, Pabillonis, Mogoro, Masullas, Siris, Pompu, Curcuris, Simala, Baradili, Turri, Baressa, Gonnoscodina, Gonnostramatza, Collinas, Sardara e San Gavino Monreale), come dimostra l'analisi dei dati storici degli ultimi sei anni, spesso si comporta, da un punto di vista delle temperature e del vento, più similmente alla zona S.

D'altra parte, quando lo scirocco riesce a penetrare in profondità nel Campidano, la parte più meridionale della zona L risulta molto calda in maniera analoga al territorio confinante della zona S. Pertanto, il settore meridionale della zona L è stato ricompreso nella zona S.



**Interreg**



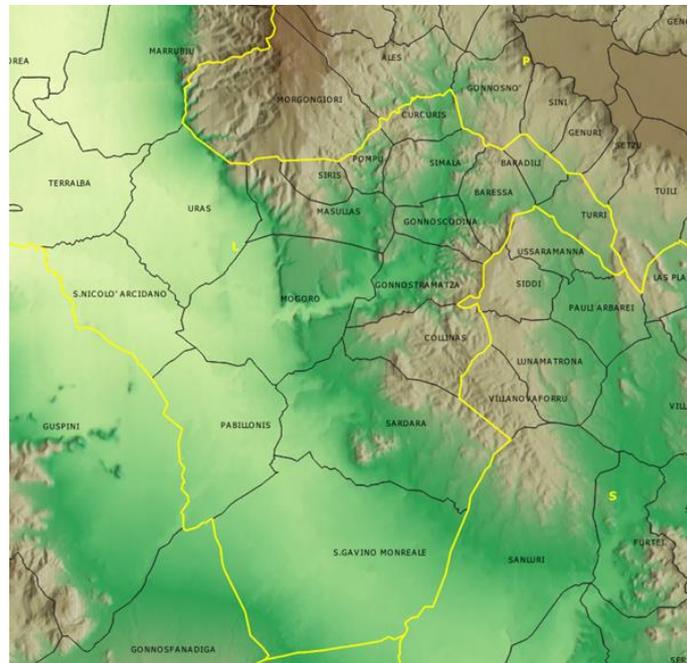
UNION EUROPEENNE  
UNIONE EUROPEA

**MARITTIMO-IT FR-MARITIME**

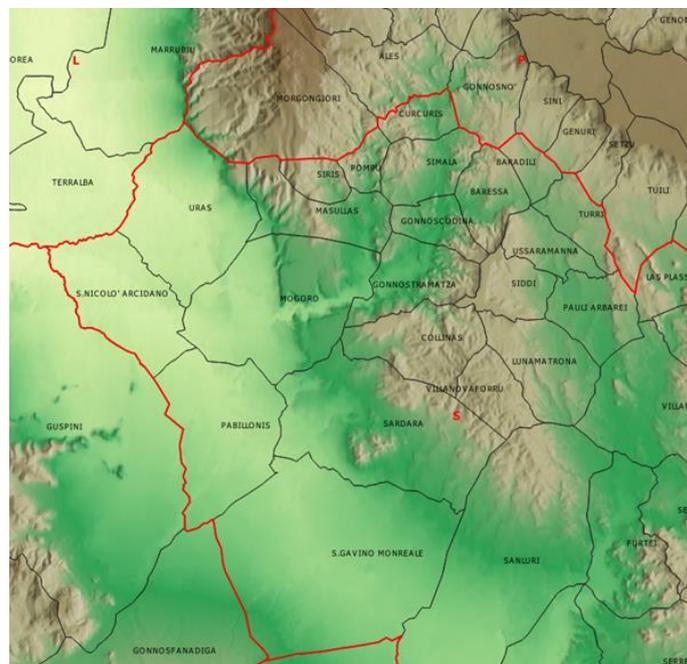
Fonds européen de développement régional  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



**MED-Star**



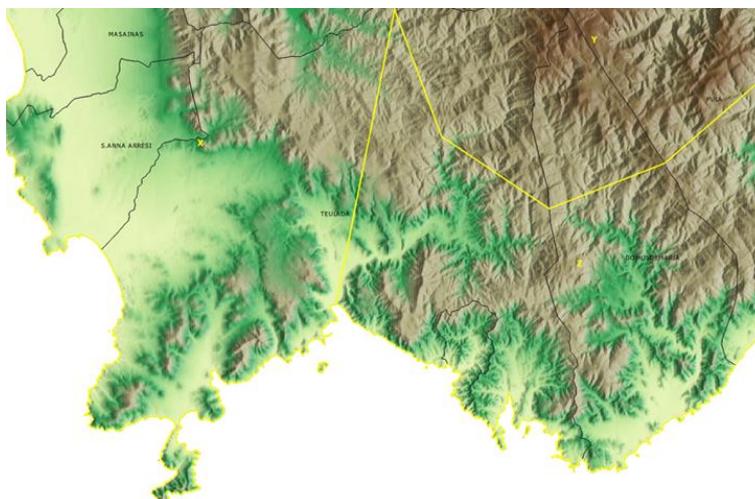
*Figura 46: Limite zone L-S attuale.*



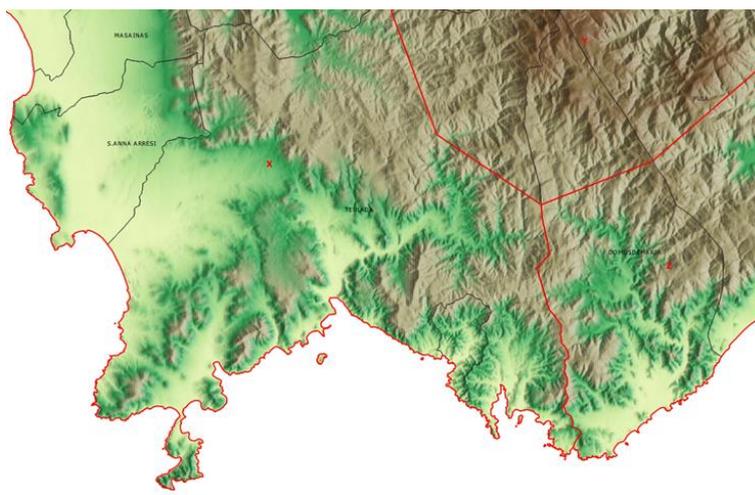
*Figura 47: Limite zone L-S ridefinite.*

*Revisione zone X e Z.*

La parte sud-orientale del Comune di Teulada, e pertanto il territorio fino a Capo Spartivento, incluso l'isola amministrativa di Domus de Maria, è maggiormente esposta ai venti di maestrale rispetto alla restante parte del territorio della zona Z, pertanto si ritiene opportuno includerla nella zona X che ha analoghe caratteristiche. In questo modo si è anche raggiunto lo scopo di unire il territorio Comunale di Teulada più costiero all'interno di una unica zona (X), mentre la parte montana permane nella zona Y.



