



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SASSARI

CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA  
Scienze Agrarie



Curriculum Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente  
mediterraneo

Ciclo XXIX

Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea

dr. Simona Tidu

*Coordinatore del Corso*  
*Referente di Curriculum*  
*Docente Guida*  
*Tutor*

Prof. Antonello Cannas  
Prof. Alberto Satta  
Prof. Raffaella Lovreglio  
Prof. Gian Franco Capra



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SASSARI

CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA  
Scienze Agrarie



Curriculum Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente  
mediterraneo

Ciclo XXIX

Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea

dr. Simona Tidu

*Coordinatore del Corso*  
*Referente di Curriculum*  
*Docente Guida*  
*Tutor*

Prof. Antonello Cannas  
Prof. Alberto Satta  
Prof. Raffaella Lovreglio  
Prof. Gian Franco Capra

## **Ringraziamenti**

Il lavoro di ricerca è frutto di un'esperienza scientifica ed umana maturata durante questi tre anni di dottorato. In questo periodo ho avuto modo di incontrare diversi docenti guida e ognuno di loro si è reso protagonista di questo lavoro dedicandomi tempo prezioso, spesso per confrontarsi con me, a trovare risposte alle mie domande. Pertanto è doveroso ringraziare loro e tutte le persone che hanno condiviso con me questi anni di studio e dedizione. Un ringraziamento particolare va alla Professoressa Raffaella Lovreglio e al Professor Gian Franco Capra, per avermi guidata nel mio percorso di ricerca con sapienti consigli ed avermi seguito costantemente nella realizzazione della tesi di dottorato.

Un grazie speciale è rivolto alla Dott.ssa Valentina Bacciu e al Dott. Michele Salis, per il prezioso aiuto fornitomi nella parte inerente la caratterizzazione degli incendi.

Ringrazio il Dott. Antonio Ganga, per l'aiuto datomi nella parte relativa all'individuazione delle aree di studio e durante la fase di campionamento.

Un ringraziamento va anche al Dott. Marco Biagioli, responsabile dei laboratori di Scienze del Suolo e Pedotecnologie nella sede di Nuoro, che costantemente mi ha seguito durante l'attività di laboratorio.

Ringrazio inoltre il Dott. Maurizio Mallocci, funzionario presso l'Agenzia Forestas della Sardegna Direttore dei Lavori Responsabile Gestione Complesso Forestale Sarcidano, per tutte le preziose informazioni fornite e per l'interesse costante per questo lavoro.

Ringrazio inoltre il CFVA e l'ARPAS per avermi fornito materiale prezioso e utile sugli incendi e dei dati metereologici delle giornate in cui si sono verificati gli eventi trattati.

Ringrazio i miei colleghi e amici Cristina, Rita, Gian Mario, Jessica, Agata, Antonio F e Marco DM, avendo ognuno di loro dato un piccolo contributo a questo lavoro.

Un ringraziamento inoltre va al collega Angelo Peddes, compagno di viaggi a Sassari, di racconti di confronti e sfoghi.

Ringrazio in ultimo i miei genitori per avermi sempre incoraggiata e sostenuta, per avermi dato gli stimoli necessari, per iniziare questa "avventura" e poi per continuarla. Non posso dimenticare l'immenso debito di gratitudine verso mio marito Antonello, per essermi stato vicino, per aver sostenuto le mie scelte personali e professionali, non mancando mai di amore, ascolto e attenzione, spronandomi sempre ad andare avanti nella mia strada. Grazie per aver condiviso con me quei momenti in cui pensavo di non venirci più a capo (e sono stati tanti), dandomi sempre conforto e allegria.

## Su ballu 'e su fogu

*Los an falados a fogusos montes de idda mia  
a crabone allutu ebbia  
an reduidu su logu.*

*In s'ierru s'astrañretotu cantu at ruinadu  
sa pastura nd'at sicadu  
at distrutu su lañre, cussu nordicu rigore  
at batidu annada mala,  
e arrivan da ogn'ala  
lamentos de carestĕa.*

*In s'istĕu est arrivadasa desertica sicagna,  
mancu s'aria de muntagna  
podet esser respirada,  
e sa zente est ispantada  
de ider cussu sicore,  
cun totu custu calore  
parimus in Algerĕa.*

*Epuru b'at zente indignachi a su male azunghet male,  
cun d'un'ira criminale  
at brusiadu sa Sardigna,  
razza perfida, maligna,  
sa chisina at semenadu,  
in Barbagia, in Barigadu,  
Nurra, Sulcis, Baronĕa.*

*Impunidos sos balentessa natura sun bochinde,  
a desertu reduinde,  
suni tancas e padentes,  
cussos crobos puzzolentes,  
cheren totu avvelenare,  
los devimus isolare  
che canes peri sa ia.*

*Los devian cundennarea brusiare lentamente,  
subra su crabone ardente,  
finas a si ch'istudare,  
in manera chi pro'repotan cussu bellu giogu,  
in manera chi in su fogu  
lassen sa piromania.*

*Como azis totu brusiadue tantas vidas distrutu,  
como chi azis allutu*

*su irde chi fit restadu,  
ite azis balanzadu  
ischifosos assassinos  
Miserabiles cainos,  
morzedas in agoněa*

*Poberitos innozentes, miserina cussa sorte  
ohi, ite cudrele morte  
sos cudreles bos han dadu,  
in piantu hana lassadu  
isposas, mamas e fìzos,  
a pagare sos fastizos  
de cussa zega maněa.*

*De su rimorsu in su lettunon potana riposare,  
e in cella a frazigare,  
los lassene a abba e pane,  
arrabbiados chei su cane  
chi sian de su dolore,  
infines unu puntore  
chi nd'isperdat sa zeněa.*

*Sardigna, terra brusiada, terra 'e fogu e de afannos,  
non permitas custos dannos,  
lassa istare su sufrire,  
imprese faghe fuèredisonestos e foghistas,  
chi t'an semper, egoistas,  
ispulpadu sende běa.*

*Tonino Cau -luglio 83*

## ***La danza del fuoco***

*I monti del mio paese li hanno bruciati, lasciando soltanto carboni ardenti.  
Il gelo dell'inverno aveva rovinato tutto, inaridito i pascoli e distrutto le seminagioni, quel rigore nordico aveva causato la cattiva annata e da ogni dove arrivavano lamenti di carestia.  
D'estate poi era arrivata la desertica siccità al punto che anche in montagna l'aria era irrespirabile, e la gente era giustamente meravigliata di vedere tanta arsura, con quel caldo sembrava d'essere in Algeria. Eppure della gente indegna aggiunge male al male: con una criminale rabbia sta bruciando la Sardegna, razza perfida e maligna, hanno seminato la cenere in Barbagia, Barigadu, Nurra, Sulcis e Baronia. Impuniti, i balentes stanno uccidendo la*

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

*natura, desertificando tanche e boschi, quei corvi puzzolenti vogliono avvelenare tutto, dovremmo isolarli come se fossero cani randagi. Li dovrebbero condannare a bruciare lentamente sopra i carboni ardenti, fino a spegnerli, in modo che possano provare quel bel gioco ed in modo che nel fuoco abbandonino la piromania. I monti del mio paese li hanno bruciati, lasciando soltanto carboni ardenti. Ora che avete bruciato tutto, e distrutto tante vite, ora che avete incenerito il verde superstite, cosa avete guadagnato? Caini miserabili, che possiate morire agonizzanti. Poveri innocenti, misera la vostra sorte, che morte crudele i crudeli vi hanno dato, avete lasciato nel pianto spose, madri e figli, a pagare gli affanni provocati da quella cieca follia. Che non possano riposare a causa del rimorso, e che siano lasciati a marcire in una cella, ad acqua e pane, che siano arrabbiati come i cani, doloranti, ed infine un male inguaribile ne disperda la razza. Sardegna, terra bruciata e addolorata, non permettere più questi danni e smetti di soffrire, fai fuggire in fretta i disonesti e i piromani che egoisticamente ti hanno scarnificata essendo viva.*

La Sardegna fu investita nel 1983, in particolare nelle ultime due settimane di luglio e i primi giorni di agosto, da un'ondata di calore. In buona parte dell'isola si misurarono temperature massime oltre i 40°C, con medie giornaliere prossime ai 43/44°C nelle zone interne, e minime intorno ai 30° C. A questa ondata di caldo si associarono i drammatici eventi degli incendi che percorsero boschi e campi per due settimane.

L'evento più drammatico, che viene definito tuttora come una catastrofe, si registrò a Tempio Pausania, nell'incendio di "Curraggia " che culminò nella morte di un folto gruppo di persone, impegnate nella fase di spegnimento del fuoco, che furono travolte dalle fiamme.

Questa poesia, che poi è divenuta una canzone conosciuta in tutta la Sardegna, è stata scritta dal poeta Tonino Cau; è una poesia di condanna nei confronti degli incendiari, che vuole ricordare le due settimane di inferno vissute dagli abitanti della Sardegna ed, in particolar modo, vuole rammendare le vittime dell'evento di "Curraggia".

# Indice

Riassunto .....	1
Abstract .....	2
1. Introduzione .....	3
1.1 Le conseguenze del fenomeno incendi a scala mondiale e locale.....	7
1.2 Gli effetti degli incendi sui processi pedologici.....	11
1.3 I fattori che influiscono il comportamento del fronte di fiamma e i parametri che lo descrivono .....	16
1.4 La caratterizzazione degli incendi per la valutazione degli effetti del passaggio del fuoco sul suolo .....	21
1.5 I modelli di simulazione del comportamento del fuoco e l'uso del software BehavePlus 5.0.5.....	25
2. Obiettivi della ricerca .....	28
3. Individuazione aree di studio .....	29
3.1 Inquadramento area di studio Laconi .....	39
3.1.1 Localizzazione geografica.....	39
3.1.2 Inquadramento climatico.....	41
3.1.3 Inquadramento geologico e geomorfologico.....	43
3.1.4 Inquadramento delle unità pedologiche presenti.....	45
3.1.5 Inquadramento vegetazionale.....	47
3.2 Inquadramento area di studio Sant'Antioco.....	50
3.2.1 Localizzazione geografica.....	50
3.2.2 Inquadramento climatico.....	52
3.2.3 Inquadramento geologico e geomorfologico.....	54
3.2.4 Inquadramento delle unità pedologiche presenti.....	56
3.2.5 Inquadramento vegetazionale.....	56
4. Tipologia di incendi .....	58
4.1 Caso studio Laconi .....	58
4.2 Caso studio Sant'Antioco.....	62
5. Materiali e metodi .....	65
5.1 Caratterizzazione degli incendi .....	65
5.2 Analisi chimico-fisiche.....	80
5.2.1 Umidità.....	81
5.2.2 Densità apparente .....	81
5.2.3 Analisi granulometriche .....	82
5.2.4 Scheletro.....	83
5.2.5 Terra fine (sabbia, limo e argilla) .....	83
5.2.6 Tessitura.....	84

5.2.7 pH.....	84
5.2.8 Conducibilità elettrica .....	85
5.2.9 Azoto totale .....	86
5.2.10 Fosforo totale.....	86
5.2.11 Sostanza organica .....	87
5.2.12 Idrofobicità .....	88
5.3 Elaborazioni statistiche .....	90
5.3.1 ANOVA .....	90
5.3.2 Principal Factor Analysis (PFA).....	90
7. Risultati e discussioni.....	92
7.1 Simulazione degli incendi .....	92
7.1.1 Caso di studio Laconi.....	92
7.1.2 Caso di studio Sant’Antioco.....	95
7.2. Parametri chimico-fisici .....	97
7.2.1 Densità apparente .....	97
7.2.2 Sabbia, limo e argilla.....	100
7.2.3 pH.....	104
7.2.4 Conducibilità elettrica .....	107
7.2.5 Azoto totale .....	109
7.2.6 Fosforo totale.....	111
7.2.7 Sostanza organica.....	113
7.2.8 Idrofobicità.....	115
7.3 Analisi statistica multivariata .....	123
8. Conclusioni.....	130
9. Bibliografia.....	136

## **Riassunto**

La presente ricerca ha voluto indagare gli effetti del passaggio del fuoco su suoli evoluti su substrati calcarei. Sono state individuate due aree del centro-sud Sardegna (Laconi percorsa nel 2013 e S. Antioco percorsa nel 2010) selezionate sulla base di peculiari caratteristiche. Per le due aree si è realizzato un campionamento a maglie regolari (100x100 m), identificando in ciascuna delle aree 40 punti di campionamento del suolo nelle aree percorse (P) e 40 in quelle non percorse (NP). Sui 160 campioni di suolo sono stati analizzati: densità apparente, frazioni granulometriche, conducibilità elettrica, pH, sostanza organica, azoto, fosforo ed idrofobicità. I parametri degli incendi considerati, stimati con l'uso del software BehavePlus 5.0.5, sono stati la velocità di avanzamento del fuoco, l'intensità e la lunghezza del fronte di fiamma. Le differenze tra l'area P e NP, in termini di parametri fisico-chimici del suolo, sono state individuate tramite analisi della varianza (ANOVA). Le correlazioni multiple, sono state valutate tramite Principal Factor Analysis (PFA). I risultati mostrano che, per entrambe le aree, gli incendi sono caratterizzati da una notevole severità. Questo ha determinato effetti su taluni parametri fisico-chimici dei suoli, benché tali differenze non siano spesso generalizzabili ma piuttosto sito-specifiche. In generale, gli incendi ad alta severità sembrano aver giocato un ruolo fondamentale, poiché la PFA estrae, per entrambe i siti, buona parte dei parametri legati agli incendi. Gli incendi possono aver esercitato una marcata influenza sui processi idrologici superficiali e tale influenza potrebbe essere stata amplificata in condizioni di forti pendenze in grado di aumentare la severità degli incendi e, conseguentemente, quella dei processi erosivi sottesi.

## **Abstract**

This study investigated fire effects on soils evolved on calcareous substrates. Two areas in south-central Sardinia (Laconi, burned in 2013 and S. Antioco in 2010) were chosen considering specific features. A grid sampling with regular spacing (100x100 m) was conducted on the two areas, identifying 40 soil sampling points in the burned (B) and 40 in the unburned areas (UB). Analysis of bulk density, soil texture, electrical conductivity, pH, organic matter, nitrogen, phosphorus and hydrophobicity were conducted on the 160 soil samples. Surface rate of spread, fireline intensity and flame length, evaluated by BehavePlus 5.0.5, were the parameters of the investigated fires. The differences between the physical-chemical soil properties of the B and the UB area were identified by variance analysis (ANOVA). The multiple correlations were evaluated by Principal Factor Analysis (PFA). The results show that, in both areas, fires were characterized by high severity. This affected some physical-chemical properties of the soils, though these differences are often not generalizable but rather site-specific. In general, high severity fires seem to have played a key role, since in both sites the PFA extracts most of the parameters related to fires. Fires may have exerted a marked influence on surface hydrological processes and this influence may have been amplified by strong gradient conditions able to increase the severity of the fire and, consequently, of the underlying erosive processes.

## 1.Introduzione

Gli incendi inducono sugli ecosistemi forestali alterazioni dei processi naturali, che regolano la loro funzionalità ed evoluzione. Gli effetti sono differenti a seconda del tipo di incendio (grado di intensità, propagazione, stagione dell'incendio), della vegetazione interessata, delle condizioni climatiche e topografiche dell'area, degli insediamenti, delle infrastrutture, delle opere e dei beni di volta in volta esposti. Gli impatti che il passaggio del fuoco ha sull'ecosistema sono diversificati e coinvolgono diverse componenti, ovvero il suolo, il paesaggio, l'atmosfera, la vegetazione e la fauna. Gli ecosistemi situati in ambienti aridi e semi-aridi sono sempre più vulnerabili a questo genere di disturbo; gli incendi possono causare gravi alterazioni alla loro struttura e al loro funzionamento sia su scala regionale che mondiale (Cerdà e Robichaud, 2009; Guida et al., 2014; Munoz-Rojas et al., 2015; Munoz-Rojas et al., 2016).

Per comprendere come il fuoco si sia trasformato da fattore ecologico ambientale naturale a fenomeno antropico di impatto globale sul pianeta, è fondamentale analizzare i cambiamenti storico-culturali-sociali ed economici avvenuti negli ultimi decenni nella società.

Nell'area mediterranea, l'esodo della popolazione dalle campagne alla città, a partire dagli anni '50 e sino agli anni '80 e '90 a seconda delle aree geografiche, ha portato ad una progressiva contrazione dell'attività agricola, a favore dei settori industriale, commerciale, turistico e dei servizi in genere (Dimitriou et al., 2001). In tante porzioni di territorio un tempo oggetto del lavoro dell'uomo, custodite e gestite in forme tradizionali, si è avuto un graduale abbandono delle pratiche agricole, con una trasformazione del paesaggio e della vegetazione (Duguy et al., 2007; Moreira et al., 2011; Fois, 2014).

L'abbandono di molte aree ha comportato l'aumento delle aree marginali, la perdita dei presidi territoriali, l'espansione delle aree d'interfaccia, l'accumulo di combustibile, e inoltre ha favorito fenomeni di degrado ambientale e cambiamenti del paesaggio, innescando spesso processi di successione secondaria della vegetazione, tra cui gli incendi risultano preminenti (Corda, 2011). Tra i fattori che influiscono sull'intensificazione degli incendi, si ricordano i cambiamenti di uso del suolo e l'abbandono rurale (De Luis et al., 2003; Úbeda et al., 2006; Pérez-Cabello et al., 2010; Carreiras et al., 2014; Tessler et al., 2015).

Il panorama europeo assume un andamento caratterizzato dalla forte presenza degli incendi boschivi nei Paesi Mediterranei; durante il periodo 1993-2012 sono stati registrati in media circa 58 mila incendi all'anno, con una superficie percorsa di circa 410 mila ettari (JRC, 2013).

Nel bacino del Mediterraneo ed in particolare nella penisola Italiana, il problema degli incendi rappresenta un fenomeno a carattere stagionale, data la sua dipendenza dalle condizioni meteorologiche, dalle caratteristiche dei combustibili vegetali, dalle particolarità fisiografiche del territorio e dalle motivazioni sempre più connesse alle attività antropiche. Sovente gli incendi non sono confinati alle sole superfici forestali, ma interessano anche sistemi agro-pastorali e aree urbanizzate, costituendo un pericolo reale per la popolazione (Bottai et al., 2008).

A livello europeo, la situazione degli incendi boschivi presenta caratteri allarmanti per tutti i Paesi che si affacciano sul bacino del Mediterraneo. Questi paesi sono ogni anno interessati dal problema, secondo dinamiche simili a quelle Italiane, per l'esistenza di comuni aspetti climatici, vegetazionali, storici e culturali che concorrono a determinare diffuse condizioni di vulnerabilità nei confronti del fuoco (Barbosa et al., 2006; Bottai et al., 2008).

In genere l'aumento e la diffusione di questo fenomeno è legato sostanzialmente alla variabilità delle condizioni climatiche indotte dal *global change* e alle profonde modifiche avvenute nell'uso antropico del territorio. Infatti ai periodi di siccità prolungata, naturalmente predisponenti, si sono sovrapposti l'abbandono delle aree rurali, la crescita demografica in aree urbanizzate, l'adozione di politiche forestali estremamente conservative; a queste si devono aggiungere le circostanze, non meno importanti, legate ai contesti sociali che generano particolari figure di incendiari, fenomeni di natura economica ed occupazionale, fenomeni legati ad attività e ad interessi diversi (Corda, 2011).

In riferimento al continente Europeo, il fenomeno è indubbiamente prevalentemente di origine antropica, causato nel 99% circa dei casi da complesse ragioni (sociali, economiche, culturali, storiche e psicologiche). In questo contesto, la rapida crescita dell'urbanizzazione della società, il calo dell'uso del suolo, la popolazione rurale in via di regresso ed invecchiamento, che è attivamente coinvolta nella gestione del territorio,

hanno innalzato il rischio di incendi boschivi ad un livello mai visto in precedenza (EFFIS/Europa, 2010).

Inoltre va considerato che nei prossimi anni sono attesi incrementi della frequenza degli incendi, dovuti al riscaldamento globale, conseguente all' aumento delle temperature, dell'evapotraspirazione (Díaz-Delgado et al., 2002; Pausas, 2004; Herman, 2009), ai cambiamenti nel regime delle precipitazioni, alla riduzione della stagione delle piogge (Wittenberg et al., 2007a).

In Italia il fenomeno degli incendi nei boschi e, più in genere, nello spazio rurale, appare abbastanza rilevante: nell'arco di 45 anni (1970-2015) sono stati registrati circa 390 mila eventi che hanno percorso oltre 4.5 milioni di ha. Nel periodo 2011-2015, gli incendi registrati risultano 28.090 con una superficie percorsa di 309 mila ha, di cui 169 mila ha di superficie boscata e 140 mila ha di superficie non boscata. Per quanto riguarda il 2016, dai dati provvisori al 27 novembre 2016 risultano 4.793 gli incendi ufficialmente registrati con una superficie percorsa di circa 48 mila ha, di cui 22 mila ha di superfici boscata e 26 mila ha di superfici non boscate (CFS, 2016).

Il fenomeno si manifesta con maggiore intensità nelle regioni del sud Italia; questo può essere riconducibile ad una serie di fattori predisponenti, tra cui l'andamento climatico, che soprattutto in queste zone è caratterizzato dal perdurare di periodi siccitosi, con presenza di forti venti di scirocco e temperature che toccano spesso picchi di 40°C, provocando un notevole abbassamento del grado di umidità della vegetazione. La presenza di aree spesso abbandonate e incolte, con conseguenti accumuli di biomassa e di materiale combustibile, che favoriscono il propagarsi del fuoco su ampie superfici. Vanno a sommarsi a questi fattori predisponenti tutta una serie di casistiche che riconducono a cause sia colpose che dolose, queste ultime appaiono sempre più connesse a problematiche socio-economiche legate ad una complessa serie di circostanze (Corda, 2011).

La regione Sardegna registra la più alta incidenza di incendi boschivi tra le Regioni italiane. I dati statistici e le fonti storiche mostrano che circa 600.000 ettari di bosco sono stati percorsi dal fuoco negli ultimi 120 anni (D'Angelo et al., 1998).

Nel periodo tra gli anni 1971-2012 i dati documentati (Regione Autonoma della Sardegna, Piano AIB 2011-2013), riportano 138.355 eventi registrati con una superficie percorsa di 1.565.871 ha, di cui 313.985 ha di superficie boscata. Per l'intera Regione dalla serie

storica degli incendi, registrati e suddivisi per cause generiche (dati dall'attività investigativa negli anni 1996-2011) si può constatare che il 71% sono di origine dolosa, il 10% di origine colposa e il 18% come causa indefinita.

Il fenomeno degli incendi in Sardegna, oltre all'eterogeneità della copertura del suolo tipica degli ambienti mediterranei, alle condizioni climatiche, geomorfologiche, è fortemente legato alla presenza dell'uomo sul territorio ed in particolare alle attività agropastorali e alle tecniche utilizzate per la gestione del territorio. A questi si sommano cause economico- sociali collegate allo sviluppo turistico ed occupazionale (Mou, 2014). L'incendio nello spazio rurale costituisce per la Sardegna uno dei rischi ambientali maggiori; il periodo di maggiore insorgenza e sviluppo degli incendi nel territorio dell'isola include la stagione estiva e ultimamente anche i primi mesi autunnali. Al di là delle molteplici cause che stanno a monte del problema degli incendi, gli effetti provocati all'ecosistema sono molteplici e variano dall'alterazione dei parametri chimico-fisici suolo, all'incremento di fenomeni erosivi e conseguente dissesto idrogeologico, all'accentuarsi di fenomeni di desertificazione, alla trasformazione del paesaggio. Queste conseguenze rendono il fenomeno degli incendi uno dei principali fattori di impoverimento del territorio (Mou, 2014).