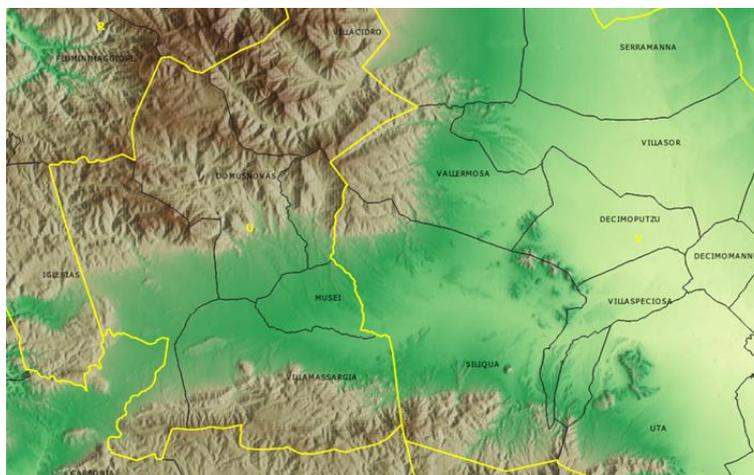
*Figura 48: Limite zone X-Z attuale.*



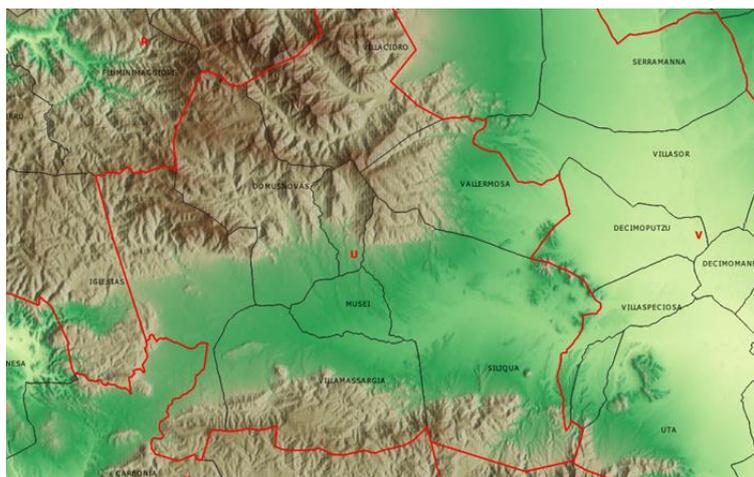
*Figura 49: Limite zone X-Z ridefinito.*

### Revisione zone U e V.

I Comuni di Vallermosa e Siliqua (attuale zona V) sono caratterizzati da temperature alte come i comuni di Musei, Villamassargia, Domusnovas e Iglesias (attuale zona U). Inoltre, hanno una esposizione simile ai venti dominanti: risultano tutti ben esposti a scirocco e sono poco interessati dal maestrale, in quanto sottovento rispetto al Massiccio del Linas. I Comuni di Vallermosa e Siliqua si ritiene, pertanto, che debbano essere spostati dalla zona V alla zona U.



*Figura 50: Limite zone U-V attuale.*



*Figura 51: Limite zone U-V ridefinito.*

### Revisione zone T, O e Q.

Il territorio del Comune di Perdasdefogu si ritiene debba essere spostato dalla zona T alla zona Q in quanto, come ha mostrato l'esperienza degli ultimi 6 anni, viene influenzato meno dal mare, caratteristica tipica dei comuni della T, viceversa il suo clima è più simile ai Comuni di Escalaplano e Orroli.

La parte nord della T, contiene varie isole amministrative di Comuni ricadenti nella zona O (isole amministrative dei Comuni ogliastrini di Arzana, Lanusei, Loceri, Jerzu e Ulassai e il Comune di Tertenia) ed è tipicamente ogliastrina sia come caratteristiche morfologiche che climatiche. Pertanto, tali isole amministrative e il Comune di Tertenia si ritiene debbano essere spostati dalla zona T alla zona O. Questo cambio consentirebbe anche di unire il territorio delle isole amministrative ai Comuni principali.

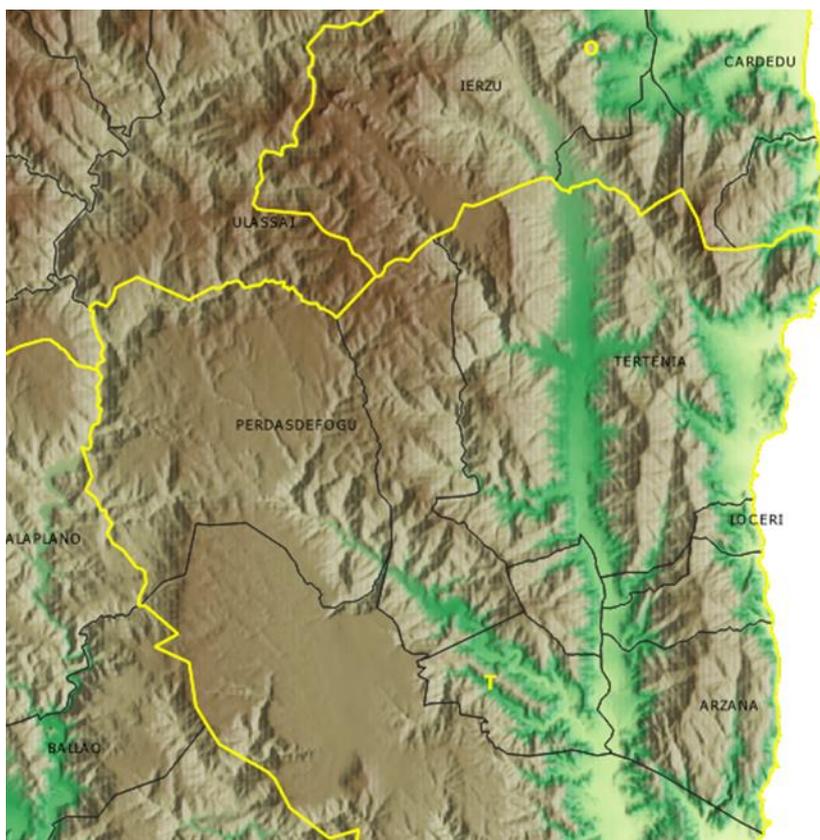
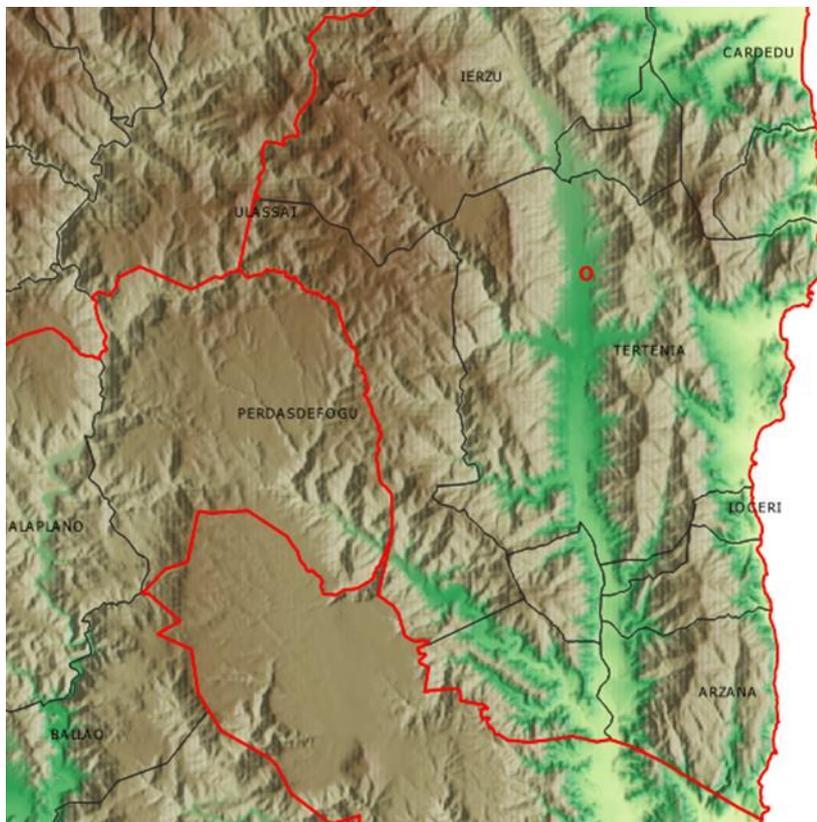
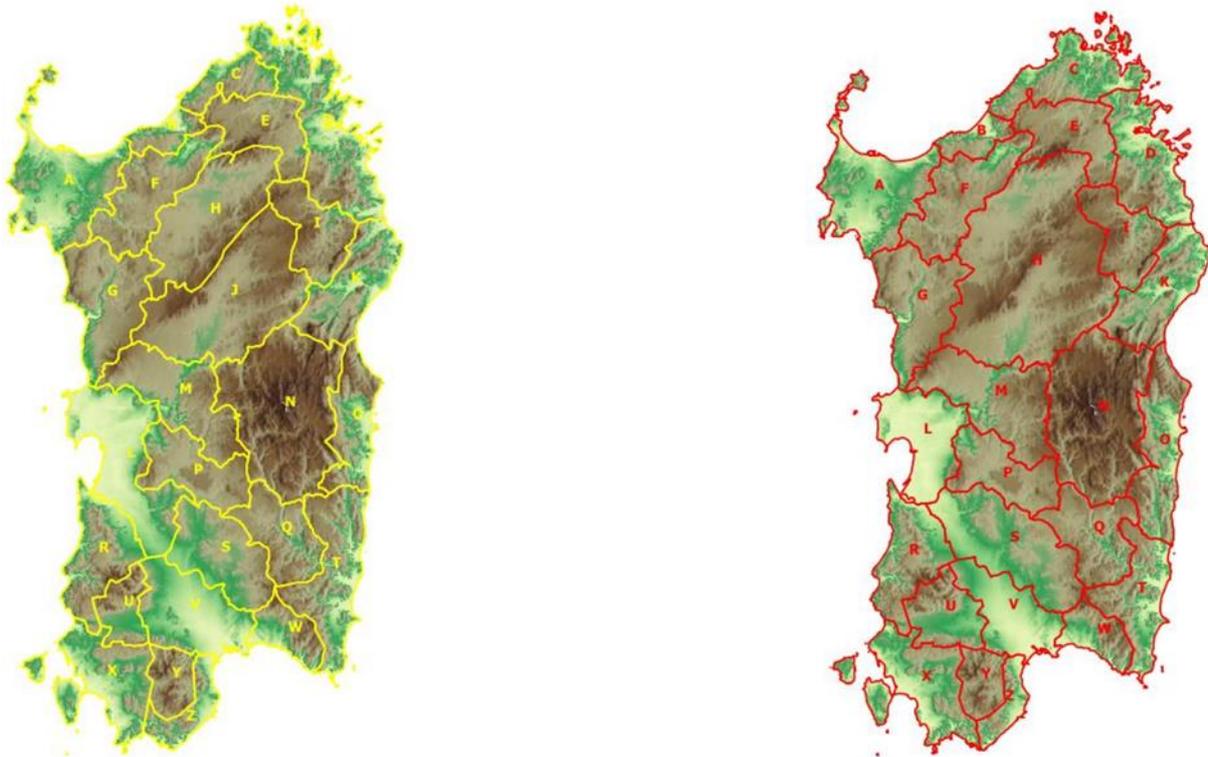


Figura 52: Limite zone Q-O-T attuale.



*Figura 53: Limite one Q-O-T ridefinito.*



*Figura 54: Zone attuali (sinistra) e ridefinite (destra).*

## Sviluppo e validazione del Simulatore di propagazione Web-based Wildfire Simulator (WWS).

L'applicazione dei simulatori di propagazione durante gli incendi in atto potrebbe consentire una più facile valutazione del comportamento e della severità del fuoco, valutandone le potenzialità di propagazione per un orizzonte temporale definito e consentendo in tal modo di evidenziare aree, ad esempio di interfaccia, che necessitano di specifici interventi di lotta o di messa in sicurezza. E' con questa filosofia che il CNR-IBE ha sviluppato un simulatore di propagazione per applicazioni in real-time, che rappresenta anche la capitalizzazione di precedenti esperienze sviluppate nell'ambito del PO Marittimi, ovvero i Progetti Proterina-Due e Proterina-C (Programma Interreg Italia-Francia Marittimo 2007-2013). In questi precedenti progetti l'IBE ha svolto una intensa attività di raccolta dati e realizzazione di mappe di vegetazione e combustibile, di calibrazione e validazione dei modelli di combustibile e di modelli di propagazione, e inoltre ha sviluppato la prima versione di un modello per il downscaling dei campi di vento. Nell'ambito dei progetti MedSTAR e Medcoopfire si è provveduto all'ulteriore sviluppo della catena modellistica necessaria per la previsione in real-time della propagazione degli incendi boschivi, attraverso le seguenti fasi: sviluppo e parallelizzazione del codice; completamento dello sviluppo dell'algoritmo multigrid per la previsione dei campi di vento; sviluppo di funzionalità per la previsione probabilistica della propagazione; sviluppo di una versione del simulatore in grado di operare nelle altre regioni del programma PO Marittimo; sviluppo dell'interfaccia grafica e delle funzionalità per l'accesso online del simulatore; sviluppo di un codice per la previsione del fuoco di chioma; test di funzionamento e validazione degli algoritmi e della catena modellistica, condotti su un set di dati meteo e di incendi boschivi realmente verificatisi durante le stagioni 2019, 2020 e 2021. In questo report descriviamo l'architettura del software, le caratteristiche della catena modellistica e i risultati prodotti dal simulatore sul set di validazione.

### Struttura del simulatore.

Il simulatore è costituito da una catena modellistica composta da un modello per le previsioni meteorologiche, un modulo di gestione dei dati di input-output, un modello mass-consistent dedicato al downscaling dei campi di vento e un modulo che, a partire dai dati forniti dai precedenti moduli, simula la propagazione degli incendi boschivi. Una interfaccia grafica accessibile con protocollo http consente l'inizializzazione delle simulazioni e la visualizzazione degli output prodotti dal simulatore. Il software è un'applicazione client/server, è scritto in linguaggio Fortran e dialoga con l'interfaccia grafica Web-GIS

attraverso javascript e linguaggio PHP; la maggior parte del codice è parallelizzato per ridurre al minimo i tempi di calcolo.

Il simulatore è stato concepito per utilizzare in automatico i dati di input necessari a caratterizzare l'evento, quali la morfologia, le mappe della vegetazione e pertanto del combustibile vegetale, le condizioni meteorologiche a scala regionale. Pertanto per inizializzare la simulazione l'operatore dovrà inserire le coordinate del punto di innesco, il luogo e l'ora di innesco, la durata dell'incendio e infine la dimensione del dominio di simulazione.

Il simulatore è in grado di effettuare una simulazione deterministica a partire dalle coordinate del punto di innesco inserite dall'operatore; alternativamente può essere utilizzata una modalità di simulazione probabilistica nella quale il simulatore avvia autonomamente una serie di simulazioni con punti di insorgenza distribuiti in un intorno del punto di innesco inserito dall'operatore, su una griglia regolare. Per ciascun pixel del dominio di simulazione viene poi calcolata la frequenza con la quale ogni pixel viene percorso dal fuoco rispetto al numero di incendi innescati, dando così una stima della probabilità che un punto possa essere percorso dal fuoco considerando l'incertezza del punto di innesco.

Un ruolo molto importante hanno i dati orografici e della vegetazione. Si tratta di dati di tipo statico, o dati che hanno tempi di variazione su scala annuale; le caratteristiche della vegetazione possono variare anche durante l'evoluzione della stagione. Da tali dati, archiviati ad elevate risoluzioni, il sistema è in grado di rilevare gli input alla risoluzione richiesta dall'operatore. Relativamente ai modelli del combustibile il simulatore utilizza una mappa delle tipologie vegetazionali e a questa associa i modelli di combustibile più appropriati, selezionati da un database dei modelli di combustibile standard (Anderson, 1982; Scott e Burgan, 2005) o più frequentemente da un set di modelli customizzati frutto di attività di sviluppo condotte in Sardegna (Arca et al. 2009). I modelli prevedono un carico diverso per la frazione viva e morta, quest'ultima viene poi suddivisa in 3 categorie a seconda dello spessore considerato: sotto i 0.6 cm, compresa fra 0.6 cm e 2.5 cm, e superiore a 2.5 cm; viene attribuito a ciascun modello di combustibile un set di descrittori delle caratteristiche del combustibile, quali il carico di combustibile, il rapporto superficie-volume, l'altezza del combustibile, la sua umidità di estinzione, il calore sviluppato con la combustione.