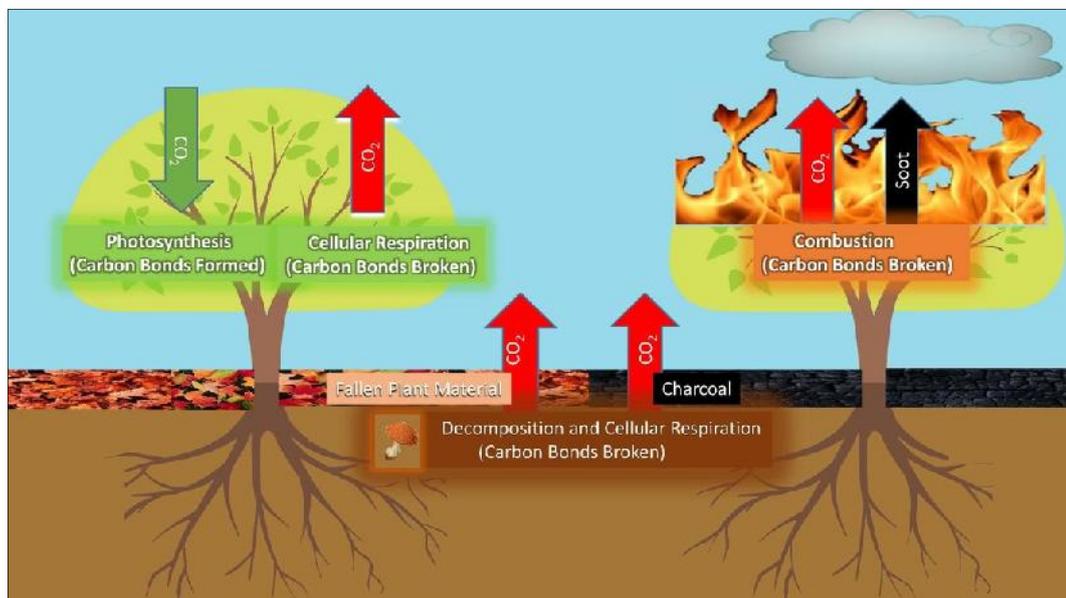
## 1.1 Le conseguenze del fenomeno incendi a scala mondiale e locale

Nei prossimi anni sono attesi cambiamenti climatici a livello globale, con importanti ricadute sulle temperature e precipitazioni nelle diverse regioni soggette al fuoco (Bradstock et al., 2012). Si prevede un aumento delle temperature, delle ondate di calore, dell'aridità estiva e una diminuzione delle precipitazioni con un conseguente incremento della frequenza e della gravità degli incendi. Eventi ricorrenti di estrema siccità potrebbero minare la salute e la produttività degli ecosistemi forestali (Ciais et al., 2005; Paoletti, 2007), essendo questi la più grande riserva di carbonio organico fra gli ecosistemi terrestri (Houghton 1999; Houghton et al., 2001, Mancini, 2013). I flussi di scambio di carbonio in foresta sono i più grandi misurati tra gli ecosistemi terrestri (Field et al., 1998; Houghton, et al., 2001; Mancini, 2013), quindi il disturbo portato agli ecosistemi forestali dal fuoco porta delle perturbazioni nel ciclo globale del carbonio, trasformando questi da *sink* di carbonio a sorgenti (Ciais et al., 2005; Paoletti, 2007).

È evidente che gli incendi a scala mondiale sono uno dei principali fattori di cambiamento negli ecosistemi (Pyne et al., 1996; Brugger et al., 2007) e determinano importanti conseguenze sugli ecosistemi terrestri (Tessler et al., 2015), includendo sia la componente abiotica che quella biotica (Bovio, 2011).

Tra le principali conseguenze di carattere ecosistemico indotte dagli incendi, vi è il trasferimento all'atmosfera di una porzione significativa di circa 200 composti (metano, idrocarburi, monossido e biossido di carbonio, ossidi di azoto e particolato), che derivano dai processi di combustione incompleta della cellulosa e della lignina, ai quali si aggiungono resine e olii contenuti in varia misura nella vegetazione e nel suolo (Bovio e Manes, 2004). Negli incendi di vasta entità, l'emissione aumenta più che proporzionalmente all'aumento della superficie percorsa. Infatti si vengono a creare delle condizioni di combustione incompleta in corrispondenza delle zone dove è massima la velocità del fronte di fiamma. Ciò accade poiché nel fronte veloce la fiamma viva transita in fretta, lasciando dietro di sé una combustione lenta, che origina una quantità di gas otto volte superiore rispetto alla combustione viva (Bovio e Manes, 2004). La massa di inquinanti dipende dal comportamento del fuoco e dalla frazione di biomassa che effettivamente viene consumata (Bovio e Manes, 2004). La maggior parte del carbonio viene emesso sotto forma di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e monossido di carbonio (CO), che rappresentano tra

il 90 e il 95% delle emissioni. Il resto del carbonio è composto da metano ( $\text{CH}_4$ ) e altri composti volatici (VOC) (Langmann et al., 2009). Meno del 5% del carbonio viene emesso come materiale particolato (Reid et al., 2005). L'insieme di questi elementi ha numerosi effetti fisico-chimici sull'atmosfera, come l'assorbimento e lo *scattering* della luce (Hobbs et al., 1997; Podgorny et al., 2003; IPCC, 2007), le formazioni e i processi micro - fisici delle nubi (Andreae et al., 2001; Koren et al., 2004; Feingold et al., 2005). Per quanto riguarda le emissioni in atmosfera di particolati (PM 2.5), dovute ad incendi boschivi nell'agosto 2003, il contributo nel Sud Europa è stato pari a quello delle emissioni antropogeniche, con significativi impatti sul bilancio radiativo (Hodzic et al., 2007).



**Figura 1.1.1:** Rilascio in atmosfera di anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) e particolato (soot) dopo il passaggio del fuoco e conseguente variazione del ciclo del carbonio nell'ecosistema.

I diversi tipi di incendi (sotterraneo, di superficie e di chioma) che possono verificarsi in diverse combinazioni, causano come conseguenza la perdita totale o parziale sia della parte ipogea che epigea delle piante; questo provoca effetti a livello ecologico che portano: ad una variazione della produttività primaria netta (PPN), della struttura del paesaggio, delle caratteristiche fisico-chimiche e biologiche del suolo, della struttura degli habitat, all'alterazione della flora spontanea, all'alterazione e allo spopolamento da parte della fauna selvatica (Valentini, 2000).

A seguito di un incendio la Produzione Primaria Netta (PPN) si riduce come effetto dell'eliminazione del soprassuolo; inoltre, se l'incendio ha creato dei cambiamenti relativi alla fertilità e umidità del suolo, la PPN potrebbe diminuire ulteriormente per un lungo periodo (Valentini, 2000).

Il fuoco riveste un ruolo importante nel plasmare il paesaggio (Naveh, 1990; Omi, 2005; Pausas et al., 2008; Fois, 2014); l'effetto del fuoco sulla struttura del paesaggio sembra essere correlato alla stagionalità, alla frequenza, all'intensità e all'entità del disturbo, inteso come dimensione dell'area percorsa.

L'analisi dell'influenza dell'azione del fuoco sulla struttura del paesaggio è complicata dal fatto che l'eterogeneità spaziale esiste a diverse scale d'osservazione; la tipologia di vegetazione coinvolta durante un incendio porta ad un'intensità variabile del fuoco, che produce un assetto spaziale eterogeneo, composto da isole di vegetazione integra, frammiste a lembi di vegetazione più o meno colpiti dal passaggio del fuoco (Marchetti e Ricotta, 2004).

Il frequente passaggio del fuoco causa variazioni della copertura e della struttura delle comunità vegetali presenti (Naveh, 1990; Lloret e Montserrat, 2003; Lloret et al., 2003; Tessler et al., 2015). Gli ecosistemi di tipo mediterraneo sono generalmente più resistenti agli incendi boschivi, per effetto degli adattamenti sviluppati dalle specie vegetali presenti (Naveh, 1990).

Un frequente passaggio del fuoco provoca un'omogeneizzazione della vegetazione in macchia o prati, indipendentemente dalla composizione della vegetazione pre-incendio (Moreira et al., 2011), con conseguente creazione di un paesaggio omogeneo, monotono, dinamicamente vincolato e incapace di modificazioni (Marchetti e Ricotta, 2004). Dove il fuoco è frequente, le comunità vegetali si sono specializzate e sono dominate da specie pirotolleranti, in grado di sfruttare il passaggio del fuoco e lo choc termico che ne deriva, per attivare i meccanismi di fioritura, di fruttificazione, di rilascio o di germinazione dei semi (Mazzoleni 1993; Pyne et al., 1996; Brugger et al., 2007).

Incendi ricorrenti riducono la copertura vegetale e la densità delle piante (Lloret et al., 2003; Eugenio e Lloret, 2004; Delitti et al., 2005; Eugenio et al., 2006; Herman, 2009; Tessler et al., 2015).

Le comunità faunistiche sono strettamente dipendenti dalla vegetazione, sia per il cibo che per la ricerca di zone di rifugio e nidificazione; esiste quindi una stretta relazione tra

incendi, vegetazione e comunità animali. Gli incendi, infatti, determinano sulle comunità animali sia effetti diretti che indiretti; le conseguenze dirette dipendono dalla mobilità degli animali, dalla velocità di diffusione delle fiamme, dall'intensità del fuoco e dalle temperature; quelle indirette sono determinate dai mutamenti della vegetazione, attraverso la trasformazione indotta dagli incendi sulla sua composizione, in termini di produttività, struttura e specie.



**a)** **b)**  
**Figura 1.1.2:** **a)** Conseguenze degli incendi su un soprassuolo a conifere, Laconi 2015; **b)** Intervento selvicolturale post-incendio sullo stesso soprassuolo Laconi 2016.

## 1.2 Gli effetti degli incendi sui processi pedologici

Il fuoco è un fattore di disturbo comune nei terreni forestali, in quanto gli incendi forestali non solo alterano la flora e la fauna e disturbano gli equilibri biologici, ma modificano anche gli equilibri idrologici, pedologici e le condizioni microclimatiche (Stoof et al., 2015). Tuttavia una delle peggiori implicazioni degli incendi boschivi è probabilmente il loro impatto sul suolo, che non è solo il supporto fisico e serbatoio dei nutrienti per le piante, ma anche una risorsa rinnovabile, con tassi di degradazione potenzialmente rapidi e processi di formazione e rigenerazione estremamente lenti (Hyde et al., 2007; Cerdà e Doerr, 2008; Cerdà e Robichaud, 2009; Stoof et al., 2012; Guénon et al., 2013; Stoof et al., 2015).

L'effetto del fuoco sul sistema suolo dipende da diversi fattori, quali l'intensità del fuoco, le condizioni climatiche, la topografia e l'eterogeneità del paesaggio (Cerdà e Robichaud, 2009; Wright e Clarke, 2008; Munoz-Rojas et al., 2016).

Il rischio degradazione del suolo, a seguito di un incendio, è in larga misura determinato da quanto accade alle sue proprietà e alla copertura vegetale, durante e dopo l'incendio. Gli ambienti aridi possono essere più vulnerabili al degrado, dopo il passaggio del fuoco, a causa della perdita della copertura vegetale, del deflusso e dell'erosione, della riduzione dei nutrienti e della sostanza organica (Vieira et al., 2015); fattori come l'intensità del fuoco, la stagionalità e la storia, possono influenzare le risposte post-fuoco di questi ambienti (Knox e Clarke, 2006; Munoz-Rojas et al., 2016).

Le conseguenze del passaggio del fuoco sul suolo non si limitano alla riduzione della vegetazione, ma riguardano anche il comparto idrologico e pedologico. Tali comparti, infatti, possono subire alterazioni a seguito del frequente passaggio del fuoco, potendo essere interessati, nelle aree percorse, da fenomeni quali aumento del deflusso superficiale delle acque ed erosione (effetti questi dovuti alla riduzione della conduttività idraulica del suolo; De Bano, 1981), alla diminuzione della stabilità degli aggregati del suolo (Wilson, 1999), ad una generale diminuzione dei nutrienti del suolo (Thomas et al., 1999), all'alterazione delle proprietà fisico-chimiche del suolo (Giovannini e Lucchesi, 1997) ed alla variazione della dinamica di vegetazione (Trabaud e Galtié, 1996).

Le conseguenze sul suolo, in seguito al passaggio del fuoco, dipendono strettamente dal regime degli incendi (intensità, stagione, tempo di ritorno) (Munoz-Rojas et al., 2016) ma

anche da altri diversi fattori: struttura, idratazione e colore del suolo, tipo di copertura vegetale nonché dalla severità dell'incendio, a sua volta risultato dell'intensità, della velocità di propagazione, del tempo di residenza etc. (Certini, 2005; Cerdà e Robichaud, 2009; Alcañiz et al., 2016).

Immediatamente dopo un evento, la quantità di sostanza organica decresce, benché nel lungo periodo aumenti rispetto al livello pre-incendio; la qualità della sostanza organica cambia in modo notevole, con arricchimento della frazione più recalcitrante alla demolizione biochimica (Certini, 2005).

La disponibilità di sostanze nutritive aumenta temporaneamente in modo anche notevole. L'azoto organico in parte volatilizza ed in parte si trasforma in ammonio, forma disponibile per gli organismi al suolo. L'ammonio è destinato, nel tempo, a trasformarsi in nitrato, che venendo dilavato porta, in determinate condizioni, un possibile inquinamento delle falde da nitrati (Certini, 2005).

Il fosforo organico mineralizza in ortofosfato, ma la perdita per mineralizzazione è spesso trascurabile. Qualora però non venga prontamente assunto dalla vegetazione, può subire processi di precipitazione in forme minerali poco disponibili (Certini, 2005; Leone e Lovreglio, 2011).

Calcio, magnesio e potassio aumentano temporaneamente in modo notevole, attraverso l'aggiunta di cenere proveniente dalla vegetazione arbustiva ed arborea e dalle chiome bruciate, questa crescita di solito non è persistente, in quanto alcuni componenti sono lisciviati ed altri prontamente utilizzati dalla vegetazione residua. La capacità di scambio cationico decresce proporzionalmente alla perdita di sostanza organica (Certini, 2005).

Le proprietà fisiche e fisico chimiche del suolo, che variano in seguito al passaggio di un incendio sono: idrofobicità, stabilità della struttura, densità, distribuzione granulometrica pH, struttura mineralogica, colore e regime delle temperature.

Le proprietà idrorepellenti sono già presenti naturalmente nei suoli e si accentuano dopo gli effetti di un incendio, per effetto della creazione di un diaframma idrorepellente a pochi centimetri di profondità; ciò può determinare riduzione della permeabilità e aumento dei fenomeni di scorrimento ed erosione superficiale (*runoff*) ed erosione (Leone e Lovreglio, 2011).

La stabilità della struttura diminuisce con la combustione delle sostanze aggreganti che aggregano le particelle di suolo.

La densità apparente aumenta per effetto del collasso degli aggregati e per l'intasamento dei pori da parte delle ceneri e delle sostanze argillose, finemente disperse. Ne consegue una riduzione della porosità e della permeabilità (Certini, 2005).

Le diverse frazioni granulometriche (sabbia, limo e argilla) mostrano spesso una elevata resistenza al fuoco (Parlak, 2011; Munoz-Rojas et al., 2016).

La composizione granulometrica degli orizzonti di superficie non cambia direttamente ma per effetto dell'erosione, che può rimuovere selettivamente la frazione più fine (Certini, 2005).

Il pH aumenta nei suoli non carbonatici, seppure in maniera transitoria, per effetto del rilascio durante il processo di combustione di cationi alcalini legati alla sostanza organica (Ca, Mg, K, Na) (Certini, 2005; Leone e Lovreglio, 2011); più raramente si verifica un incremento di pH, dopo la combustione, su suoli aridi o semi-aridi, i quali sono tipicamente alcalini.

Il colore del suolo vira a nerastro per carbonizzazione o al rossastro, per formazione di ossidi di ferro.

Il regime della temperatura, a livello del suolo, cambia temporaneamente per effetto sia della perdita della copertura vegetale che per modificazione del colore del suolo (intensificazione dei fenomeni di albedo); la temperatura del suolo è, inoltre, influenzata dalla perdita dello strato organico, poiché questo risulta essere un efficiente isolante termico.

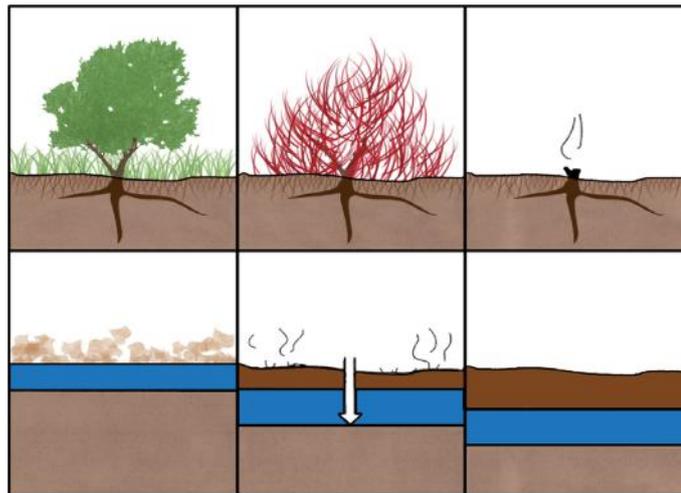
Dopo il passaggio del fuoco, gli orizzonti di superficie del suolo risultano quindi impoveriti in sostanza organica e, conseguentemente, diminuisce l'aggregazione per perdita della sostanza organica (frazione colloidale) che agisce come aggregante (Prosser e Williams, 1998; Jordán et al., 2011; Mataix-Solera et al., 2011).

Le sostanze organiche migrano più in basso formando un diaframma idrorepellente (DeBano, 1969a, 1969b; Giovannini e Lucchesi, 1997; Giovannini et al., 1988; DeBano, 2000; Neary et al., 2005) ad una profondità compresa tra circa 2 e 6 cm (Moody et al., 2005).

Gli effetti immediati sulla vegetazione prodotti dal fuoco, oltre a manifestarsi con il danneggiamento, totale o parziale, riguardano il consumo della sostanza organica degli orizzonti superficiali del suolo, la diminuzione della stabilità degli aggregati e lo sviluppo

di uno strato superficiale impermeabile, anche per effetto dell'intasamento dei pori da parte della cenere e delle particelle più fini.

La formazione dello strato repellente determina una riduzione della capacità di immagazzinamento di acqua nei suoli e, di conseguenza, un aumento del deflusso superficiale (Scott e Van Wyk, 1990; Neary et al., 2005) e fenomeni di erosione diffusa, con conseguenti perdite di suolo e quindi di fertilità, contribuendo in tal modo ad aumentare le aree a rischio di desertificazione.



**Figura 1.2.1:** Formazione dello strato idrorepellente, provocato dalla migrazione delle sostanze idrofobiche al di sotto dello strato superficiale del suolo e loro rideposizione a modesta profondità per effetto del gradiente termico (ridisegnato da DeBano, 1981; Leone e Lovreglio, 2011).

Nel contempo, la parziale o totale eliminazione della copertura vegetale espone il suolo stesso all'azione battente delle piogge, rendendolo ancora più vulnerabile all'erosione da impatto (*splash erosion*) (Leone e Lovreglio, 2011).

Gli incendi possono alterare seriamente la risposta idrologica dei bacini idrografici alle precipitazioni, con un aumento del picco di efflusso e produzione di sedimenti.

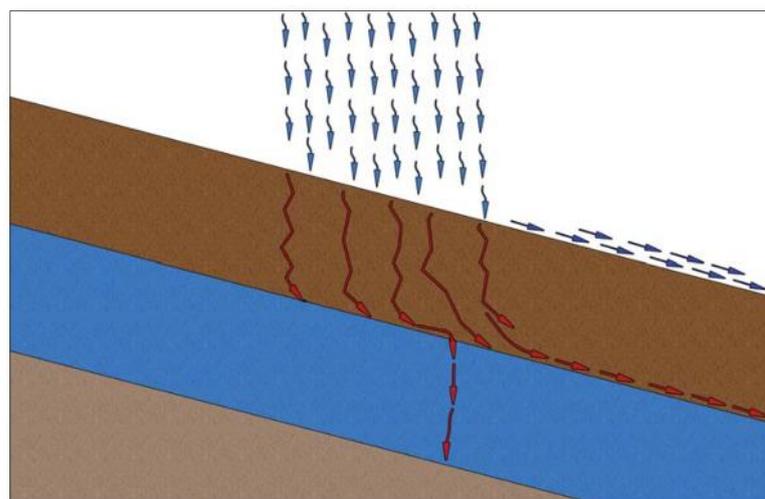
Questi cambiamenti possono essere attribuiti ad alcuni differenti processi fisici che si verificano durante gli incendi, che provocano la riduzione dell'intercettazione dell'acqua dovuta alla alterazione della copertura vegetale, e alla riduzione della velocità di infiltrazione dell'acqua, all'alterazione delle proprietà idrauliche dei suoli, alla creazione di cenere e conseguenti fenomeni di repellenza all'acqua (DeBano et al., 1998; Inbar et al., 1998; DeBano, 2000; Robichaud, 2000; Shakesby e Doerr 2006; Onda et al., 2008; Malkinson e Wittenberg, 2011; Ebel et al., 2012; Stoof et al., 2012; Moody et al., 2013; Leopardi e Scorzini, 2014).

Nel caso dei suoli in aree collinari, in caso di piogge intense, una parte dell'acqua piovana si infiltra rapidamente nello strato superficiale, impregnandolo rapidamente poiché il sottostante diaframma idrorepellente impedisce o rallenta l'infiltrazione profonda (Leone e Lovreglio, 2011).

Inizia così, a causa della pendenza, un flusso laterale interno che, sommandosi allo scorrimento superficiale, non più rallentato dalla copertura vegetale, può causare lo scivolamento e l'asportazione degli orizzonti del suolo più superficiale, con forme di erosione di vario tipo, soprattutto incanalata (Certini, 2005; Leone e Lovreglio, 2011).

Le perdite di suolo per erosione post-incendio possono variare in maniera estrema, in funzione del tipo di suolo, copertura, vegetazione, pendenza, severità dell'incendio, intensità delle precipitazioni, periodo delle precipitazioni (Certini, 2005; Leone e Lovreglio, 2011). Robichaud et al. (2006) riportano potenziale di erosione variabili da  $2\text{Mg ha}^{-1}$  a  $20.000\text{ Mg ha}^{-1}$ .

Dal punto di vista biologico, la biomassa microbica decresce ed il recupero ai livelli pre-incendio dipende principalmente dal processo di ricolonizzazione vegetale. Le modifiche della composizione della comunità microbica sono il risultato di un'azione selettiva del fuoco; in genere i funghi diminuiscono meno dei batteri. La biomassa degli invertebrati terricoli diminuisce, ma meno di quella dei microrganismi, per effetto di un maggiore mobilità. La composizione della biomassa degli invertebrati terricoli cambia notevolmente anche in funzione della diversa resistenza (Certini, 2005; Leone e Lovreglio, 2011).

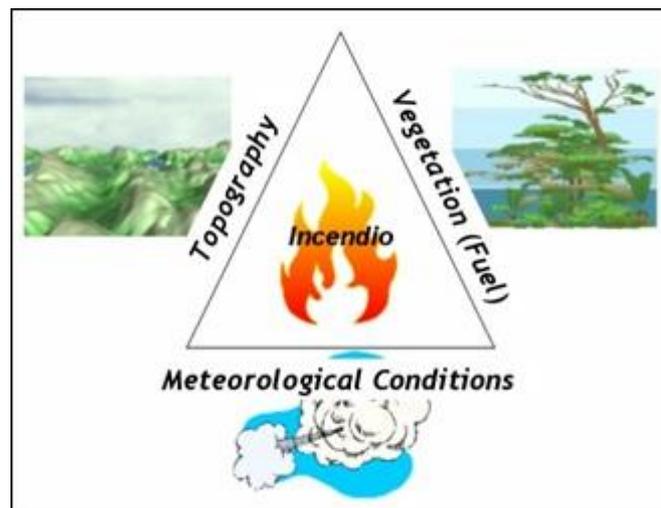


**Figura 1.2.2:** Lo strato idrorepellente impedisce l'infiltrazione dell'acqua e causa scorrimento superficiale (ridisegnato da DeBano, 1969a e 1969b; Leone e Lovreglio, 2011).