Un altro fattore chiave è rappresentato dalle condizioni meteorologiche che determinano l'umidità del combustibile e i campi di vento con i quali vengono condotte le simulazioni del fronte di fiamma; tali dati possono essere inseriti manualmente dall'operatore, che li ricava da dati misurati da stazioni meteorologiche. In alternativa tali dati possono essere forniti in automatico da una catena modellistica meteorologica appositamente sviluppata, inizializzata mediante dati di forecast forniti dai modelli a circolazione globale. All'interno della catena modellistica viene utilizzato il modello meteorologico a scala limitata WRF (Weather Research and Forecasting) che lavora a risoluzioni di 1 km. Il modello è stato parametrizzato per le specifiche esigenze della simulazione degli incendi in modo da minimizzare l'errore sui campi di vento. WRF è stato utilizzato per produrre i dati meteo relativi alla stagione incendi

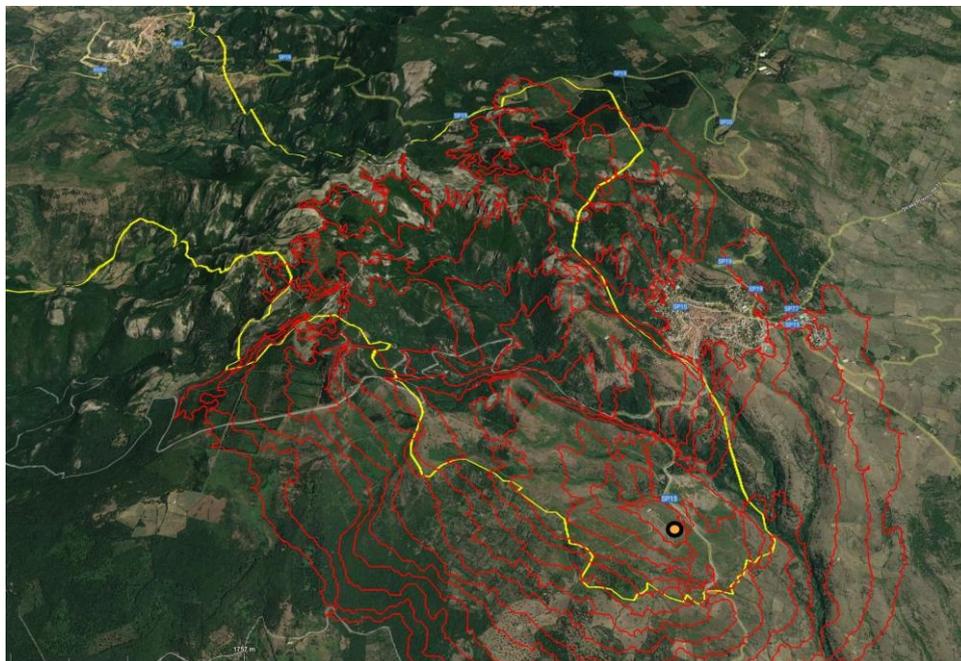
degli anni 2019-2020-2021, in modo da testare il comportamento del simulatore anche su eventi di incendio verificatisi negli anni passati. Per quanto riguarda il funzionamento in real-time il modello WRF viene eseguito quotidianamente producendo le previsioni per le 48 ore successive in modo da fornire le previsioni per simulare la propagazione in tempo reale. Al fine di incrementare l'accuratezza dei campi di vento, un modello mass-consistent è stato sviluppato per eseguire il downscaling dei campi di vento forniti dal modello WRF (attualmente a 1 km di risoluzione) fino a una risoluzione di 30 m, allo scopo di considerare gli effetti locali dovuti a una morfologia complessa. L'approccio di downscaling è basato sull'allentamento dei vincoli derivati dai principi generali di conservazione della massa, dell'energia e della quantità di moto. Proprio quest'ultima legge di conservazione, che implica 3 equazioni scalari in quanto si tratta di una grandezza vettoriale, comporta un carico computazionale non compatibile con le esigenze del real-time. Energia e massa sono invece quantità scalari e perciò il principio della loro conservazione porta a equazioni scalari. Delle cinque equazioni che trattano della fisica completa, nel nostro approccio semplificato, viene considerato solo il principio di conservazione della massa. L'idea di base è di aggiustare una prima ipotesi di campo di vento in modo che venga rispettata l'equazione di continuità della massa. La strategia di risoluzione prevede un approccio numerico alle differenze finite con griglia regolare orizzontale mentre, per dare una migliore rappresentazione della parte inferiore dello strato limite planetario, la distribuzione dei 128 livelli verticali segue una legge esponenziale, con primo livello posto a 0.5 m.

Il simulatore si basa sulla implementazione delle equazioni del modello quasi empirico di comportamento al fuoco di Rothermel, mentre la tecnica di simulazione utilizzata si basa sul metodo Level-Set. Il modello di comportamento al fuoco di Rothermel (1972) è stato scelto perché esso prevede un buon compromesso tra accuratezza, sforzo computazionale e pertanto agilità nelle applicazioni operative. Il modello prevede il comportamento del fuoco utilizzando equazioni che considerano l'energia generata dal fuoco, il calore trasferito dal fuoco al combustibile vegetale adiacente e l'energia assorbita dallo stesso combustibile. La formulazione del modello si basa su una serie di esperimenti di laboratorio condotta utilizzando combustibili morti di piccole dimensioni e omogenei. Le caratteristiche di comportamento del fuoco, in particolare la velocità di propagazione e l'intensità della linea di fuoco, sono calcolati con funzioni quasi-empiriche di un gran numero di variabili indipendenti che influiscono sulla propagazione. Le proprietà del combustibile sono fornite separatamente per componente viva e morta e per diverse classi dimensionali. Viene calcolata la media delle proprietà tra le classi di dimensione utilizzando il rapporto superficie/volume come fattore di ponderazione, mentre le frazioni viva e morta sono trattate separatamente. Per quanto riguarda la tecnica di propagazione del fuoco, l'approccio level-set è stato scelto con l'obiettivo di fornire uno strumento più adatto ad applicazioni operative, perché caratterizzato da una maggiore agilità computazionale e una migliore portabilità ad ambienti di elaborazione parallela rispetto ai simulatori vettoriali. Il metodo level-set utilizza un'equazione Hamilton-Jacobi (un'equazione differenziale alle derivate parziali di tipo

iperbolico) per descrivere la propagazione del fronte di fuoco, che è definita implicitamente in uno spazio piatto bidimensionale.

### Validazione del simulatore.

La fase di validazione è stata condotta su un set di casi di studio rappresentati da incendi realmente verificatisi, in Sardegna e nelle altre aree di programma, nel corso delle ultime stagioni degli incendi. Il simulatore ha dimostrato le capacità di fornire previsioni della propagazione e del comportamento degli incendi in sostanziale accordo con i perimetri reali e un costo computazionale adatto per applicazioni in real-time. Il sistema fornisce in output i seguenti tematismi utili per la caratterizzazione del comportamento dell'incendio: perimetro simulato, velocità di propagazione, intensità del fronte di fiamma, lunghezza di fiamma, tempo di arrivo, mappa del combustibile, mappa delle aree interessate da fuoco di chioma, mappa dei campi di vento, mappa dell'umidità del combustibile. Tra questi parametri la velocità di propagazione, stimata in metri al minuto, che è un parametro essenziale per l'impostazione delle attività di lotta e anche per l'individuazione di aree del comprensorio particolarmente a rischio, quali ad esempio le periferie delle aree abitate, che grazie alla stima della velocità di propagazione e dell'ora di arrivo delle fiamme, possono essere adeguatamente protette, ad esempio con interventi di protezione civile e di evacuazione. Un altro tematismo essenziale per l'impostazione degli interventi di lotta è la fireline intensity, che misura in kW/m l'energia rilasciata dal combustibile vegetale per metro di fronte di avanzamento dell'incendio; tale parametro è essenziale perché consente di impostare delle soglie minime necessarie per effettuare interventi di spegnimento in sicurezza e pertanto di individuare le zone del territorio maggiormente indicate per l'esecuzione degli interventi; analogamente per gli interventi aerei, i valori previsti di fireline intensity possono guidare la scelta del mezzo e fornire indicazioni sulla potenziale efficacia degli interventi stessi. Questi tematismi, unitamente a informazioni sulle condizioni meteorologiche ugualmente fornite dalla catena modellistica, ad esempio alle stime dell'umidità del combustibile e alla stima della direzione e intensità del vento, possono essere molto utili per guidare le scelte tattiche di intervento. Di seguito si riportano una serie di mappe relative ad alcuni casi di studio utilizzati per la fase di test e validazione del simulatore.