### 1.3 I fattori che influiscono il comportamento del fronte di fiamma e i parametri che lo descrivono

Il comportamento di un incendio può essere definito come una combustione che avviene liberamente nello spazio, che consuma combustibili vegetali, che sviluppa un fronte di fiamma la cui propagazione è fortemente influenzata dall'interazione con l'ambiente circostante (Alexander e Cruz, 2013; Fois, 2014). Definire il comportamento di un evento risulta un argomento critico, in quanto la propagazione di un incendio è un fenomeno altamente variabile e dinamico, soprattutto in condizioni ambientali e microstazionali con caratteristiche differenti.

La propagazione di un incendio è influenzata da complesse interazioni tra fattori ambientali (ad esempio le caratteristiche e il tipo di vegetazione, le condizioni meteorologiche, la topografia) (figura 1.3.1) cui vanno a sommarsi fattori di origine antropica; l'interazione di questi fattori tra loro e tra il fuoco stesso ne influenzano anche la diffusione (Agee, 1996; Pyne et al., 1996; Rothermel, 1983; Salis, 2008; Fois, 2014).



**Figura 1.3.1:** Il triangolo dell'ambiente del fuoco, interazione tra caratteristiche e tipo di vegetazione, condizioni meteorologiche, topografia e fuoco (Salis, 2008; Fois, 2014).

Un incendio nelle sue diverse fasi evolutive può presentarsi, dal punto di vista comportamentale, in modo differente in relazione ai diversi fattori; questo fa sì che un evento possa presentare un ventaglio molto ampio di caratteristiche della propagazione stessa del fuoco. L'analisi dei fattori predisponenti, che influenzano l'insorgenza di un incendio, è fondamentale per la conoscenza della modalità di propagazione del fuoco nello spazio rurale (Leone e Lovreglio, 2005).

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

Il comportamento del fuoco è definito dai valori di diversi parametri, tra questi si ricordano i principali: velocità di avanzamento del fronte di fiamma, intensità della linea di fiamma e lunghezza di fiamma.

Il tempo impiegato dal fronte di fiamma per passare da una posizione ad un'altra (da un qualsiasi punto del perimetro), viene definita velocità di avanzamento del fronte di fiamma espresso in  $\text{m min}^{-1}$  (*Surface Rate of Spread*, ROS), le prime conoscenze di questo parametro risalgono al 1919 (Alexander e Cruz, 2013; Fois, 2014).

Un incendio può raggiungere elevati valori di ROS, anche a seguito dell'influenza esercitata dal vento e dalla pendenza. Qualora si abbia l'allineamento tra vento e pendenza, l'effetto cumulativo prodotto dalla loro interazione porta ad un'accelerazione della propagazione del fuoco, al contrario si diffonderà più lentamente nel caso in cui il vento abbia direzione opposta alla pendenza (Pyne, 1996; Fois, 2014).

La velocità di propagazione varia molto a seconda della parte dell'incendio che si considera; l'area in cui si riscontrano dei valori di ROS più alti è quella relativa alla testa dell'incendio, spostandoci sui fianchi si avranno dei valori intermedi, mentre nella coda si registreranno i valori minimi (Bovio e Camia, 2004; Fois, 2014).

L'intensità lineare esprime l'energia emanata nell'unità di tempo e di spazio da un'ideale sezione del fronte di fuoco di un metro di larghezza e della profondità di un metro, si esprime in  $\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$  o in  $\text{kW m}^{-1}$ , (Leone et al., 2008); le differenti tipologie di combustibile a disposizione durante un incendio, concorrono al determinare il quantitativo di energia rilasciata e, di conseguenza, questo mostrerà valori di intensità differenti (Agee, 1996; Chatto e Tolhurst, 2004; Bovio e Camia, 2004; Fois, 2014).

Nella testa di un incendio l'energia sarà più elevata che nei fianchi, i quali a loro volta presenteranno dei valori più alti rispetto a quelli registrati nella parte posteriore o coda di un incendio (Chatto e Tolhurst, 2004; Bovio e Camia, 2004; Fois, 2014).

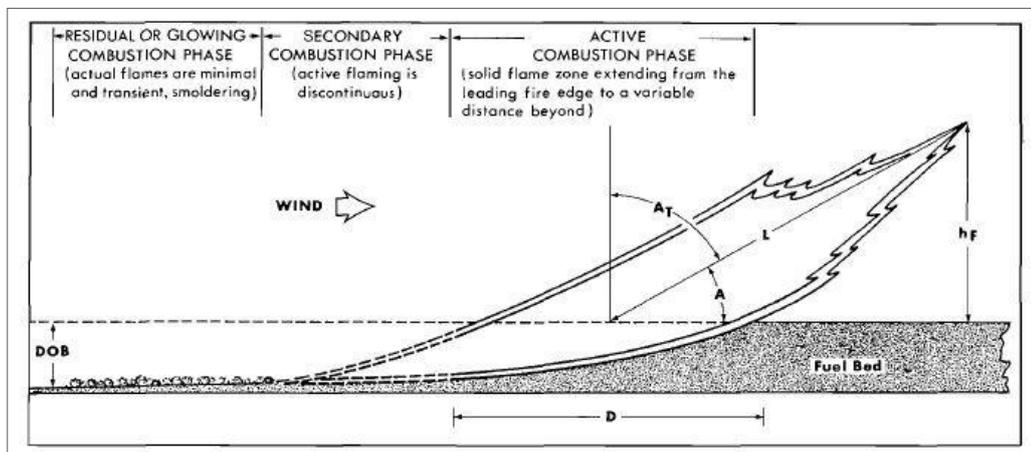
La necessità di determinare l'intensità è giustificata dal fatto che essa viene usata per diversi scopi (Santoni et al., 2011): tra cui valutare gli effetti del trattamento del combustibile sul comportamento del fuoco, stabilire i limiti per i fuochi prescritti, valutare gli impatti di un incendio sull'ecosistema, usato come indicatore per la quantificazione del rischio o come aiuto nelle attività di soppressione di un incendio (Fois, 2014).

Le più comuni espressioni, utilizzate, con risultati peraltro piuttosto contrastanti tra loro, sono riportate nella tabella 1.3.1.

**Tabella 1.3.1:** Espressioni di calcolo dell'intensità lineare in kW/m ( $I$  = intensità lineare del fronte di fiamma,  $L$ = lunghezza del fronte di fiamma), (Lovreglio, 2014).

$I = 295.83 \times L^{2.17}$	Byram
$I = 229.97 \times L^{1.5}$	Thomas
$I = 511.07 \times L^2$	Nelson
$I = 483.27 \times L^{2.03}$	Nelson e Adkins
$I = 300 \times L^2$	Newman

La lunghezza di fiamma in metri (m), è definita come la distanza tra l'estremità della fiamma ed il punto medio del terreno interessato dalle fiamme attive (Rothermel e Deeming 1980; Andrews et al., 2011). La fiamma è assimilabile ad un pannello radiante, variamente inclinato per effetto del vento; in essa si distinguono diverse parti: altezza, lunghezza e profondità. In assenza di vento altezza e lunghezza coincidono mentre in presenza di vento la fiamma è inclinata e l'altezza corrisponde al cateto di un triangolo rettangolo di cui l'ipotenusa è la lunghezza di fiamma (figura 1.3.2), in quest'ultimo caso si considera il parametro lunghezza e non l'altezza perché sempre maggiore (Leone et al., 2008). La profondità della fiamma corrisponde alla larghezza in metri della zona in fiamme lungo il perimetro, in prossimità della testa dell'incendio.



**Figura 1.3.2:** Sezione trasversale della parte anteriore di un incendio di superficie su terreno piano che illustra le fasi di rilascio di energia o calore durante e dopo il passaggio del fronte di fiamma, lunghezza della fiamma ( $L$ ), altezza della fiamma ( $h_f$ ), angolo di fiamma ( $A$ ), angolo di inclinazione della fiamma ( $A_T$ ), profondità orizzontale della fiamma ( $D$ ) e profondità risultante dell'area percorsa ( $DOB$ ). (Fonte: Alexander, 1982), (Fois, 2014).

La lunghezza del fronte di fiamma è correlata al vento e alla pendenza, che rivestono un ruolo predominante nel comportamento di un incendio; il vento allontana l'umidità dai

combustibili, aumenta l'afflusso di ossigeno, ravvivando la combustione, e può determinare l'insorgenza di focolai secondari; la pendenza, a sua volta, può favorire la rapida propagazione, se opera nello stesso senso del vento, ma può anche ostacolare il cammino delle fiamme se rende più difficile la trasmissione di calore (Leone et al., 2008). I valori della lunghezza di fiamma e dell'intensità lineare suggeriscono come comportarsi durante l'attività di spegnimento di un incendio, i due parametri sono strettamente connessi tra di loro. In letteratura sono presenti diverse classificazioni che evidenziano le relazioni che intercorrono tra questi due parametri, tra cui quelle proposte da Roussopoulos e Johnson (1975), da Alexander e Cole (1995), da De Ronde et al. (1990) quest'ultima da utilizzare solamente nell'esecuzione del fuoco prescritto. Ultima in ordine di tempo è quella proposta da Andrews et al. (2011) (tabella 1.3.2) usata come guida non esclusivamente durante le attività di soppressione di un incendio, ma anche dalla comunità scientifica (Fois, 2014).

**Tabella 1.3.2:** Relazione tra la lunghezza di fiamma e l'intensità lineare negli incendi di superficie e interpretazione dei loro valori nelle attività di soppressione dell'incendio (Fonte: Andrews et al., 2011; Fois, 2014).

<b>Lunghezza di fiamma m</b>	<b>Intensità lineare (kW m<sup>-1</sup>)</b>	<b>Interpretazione</b>
< 1.2	<350	Gli incendi possono generalmente essere attaccati alla testa o fianchi da operatori muniti di attrezzi manuali. La fascia realizzata manualmente è in grado di contenere l'incendio.
1.2 – 2.4	350 – 1.700	Gli incendi sono troppo intensi per un attacco diretto alla testa da operatori muniti di attrezzi manuali. La fascia realizzata manualmente non garantisce il contenimento dell'incendio. Possono essere efficaci mezzi meccanici quali le ruspe e sostanze ritardanti
2.4 – 3.4	1.700 – 3.500	Gli incendi possono presentare seri problemi nel controllo (salti di fuoco, incendi di chioma). Le azioni di controllo alla testa dell'incendio possono risultare inefficaci
> 3.4	>3.500	Salti di fuoco, incendi di chioma e accelerazioni improvvise dell'incendio sono probabili. Le azioni di controllo al fronte dell'incendio sono inefficaci.

La ricostruzione a posteriori del comportamento assunto da un incendio, è un lavoro molto difficile; per poter esaminare incendi passati e per avere uno scenario quanto più possibile completo dell'evento è indispensabile avere a disposizione una considerevole quantità di informazioni e di dati. Il metodo più immediato per ottenerle è tramite la consultazione di database, a cui si aggiunge la lettura di rapporti, relazioni o articoli, la comparazione tra foto vecchie e foto recenti (Pyne, 1996; Fois, 2014).

Non sempre è facile acquisire tutti gli elementi necessari alla ricostruzione, o può accadere di recuperare del materiale che fornisce esigue o sommarie informazioni. A causa di tale incertezza e/o scarsità nei dati di input, l'analisi di un incendio avvenuto nel passato può presentare un margine più o meno ampio di errore, che deve essere tenuto in debita considerazione quando si leggono i risultati (Fois, 2014).

## 1.4 La caratterizzazione degli incendi per la valutazione degli effetti del passaggio del fuoco sul suolo

Prevedere il comportamento del fuoco è utile per pianificare la prevenzione e la lotta agli incendi boschivi (es., analisi del rischio) (Salis et al., 2012), a progettare interventi di selvicoltura preventiva (es., fuoco prescritto) (Mou, 2014), a valutare interventi di prevenzione selvicolturale (es., diradamenti) (Reinhardt e Crookstone, 2003), a prevedere gli effetti degli incendi sull'ecosistema (Reinhardt et al., 2001) ed a definire strategie di lotta attiva e formare il personale (Finney, 2006; Lovreglio, 2014).

Caratterizzare un evento, significa determinare i valori dei parametri di comportamento di un incendio quali: velocità di propagazione o di avanzamento del fronte di fiamma, lunghezza di fiamma, intensità lineare, energia calorica rilasciata per unità di superficie.

**Tabella 1.4.1:** Parametri che descrivono il comportamento di un incendio (Lovreglio, 2014).

Velocità di propagazione o di avanzamento del fronte di fiamma	Velocità in $\text{m min}^{-1}$ , con la quale si sposta il fronte di fiamma in testa; dipende da: quantità di biomassa in combustione, velocità del vento, direzione del vento, pendenza e contenuto di umidità dei combustibili
Lunghezza di fiamma	Distanza tra l'estremità della fiamma ed il punto medio del terreno interessato dalle fiamme attive; dipende dalla velocità del vento, dall'altezza della vegetazione e dalla velocità di propagazione
Intensità lineare	Energia emanata nell'unità di tempo e di spazio; si definisce lineare, in quanto costituisce l'energia rilasciata per secondo da una sezione del fronte di fiamme lunga un metro. Si esprime in $\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$ o in $\text{kW m}^{-1}$ ; questa stima la capacità di energia rilasciata dall'incendio
Energia calorica rilasciata per unità di superficie	Quantità di energia emessa per unità di superficie in $\text{kcal m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . È un parametro fondamentale per valutare l'opportunità di uso dell'acqua come mezzo estinguente

Nel determinare gli effetti di un incendio è di fondamentale importanza conoscere le sue caratteristiche in termini di energia sprigionata, di mobilità e di dimensione nel suo complesso, al fine di comprendere meglio l'entità degli effetti che un evento ha sull'ecosistema e, nello specifico, nei primi strati di suolo (Lovreglio, 2014)

Le conseguenze che un incendio può avere sull'ecosistema ed in particolare sul suolo, sono molto variabili in relazione al tipo di incendio, alla sua severità, ovvero in relazione agli effetti che può provocare rispetto alle sue caratteristiche. I valori di energia sprigionata dall'incendio, la modalità di propagazione e le altezze di fiamma correlate con i parametri

che caratterizzano il suolo permettono di interpretare l'entità dell'effetto del fuoco sul comparto edafico.

L'impatto del fuoco sul suolo non è facilmente prevedibile; una migliore comprensione della relazione tra intensità (energia prodotta), (Keeley, 2009) e i cambiamenti indotti sulla superficie del suolo, sulle proprietà fisico-chimiche del suolo, sull'esposizione post-incendio, contribuiscono a migliorare la valutazione del rischio di degradazione dell'ecosistema dopo gli incendi (Stoof et al., 2015).

Il fuoco può dare luogo a un'ampia gamma di effetti sui suoli, nei diversi tipi di ambiente; ciò è dovuto alla variabilità intrinseca della risorsa suolo, alle caratteristiche che assume l'incendio nel suo sviluppo, alla stagione in cui si verifica e alle condizioni ambientali precedenti e successive all'incendio (Blasi et al., 2004).

L'impatto del fuoco sul suolo è in gran parte dettato dalla sua intensità e durata; influiscono, inoltre, il tipo di suolo e le condizioni climatiche (García-Corona et al., 2004).

Il rischio di degradazione del suolo post-incendio è in larga misura determinato da quanto accade alle proprietà del suolo e alla copertura vegetale, durante e dopo l'incendio (Hyde et al., 2007; Cerdà e Doerr, 2008; Cerdà e Robichaud, 2009; Stoof et al., 2012; Guénon et al., 2013).

A seconda dell'intensità, della temperatura del suolo raggiunta, della durata del riscaldamento (Keeley, 2009; Stoof et al., 2010; Mataix-Solera et al., 2011) nonché della velocità di propagazione, gli effetti variano da una riduzione della sostanza organica, della porosità e della conducibilità del suolo, ad aumenti della densità di massa secca (Alauzis et al., 2004; García-Corona et al., 2004; Stoof et al., 2010; Aznar et al., 2013); che può portare ad una diminuzione di ritenzione idrica del suolo (Stoof et al., 2010; Ebel et al., 2012) e della capacità di infiltrazione (Cerdà, 1998; Martin e Moody, 2001). Un altro effetto indotto dal fuoco è lo sviluppo dell'idrorepellenza del suolo (DeBano, 2000) che può ulteriormente ostacolare l'infiltrazione dell'acqua.

Le conseguenze degli incendi sui processi biogeochimici del suolo differiscono al variare dell'intensità del fuoco; in base ai livelli che questa assume, si possono avere (Mazzoleni e Esposito, 2004):

1. effetti primari, che consistono nella deposizione della cenere e nella volatilizzazione dei nutrienti;

2. effetti secondari, che comprendono il dilavamento e l'erosione del suolo, la dissoluzione di ioni, la lisciviazione di ioni al di fuori della rizosfera, la volatilizzazione dell'azoto e degli *inputs* sotto forma di precipitazioni del particolato presente nel fumo;
3. effetti terziari, che influiscono sull'attività microbica, sull'assorbimento di nutrienti da parte delle piante, sulla quantità e la composizione della produzione della lettiera nel post-incendio e sulle varie trasformazioni dell'azoto (nitrificazione, denitrificazione e fissazione dell'azoto) (Mazzoleni e Esposito, 2004).

Tra gli effetti indotti dal fuoco sulla superficie del suolo, si hanno dei cambiamenti molto pronunciati nelle condizioni di insolazione e temperature post-incendio; queste variazioni possono sussistere per periodi più o meno lunghi, a seconda delle formazioni vegetali considerate, e influiscono in modo significativo sullo sviluppo dei processi chimici e biologici.

Gli incendi, a seconda del grado di intensità, possono indurre alterazioni dei cicli del carbonio e dell'azoto in ecosistemi che presentano condizioni limitanti, come quelli che caratterizzano l'area mediterranea (Mazzoleni e Esposito, 2004). La quantità dei nutrienti a disposizione dopo un incendio è variabile ed è strettamente correlata all'intensità dell'evento.

In letteratura sono presenti lavori in cui si mostra una forte correlazione tra l'intensità dell'evento con effetti sul suolo; ad esempio l'erosione risulta, in generale, tanto più notevole quanto maggiore è l'intensità di incendio; la profondità e lo spessore dello strato idrofobo sono direttamente correlati all'intensità, alle temperature raggiunte dal fuoco e alle caratteristiche locali del suolo. Una maggiore idrorepellenza nelle zone colpite dal fuoco è stata riscontrata da diversi autori (DeBano et al., 1970; DeBano, 2000; Doerr et al., 2000). La quantità di sostanza organica consumata dal fuoco dipende dal contenuto di umidità del suolo, dalla quantità e dalla durata del riscaldamento e dalla quantità disponibile per la combustione o la distillazione (Persiani, 2004). La sostanza organica è uno dei parametri più frequentemente utilizzati come indicatore di cambiamento ambientale, a causa delle sue numerose funzioni legate alla crescita delle piante in condizioni naturali, alle capacità di trattenere acqua e apportare sostanze nutritive (González-Pérez et al., 2004; Garcia-Corona, 2004). I cambiamenti indotti dal fuoco sulla

quantità e qualità della sostanza organica sono fattori chiave che controllano la risposta di un ecosistema dopo un incendio (Certini, 2005; Abella e Engel, 2013).

Sulla componente biologica, incendi di forte intensità, che raggiungano temperature di 700-800 °C sulla superficie del suolo, provocano una pressoché totale sterilizzazione nei primi centimetri dell'orizzonte superficiale (0-5 cm), causando una riduzione nella biomassa e nel numero delle specie (Persiani, 2004, Harmon et al., 2011).

Svariati parametri fisici, chimici e biologici del suolo, sono utilizzati come indicatori affidabili per misurare il recupero delle funzioni del suolo dopo processi di alterazione causati da un disturbo naturale (Schimann et al., 2012; Dinesh e Chaudhuri, 2013).

La conoscenza di questi parametri e di quelli relativi all'incendio permette di definire meglio e con maggiore accuratezza le tecniche di recupero per favorire il ripristino di un determinato ecosistema.

## **1.5 I modelli di simulazione del comportamento del fuoco e l'uso del software BehavePlus 5.0.5**

Nelle ultime decadi sono stati sviluppati diversi modelli di propagazione di calcolo del comportamento degli incendi boschivi (Sullivan, 2009a, 2009b, 2009c; Arca et al., 2015). Diversi lavori hanno mostrato che la stima accurata dei parametri che caratterizzano l'incendio, come ad esempio l'intensità del fuoco e la velocità di propagazione, sono rilevanti poiché determinano le modalità di propagazione e consentono la valutazione dei limiti al di là dei quali l'incendio supera le capacità di soppressione di operatori e mezzi impegnati nelle operazioni di spegnimento (Arca et al., 2015).

Il comportamento degli incendi è dato dall'interazione di fattori altamente variabili nello spazio e nel tempo (ad esempio le caratteristiche e il tipo di vegetazione, le condizioni meteorologiche, la topografia); questi fattori rappresentano i dati di input presi in considerazione dai modelli di simulazione del comportamento del fronte di fiamma (Fois, 2014).

Negli ultimi anni, l'aumento nelle capacità di telerilevamento, della potenza di calcolo e dei sistemi di informazione geografica ha permesso un miglioramento della modellizzazione e simulazione della propagazione degli incendi boschivi e di conseguenza sulla prevenzione e sulla gestione della tecnica degli incendi (Fiorucci et al., 2007; Sullivan, 2009a; Fois, 2014).

Diversi sono gli approcci modellistici attraverso i quali può essere effettuata la modellizzazione di un incendio; i modelli di propagazione sono stati nell'ultimo decennio oggetto di svariate modifiche. Sulla base di queste sono stati classificati in base alla natura delle equazioni (fisico, empirica e semi- empirica), al sistema fisico modellato (modelli di incendi di superficie, di incendi di chioma, di *spot fire*, di incendi sotterranei) ed infine alle variabili studiate (modelli di propagazione degli incendi boschivi e modelli delle proprietà del fronte di fuoco) (Pastor et al., 2003; Sullivan, 2009a; Sullivan, 2009b).

I modelli di comportamento del fuoco sono generalmente composti da equazioni numeriche e gli output descrivono l'evoluzione temporale e spaziale di uno o più parametri (es: velocità di propagazione, intensità lineare, altezza di fiamma, etc) (Cerapiá, 2006; White et al., 2013).

Tra i vari modelli, il più citato in letteratura, è il modello di propagazione del fuoco di Rothermel (1972) (Wells, 2008). Rothermel formulò nel 1972 il suo modello semi-

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

empirico per stimare l'intensità e la velocità di propagazione del fuoco (White et al., 2013).

Nel 1980 il modello di Rothermel iniziò ad essere usato intensamente, e, nel corso degli anni, è stato la base dello sviluppo di diversi nuovi strumenti di analisi anche in ambiente GIS (Wells, 2008). Fino ad oggi, le sue equazioni sono state incorporate nei moderni software di previsione del comportamento del fuoco, come ad esempio BehavePlus (Andrews et al., 2003), FARSITE (Finney, 2004) e FlamMap (Finney, 2006), (White et al., 2013). Il modello è basato su un'equazione di conservazione dell'energia, opportunamente calibrata mediante esperimenti di combustione condotti in laboratorio in condizioni controllate (Arca et al., 2015).

In fase di applicazione il modello, ha bisogno di informazioni sulle condizioni ambientali (velocità del vento e pendenza del terreno) e sulle caratteristiche del combustibile vegetale (carico di combustibile, altezza dello strato, umidità di estinzione, calore specifico ecc.) (Arca et al., 2015).

L'uso di modelli matematici per prevedere il comportamento e l'effetto del fuoco è un passo importante nella gestione degli incendi.

Alcuni software di previsione del comportamento del fuoco utilizzano il modello di Rothermel in combinazione con altri modelli come quello di Byram (1959), di Van Wagner (1977), per esempio, in BehavePlus sono 35 i modelli matematici descritti in 42 pubblicazioni, integrati nel suo database (Andrews, 2008). Le equazioni non solo descrivono le varie caratteristiche di comportamento del fuoco, così come il suo impatto sull'ambiente, ma formula una serie di raccomandazioni per estinguerlo (White et al., 2013).