*Figura 55: Perimetro simulato (rosso) e reale (giallo) del primo step dell'incendio del montiferru (24/07/2021). Le linee rosse indicano gli avanzamenti dell'incendio simulato per ogni mezz'ora di propagazione. Il punto di insorgenza è indicato dal punto arancione.*

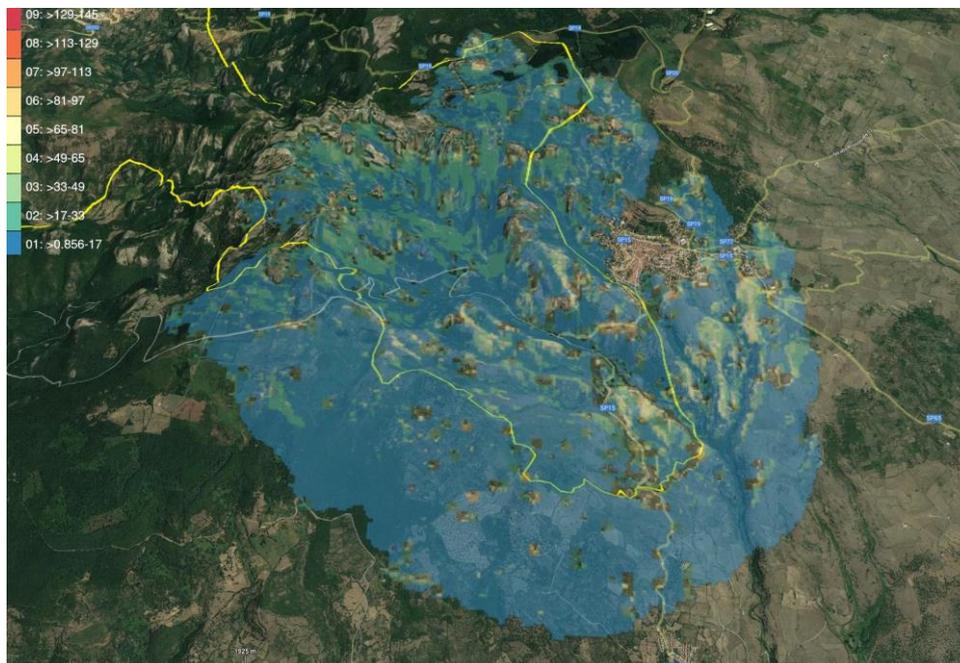


Figura 56: Mappa della velocità di propagazione (m/minuto) del primo step dell'incendio del montiferru (24/07/2021). Valori alti della velocità di propagazione si verificano nell'area vicina al punto di insorgenza e nella parte a nord ovest, molto esposta ai venti e caratterizzata da pendenze sostenute.

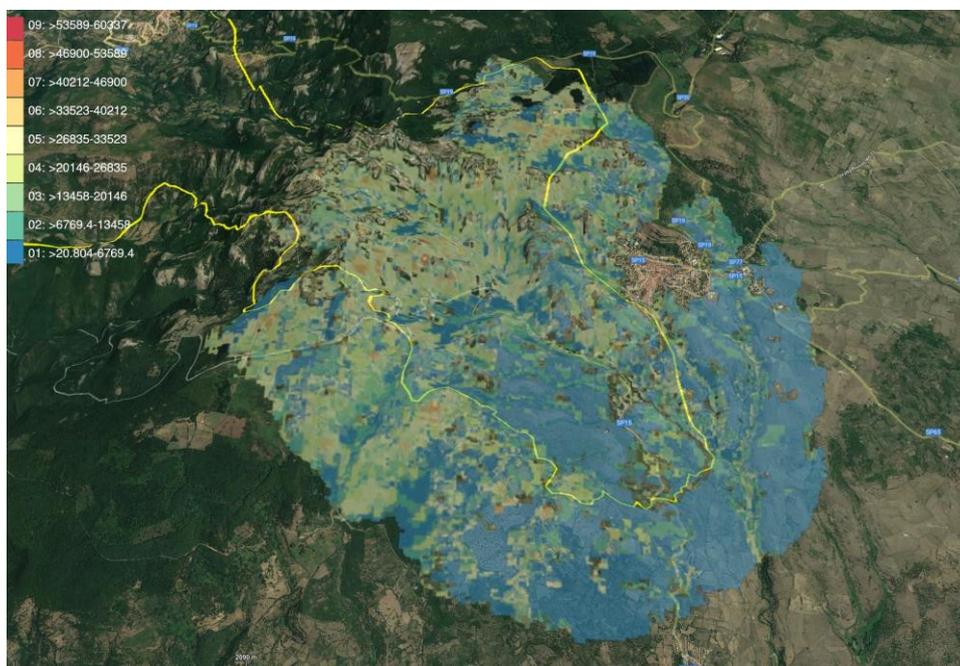


Figura 57: Mappa della fireline intensity (kw/m) del primo step dell'incendio del montiferru (24/07/2021). Valori alti dell'intensità, superiori a 25000 kw/m, si verificano nelle aree forestali in quota (nord-ovest) caratterizzate da carichi di combustibile elevati e continuità verticale della vegetazione.

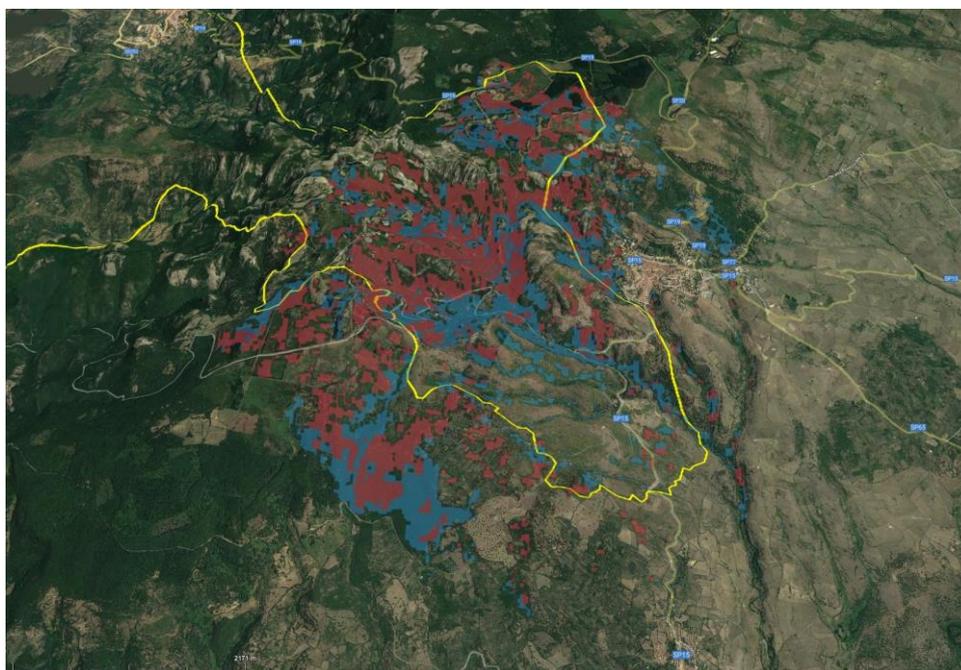


Figura 58: Mappa delle aree interessate da fuoco di chiuma passivo (aree blu) e attivo (aree rosse) nel primo step dell'incendio del montiferru (24/07/2021).