BehavePlus 5.0.5 (Andrews, 2009), è un software di modellizzazione del fuoco, basato su modelli matematici, descrive il comportamento del fuoco e l'ambiente in cui esso si sviluppa; è un sistema flessibile che produce tabelle, grafici e diagrammi semplici (Andrews, 2009).

Può essere utilizzato per svariate applicazioni: prevenzione degli incendi e attività di mitigazione, gestione territoriale, istruzione delle forze preposte allo spegnimento, pianificazione del territorio (Andrews, 2009; White et al., 2013).

Il software Behave è stato ideato per prevedere il potenziale comportamento di un incendio boschivo a scala locale (Arca et al., 2015); esso nasce come "*Behave: fire*

*behavior prediction system*”; ampliato e modificato, viene oggi chiamato BehavePlus (Wagtendonk, 1996; White et al., 2013).

I dati input richiesti da BehavePlus sono in funzione degli output che si desidera ottenere; le informazioni base interessano il modello di combustibile, l’umidità del combustibile, i fattori topografici e climatici.

Behave usa i modelli di combustibile sviluppati dal Northern Forest Fire Laboratory (NFFL), e in particolare 13 modelli di combustibile noti come *Standard Fire Behavior Fuel Models* (Albini, 1976; Anderson, 1982; Burgan e Rothermel, 1984) e i cosiddetti modelli di combustibile "40+" di Scott e Burgan (2005) (Arca et al., 2015).

BehavePlus è uno dei software maggiormente utilizzati al mondo (Andrews, 2010). In letteratura si trovano diverse applicazioni di BehavePlus, che hanno verificato la sua utilità in differenti aree geografiche quali Grecia (Dimitrakopoulos, 2002), Portogallo (Fernandes, 2002), Stati Uniti (Mohr et al., 2004, 2010; Cruz e Alexander, 2010; Vollmer, 2005), Brasile (Mistry e Berardi, 2005; White, 2010), Italia (Duce et al., 2012), (White et al., 2013).

## 2. Obiettivi della ricerca

Lo studio di ricerca scientifica analizza gli effetti indotti dal passaggio del fuoco sul suolo e sulle sue caratteristiche fisico-chimico-idrologiche in relazione ai differenti tipi di incendi ed alle eterogenee condizioni ambientali delle aree campione.

Il lavoro di ricerca è articolato in diverse fasi di indagine:

1. individuazione delle aree di ricerca sulla base di analisi ambientali delle componenti pedologiche, morfologiche e vegetazionali delle zone di studio;
2. campionamento degli orizzonti di suolo di superficie (orizzonti A) tramite l'uso di una griglia a maglie regolari nelle aree di ricerca selezionate;
3. caratterizzazione degli incendi verificatesi nelle aree di ricerca, attraverso la stima e interpretazione dei parametri del comportamento del fronte di fiamma;
4. analisi fisico-chimiche sui campioni prelevati, al fine di determinare diversi parametri ritenuti di particolare interesse quali pH, conducibilità elettrica (CE), sostanza organica (SO), azoto totale (N<sub>tot</sub>), fosforo totale (P<sub>tot</sub>), tessitura, densità apparente, idrofobicità;
5. comparazione dei risultati delle analisi chimico-fisiche, ottenuti su aree percorse ed aree testimone sulla base della tipologia di substrato interessato;
6. valutazione delle eventuali alterazioni delle caratteristiche fisico-chimiche del suolo per effetto del passaggio del fuoco e in relazione al diverso tipo di incendio.

### 3. Individuazione aree di studio

Le aree di ricerca sono state individuate sulla base dei seguenti aspetti, utili alla definizione di precise zone di studio:

1. aree percorse da incendio con una superficie maggiore o uguale ai 100 ettari;
2. distinzione tra superfici percorse dal fuoco ricadenti su substrati acidi (intrusivi del tipo granito) e basici (calcari); queste tipologie rappresentano infatti i substrati maggiormente presenti in Sardegna per estensione ed importanza pedo-paesaggistica. I suoli che caratterizzano tali substrati si distinguono solitamente in maniera netta per caratteristiche fisico-chimiche e pedogenetiche;
3. caratterizzazione in base alle condizioni climatiche e vegetazionali il più possibile comparabili.

Nello specifico si riportano le metodiche di indagine relative alle fasi di analisi precedentemente descritte.

Per la redazione della cartografia necessaria all'individuazione e caratterizzazione delle aree di studio è stato utilizzato il Geoportale della Regione Sardegna ([www.sardegnageoportale.it](http://www.sardegnageoportale.it)) che ha permesso di disporre dei seguenti strati informativi vettoriali e raster:

1. Perimetrazione delle aree percorse da incendi negli anni 2005-2006-2007-2008-2009-2010-2012-2013 (in formato ESRI shapefile), questo strato informativo fornisce le informazioni relative al perimetro, all'area percorsa e la tipologia di soprassuolo vegetale interessata dal passaggio del fuoco;
2. Limiti amministrativi della Regione Sardegna (in formato ESRI shapefile), che riporta i limiti amministrativi comunali;
3. Carta dell'uso del Suolo in scala 1:25.000 (anno 2008, in formato ESRI shapefile), realizzata a partire dall'edizione del 2003 contiene le informazioni relative all'uso reale del suolo, suddivisa secondo le classi del progetto Corine Land Cover;
4. Modello Digitale del terreno (DEM), modello di dati raster che rappresenta l'elevazione del terreno, attraverso il DEM è possibile effettuare l'analisi della pendenza e dell'esposizione;

5. Carta Fitoclimatica (Arrigoni, 1968) (in formato ESRI shapefile), questa mostra la distribuzione geografica delle diverse associazioni vegetali associate ai parametri climatici.

Altra fonte consultata è il Geoportale Ispra Ambiente ([www.geoportale.isprambiente.it](http://www.geoportale.isprambiente.it)) che ha fornito:

1. Carta della Natura della Regione Sardegna (anno 2009, in formato ESRI shapefile), scala 1:50.000, che rappresenta in modo sintetico il territorio con i vari elementi non solo di valore naturale ma anche di degrado e di fragilità degli ecosistemi. La legenda, per la Regione Sardegna, riporta 41 dei 230 habitat individuati nell'intero territorio Nazionale, classificati secondo il sistema europeo CORINE Biotopes.

È stato inoltre utilizzato il seguente strato informativo:

1. Carta dei suoli della Regione Sardegna (Aru et. al, 1991), nella sua versione digitalizzata in formato ESRI shapefile, che identifica la distribuzione areale dei vari raggruppamenti di suoli con caratteri simili in funzione dei possibili usi.

La cartografia di base disponibile ed utilizzata ha permesso, con elaborazioni effettuate con uno specifico Sistema Informativo Territoriale (Qgis), di realizzare le seguenti carte:

1. carta delle aree percorse con superficie maggiore o uguale ai 100 ettari per gli anni 2005-2006-2007-2008-2009-2010-2012-2013;
2. carta dei paesaggi su rocce intrusive (graniti, granodioriti, leucograniti, ecc.) del Paleozoico e relativi depositi di versante e su calcari, dolomie e calcari dolomitici del Paleozoico e del Mesozoico e relativi depositi di versante;
3. carta fitoclimatica della Regione Sardegna;
4. carta dei suoli;
5. carta delle pendenze;
6. carta dell'esposizione.

Al fine di definire le diverse aree dal punto di vista climatico, le informazioni sono state fornite dal Servizio tutela e gestione delle risorse idriche, vigilanza sui servizi idrici e gestione della siccità della Regione Autonoma della Sardegna. È stato altresì utilizzato lo Studio sull'Idrologia Superficiale della Sardegna, elaborato dalla Regione Autonoma della Sardegna (1998).

Sulla base delle carte prodotte e dei dati climatici è stato possibile per ciascuna delle aree di ricerca acquisire le informazioni relative a:

1. aspetti vegetazionali;
2. caratteristiche pedologiche;
3. dati relativi all'incendio (superficie percorsa, data, luogo, stazione e STIR competente);
4. caratteristiche climatiche.

Per ogni anno analizzato, sono stati osservati due incendi avvenuti in aree con caratteristiche simili dal punto di vista del substrato (sia acido che basico), climatico (clima simile per ogni area individuata all'interno dello stesso anno) e dimensioni in ettari dell'area percorsa da incendio.

Sulla base di quanto precedentemente riportato, gli anni in cui sono stati individuati eventi con caratteristiche simili sono il 2007-2008-2010-2013.

Per ogni annata analizzata, tra gli incendi sono stati considerati due eventi, particolarmente significativi per individuare le aree in cui condurre le caratterizzazioni relative al suolo e al tipo di incendio.

Si riporta solo un esempio, per illustrare l'applicazione della metodologia di identificazione delle aree di ricerca, considerando il substrato, il clima e l'estensione dell'area percorsa.

Considerando l'anno 2007, sono stati selezionati due precisi eventi, entrambi caratterizzati da superfici superiori ai 100 ettari, avvenuti in aree a substrati diversi (acidi e basici) e a condizioni climatiche simili.

Il primo evento del 2007 selezionato è a Teulada, in località Barracca de Frisas, su substrati acidi; il secondo è avvenuto ad Iglesias, in località Rio Anguiddas, su substrati basici.

Per ognuna delle aree selezionate, sulla base dell'analisi cartografica per le aree percorse (2007-2008-2010-2013) si riportano di seguito le tabelle (tabella 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8) riepilogative delle informazioni sugli eventi analizzati e sulle caratteristiche ambientali delle zone di studio identificate.

**Tabella 3.1:** Area percorsa su substrato acido anno 2007

Data	18/07/2007
Località	Barracca De Frisas
Area	300.296137 ha
Stazione	Teulada
Stir	Cagliari
Temperatura	Temperatura media annua 17.5°C, temperatura media mese più freddo 9.8°C, temperatura media mese più caldo 25.9°C
Sigla pedologica	C2
Morfologia	Aree con forme da aspre a sub pianeggianti al di sotto degli 800-1.000 m. Aree con forme aspre e pendenze elevate. Aree con forme da aspre a sub pianeggianti
Copertura vegetale	Gariga, aree a pascolo naturale, macchia mediterranea
Tassonomia	Typic, Dystric, Lithic Xerorthents, Typic, Dystric, Lithic Xerochrepts, Rock Outcrop, subordinatamente Palexeralfs, Haploxeralfs Rock Outcrop, Lithic Xerorthents, subordinatamente Xerochrepts
Att int	Conservazione e ripristino della vegetazione naturale; a tratti colture arboree previa sistemazione dei versanti ed opere per la regimazione dei deflussi. Conservazione e ripristino della vegetazione naturale; eliminazione del pascolamento
Unità cartografica	9
Descrizione	Paesaggi su rocce intrusive (graniti, granodioriti, leucograniti, ecc.) del Paleozoico e relativi depositi di versante
Sigla unità	c1-c2
Descrizione profilo	Profili A-C, A- Bw- C, roccia affiorante e subordinatamente suoli a profilo A- Bt- C, da poco a mediamente profondi, da sabbioso franchi a franco sabbioso argillosi, permeabili, da subacidi ad acidi, parzialmente desaturati. Rocca affiorante, suoli a profilo A-C e subordinatamente A-Bw-C, poco profondi, da sabbioso franchi a franco sabbiosi, permeabili, acidi, parzialmente desaturati
Reazione	Da subacida ad acida, acida
Permeabilità	Permeabili
Erodibilità	Elevata
Tessitura	Da sabbioso-franca a franco- sabbioso-argillosa
Profondità	Da poco profondi a mediamente profondi. Poco profondi
Substrato	Rocce intrusive (graniti, granodioriti, leucograniti, ecc.) del Paleozoico e relativi depositi di versante
Limitazioni	A tratti, rocciosità e pietrosità elevate, scarsa profondità, eccesso di scheletro. Forte pericolo di erosione
Capacità d'uso	VII-VI-IV

**Tabella 3.2:** Area percorsa su substrato basico anno 2007

Data	14/07/2007
Località	Rio Anguiddas
Area	268.236144 ha
Stazione	Iglesias
Stir	Iglesias
Temperatura	Temperatura media annua 17°C, temperatura media mese più freddo 8.7°C, temperatura media mese più caldo 26.5°C
Sigla pedologica	A1
Morfologia	Aree con forme accidentate, da aspre a sub pianeggianti ("tacchi")
Copertura vegetale	Macchia mediterranea, bosco di latifoglie, prati artificiali
Tassonomia	Rock Outcrop, Lithic Xerorthents, subordinatamente Rhodoxeralfs, Haploxerolls
Att int	Conservazione e ripristino della vegetazione naturale; evitare il pascolamento
Unità cartografica	1
Descrizione	Paesaggi su calcari, dolomie e calcari dolomitici del Paleozoico e del Mesozoico e relativi depositi di versante
Sigla unità	A1
Descrizione Profilo	Rocca affiorante e suoli a profondità variabile nelle anfrattuosità della roccia, con profili A-R e subordinatamente A- Bt- R, argillosi, poco permeabili, neutri, saturi
Reazione	Neutra
Permeabilità	Poco permeabili
Erodibilità	Elevata
Tessitura	Argillosa
Profondità	Variabile
Substrato	Calcari, dolomie e calcari dolomitici del Paleozoico e del Mesozoico e relativi depositi di versante
Limitazioni	Rocciosità e pietrosità elevate, scarsa profondità, forte pericolo di erosione.
Capacità d'uso	VIII-VII

**Tabella 3.3:** Area percorsa su substrato acido anno 2008

Data	15/08/2008
Località	Cuguranti
Area	134.904155 ha
Stazione	Muravera
Stir	Cagliari
Temperatura	Temperatura media annua 18°C, temperatura media mese più freddo 10.1 °C, temperatura media mese più caldo 27 °C
Sigla pedologica	C2
Morfologia	Aree con forme da aspre a sub pianeggianti al di sotto degli 800-1.000 m.
Copertura vegetale	Macchia mediterranea, aree con vegetazione rada >5% e 40%, seminativi in aree non irrigue, sistemi colturali e particellari complessi, aree agroforestali, frutteti e frutti minori, gariga
Tassonomia	Typic, Dystric, Lithic Xerorthents, Typic, Dystric, Lithic Xerochrepts, Rock Outcrop, subordinatamente Palexeralfs, Haploxeralfs
Att_int	Conservazione e ripristino della vegetazione naturale; a tratti colture arboree previa sistemazione dei versanti ed opere per la regimazione dei deflussi
Unità cartografica	9
Descrizione	Paesaggi su rocce intrusive (graniti, granodioriti, leucograniti, ecc.) del Paleozoico e relativi depositi di versante
Sigla pedologica	C2
Descrizione profilo	Profili A-C, A-Bw-C, roccia affiorante e subordinatamente suoli a profilo A-Bt-C, da poco a mediamente profondi, da sabbioso franchi a franco sabbioso argillosi, permeabili, da subacidi ad acidi, parzialmente desaturati
Reazione	Da subacida ad acida
Permeabilità	Permeabili
Erodibilità	Elevata
Tessitura	Da sabbioso-franca a franco- sabbioso- argillosa
Profondità	Da poco profondi a mediamente profondi
Substrato	Rocce intrusive (graniti, granodioriti, leucograniti, ecc.) del Paleozoico e relativi depositi di versante.
Limitazioni	A tratti, rocciosità e pietrosità elevate, scarsa profondità, eccesso di scheletro. Forte pericolo di erosione
Capacità d'uso	VII-VI-IV

**Tabella 3.4:** Area percorsa su substrato basico anno 2008

Data	23/08/2008
Località	Terraseo-Gutturu sa Saracca
Area	175.096238 ha
Stazione	Carbonia
Stir	Iglesias
Temperatura	Temperatura media annua 17°C, temperatura media mese più freddo 8.7°C, temperatura media mese più caldo 26.5°C
Sigla pedologica	A1
Morfologia	Aree con forme accidentate, da aspre a sub pianeggianti ("tacchi")
Copertura vegetale	Macchia mediterranea, bosco latifoglie, prati artificiali, seminativi in aree non irrigue
Tassonomia	Rock Outcrop, Lithic Xerorthents, subordinatamente Rhodoxeralfs, Haploxerolls
Att_int	Conservazione e ripristino della vegetazione naturale; evitare il pascolamento
Unità cartografica	1
Descrizione	Paesaggi su calcari, dolomie e calcari dolomitici del Paleozoico e del Mesozoico e relativi depositi di versante
Sigla pedologica	A1
Descrizione profilo	Rocce affiorante e suoli a profondità variabile nelle anfrattuosità della roccia, con profili A-R e subordinatamente A-Bt-R, argillosi, poco permeabili, neutri, saturi
Reazione	Neutra
Permeabilità	Poco permeabili
Erodibilità	Elevata
Tessitura	Argillosa
Profondità	Variabile
Substrato	Calcari, dolomie e calcari dolomitici del Paleozoico e del Mesozoico e relativi depositi di versante
Limitazioni	Roccosità e pietrosità elevate, scarsa profondità, forte pericolo di erosione
Capacità d'uso	VIII-VII

**Tabella 3.5:** Area percorsa su substrato acido anno 2010

Data	30/07/2010
Località	Genna Intremontes
Area	134.897600 ha
Stazione	Tortoli
Stir	Lanusei
Temperatura	Temperatura media annua 15.8°C, temperatura media mese più freddo 7.3 °C, temperatura media mese più caldo 25.8 °C
Sigla pedologica	C2
Morfologia	Aree con forme da aspre a sub pianeggianti al di sotto degli 800-1000 m.
Copertura vegetale	Aree con vegetazione rada >5% e 40%, gariga, seminativi semplici e colture orticole a pieno campo
Tassonomia	Typic, Dystric, Lithic Xerorthents, Typic, Dystric, Lithic Xerochrepts, Rock Outcrop, subordinatamente Palexeralfs, Haploxeralfs
Att_int	Conservazione e ripristino della vegetazione naturale; a tratti colture arboree previa sistemazione dei versanti ed opere per la regimazione dei deflussi
Unità cartografica	9
Descrizione	Paesaggi su rocce intrusive (graniti, granodioriti, leucograniti, ecc.) del Paleozoico e relativi depositi di versante
Sigla pedologica	C2
Descrizione profilo	Profili A-C, A-Bw-C, roccia affiorante e subordinatamente suoli a profilo A-Bt-C, da poco a mediamente profondi, da sabbioso franchi a franco sabbioso argillosi, permeabili, da subacidi ad acidi, parzialmente desaturati
Reazione	Da subacida ad acida
Permeabilità	Permeabili
Erodibilità	Elevata
Tessitura	Da sabbioso-franca a franco- sabbioso-argillosa
Profondità	Da poco profondi a mediamente profondi
Substrato	Rocce intrusive (graniti, granodioriti, leucograniti, ecc.) del Paleozoico e relativi depositi di versante.
Limitazioni	A tratti, rocciosità e pietrosità elevate, scarsa profondità, eccesso di scheletro. Forte pericolo di erosione
Capacità d'uso	VII-VI-IV

**Tabella 3.6:** Area percorsa su substrato basico anno 2010

Data	24/07/2010
Località	S'Uttu e su Para
Area	134.537800 ha
Stazione	Carbonia – Iglesias
Stir	Sant'Antioco
Temperatura	Temperatura media annua 17.4°C, temperatura media mese più freddo 11.2°C, temperatura media mese più caldo 24.6°C
Sigla pedologica	A1
Morfologia	Aree con forme accidentate, da aspre a sub pianeggianti ("tacchi")
Copertura vegetale	Macchia mediterranea, gariga, bosco latifoglie, seminativi in aree non irrigue
Tassonomia	Rock Outcrop, Lithic Xerorthents, subordinatamente Rhodoxeralfs, Haploxerolls
Att_int	Conservazione e ripristino della vegetazione naturale; evitare il pascolamento
Unità cartografica	1
Descrizione	Paesaggi su calcari, dolomie e calcari dolomitici del Paleozoico e del Mesozoico e relativi depositi di versante
Sigla pedologica	A1
Descrizione profilo	Rocce affiorante e suoli a profondità variabile nelle anfrattuosità della roccia, con profili A-R e subordinatamente A-Bt-R, argillosi, poco permeabili, neutri, saturi
Reazione	Neutra
Permeabilità	poco permeabili
Erodibilità	Elevata
Tessitura	Argillosa
Profondità	Variabile
Substrato	Calcari, dolomie e calcari dolomitici del Paleozoico e del Mesozoico e relativi depositi di versante
Limitazioni	Roccosità e pietrosità elevate, scarsa profondità, forte pericolo di erosione
Capacità d'uso	VIII-VII

**Tabella 3.7:** Area percorsa su substrato acido anno 2013

Data	07/08/2013
Località	Cuili e Lepori Sinnai
Area	415.73 ha
Stazione	Sinnai
Stir	Cagliari
Temperatura	Temperatura media annua 17.5°C, temperatura media mese più freddo 9.8 °C, temperatura media mese più caldo 25.9 °C
Sigla pedologica	C2
Morfologia	Aree con forme da aspre a sub pianeggianti al di sotto degli 800-1000 m.
Copertura vegetale	Bosco latifoglie, macchia mediterranea, aree a ricolonizzazione naturale, Aree prevalentemente occupate da colture agrarie boschi misti di conifere e latifoglie, bosco latifoglie, gariga, cespuglietti e arbusteti
Tassonomia	Typic, Dystric, Lithic Xerorthents, Typic, Dystric, Lithic Xerochrepts, Rock Outcrop, subordinatamente Palexeralfs, Haploxeralfs
Att_int	Conservazione e ripristino della vegetazione naturale; a tratti colture arboree previa sistemazione dei versanti ed opere per la regimazione dei deflussi.
Unità cartografica	9
Descrizione	Paesaggi su rocce intrusive (graniti, granodioriti, leucograniti, ecc.) del Paleozoico e relativi depositi di versante
Sigla pedologica	C2
Descrizione Profilo	Profili A-C, A-Bw-C, roccia affiorante e subordinatamente suoli a profilo A-Bt-C, da poco a mediamente profondi, da sabbioso franchi a franco sabbioso argillosi, permeabili, da subacidi ad acidi, parzialmente desaturati.
Reazione	Da subacida ad acida
Permeabilità	Permeabili
Erodibilità	Elevata
Tessitura	Da sabbioso-franca a franco-sabbioso-argillosa
Profondità	Da poco profondi a profondi
Substrato	Rocce intrusive (graniti, granodioriti, leucograniti, ecc.) del Paleozoico e relativi depositi di versante.
Limitazioni	A tratti: pietrosità elevata, scarsa profondità, eccesso di scheletro. Forte pericolo di erosione.
Capacità d'uso	VII-VI-IV

**Tabella 3.8:** Area percorsa su substrato basico anno 2013

Data	08/08/2013
Località	Bidda Beccia
Area	2469.83 ha
Stazione	Isili, Laconi
Stir	Cagliari, Oristano
Temperatura	Temperatura media annua 14.1°C, temperatura media mese più freddo 6.4°C, temperatura media mese più caldo 23.1 °C
Sigla pedologica	A1
Morfologia	Aree con forme accidentate, da aspre a sub pianeggianti ("tacchi").
Copertura vegetale	Macchia mediterranea, aree a ricolonizzazione artificiale, aree a ricolonizzazione naturale, aree a pascolo naturale, bosco di latifoglie, bosco di conifere, seminativi in aree non irrigue, aree agroforestali, prati artificiali,
Tassonomia	Rock Outcrop, Lithic Xerorthents, subordinatamente Rhodoxeralfs, Haploxeralfs
Att_int	Conservazione e ripristino della vegetazione naturale; evitare il pascolamento.
Unità cartografica	1
Descrizione	Paesaggi su calcari, dolomie e calcari dolomitici del Paleozoico e del Mesozoico e relativi depositi di versante
Sigla pedologica	A1
Descrizione profilo	Rocce affiorante e suoli a profondità variabile nelle anfrattuosità della roccia, con profili A-R e subordinatamente A-Bt-R, argillosi, poco permeabili, neutri, saturi.
Reazione	Neutra
Permeabilità	Poco permeabile
Erodibilità	Elevata
Tessitura	Argillosa
Profondità	Variabile
Substrato	Calcari, dolomie e calcari dolomitici del Paleozoico e del Mesozoico e relativi depositi di versante
Limitazioni	Rocciosità e pietrosità elevate, scarsa profondità, forte pericolo di erosione.
Capacità d'uso	VIII-VII

Per le otto aree individuate è stato simulato, in ambito GIS, un piano di campionamento di suolo, costituito da una griglia a maglia regolare con passo di 100 metri, al fine di ottenere una distribuzione omogenea dei punti di campionamento. All' interno della griglia si distingue l'area percorsa e quella non percorsa adiacenti, con caratteristiche geologiche, pedologiche, morfologiche e vegetazionali il più possibile omogenee.