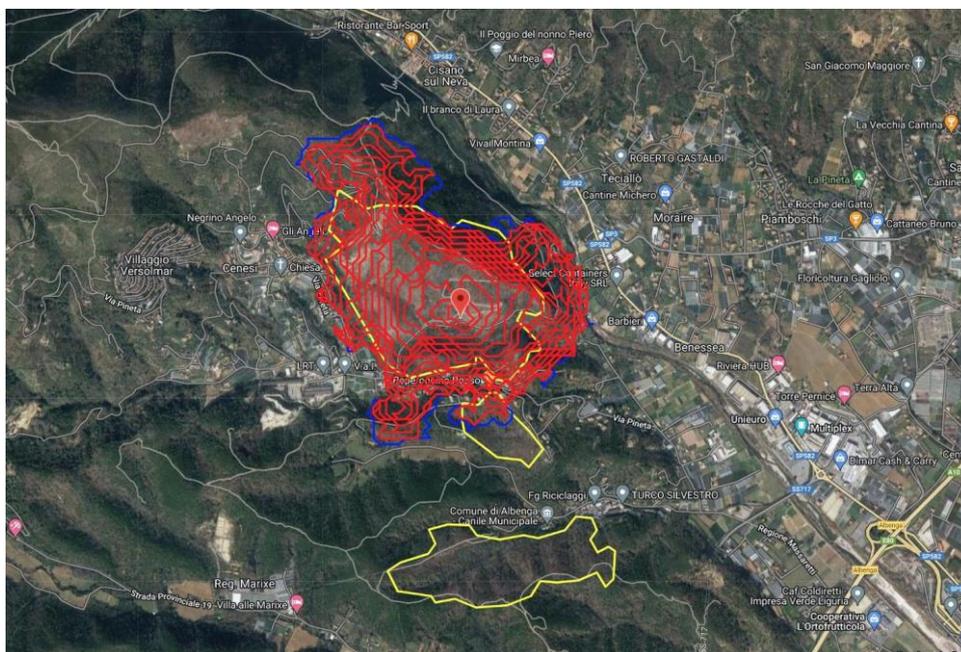


Figura 59: Perimetro simulato (rosso) e reale (giallo) dell'incendio di Cisano sul Neva (06/09/2021). Le linee rosse indicano gli avanzamenti dell'incendio simulato per ogni mezz'ora di propagazione. Il punto di insorgenza è indicato dal puntatore rosso.

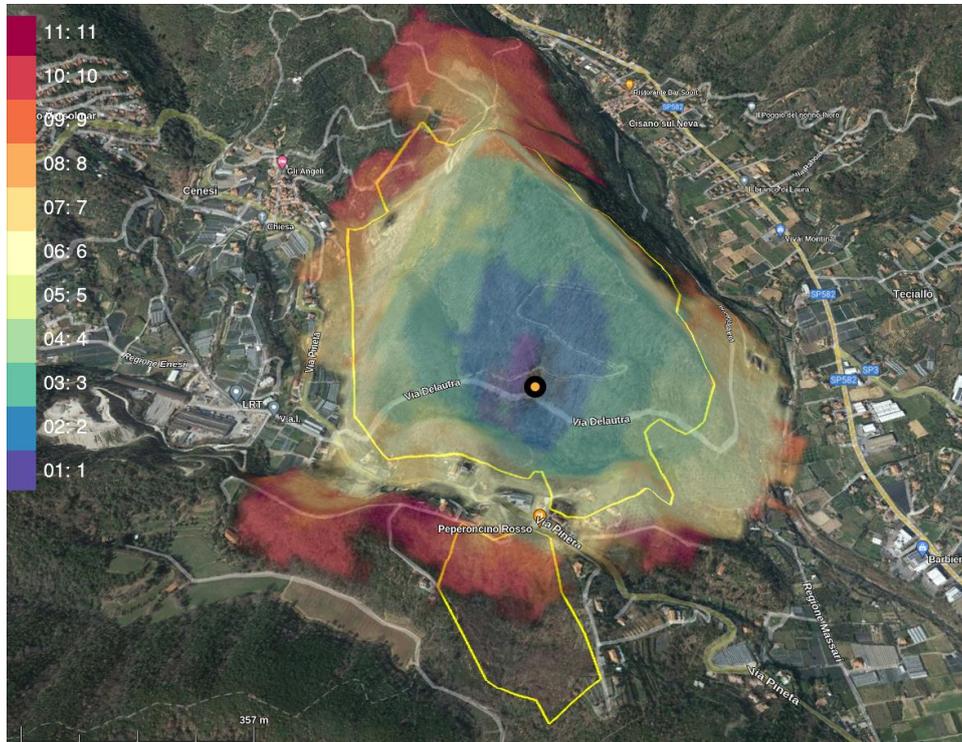


Figura 60: Mappa del tempo di arrivo delle fiamme nei diversi punti dell'incendio di Cisano sul Neva (06/09/2021), a partire dal punto di insorgenza (indicato dal punto arancione).

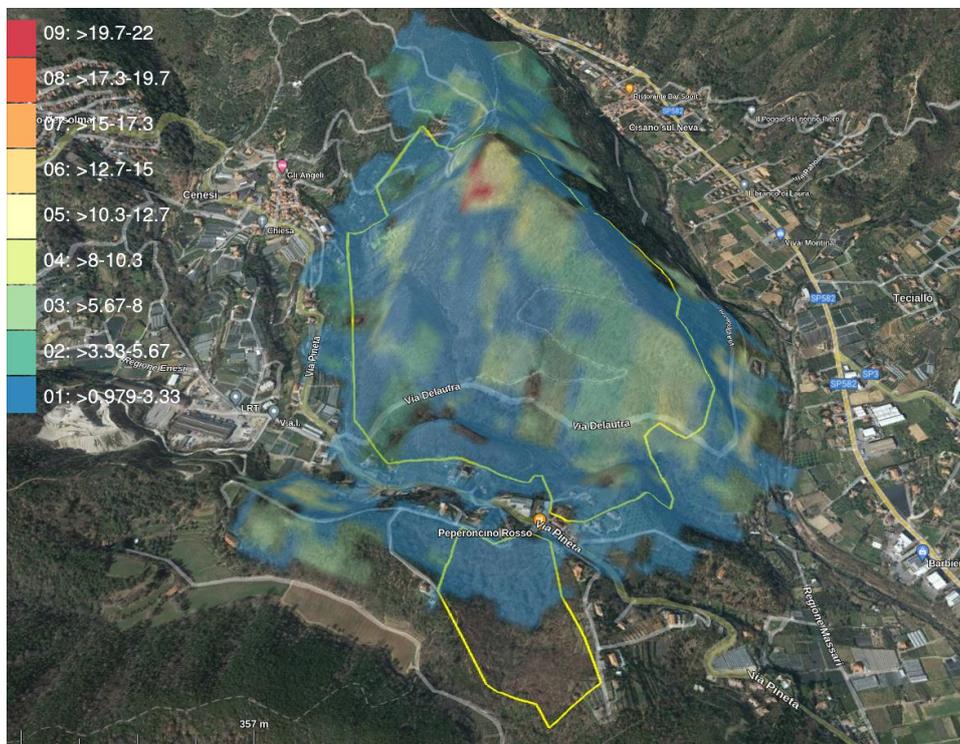


Figura 61: Mappa della velocità di propagazione (m/minuto) dell'incendio di Cisano sul Neva (06/09/2021). I valori più alti della velocità di propagazione si sono verificati in prossimità del punto di insorgenza e in prossimità della linea di cresta.