Attraverso un'ulteriore analisi cartografica effettuata a video, è emersa la necessità di effettuare una successiva cernita delle otto aree oggetto di studio inizialmente individuate: Tale ulteriore selezione si è basata su alcuni parametri ovvero:

1. Accessibilità dell'area: valutata sulla base della morfologia più o meno accidentata, punti di accesso alle aree di campionamento con l'impiego di automezzi e presenza di corsi d'acqua. Per l'individuazione di questi elementi si è resa necessaria un'analisi effettuata sulla cartografia tecnica regionale, le ortofoto (anno 2010) e de modello digitale del terreno (DTM).
2. Omogeneità della copertura vegetale analizzata attraverso l'ausilio della Carta d'Uso del suolo (2008) e della Carta della Natura della Regione Sardegna (2009). Questo parametro è valutato sulla base dei dati emersi dall'analisi delle carte sopraelencate. L'analisi di queste due supporti cartografici ha permesso di individuare le aree in cui l'uso del suolo è caratterizzato da una maggiore presenza di formazioni forestali.
3. Omogeneità geo-pedologica definita sulla base dell'analisi della carta dei suoli della Sardegna (1991).

Sulla base dei parametri precedentemente citati sono pertanto state escluse le seguenti aree:

1. Rio Anguiddas Iglesias: scarsa omogeneità vegetazionale, difficoltà d'accesso;
2. Rio Cuguranti, Muravera: morfologia estremamente accidentata; copertura del suolo caratterizzata da seminativi e altre colture;
3. Terraseo, Gutturu sa Saracca, Narcao: morfologia accidentata con elevate pendenze (25-50%);
4. Genna Intremontes, Lotzorai: area parzialmente ricadente su alveo di fiume, la copertura del suolo è prevalentemente a vocazione agricola;
5. Barracca De Frisas, Teulada: area ricadente all'interno di Demanio Militare;
6. Cuili 'e Lepori, Sinnai: morfologia accidentata con elevate pendenze (>30%).

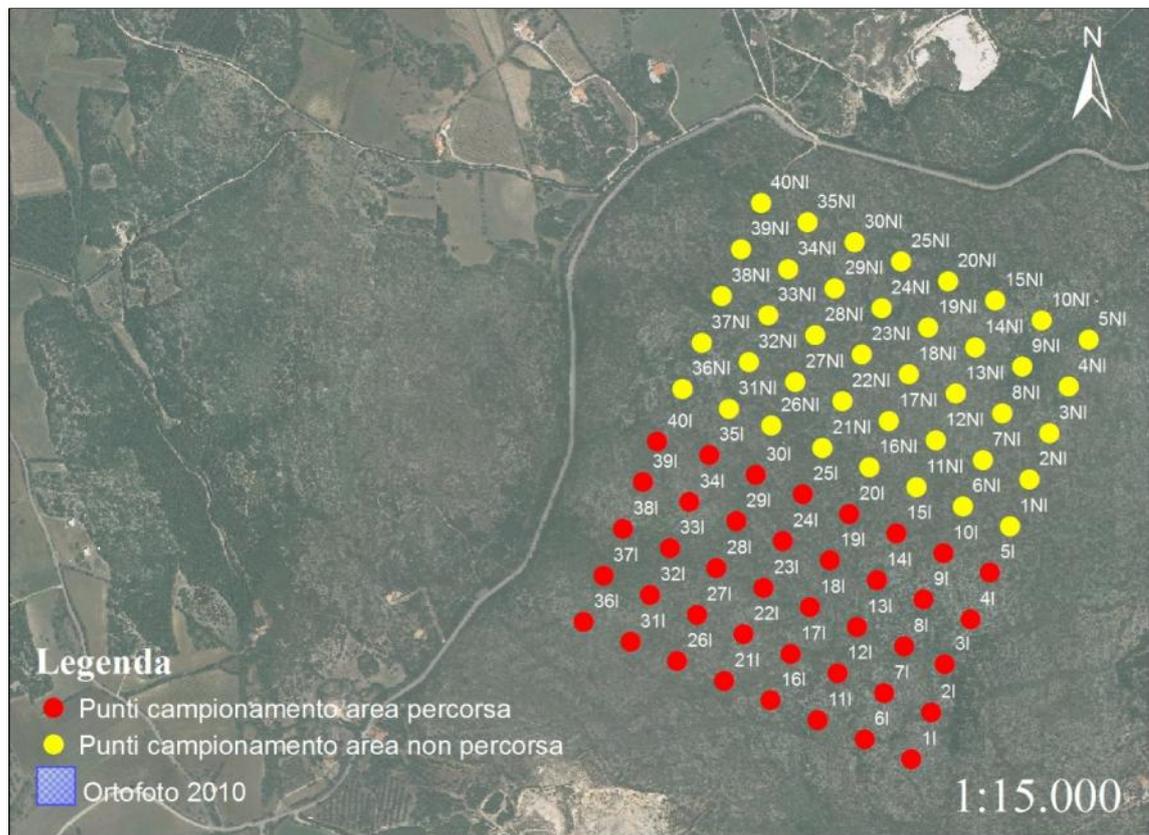
Pertanto, per successiva esclusione le aree individuate sono le seguenti

1. S'Uttu e su Para, Sant'Antioco;
2. Bidda Beccia, Isili e Laconi.

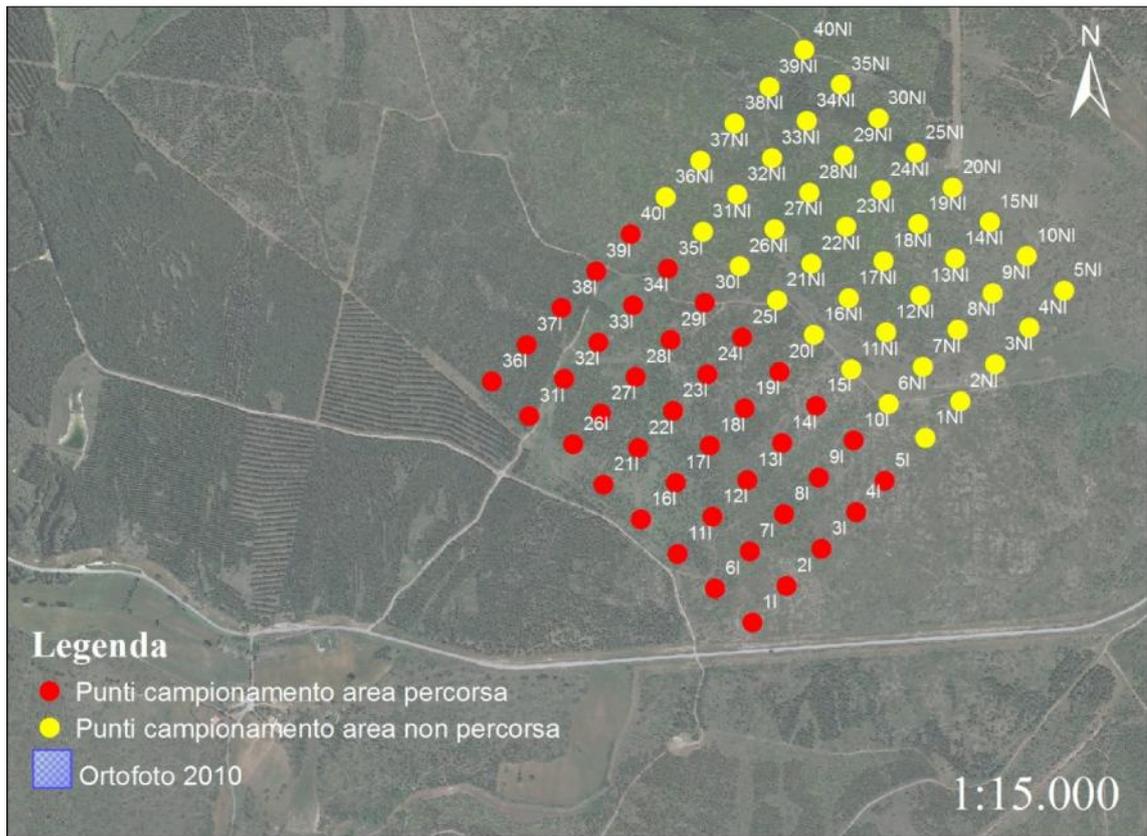
Le tabelle riepilogative (3.6 e 3.8) precedentemente riportate, descrivono le caratteristiche geo-pedologiche, climatiche e vegetazionali delle aree individuate.

Su tali aree attraverso un campionamento a griglia a maglia regolare, con passo di 100 metri, sono stati identificati 80 punti di cui 40 ricadenti all'interno dell'area percorsa da incendio e 40 nella zona non interessata dal passaggio del fuoco (figura 3.1 e 3.2)

Ciascun punto di campionamento è identificato tramite precise coordinate geografiche (latitudine e longitudine, WGS 1984, EPSG 4326), e attraverso un codice alfanumerico (per esempio il punto 2I indica il punto due dell'area incendiata e viceversa il punto 2NI il punto 2 dell'area non interessata dal passaggio del fuoco).



**Figura 3.1:** Griglia Campionamento Sant'Antioco località "S'Uttu 'e su para", 2010.



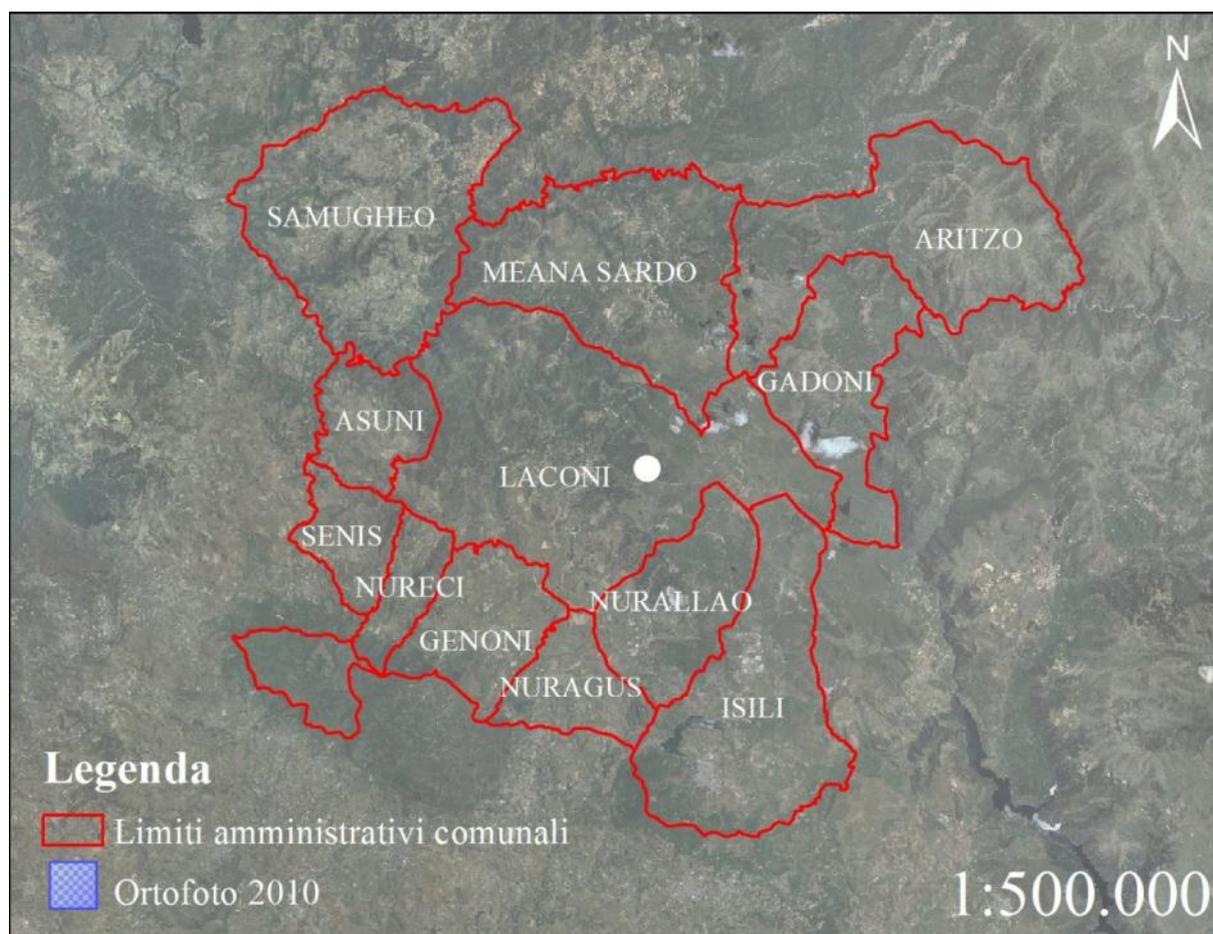
**Figura 3.2:** Punti campionamento area percorsa "Bida Beccia" Isili/Laconi/Nurallao, 2013.

### 3.1 Inquadramento area di studio Laconi

#### 3.1.1 Localizzazione geografica

L'area di studio ricade all'interno del Comune di Laconi (<https://goo.gl/maps/feHMsrLDzqR2>) (<https://goo.gl/maps/ooPWK7gBxEk>), che si estende nella Sardegna centrale, nel settore nord-occidentale dell'altopiano del Sarcidano, su un'area vasta circa 12 mila ha, appartiene amministrativamente alla provincia di Oristano.

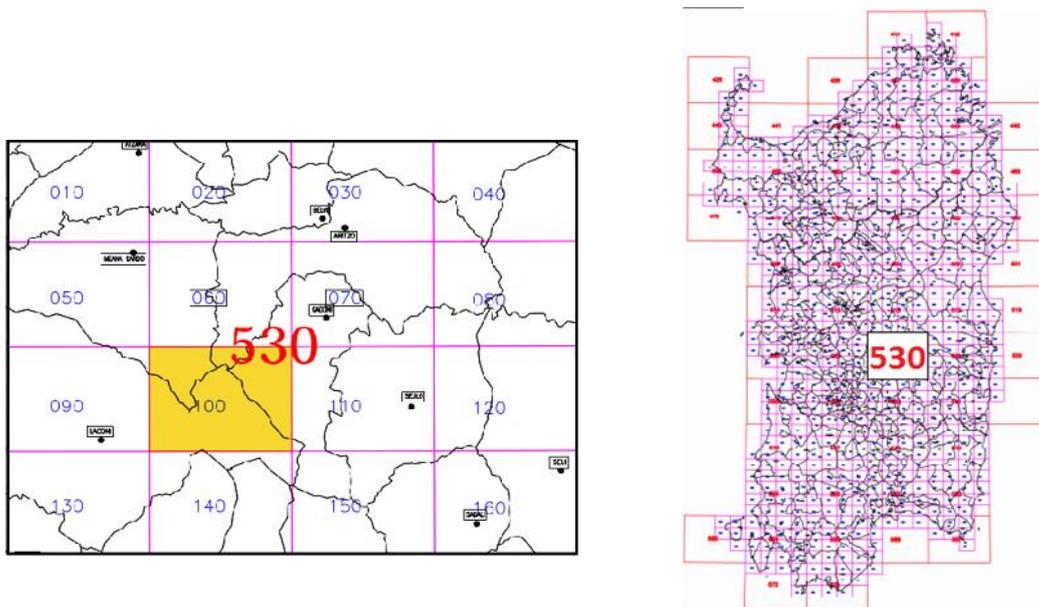
Confina a settentrione con le aree montane di Meana Sardo e di Aritzo, ad oriente con il Comune di Gadoni; sul versante meridionale, invece, divide i confini con Isili, Nurallao, Nuragus, Genoni, Nureci e, ad occidente, con Senis, Asuni e Samugheo. Il territorio del Comune di Laconi è per la maggior parte compreso nel Sub-Bacino del Tirso e per il restante nel Sub-Bacino del Flumendosa.



**Figura 3.1.1.1:** Localizzazione geografica area di studio Comune di Laconi, scala 1:500.000.

Dal punto di vista della cartografia, il territorio rientra nella carta topografica d'Italia I.G.M. in scala 1:25.000, Foglio n° 530 sez. III/Laconi, mentre ricade nella sezione 530100 della Carta Tecnica Regionale (CTR), 1:10.000.

L'area ricade all'interno del Complesso Forestale di Gestione Sarcidano, e più precisamente all'interno dell'unità di gestione di base (UGB) "Su Lau"; questa è costituita da terreni, interamente ricadenti nel Comune di Laconi, gestiti tramite l'occupazione temporanea ai sensi del Regio Decreto Legislativo 30 dicembre 1923, n.3267. «Riordinamento e riforma della legislazione in materia di boschi e di terreni montani».



**Figura 3.1.1.2:** Localizzazione area di studio sulla Carta Tecnica Regionale (CTR).

### 3.1.2 Inquadramento climatico

Il clima dominante nell'area di studio di Laconi è di tipo mediterraneo interno, caratterizzato da inverni miti e relativamente piovosi ed estati secche e calde (Melosu, 2013).

Il territorio di Laconi, al confine tra le zone pianeggianti e collinari della Marmilla e Trexenta e alle zone più interne dai caratteri continentali della Barbagia e del Gennergentu, presenta un clima tipicamente di collina, nel complesso abbastanza mite, con limitate escursioni termiche diurne, buona ventilazione e scarsa inversione termica (Melosu, 2013).

Per delineare i caratteri climatici dell'area di studio sono state acquisite ed analizzate le serie storiche dei dati termo-pluviometrici rilevati nelle stazioni meteorologiche ricadenti nel territorio indagato. L'analisi delle serie storiche è stata condotta con l'ausilio dei dati forniti dal Servizio tutela e gestione delle risorse idriche, vigilanza sui servizi idrici e gestione della siccità della Regione Autonoma della Sardegna e con l'ausilio dei dati contenuti nello Studio sull'Idrologia Superficiale della Sardegna, elaborato dalla Regione Autonoma della Sardegna (1998).

Dall'elaborazione dei dati rilevati nella stazione termometrica disponibile di Sarcidano (699 m), si è calcolato che per il periodo 1988-2002 la temperatura media annua è di 14.1°C

I mesi più freddi sono gennaio e febbraio con temperature medie di 6.4 e 6.7 °C, i mesi più caldi, luglio e agosto, registrano rispettivamente medie tra 23.1 e 23.2°C.

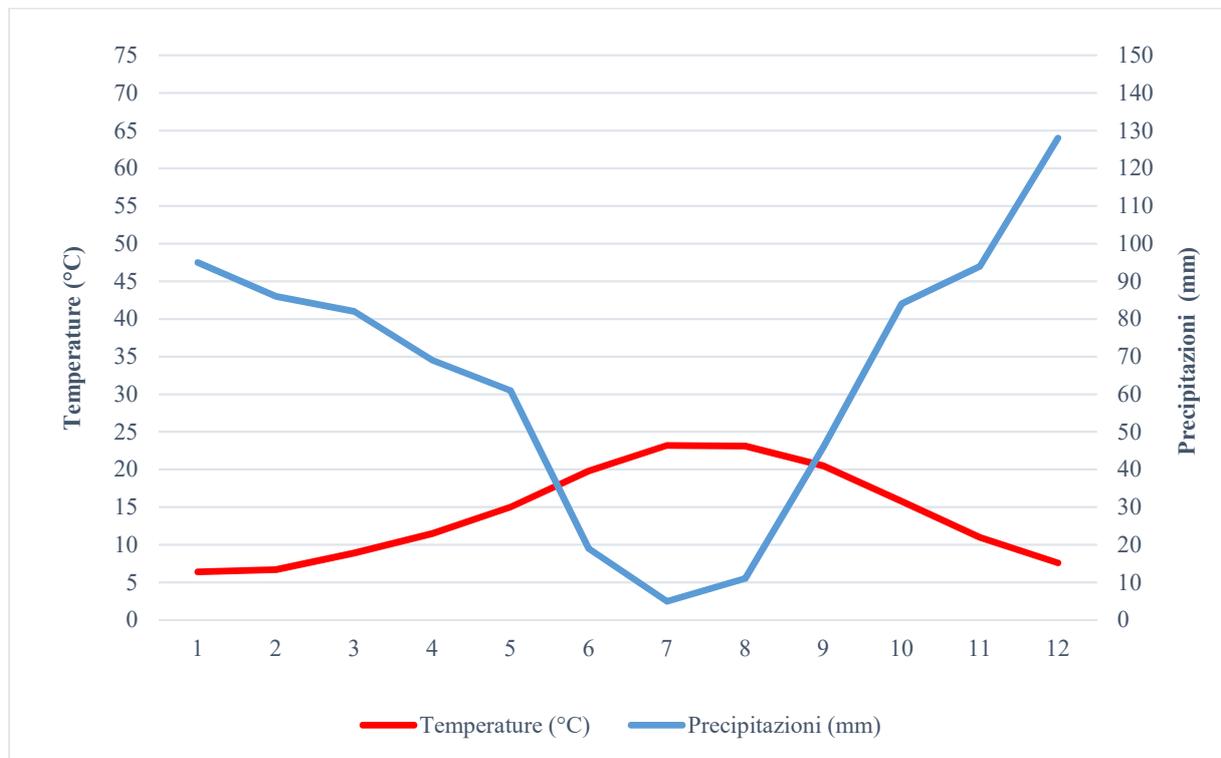
Per quanto riguarda le precipitazioni, i dati rilevati alla stazione di Laconi (637 m), indicano valori medi annui pari a 780 mm/a; le precipitazioni più abbondanti si registrano nella stagione invernale, mentre gli eventi ad alta intensità si collocano per lo più durante i mesi autunnali (ottobre-novembre); il mese più piovoso, con valori medi di 128 mm/m, è dicembre, quello più asciutto è luglio, con 5 mm/m.

I venti predominanti sono quelli occidentali, soprattutto del IV quadrante (circa 44%). Su tutti domina, soprattutto nella stagione invernale, il maestrale, che soffia da Nord-Ovest e porta masse d'aria fredde in inverno e calde d'estate.

In base alla classificazione fitoclimatica del Pavari (1916), il territorio dell'area di studio ricade nella fascia fitoclimatica del Lauretum, sottozona media con siccità estiva.

Dall'elaborazione dei dati termo-pluviometrici della stazione meteorologica del Sarcidano è stato poi possibile ricavare il diagramma di Walter e Lieth (1960) (figura 3.1.2.1).

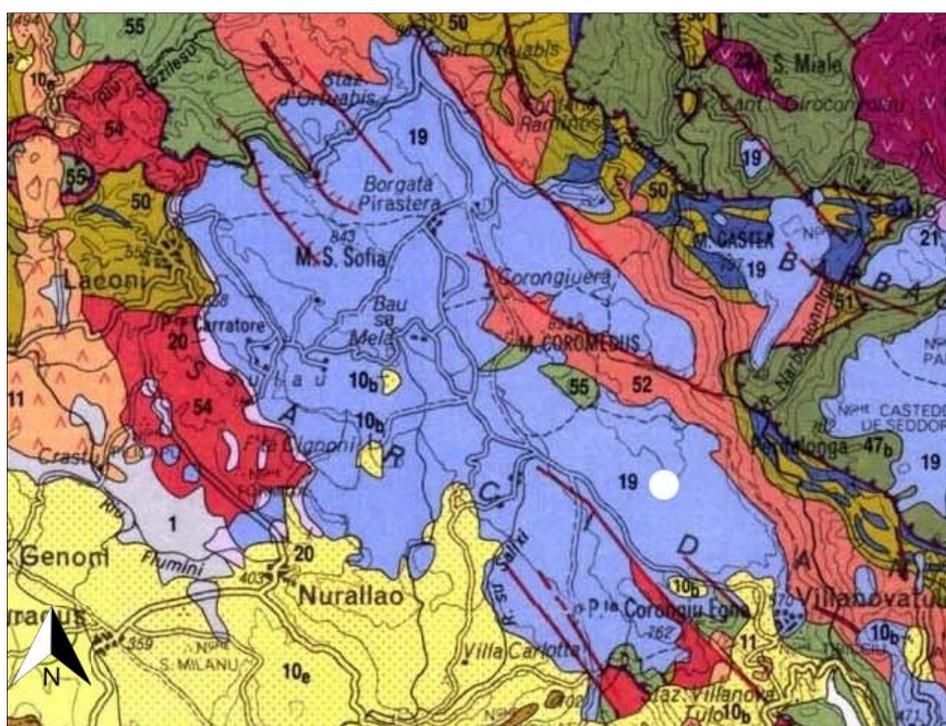
È evidente dal diagramma che il periodo arido ha una lunga durata, inizia ai primi di giugno e si protrae fino a settembre, comprendendo quattro mesi. Il mese più freddo risulta essere gennaio (con una media annua di 6.4°C) mentre quello più caldo è il mese di luglio (con una media annua di 23.2 °C).