## Sviluppo e validazione del Simulatore PROPAGATOR.

PROPAGATOR è un modello di automa cellulare stocastico per la simulazione della propagazione degli incendi boschivi, concepito come metodo rapido per la valutazione del rischio di incendio. Il modello utilizza informazioni ad alta risoluzione come la topografia e la copertura vegetale, considerando diversi tipi di vegetazione. Ciascun tipo di vegetazione è infatti caratterizzato da diversi valori di suscettività al fuoco e di velocità del fronte di fiamma. I parametri di input del modello sono la velocità e la direzione del vento e il punto di accensione. È possibile considerare anche il contenuto di umidità del combustibile fine morto e si può selezionare l'opzione di simulare anche il fenomeno di "spotting". Le condizioni al contorno possono essere selezionate dall'utente o richiamate da modello meteorologico (per quanto riguarda il vento) e da RISICO (per quanto riguarda l'umidità della necromassa).

Ciascuna simulazione può includere l'effetto di diverse strategie antincendio, come azioni di contrasto a terra con linee d'acqua o taglio di vegetazione, ed azioni di contrasto aereo con canadair ed elicotteri. La duttilità del modello agevola la rappresentazione dello scenario di incendio forestale desiderato. La probabilità di propagazione dell'incendio dipende dal tipo di vegetazione, dalla pendenza, dalla direzione e dalla velocità del vento e dal contenuto di umidità del combustibile. La velocità di propagazione dell'incendio viene determinata attraverso l'adozione di un modello di velocità di propagazione "Rate of Spread" di letteratura. PROPAGATOR simula realizzazioni indipendenti di un processo stocastico di propagazione dell'incendio e, a ogni time-step, fornisce come output una mappa che rappresenta la probabilità di ogni cella del dominio di essere colpita dall'incendio. Queste probabilità si ottengono calcolando la frequenza relativa di accensione di ogni cella tra tutte le simulazioni effettuate.

Una simulazione di un incendio di 24-48 ore può essere effettuata nell'ordine di qualche minuto tramite la piattaforma MEDSTAR. Ogni simulazione permette di visualizzare le isocrone orarie del fronte di fiamma, la mappa di probabilità di arrivo del fuoco per ogni ora di simulazione, le mappe di velocità ("Rate of Spread") e di intensità lineare ("Fireline Intensity") del fronte di fiamma, sia massima sia media, per ogni pixel del dominio.

Un caso studio nella località Valle di Vado è di seguito illustrato. Si simula uno scenario di incendio iniziato nella Wildland Urban Interface, nello specifico a pochi metri dalla discarica Bossarino, a Nord Ovest dell'Autostrada dei Fiori. Il fuoco viene simulato per 8 ore, con un vento da Sud-Est che al momento dell'innesco soffia a 37km/h e poi dopo un'ora rimane sostenuto a 18km/h. L'umidità della necromassa rimane a 6% (condizione di umidità critiche) per tutta la durata della simulazione.

Si simulano tre casistiche:

- 1) Viene predisposto un intervento a terra "heavy actions", con rimozione del combustibile tramite mezzi di terra (43 ettari bruciati dopo 8 ore)
- 2) Come il caso 1), ma con il fenomeno di "fire spotting" attivato nel simulatore (47 ettari bruciati dopo 8 ore)

- 3) Con il fire spotting simulato, e senza nessun intervento di contrasto al fuoco (183 ettari bruciati dopo 8 ore)

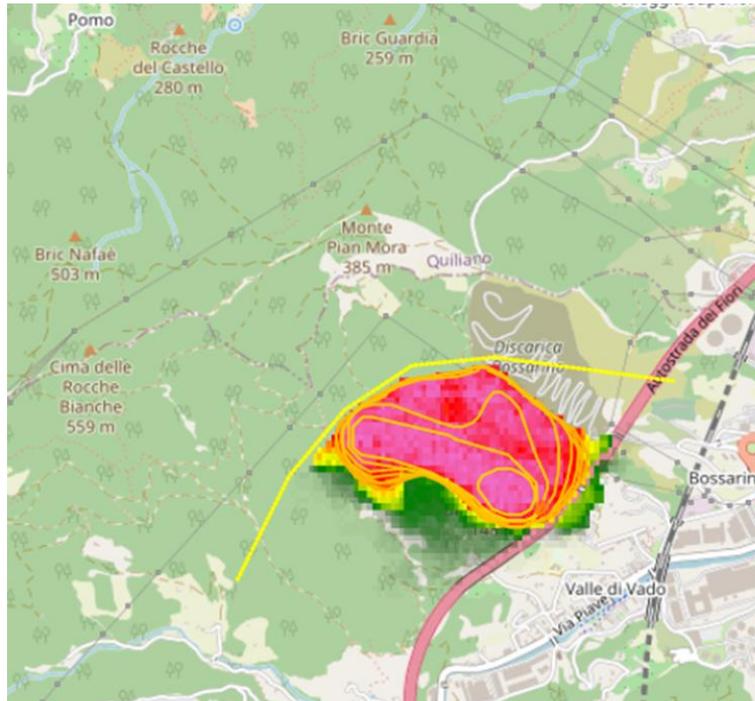


Figura 62: Caso 1.



**Interreg**



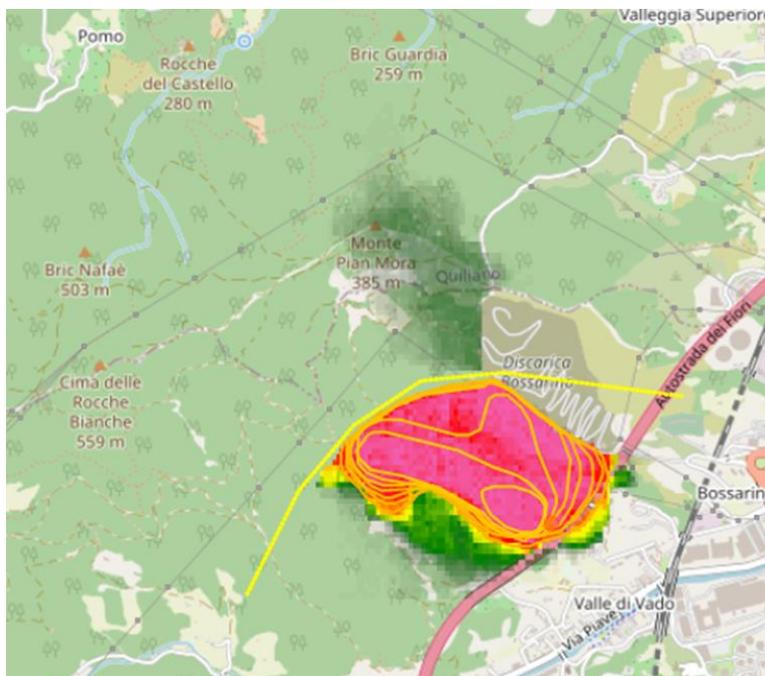
UNION EUROPEENNE  
UNIONE EUROPEA

**MARITTIMO-IT FR-MARITIME**

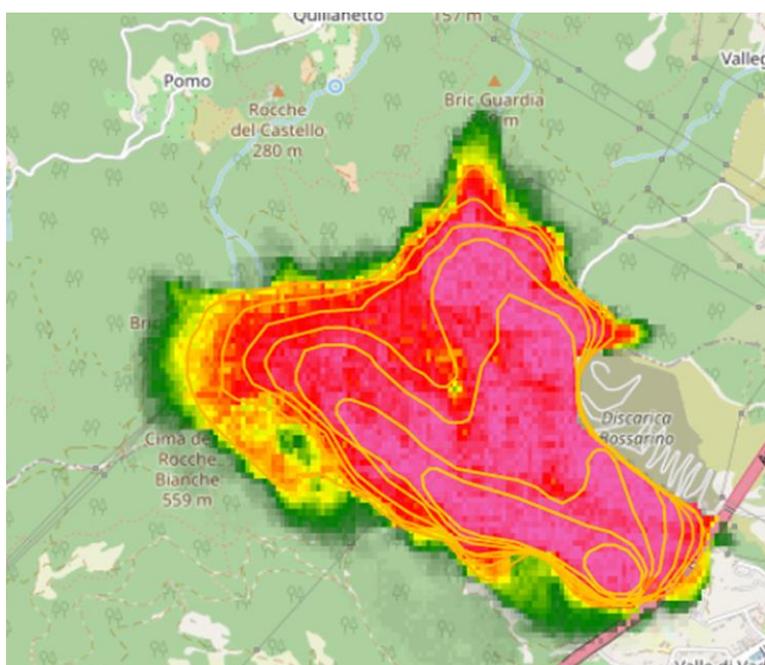
Fonds européen de développement régional  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