**Figura 3.1.2.1:** Climatogramma Walter e Lieth, stazione Sarcidano (699 m).

### 3.1.3 Inquadramento geologico e geomorfologico

Dal punto di vista geologico (Carmignani et al., 2001), il territorio in esame ricade nel complesso geologico delle coperture post-erciniche, all'interno delle quali rientrano le Unità sviluppate su coperture sedimentarie e vulcaniche, in particolare le successioni marine e transizionali del Triassico medio - Cretacico inferiore (205-66.7 Ma.). A tali successioni, a loro volta, appartengono le successioni Giurassiche della Sardegna Orientale (Unità 18<sub>a</sub> e 19) e della Sardegna occidentale (18<sub>b</sub>); l'area di studio ricade all'interno dell'Unità 19.

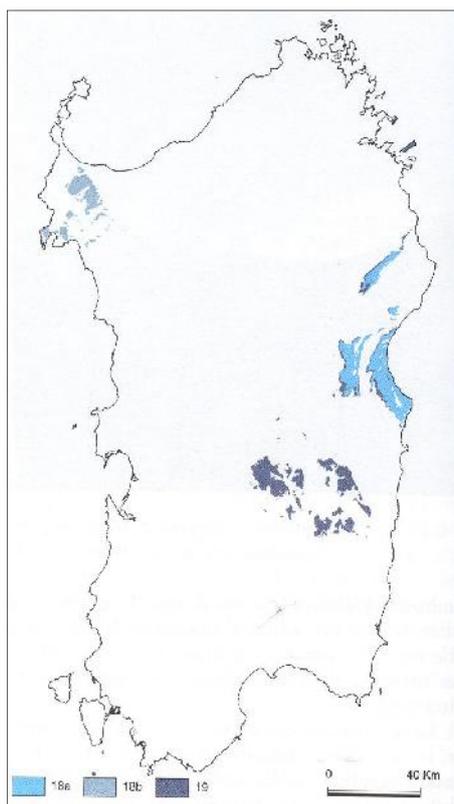


**Figura 3.1.3.1:** Estratto cartografico della Carta Geologica d'Italia, scala 1:200.000 (Carmignani et al., 2001); unità geologiche presenti nel territorio in esame (19).

[www.geologi.sardegna.it/documenti/cartografia-geologica/](http://www.geologi.sardegna.it/documenti/cartografia-geologica/)

19	Copertura sedimentaria e vulcanica	Successioni marine e transizionali del Triassico Medio - Cretacico Inferiore: Successione della Sardegna Orientale (19 Dogger-Malm) - Dolomie, dolomie arenacee, calcari dolomitici da litorali a circalitorali con Foraminiferi bentonici e planctonici, Calcifere, Alghe calcaree, Belemniti, Ammoniti, Echinodermi; conglomerati arenarie quarzose, siltiti e argille fluvio-deltizi, con livelli lignitiferi e con resti di Piante e Sporomorfi.
----	------------------------------------	--

**Figura 3.1.3.2:** Descrizione unità geologica presente nel territorio in esame (19) (Carmignani et al., 2001).



**Figura 3.1.3.3:** Ubicazione affioramenti della Successione Giurassica della Sardegna Orientale - 18<sub>a</sub>-19 e Occidentale - 18<sub>b</sub> (Carmignani et al., 2001).

La successione Giurassica della Sardegna orientale, i cui affioramenti vengono rappresentati in figura 3.1.3.3, costituisce l'ossatura dei rilievi carbonatici della Sardegna a partire dai massicci del Monte Albo, del Monte Tuttavista e del Supramonte (Golfo di Orosei e Baronie) fino ai rilievi dell'Ogliastra, del Sarcidano e della Barbagia conosciuti col nome di "Tacchi" o "Toneri". Nella Sardegna sud-orientale la successione Giurassica è costituita dalla formazione di Genna Selole e dalla formazione di Dorgali, la cui potenza è di circa 70 metri, mentre risulta più potente (diverse centinaia di metri) spostandosi verso nord (Barbagia e Baronie).

La formazione di Dorgali affiora estesamente nella regione dei "Tacchi" (Sarcidano, Salto di Quirra, Ogliastra) e lungo i bordi dei rilievi carbonatici del Supramonte (Barbagia), del Monte Tuttavista e del Monte Albo (Baronie). Si tratta di arenarie dolomitiche alla base, che divengono dolomie di colore bruno alla sommità. Sia l'età che lo spessore della formazione di Dorgali sono molto variabili; nelle zone costiere risale completamente al Bathoniano (Giurassico medio,  $167.7 \pm 3.5 - 164.7 \pm 4.0$  Ma), verso ovest è di età più recenti, fino al Kimmeridgiano superiore (Giurassico superiore o primo Giurassico  $155.7 \pm 4.0 - 150.8 \pm 4.0$  Ma). Lo spessore varia da un massimo di circa 300 metri a circa 200 metri (Carmignani et al., 2001).

### 3.1.4 Inquadramento delle unità pedologiche presenti

L'area di studio ricade all'interno di unica unità pedologica, ovvero l'Unità 1, si riporta di seguito la tabella 3.1.4.1, che descrive in modo schematico le principali caratteristiche dell'unità pedologica presente nell'area di studio (Aru et al., 1991).

**Tabella 3.1.4.1:** Descrizione unità pedologica 1(Aru et al.,1991).

	<b>Unità 1</b>	
Substrato	Calcari, dolomie e calcari dolomitici del Paleozoico e del Mesozoico	
Forme	Accidentate, da aspre a sub-pianeggianti	
Suoli predominanti	Rock Outcrop, Lithic Xerorthents	
Suoli subordinati	Rhodoxeralfs; Haploxerolls	
Caratteri dei suoli	profondità	Variabile
	tessitura	Argillosa
	struttura	Grumosa, poliedrica sub-angolare ed angolare
	permeabilità	Scarsa
	erodibilità	Elevata
	reazione	Neutra
Limitazioni d'uso	Rocciosità e pietrosità elevate, scarsa profondità, forte pericolo di erosione	
Attitudini	Conservazione e ripristino della vegetazione naturale; eliminazione totale del pascolamento	
Classe capacità d'uso	VIIIIVII	

L'Unità 1 è caratterizzata da suoli che si sviluppano in paesaggi su calcari, dolomie e calcari dolomitici del Mesozoico e relativi depositi di versante. Si tratta dell'unica unità presente nell'area in cui sono stati effettuati i campionamenti di suolo. Questa unità caratterizza il paesaggio sulle dolomie, poiché contraddistingue tipologie di paesaggio tra le più suggestive dell'isola e presenta un rilevante interesse scientifico; in essa si riscontrano infatti i relitti dell'antica copertura dei suoli e spesso di specie vegetali endemiche della Sardegna (Aru et al., 1991).

A causa del clima, in cui periodi di massime precipitazioni (novembre e dicembre) coincidono con bassi valori della temperatura, seguiti da un periodo di aridità di circa quattro mesi, i

processi pedogenetici sono limitati ad un breve periodo primaverile e ad un più lungo periodo autunnale. Le principali limitazioni d'uso che, a scala vasta, caratterizzano le Unità Pedologiche presenti nell'area di studio, risultano: il forte pericolo di erosione; lo scarsissimo spessore del suolo; l'elevata pietrosità e rocciosità.

### 3.1.5 Inquadramento vegetazionale

Dal punto di vista vegetazionale l'area oggetto di studio è caratterizzata dalla presenza di estensioni boschive naturali, semi-naturali e artificiali. In particolare si riportano le tipologie vegetazionali forestali presenti:

#### Lecceta

La lecceta presente rientra nella serie di vegetazione *Prasio Majoris-Quercetum ilicis quercetosum virgilianae* (PFAR, 2007), serie sarda calcicola mesomediterranea del leccio. È una serie prettamente calcicola che si insedia su substrati originati da calcari e marne mioceniche, ad altitudini comprese tra i 400 e i 700 m s.l.m. La struttura del popolamento indica un ceduo con matricine di origine agamica, la specie dominante è costituita dal leccio, al quale si associano l'*Arbutus unedo* L., la *Phyllirea* spp. e *Pistacia lentiscus* L. che si presenta molto densa con altezza delle piante compresa tra i 2.5-3 m. Lo strato arbustivo è costituito da *Pistacia lentiscus* L., *Rhamnus alaternus* L., *Viburnum tinus* L., *Crataegus monogyna* Jacq., *Arbutus unedo* L. e *Osyris alba* L. e da specie lianose; tra queste sono frequenti *Clematis vitalba* L., *Rosa sempervirens* L., *Hedera helix* L. subsp. *helix*, *Tamus communis* L., *Smilax aspera* L., *Rubia peregrina* L. e *Lonicera implexa* Aiton. mentre quello erbaceo è occupato in prevalenza da *Arisarum vulgare* Targ.Tozz, *Cyclamen repandum* Sibth. e Sm. e *Allium triquetrum* L. (PFAR, 2007).

#### Impianti artificiali

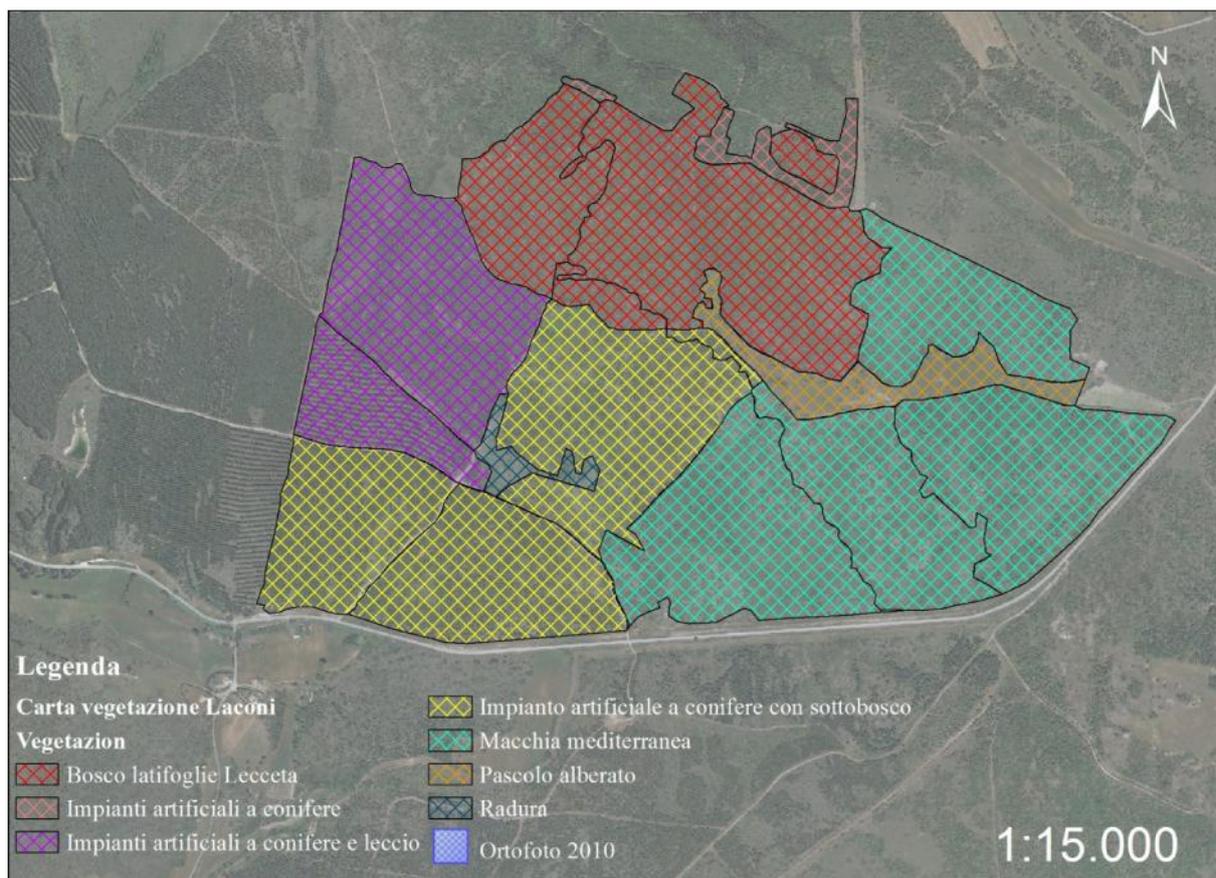
Gli impianti artificiali a conifere risalgono a metà degli anni '50 con i rimboschimenti a *Pinus pinea* L., eseguiti in seguito all'occupazione ai sensi del RDL 3267/23 "Riordinamento e riforma della legislazione in materia di boschi e di terreni montani". I successivi rimboschimenti risalgono invece agli anni '70 - '80 e primi anni '90; le specie maggiormente impiantate sono *Pinus pinea* L., *Pinus halepensis* Mill., e *Pinus brutia* Ten., *Pinus nigra* J.F. Arnold. (SardegnaForeste, [www.sardegnaambiente.it](http://www.sardegnaambiente.it)). Tutte le specie sono rappresentate in questi impianti, con una densità tra l'80 e l'85%; sono inoltre presenti specie esotiche impiantate a scopo sperimentale, tra queste si riscontrano il *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti., il *Cupressus sempervirens* L. e *Cupressus arizonica* L.

Nell'area sono presenti due tipologie di impianti artificiali: nella tipologia 1 il soprassuolo è costituito da *Pinus pinea* L., *Pinus halepensis* Mill., *Pinus brutia* Ten. e *Pinus nigra* J.F. Arnold. che rappresentano il piano arboreo dominante; il piano dominato arbustivo è costituito da specie tipiche della macchia mediterranea come *Pistacia lentiscus* L., *Arbutus unedo* L., *Juniperus oxycedrus* L. con altezza media di circa 1.5 m.

La tipologia 2 è caratterizzata da un impianto artificiale di conifere/latifoglie, nello specifico *Pinus halepensis* Mill. e *Quercus ilex* L., che ricopre il piano dominato, il cui sviluppo è stato compromesso dalla presenza dominante del pino; infatti l'altezza massima raggiunta è di circa 1m.

### **Macchia mediterranea**

La macchia mediterranea è costituita prevalentemente da *Myrtus communis* L., *Arbutus unedo* L., *Phyllirea* spp., *Pistacia lentiscus* L., *Juniperus oxycedrus* L. con la presenza di *Quercus ilex* L. e *Quercus suber* L. Questa formazione deriva spesso da degradazione avvenuta in passato a causa di incendi e sovra pascolamento, praticati sino agli anni '70 – '80. L'eliminazione del fattore di disturbo ha portato allo sviluppo ed all'evoluzione della formazione a macchia che, a seconda delle differenze di tempo trascorso e delle caratteristiche stazionali, si presenta in diversi stadi di sviluppo.



**Figura 3.1.5.1:** Carta della vegetazione, scala 1:15.000, realizzata dopo i sopralluoghi in campo.



**Figura 3.1.5.2:** Formazione a leccio e specie della macchia mediterranea.

## 3.2 Inquadramento area di studio Sant'Antioco

### 3.2.1 Localizzazione geografica

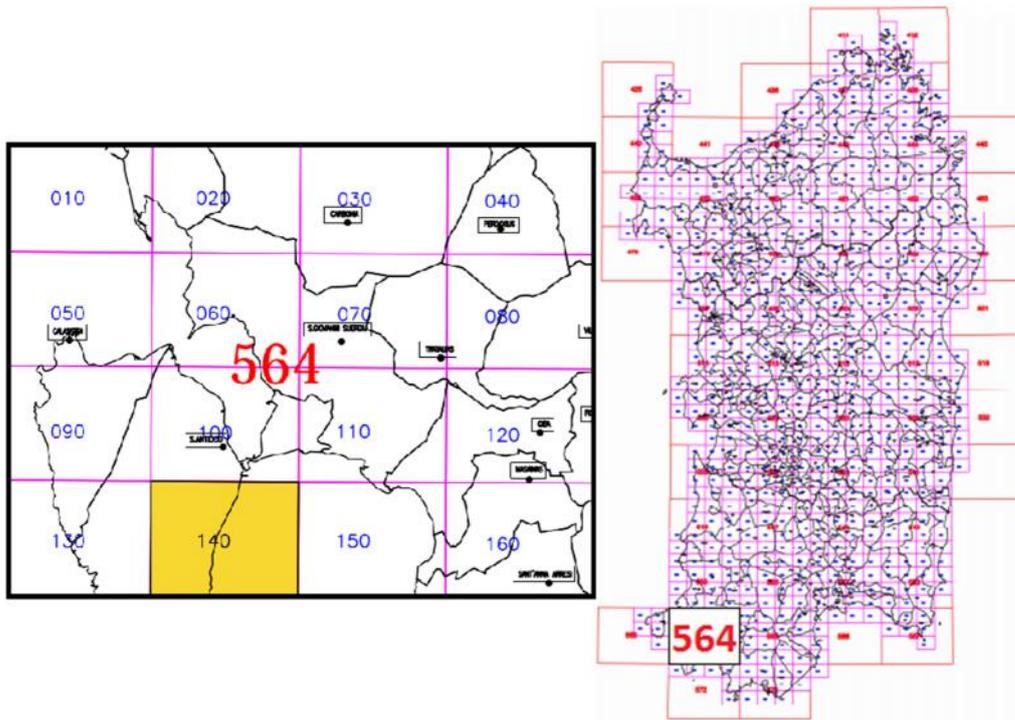
L'area di indagine è sita nella Sardegna sud-occidentale (<https://goo.gl/maps/NYiCnNFxnKt>), all'interno dell'isola di Sant'Antioco e più precisamente nella parte sud-est dell'isola all'interno del Comune di Sant'Antioco (<https://goo.gl/maps/fz8GCxFkbS32>); questo possiede una superficie complessiva di ha 8753, dista da Cagliari 84 km circa ed è collegato all'isola madre grazie a un istmo artificiale.

Confina a settentrione con Calasetta, a oriente con il Comune di San Giovanni Suergiu ed è bagnata dal Mar di Sardegna sia ad oriente che ad occidente.



**Figura 3.2.1.1:** Localizzazione geografica area di studio, scala 1:500.000.

Dal punto di vista della cartografia il territorio rientra nella carta topografica d'Italia I.G.M. in scala 1:25.000, fogli n° 564 sez. III Sant'Antioco e 572 sez. IV Capo Sperone. L'area ricade all'interno della sezione 564140 della Carta Tecnica Regionale (CTR), 1:10.000. La principale via di accesso all'area in cui sono stati effettuati i campionamenti è costituita dalla strada provinciale n.75.



**Figura 3.2.1.2:** Localizzazione geografica area di studio su Carta Tecnica Regionale (CTR).

### 3.2.2 Inquadramento climatico

Il clima dominante nell'area di studio è di tipo mediterraneo subtropicale, caratterizzato da inverni miti ed estati calde, con scarse precipitazioni (Grosso e Pilia, 2011).

Per delineare i caratteri climatici dell'area di studio sono state acquisite ed analizzate le serie storiche dei dati termo-pluviometrici rilevati nelle stazioni meteorologiche ricadenti nel territorio studiato.

L'analisi delle serie storiche è stata condotta con l'ausilio dei dati forniti dal Servizio tutela e gestione delle risorse idriche, vigilanza sui servizi idrici e gestione della siccità della Regione Autonoma della Sardegna e con l'ausilio dei dati contenuti nello Studio sull'Idrologia Superficiale della Sardegna, elaborato dalla Regione Autonoma della Sardegna (1998).

Dall'elaborazione dei dati rilevati nelle stazioni termometriche disponibili (Sant'Antioco e Carloforte), poste rispettivamente ad un'altitudine di 50 e 18 m, si evince che per il periodo 1988-2002 la temperatura media annua è di 17.4°C; con valori di escursione termica annui pari a 14.3°C.

I mesi più freddi, risultano essere gennaio e febbraio con valori medi intorno ai 11.4 e 11.2 °C; i mesi più caldi, luglio e agosto, registrano rispettivamente medie tra 24.2 e 24.6 °C.

Per quanto riguarda le precipitazioni, ricavate dalla stazione di Sant'Antioco, le medie annue mostrano valori medi pari a 623 mm/annui, il mese più piovoso, con valori di 104 mm/m, è dicembre, quello più secco è luglio con valori medi di 1 mm/m.

I venti predominanti sono quelli occidentali, soprattutto del IV quadrante. Su tutti domina, soprattutto il maestrale, che soffia da Nord – Ovest; seguito dalla tramontana che soffia da Nord e dallo scirocco che spira da Sud- Est, soprattutto in primavera e in autunno.

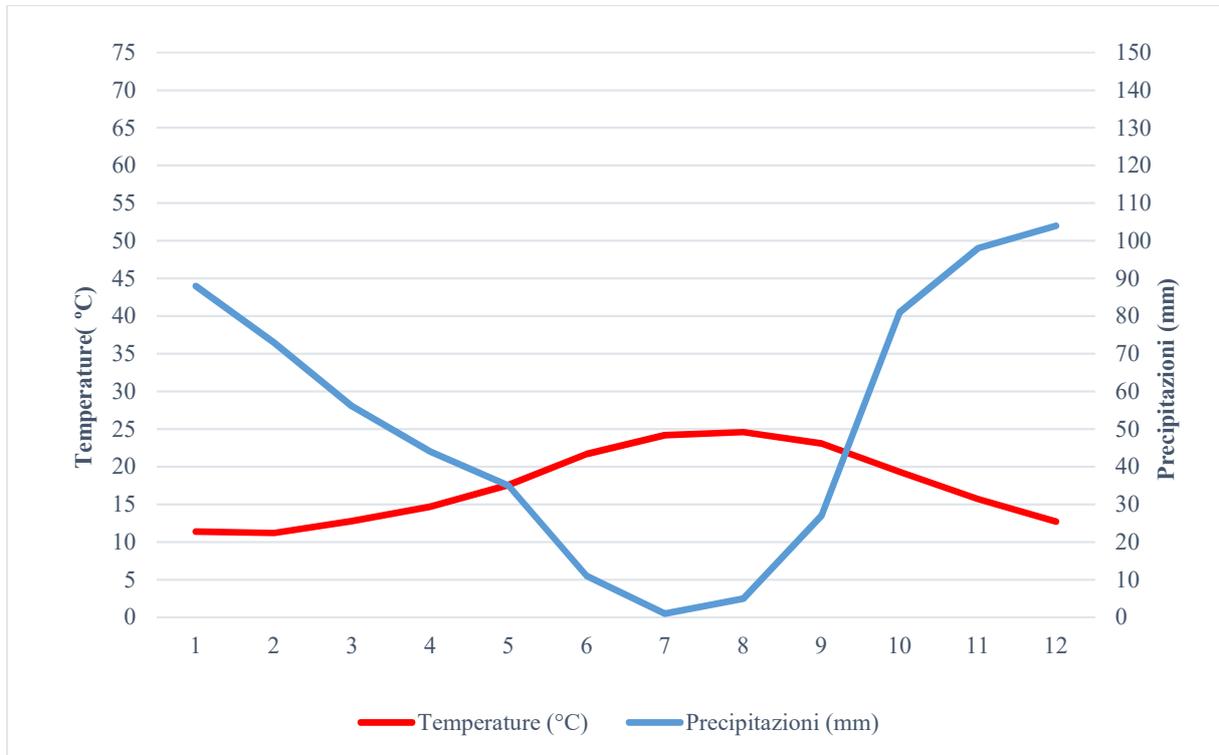
I valori di umidità relativa media risultano pari al 73%, con valori massimi del 98%.