**MED-Star**



*Figura 63: Caso 2.*



*Figura 64: Caso 3.*

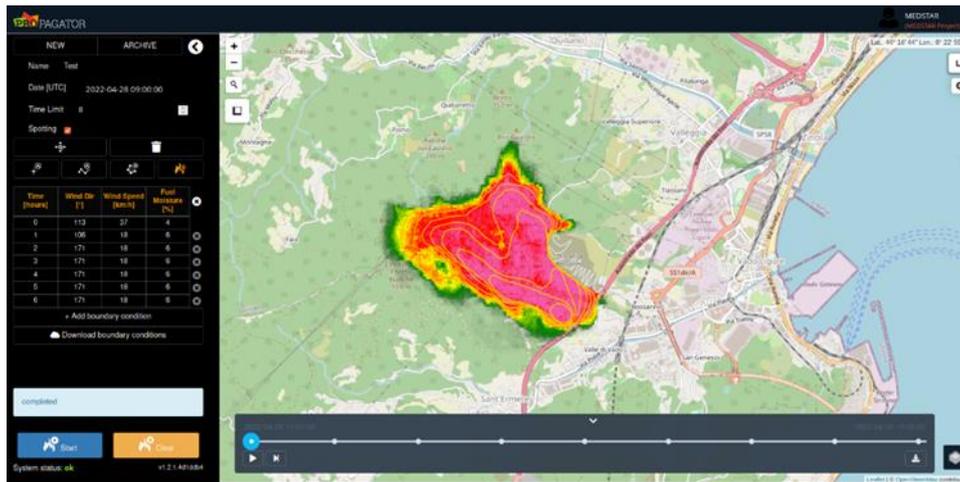


Figura 65: Esempio dell'interfaccia utente di PROPAGATOR su Mydewetra World.

## Riferimenti bibliografici.

- Anderson, H.E., Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior, US Department of Agriculture, Forest Service, 1982. General Technical Report INT-122.
- Baghino, F.; Trucchia, A.; D'Andrea, M.; Fiorucci, P. PROPAGATOR, a Cellular Automata Model for Fast Wildfire Simulations: Latest Improvements and Future Perspectives. Environ. Sci. Proc. 2022, 17, 60. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022017060>.
- Bertani R, Bovio G, Petrucci B (2018). Manuale per l'applicazione dello "schema di piano A.I.B. nei Parchi Nazionali - 2018". Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, direzione per la protezione della natura e del mare, con il contributo scientifico della Accademia Italiana di Scienze Forestali
- Bright BC, Hudak AT, Meddens AJH, Hawbaker TJ, Briggs JS, Kennedy RE (2017). Prediction of forest canopy and surface fuels from lidar and satellite time series data in a bark beetle-affected forest. Forests. 8: 1–22. - doi: 10.3390/f8090322
- Canu, S., Rosati, L., Fiori, M., Motroni, A., Filigheddu, R., Farris, E., 2015. Bioclimate map of sardinia (Italy), J. Maps 11 711–718, <https://doi.org/10.1080/17445647.2014.988187>.
- D'Este MD, Elia M, Giannico V, Spano G, Laforteza R, Sanesi G (2021). Machine Learning Techniques for Fine Dead Fuel Load Estimation Using Machine Learning Techniques

- for Fine Dead Fuel Load Estimation Using Multi - Source Remote Sensing Data. Remote Sensing. - doi: 10.3390/rs13091658
- Dessy, C., Castiglia, C., Delitala, A.M.S., 2022. Applicazioni di modellistica numerica meteorologica – sviluppate nel contesto del progetto strategico MED-Star – per l’analisi e previsione del pericolo incendi boschivi, casi studio di eventi rilevanti. Seconda Conferenza nazionale sulle previsioni meteorologiche e climatiche (Bologna, 21-22 Giugno 2022). [Contributo selezionato per il tema: “Previsioni e sistemi di allerta per la gestione e la mitigazione del rischio].
- Domingo D, de la Riva J, Lamelas MT, Garcia-Martin A, Ibarra P, Echeverria M, Hoffrén R (2020). Fuel Type Classification Using Airborne Laser Scanning and Sentinel 2 Data in Mediterranean Forest Affected by Wildfires. Remote Sensing. 1–22.
- Fiorucci, P., Gaetani, F., Minciardi, R., 2008. “Development and application of a system for dynamic wildfire risk assessment in Italy”. Environmental Modelling and Software, 23, pp. 690-702
- Haines, D. A., 1998. A lower atmosphere severity index for wildland fires. National Weather Digest 13, 23–27.
- Heisig J, Olson E, Pebesma E (2022). Predicting Wildfire Fuels and Hazard in a Central European Temperate Forest Using Active and Passive Remote Sensing. Fire. 1–23.
- Jain P, Coogan SCP, Subramanian SG, Crowley M, Taylor S, Flannigan MD (2020). A review of machine learning applications in wildfire science and management. Environmental Reviews. 28: 478–505. - doi: 10.1139/er-2020-0019
- Keane, Robert E., Dickinson, Laura J (2007). The photoload sampling technique: estimating surface fuel loadings from downward-looking photographs of synthetic fuelbeds. General Technical Report RMRS-GTR-190. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 44 p.
- Piyush J, Sean C.P. Coogan, Sriram Ganapathi Subramanian, Mark Crowley, Steve Taylor, and Mike D. Flannigan (2020). A review of machine learning applications in wildfire science and management. Environmental Reviews. 28(4): 478-505. <https://doi.org/10.1139/er-2020-0019>
- Potapov P, Li X, Hernandez-Serna A, Tyukavina A, Hansen MC, Kommareddy A, Pickens A, Turubanova S, Tang H, Silva CE, Armston J, Dubayah R, Blair JB, Hofton M (2021). Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. Remote Sensing of Environment. 253: 112165. - doi: 10.1016/j.rse.2020.112165
- Potter B., 2018. The Haines Index – it’s time to revise it or replace it. - International Journal of Wildland Fire 27, 437-440.
- Salis, M., Arca, B., Del Giudice, L., Jahdi, R., Pellizzaro, G., Ager, A., Alcasena Urdiroz, F., Scarpa, C., Schirru, M., Bacciu, V., Casula, M., Pedes, F., Ventura, A., Canu, A., Duce, P., 2022. Wildfire simulation modeling to analyze wildfire hazard and exposure in the Italy-France Maritime cooperation area (Sardinia, Corsica, Tuscany, Liguria and Provence-Alpes-Côte d’Azur). Proceedings of the Third International Conference on Fire Behaviour and Risk (ICFBR2022), Alghero (Italy), 3-6 May 2022. (in print)
- Scott, J.H., Burgan, R., Standard Fire Behavior Fuel Models: a Comprehensive Set for Use with Rothermel’s Surface Fire Spread Model, US Department of Agriculture, Forest Service, 2005. General Technical Report RMRS-GTR-153.
- Trucchia, A.; D’Andrea, M.; Baghino, F.; Fiorucci, P.; Ferraris, L.; Negro, D.; Gollini, A.; Severino, M. PROPAGATOR: An Operational Cellular-Automata Based Wildfire Simulator. Fire 2020, 3, 26. <https://doi.org/10.3390/fire3030026>.



Woodall CW, Rondeux J, Verkerk PJ, Ståhl G (2009). Estimating Dead Wood During National Forest Inventories: A Review of Inventory Methodologies and Suggestions for Harmonization. *Environmental Management* 44: 624–631. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9358-9>.