La classificazione fitoclimatica del Pavari (1916) colloca il territorio nella fascia fitoclimatica del Lauretum, sottozona calda con siccità estiva.

Dall'elaborazione dei dati termo-pluviometrici della stazione meteorologica di Sant'Antioco è stato poi possibile ricavare il diagramma di Walter e Lieth (1960) (figura 3.2.2.1).

Come si può osservare nel diagramma il periodo arido ha una lunga durata, inizia ai primi di giugno e si protrae fino a settembre, comprendendo quattro mesi. Il mese più freddo risulta

essere febbraio (con una media annua di 11.2 °C) mentre quello più caldo è il mese di luglio (con una media annua di 24.2 °C).

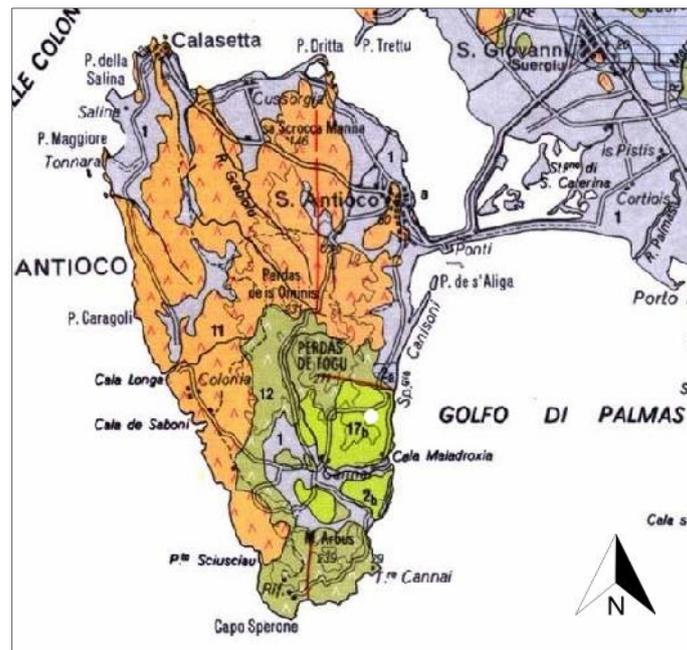


**Figura 3.2.2.1:** Climatogramma Walter e Lieth stazione Sant'Antioco (50 m).

### 3.2.3 Inquadramento geologico e geomorfologico

L'isola di Sant'Antioco rappresenta la porzione più meridionale degli affioramenti calcarei del ciclo tardo Eocenico-medio Miocenico in Sardegna (Conte, 1989; Ronga, 2011); essa è caratterizzata dalla presenza sia dei prodotti della sequenza inferiore che dalle unità finali della sequenza superiore e, inoltre, da litotipi sedimentari appartenenti al basamento Mesozoico (Barca e Costamagna, 1997; Ronga, 2011).

L'area di studio ricade all'interno dell'Unità -17b- successione Cretacica inferiore della Sardegna occidentale (figura 3.2.3.1).



**Figura 3.2.3.1:** Estratto cartografico della Carta Geologica d'Italia, scala 1:200.000 (Carmignani et al., 2001), unità geologiche presenti nel territorio in esame (17b).

[\(www.geologi.sardegna.it/documenti/cartografia-geologica/\)](http://www.geologi.sardegna.it/documenti/cartografia-geologica/)

In quest'area il Cretacico inferiore è rappresentato da limitati affioramenti nell'isola di Sant'Antioco, può essere diviso in unità di base marnosa, lagunare-lacustre, del Berriasiano-Valanginiano inferiore (facies purbeckiana), sormontata da un'unità calcarea marina del Valanginiano-Aptiano inferiore (facies urgoniana). Queste facies caratterizzavano nello stesso periodo il Dominio pirenaico-provenzale (Chabrier e Fourcade, 1975a, 1975b; Chabrier et al., 1975; Azema et al., 1977; Fourcade et al., 1977; Barberi e Cherchi, 1980; Masse e Allemann, 1982). Il Cretacico inferiore dell'isola di Sant'Antioco (Maladroxia), inizia con una successione

potente circa 90 m di marne e argille, con intercalazioni di calcari micritici ad ostracodi del Berrisiano; continua poi con circa 100 m di calcari oolitici e detritici con locali intercalazioni di calcari marnosi, dolomie e marne, il cui contenuto fossilifero è costituito da brachiopodi, calpionelle, dasycladacee ed inoltre da frammenti di rudiste, briozoi, echinodermi, ecc., che testimoniano un intervallo di tempo che va dal Valanginiano inferiore al Barremiano-Aptiano (Maxia, 1963b; Chabrier et al., 1975; Azema et al., 1977). L'ambiente di sedimentazione di questa successione cretacea, inizialmente lagunare ed ipoalino (facies purbeckiana), è poi riconducibile a condizioni sub-litorali e neritiche a salinità normale (facies urgoniana).

### **3.2.4 Inquadramento delle unità pedologiche presenti**

Dal punto di vista pedologico l'area di studio ricade all'interno di unica unità pedologica, ossia l'Unità 1. Trattandosi della stessa unità presente anche nell'area di studio Laconi, per la lettura della descrizione si rimanda al paragrafo 3.1.4.

### **3.2.5 Inquadramento vegetazionale**

Le diverse associazioni vegetali a macchia mediterranea che si osservano nel settore meridionale dell'isola di Sant'Antioco sono rappresentate sia da stadi maturi che da vari aspetti di degradazione legati soprattutto agli incendi, al disboscamento, al pascolo, ecc.

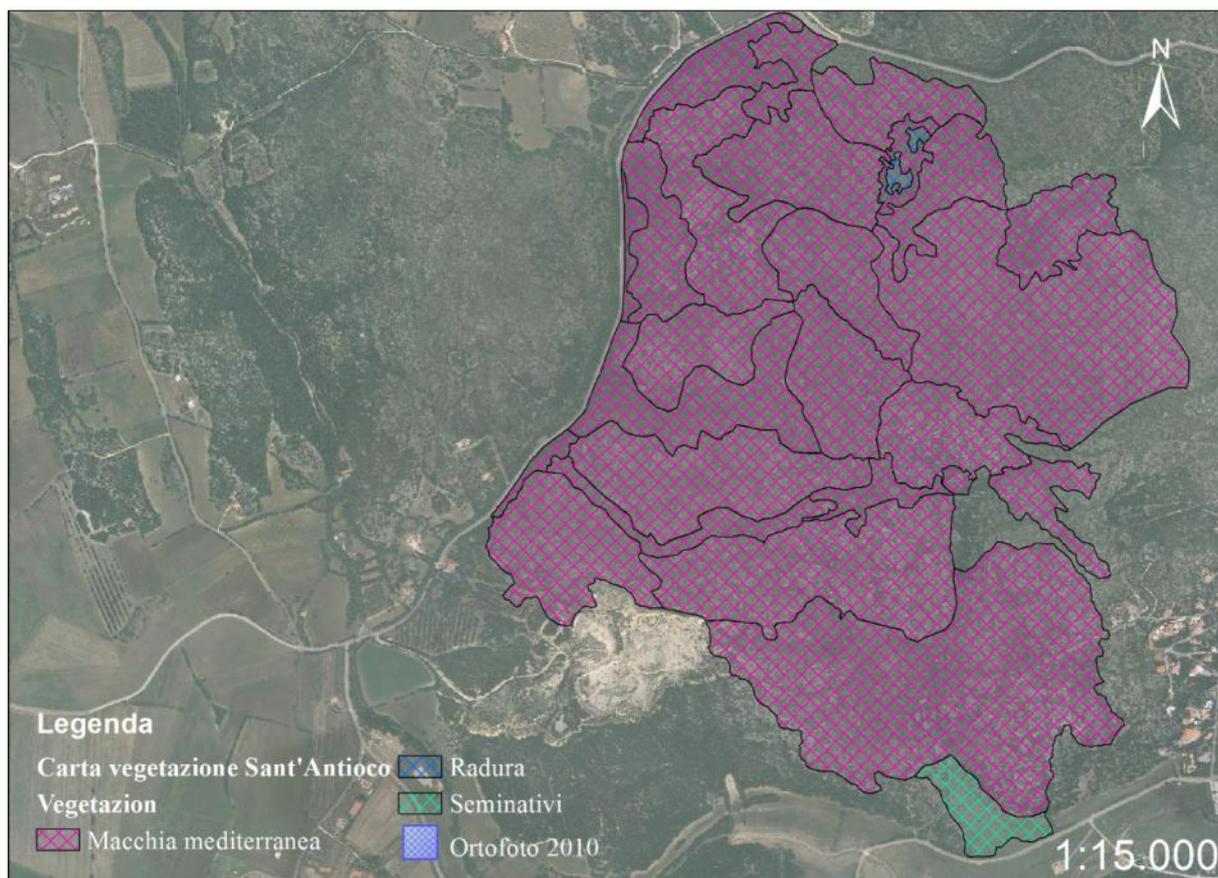
Con riferimento all'area di studio si riportano i diversi tipi vegetazionali distinti nei seguenti raggruppamenti:

#### **Macchia a ginepro fenicio**

È un interessante formazione vegetazionale che si riscontra nell'area, quasi sempre a ridosso di impluvi, in siti freschi e riparati; la specie dominante è il ginepro fenicio (*Juniperus phoenicea* L.), ma sono presenti in maniera subordinata diverse altre specie tra cui il lentisco (*Pistacia lentiscus* L.), la palma nana (*Chamaerops humilis* L.), l'euforbia arborea (*Euphorbia dendroides* L.) ecc.

#### **Macchia a lentisco, olivastro e palma nana**

Questa formazione vegetale molto diffusa nell'area oggetto di indagine, è contraddistinta, sia dal punto di vista fisionomico che strutturale, dalla presenza del lentisco (*Pistacia lentiscus* L.), quasi sempre predominante, a cui si associano l'olivastro (*Olea europaea* L. var. *sylvestris* Brot.), la palma nana (*Chamaerops humilis* L.) e diverse altre specie, tra cui la ginestra ed in particolare quella efedroide (*Genista ephedroides* D.C.), lo sparzio villosa (*Callycotome villosa* (Poiret) Link) e l'euforbia arborea (*Euphorbia dendroides* L.).



**Figura 3.2.5.1:** Carta della vegetazione, 1:15.000, realizzata dopo i sopralluoghi in campo.



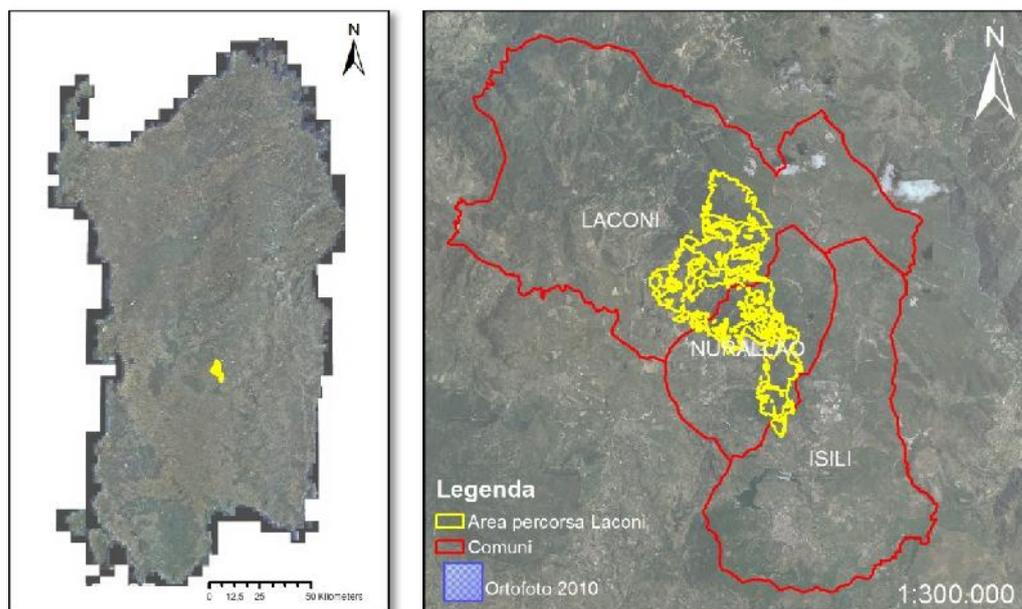
**Figura 3.2.5.2:** Vegetazione presente nell'area di studio, macchia mediterranea.

## 4. Tipologia di incendi

### 4.1 Caso studio Laconi

L'incendio sviluppatosi a Laconi il giorno 07 agosto 2013, ha raggiunto un'estensione finale di 2469.83 ettari e la maggior parte della superficie percorsa dal fuoco si è diffusa durante la giornata dell'8 agosto.

Il passaggio del fuoco ha interessato il territorio comunale di tre centri (figura 4.1.1). Il comune che ha avuto la maggiore area percorsa è stato Laconi, con circa 1490 ettari; gli altri comuni coinvolti sono stati Nurallao, con 941 ettari, e Isili, con circa 40 ettari.



**Figura 4.1.1:** Localizzazione incendio "Bidda Beccia", Comuni Laconi-Nurallao-Isili.

L'evento, di origine dolosa, ha percorso una vegetazione molto eterogenea per natura e composizione, che varia da aree con vegetazione rada, a boschi di latifoglie (misti, leccete e sugherete) e di conifere, passando per pascoli alberati, pascoli nudi, aree ricoperte di macchia mediterranea, seminativi e colture specializzate (melo, olivo) (figura 4.1.2).

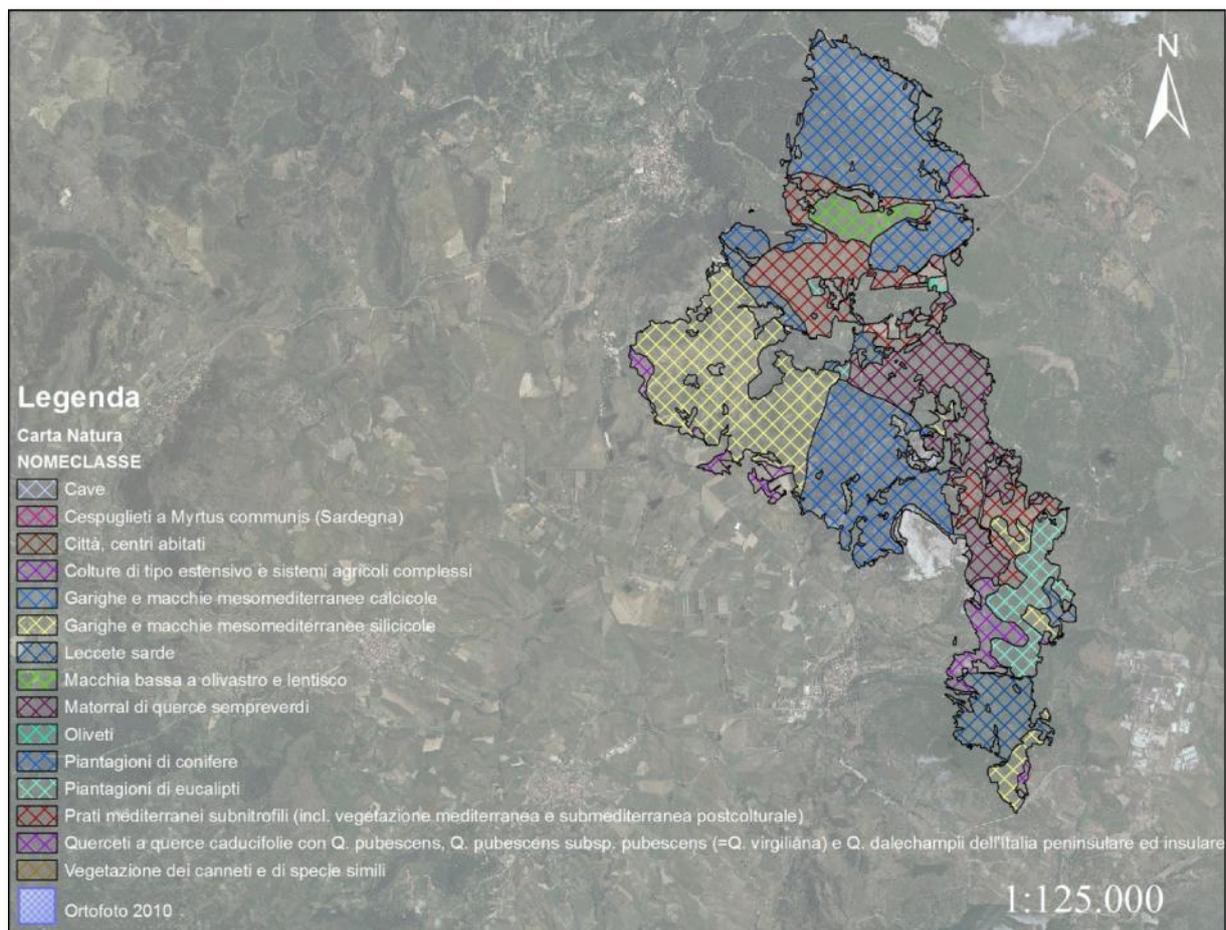
I boschi di latifoglie e leccete sono stati interessati dall'incendio per circa 110 ettari di superficie, quelli di conifere, principalmente pino domestico (*Pinus pinea* L.), pino d'Aleppo (*Pinus halepensis* Mill.), pino bruzio (*Pinus brutia* Ten.), per circa 470 ettari.

Le aree a macchia mediterranea coinvolte, principalmente a corbezzolo (*Arbutus unedo* L.), fillirea (*Phyllirea* spp.), lentisco (*Pistacia lentiscus* L.), mirto (*Myrtus communis* L.) e ginepro ossicedro (*Juniperus oxicedrus* L.), risultano risulta pari a 250 ettari.

La superficie percorsa per le restanti tipologie (pascoli alberati, oliveti, meleti e seminativi) è di circa 662 ha.

Nel Comune di Nurallao gli ettari risultano 941, così ripartiti: 360 di boschi misti e leccete, 270 rimboschimenti di conifere, 140 di macchia mediterranea, 171 tra pascoli arborati, seminativi e oliveti.

L'area interessata presenta una orografia ondulata, con valori di altitudine compresi tra i 600-900 m ed è caratterizzato da una topografia abbastanza varia.



**Figura 4.1.2:** Carta della natura, scala 1:125.000.

La giornata del 7 agosto 2013 era caratterizzata da particolari condizioni meteorologiche, ovvero presenza di forte vento caldo di scirocco proveniente da SE con una velocità media

10 Km h<sup>-1</sup>, con picchi di 35 Km h<sup>-1</sup> e temperature prossime ai 28°C già dalle prime ore del mattino e di 34°C dalla tarda mattinata; durante la giornata si sono registrati valori di umidità relativa mediamente intorno al 20%.

Il giorno successivo, ovvero l'8 agosto 2013, è stato contrassegnato da un vento di scirocco proveniente da SE con una velocità media di 12.9 Km h<sup>-1</sup> e con un'umidità relativa media pari a 15%; successivamente il vento è cambiato da scirocco in libeccio, quest'ultimo proveniente da SO con una velocità media di 18 Km h<sup>-1</sup> e valori di umidità relativa pari al 6%; si è poi verificato un ulteriore cambio del vento con direzione W-N-NW e con una risalita dei valori di umidità relativa.

L'incendio si è propagato con forte violenza in direzione N-NW, e al cambio di direzione di vento proveniente da SW e con presenza di movimenti convettivi, si sono generati incendi secondari che hanno coinvolto anche un'area forestale con pini e querce.

Tutte le informazioni presenti in questo paragrafo comprese le immagini durante e post incendio, figure da 4.1.3 a 4.1.5, sono state fornite dal Corpo Forestale di Vigilanza Ambientale della Regione Sardegna (CFVA).



**Figura 4.1.3:** Incendio Laconi, 2015.

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.



**Figura 4.1.4:** Incendio Laconi, 2015.



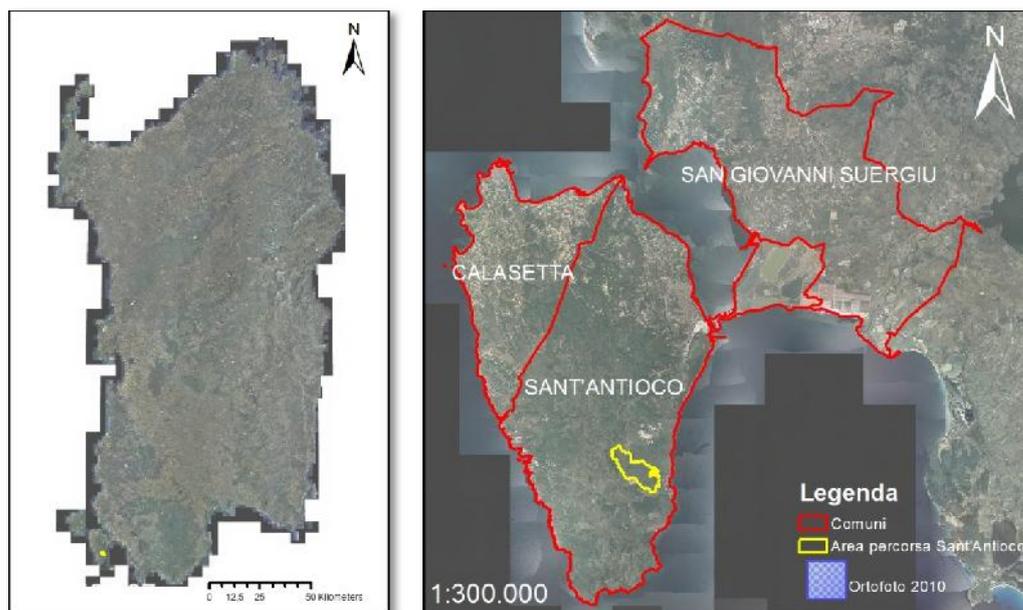
**Figura 4.1.5:** Post-incendio Laconi, 2015.

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

## 4.2 Caso studio Sant'Antioco

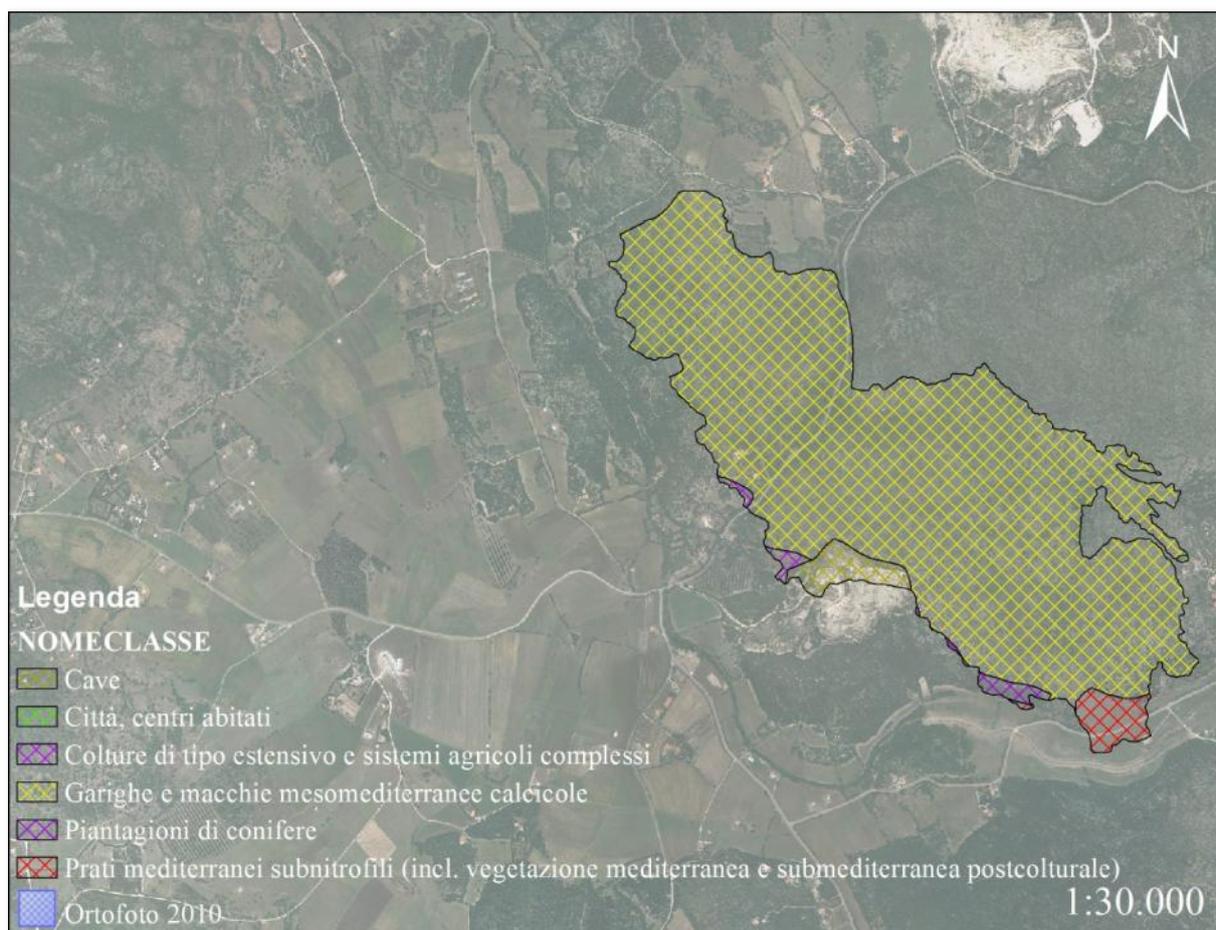
L'incendio verificatosi nella parte meridionale settore S-E, dell'Isola di Sant'Antioco, si è verificato il giorno 24 luglio 2010, protraendosi al giorno successivo ed ha percorso una superficie di 134 ha. L'evento, di origine dolosa, è stato segnalato dalla vedetta in località "Sa perda e s'omini".



**Figura 4.2.1:** Localizzazione incendio Sant'Antioco.

La superficie percorsa dal fuoco risulta pari a 130 ettari, ed era ricoperta prevalentemente da macchia mediterranea-gariga, costituite principalmente da olivastro (*Olea europaea* L. var. *sylvestris* Brot.), lentisco (*Pistacia lentiscus* L.), ginepro fenicio (*Juniperus phoenicea* L.), palma nana (*Chamaerops humilis* L.), euforbia arborea (*Euphorbia dendroides* L.), sparzio villosa (*Callycotome villosa* (Poiret) Link), asparago bianco (*Asparagus albus* L.), ginestra di Moris (*Genista morisii* Colla), cisto marino (*Cistus monspeliensis* L.), erica scoparia (*Erica scoparia* L.). Il resto dell'area interessata dal fuoco era costituita da seminativi, impianti artificiali a conifere ed eucalipti (figura 4.2.2).

L'area interessata dal fuoco presenta una orografia ondulata, a tratti accidentata e altezze che variano da 60 a 135 a m.s.l.m. ed è caratterizzata da una topografia abbastanza varia. Nell'area in cui sono stati effettuati i campionamenti del suolo la pendenza media risulta pari al 20%.



**Figura 4.2.2:** Carta della natura, scala 1:30.000.

La giornata del 24 luglio 2010 era caratterizzata da particolari condizioni meteorologiche, con presenza di forte vento di maestrale proveniente da NW con una velocità media di 19 Km h<sup>-1</sup>, con picchi di 27 Km h<sup>-1</sup> e con raffiche di 38 Km h<sup>-1</sup>; temperature di circa 25°C con valori medi di umidità del 50%.

L'area percorsa dell'incendio risulta idealmente divisa in due parti, la parte a Nord della S.P. n.75, dove ha avuto origine l'incendio, risulta scarsamente antropizzata e poco frequentata mentre nella parte a Sud della provinciale è presente l'abitato di Maladroxia, sito turistico balneare, molto frequentato nel periodo estivo.

Negli anni successivi, le superfici percorse dall'incendio del 24 luglio 2010, sono state oggetto di ripetuti attacchi incendiari che hanno depauperato la copertura boschiva, trasformando l'originaria macchia formata prevalentemente da ginepro fenicio in una macchia rada formata prevalentemente da bassi cespugli di lentisco e da palme nane. L'unico

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

utilizzo attuale dei terreni percorsi dal fuoco risulta il pascolo ovino e caprino di greggi di alcuni allevatori che gravitano nella zona, per lo più in modo abusivo o non autorizzato dai legittimi proprietari.

Tutte le informazioni presenti in questo paragrafo comprese le immagini (figura 4.2.3) sono state fornite dal Corpo Forestale di Vigilanza Ambientale della Regione Sardegna (CFVA).



**Figura 4.2.3:** Incendio Sant’Antioco, 2010.

## 5. Materiali e metodi

### 5.1 Caratterizzazione degli incendi

La caratterizzazione degli incendi basata sulla stima dei parametri di comportamento del fuoco è stata effettuata utilizzando il software BehavePlus 5.0.5 (Andrews, 2009) uno dei principali e più usati modelli di simulazione perché fornisce una previsione puntuale dei fattori di comportamento del fronte di fiamma (velocità, intensità, lunghezza fiamma, ecc.), che costituiscono gli output restituiti sotto forma di tabelle e grafici.

Può essere utilizzato per svariate applicazioni: prevenzione degli incendi e attività di mitigazione, gestione territoriale, istruzione delle forze preposte allo spegnimento, pianificazione del territorio (Andrews, 2009; White et al., 2013).

Il programma di previsione del comportamento del fuoco BEHAVE è stato tra i primi sistemi informatici sviluppati per la gestione degli incendi boschivi; è stato aggiornato, ampliato, ed ora denominato BehavePlus. Fornisce dati di output puntuali relativi al comportamento del fuoco (velocità di avanzamento del fronte di fiamma, intensità lineare, lunghezza di fiamma), agli effetti del fuoco (altezza di scottatura e mortalità delle piante) inserendo parametri relativi alle condizioni in cui si verifica l'incendio (contenuto di umidità dei combustibili e fattore di correzione del vento).

Behave è suddiviso in 9 moduli, ad ogni modulo corrispondono diversi parametri output che il programma produce (tabella 5.1.1), in BehavePlus 5.0.5 le variabili input e output sono 189 (Andrews, 2009).

**Tabella 5.1.1:** Moduli in BehavePlus 5.0.5 con rispettivi calcoli di output (Andrews, 2009).

Modulo	Calcolo
Superficie	Velocità di propagazione del fuoco superficiale; Intensità della linea di fuoco; Lunghezza di fiamma; Intensità di reazione ed energia per unità di area; modelli di combustibile: casi standard, personalizzati e speciali; Fattore di aggiustamento della velocità del vento.
Chioma	Incendio di transizione, da incendio di superficie a incendio di chioma; Velocità di propagazione dell'incendio di chioma; Area e perimetro dell'incendio di chioma; Tipo di incendio; Intensità e durata delle fiamme.
Sicurezza	Dimensioni dell'area di sicurezza basato sulla lunghezza delle fiamme;

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

	Area, perimetro e distanza di sicurezza.
Dimensioni	Modello ellittico; area, perimetro e forma.
Controllo/Contenimento	Successo nel controllo dell'incendio attraverso le risorse singole o multiple in base al tempo di risposta, tipo di attacco al fuoco, durata delle risorse; Area e perimetro dell'area consumato dal fuoco, dimensioni dell'incendio durante l'attacco iniziale.
Salti di fuoco	Distanza massima alla quale si possono generare nuovi focolai da scintille trasportate dal vento.
Altezza di scottatura	Altezza di scottatura della chioma in base alla lunghezza della fiamma.
Mortalità	Probabilità di mortalità dell'albero in base allo spessore della corteccia e di scottatura della chioma.
Accensione / Ignizione	Probabilità di accensione da tizzoni o da fulmini.

Le variabili di input necessarie per il funzionamento di BehavePlus sono rappresentate da: modello di combustibile (*Fuel model*), umidità del combustibile morto e vivo in % (*Fuel moisture*), parametri climatici (*Weather*) e condizioni topografiche (*Terrain*). Questi possono essere integrati con altre variabili, che permettono di affinare le prestazioni del programma, per esempio l'altezza di inserzione della chioma in m (*Canopy Base Height*, CBH), la densità del combustibile di chioma in  $\text{kg m}^{-3}$  (*Canopy Bulk Density*, CBD), il coefficiente di riduzione del vento (*Wind Adjustment Factor*).

I modelli di combustibile (*Fuel Model*) forniscono le informazioni relative alla vegetazione. BehavePlus utilizza come dati di ingresso sia i tredici modelli di combustibile di Anderson (1982) che i quaranta modelli di combustibile di Scott e Burgan (2005) ed è possibile crearne dei nuovi costruiti ad hoc.

I 13 modelli (Anderson, 1982) sono raggruppati in quattro classi di tipologie di combustibile (pascoli, cespuglieti, lettieri di boschi e residui di utilizzazioni), ognuna delle quali comprende al proprio interno tre o quattro modelli di combustibile. Ogni modello può essere definito come un piccolo database delle caratteristiche del letto di combustibile (Arca et al., 2015) e contiene informazioni riguardanti:

1. il carico di combustibile in  $\text{t ha}^{-1}$ , diviso per categorie (vivo e morto) e classi dimensionali;
2. lo spessore del letto del combustibile in m;
3. l'umidità di estinzione in %;
4. il potere calorifico in  $\text{kJ kg}^{-1}$ .

I modelli di combustibile definiti da Scott e Burgan (2005) sono stati classificati in funzione della loro capacità di sostenere la propagazione del fuoco (*fire-carrying fuel type*), in modo tale che lo stesso modello potesse essere attribuito a più tipologie di vegetazione differenti (Arca et al., 2015). I modelli, codificati dalla doppia lettera seguita dalla cifra, sono pertanto suddivisi come segue:

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

Ogni modello riporta tutta una serie di parametri relativi alle condizioni stazionali legate: all'umidità ambiente xerico (*Dry*) o udico (*Humid*), al carico di combustibile in  $t\ ha^{-1}$  diviso per categorie (vivo e morto) e classi dimensionali, al tipo di modello, alla profondità del letto di combustibile in m, all'umidità di estinzione in %, al potere calorifico in  $kJ\ kg^{-1}$ , al rapporto superficie volume in  $m^{-1}$  (S/V) del combustibile morto con *time-lag* 1 h, dell'erba viva e degli arbusti vivi (Ascoli e Bovio, 2014).

In entrambe le classificazioni il carico del combustibile in  $t\ ha^{-1}$  oppure  $Mg\ ha^{-1}$  ( $1Mg=1t$ ) è suddiviso per categorie e classi dimensionali; viene di seguito riportata la descrizione:

1. Combustibile morto con *time-lag* 1 ora, (*1 h Fuel Load*) è il carico del combustibile di superficie fine morto con diametro fino a 0.60 cm, (es., lettiera; necromassa fine).
2. Combustibile morto con *time-lag* 10 ore, (*10 h Fuel Load*) è il carico del combustibile di superficie morto con diametro compreso tra 0.60 cm e 2.5 cm.
3. Combustibile morto con *time-lag* 100 ore, (*100 h Fuel Load*) è il carico del combustibile di superficie morto con diametro compreso tra 2.5 cm e 7.5 cm.
4. Combustibile erbaceo vivo (*Live Herbaceous Fuel Load*) è il carico dei combustibili erbacei vivi con diametro  $< 0.6$  cm.
5. Combustibile legnoso vivo (*Live Woody Fuel Load*) è il carico dei combustibili legnosi vivi con diametro  $< 0.6$  cm.

La profondità del letto di combustibile (*Fuel bed depth*) è il valore relativo alla profondità/altezza dello strato di combustibile responsabile della propagazione del fuoco.

L'umidità di estinzione del combustibile (*Dead Fuel Moisture of Extinction*) in %, costituisce il contenuto percentuale in acqua del combustibile morto, oltre il quale non è più possibile una propagazione del fuoco per sua spontanea estinzione.

Il rapporto superficie volume è così suddiviso:

1. S/V del materiale con *time-lag* 1 h (detto  $\sigma$ ) (1 h SA/V) è il rapporto superficie/volume del combustibile morto ed è espresso in  $m^{-1}$ ;
2. S/V delle erbe vive (*Live Herbaceous SA/V*) è il rapporto superficie/volume dell'erba viva espresso in  $m^{-1}$ ;
3. S/V degli arbusti vivi (*Live Woody SA/V*) è il rapporto superficie/volume delle foglie e dei fusti sottili degli arbusti viventi espresso in  $m^{-1}$ .

Come precedentemente detto, il programma consente di creare ulteriori modelli al fine di riprodurre nel migliore dei modi le caratteristiche della vegetazione del luogo. Per ogni modello di combustibile che si intende creare occorrono i seguenti parametri:

1. carico del combustibile sia vivo che morto per superficie unitaria (*Total fuel load*)  $t\ ha^{-1}$  o  $Mg\ ha^{-1}$ ;
2. rapporto superficie volume del materiale con *time-lag* 1 h, dell'erba viva, degli arbusti viventi  $m^{-1}(S/V)$
3. profondità/altezza del letto di combustibile in m (*Fuel Complex depth*  $\delta$ );
4. potere calorifico del combustibile morto e di quello vivo in  $kJ\ kg^{-1}$  (*Fuel heat content*);
5. umidità di estinzione del combustibile morto in % (*Fuel moisture of extinction*).

Per quanto riguarda le condizioni meteorologiche (*Weather*), il programma richiede le informazioni relative alla velocità del vento ( $km\ h^{-1}$ ), relativamente agli input sulle condizioni topografiche (*Terrain*) vengono domandati i valori di pendenza (%).

Gli output stimati sono diversi e sono in funzione di quali parametri di caratterizzazione di un evento l'utente desidera calcolare; tra questi si ricordano: l'intensità del fronte di fiamma in  $kW\ m^{-1}$  (*Fireline Intensity*, FI), la lunghezza di fiamma in m (*Flame Length*, FL), la velocità di avanzamento del fronte di fiamma  $m\ min^{-1}$  (*Surface Rate of Spread*, ROS), transizione ad incendio di chioma (*Transition to Crown Fire*), tipo di incendio (*Fire type*) etc.

Per i casi di studio per disporre dei dati di input sono stati consultati i documenti ufficiali forniti dal:

1.CFVA (Corpo Forestale di Vigilanza Ambientale) che ha messo a disposizione le informazioni relative agli incendi raccolti nei moduli specifici, documentazione fotografica, video utili per la ricostruzione del comportamento del fronte di fiamma;

2.Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente della Sardegna (Arpas) che ha messo a disposizione i dati meteo relativi a: intensità e direzione del vento, temperatura istantanea, minima, media e massima, e umidità relativa istantanea, minima, media e massima delle giornate in cui si sono verificati gli eventi ma anche dei quindici giorni antecedenti e conseguenti.

Le informazioni relative alla topografia (pendenza, esposizione, altitudine) sono state ricavate dal modello digitale del terreno della Regione Sardegna (DTM), in formato raster ([www.sardegnaoportale.it](http://www.sardegnaoportale.it)).

Le informazioni relative alla vegetazione sono state ricavate attraverso l’analisi dei supporti cartografici disponibili (Carta dell’Uso del Suolo 2008 Regione Sardegna e Carta degli Habitat 2009 della Regione Sardegna) e da analisi in campo supportate da foto e video forniti dal CFVA e dall’Agenzia Forestas.

Per la caratterizzazione dei due eventi in località Laconi e Sant’Antioco, i moduli di calcolo scelti nel software BehavePlus 5.0.5 sono stati:

1. Superficie (*SURFACE*);
2. Chioma (*CROWN*).

Nel modulo *SURFACE* sono state selezionate le seguenti variabili output: intensità del fronte di fiamma in  $\text{kW m}^{-1}$  (*Fireline Intensity*, FI), la lunghezza di fiamma in m (*Flame Lengt*, FL), la velocità di avanzamento del fronte di fiamma  $\text{m min}^{-1}$  (*Surface Rate of Spread*, ROS), mentre nel modulo *CROWN*: intensità critica dell’incendio  $\text{kW m}^{-1}$  (*Critical Surface Intensity*), transizione ad incendio di chioma (*Transition to Crown Fire*) e tipo d’incendio (*Fire Type*).

I dati di input richiesti dal programma per il calcolo di questi due moduli sono:

1. modello di combustibile (*Fuel Model*);
2. altezza di inserzione della chioma in m (*Canopy Base Height*, CBH), densità del combustibile di chioma in  $\text{kg m}^{-3}$  (*Canopy Bulk Density*, CBD);

3. umidità del combustibile morto ad 1-10-100 h in % (*Fuel Moisture 1-10-100 h*), umidità del combustibile vivo erbaceo in % (*Live Herbaceous Moisture*), umidità del combustibile vivo legnoso in % (*Live Woody Moisture*), umidità fogliare in % (*Foliar Moisture*);
4. parametri climatici del giorno dell'incendio: velocità del vento a 2 m in Km h<sup>-1</sup> (20-ft *Wind Speed*), coefficiente di riduzione del vento (*Wind Adjustment Factor*);
5. condizioni topografiche: pendenza in % (*Slope*).

#### 1. Modelli di combustibile identificate nelle aree di indagine

Le informazioni relative alla vegetazione sono state ricavate attraverso

1. analisi dei supporti cartografici disponibili (Carta dell'Uso del Suolo 2008, Regione Sardegna e Carta degli Habitat della Regione Sardegna) da foto e video forniti dal CFVA e dall'Agenzia Forestas e da analisi in campo supportate in particolare per Laconi dal personale dell'Agenzia Forestas.
2. sopralluoghi per analisi della vegetazione: i nuclei di piante presenti nell'area percorsa non interessate dal passaggio del fuoco hanno permesso di identificare il combustibile che ha ricoperto il ruolo di principale conduttore della propagazione del fuoco.

La caratterizzazione dei modelli di combustibile, sia a Laconi che a Sant'Antioco, è stata effettuata sia per l'area percorsa che per l'area non percorsa in cui sono stati effettuati i campionamenti di suolo (figura 5.1.1 e 5.1.4). La simulazione del comportamento del fuoco è stata eseguita nelle aree interessate dal passaggio del fuoco.

Per la simulazione del comportamento del fuoco, i modelli di combustibile utilizzati sono quelli standard di Scott e Burgan per la macchia mediterranea e quelli costituiti ad hoc (custom) da Bacciu (2009) che hanno permesso di effettuare la simulazione con dati più realistici per questa tipologia vegetazionale, perché riferiti al territorio sardo.

I modelli di Scott e Burgan (2005) identificati sono quelli del gruppo arbusti SH, e nello specifico i modelli n° 145 (SH5) e 147 (SH7) entrambe in ambiente secco (*dry*).

Il modello SH5 (tabella 5.1.2) in ambiente secco è caratterizzato dalla presenza di un carico alto di combustibile, gli elementi primari portanti del fuoco sono gli arbusti e la lettiera di questi, l'altezza delle piante è compresa tra 1.2 e 1.8 m. Il modello SH7 (tabella 5.1.2) è caratterizzato da un carico molto alto di combustibile e anche in questo modello di

combustibile i principali conduttori del fuoco e le altezze delle piante risultano essere gli stessi di SH5.

**Tabella 5.1.2:** Parametri dei modelli di combustibile di Scott e Burgan (2005) utilizzati.

Codice modello	Carico di combustibile (t ha <sup>-1</sup> )					Tipo di modello	Rapporto S/V (m <sup>-1</sup> )			Profondità combustibile (m)	Umidità estinzione (%)	Potere calorifico (kJ kg <sup>-1</sup> )
	1-h	10-h	100-h	Erbe vive	Arbusti vivi		1-h morto	Erbe vive	Arbusti Vivi			
<b>SH5</b>	8.90	5.19	0.00	0	7.17	N/A	2460	32797	5248	18.29	15	18622
<b>SH7</b>	8.65	13.1	5.44	0	8.40	N/A	2460	32797	5248	18.29	15	18622

I modelli custom utilizzati sono quelli messi a punto specificatamente per la macchia mediterranea da Bacciu (2009) in Sardegna, denominati gruppo CM al cui interno ricadono 4 modelli (tabella 5.1.3) distinti in base alla fisionomia di questa formazione vegetale. Sono stati utilizzati i modelli CM2 e CM3 (tabella 5.1.3) che rappresentano situazioni di macchia media il primo e di macchia medio alta il secondo; in CM2 l'altezza dello strato di combustibile responsabile della propagazione del fuoco è pari a 0.48 m, mentre in CM3 risulta pari a 0.7 m.

Nella tabella 5.1.3 (Bacciu, 2009), sono riportati tutti i valori dei parametri input relativi ai modelli CM3 e CM4; attraverso l'opzione "crea nuovi modelli di combustibile custom" descritta precedentemente, è stato possibile effettuare la simulazione.

Considerato che le caratteristiche vegetazionali dei modelli CM3 e CM4 si adattavano bene sia a Laconi che a Sant'Antioco e che in quest'ultimo caso le affinità si presentavano maggiori, la scelta dei modelli custom ha consentito di ottenere una maggiore affidabilità e attendibilità della simulazione.

**Tabella 5.1.3:** Parametri dei modelli di combustibile custom usati nella simulazione, messi a punto da Bacciu (2009), per la Sardegna.

<b>Modello Custom</b>	<b>CM1</b>	<b>CM2</b>	<b>CM3</b>	<b>CM4</b>
<b>Tipologia di combustibile</b>	<b>Macchia bassa, poco densa e giovane</b>	<b>Macchia media</b>	<b>Macchia medio-alta densa</b>	<b>Macchia alta densa</b>
<b>Carico di combustibile totale (Mg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>8.77</b>	<b>23.39</b>	<b>26.38</b>	<b>31.13</b>
Carico di combustibile morto	6.39	15.20	14.54	18.18
Morto 1 ora	3.89	5.68	10.07	12.81
Morto 10 ore	2.43	8.95	3.85	5.33
Morto 100 ore	0.07	0.57	0.62	0.04
Carico di combustibile vivo:	2.38	8.19	10.84	12.95
Vivo legnoso	2.05	7.89	10.48	12.76
Vivo erbaceo	0.33	0.30	0.36	0.19
<b>Rapporto superficie- volume S/V (m<sup>-1</sup>)</b>				
Morto	1964	2427	2290	2906
Vivo	4464	5609	5847	5578
<b>Profondità letto di combustibile <math>\delta</math> (m)</b>	0.48	0.7	0.84	1.63
<b>Potere calorifico (kJ kg<sup>-1</sup>)</b>				
Morto	18620	18620	18620	18620
Vivo	18620	18620	18620	18620
<b>Umidità di estinzione (%)</b>	25	25	25	25

Nelle aree non percorse sono inoltre stati individuati altri due modelli di combustibile, il modello di combustibile n. 2 di Anderson (1982) che descrive situazioni a pascolo sia a Laconi che a Sant'Antioco; in quest'ultima area è stato inoltre identificato il modello CM2 (Bacciu, 2009) che rappresenta condizioni a macchia mediterranea bassa.

Identificati i modelli di combustibile sia per Laconi che per Sant'Antioco, attraverso l'ausilio di uno specifico Sistema Informativo Territoriale (Qgis), è stato possibile realizzare la carta dei modelli di combustibile presenti nelle due aree (figura 5.1.1 e 5.1.4).

2. Altezza di inserzione della chioma in m (*Canopy Base Height*, CBH) e densità del combustibile di chioma in  $\text{kg m}^{-3}$  (*Canopy Bulk Density*, CBD).

Il software richiede inoltre i valori di CBH e CBD, per le sole aree in cui era presente un soprassuolo di tipo arboreo (*Overstory*) di altezza superiore ai 3 m di altezza. L'altezza di inserzione della chioma in m, secondo la definizione di Scott e Reinhardt (2001), è l'altezza minima dal terreno alla quale si trova il combustibile in quantità tale da consentire la propagazione di un incendio alla chioma (Leone e Lovreglio, 2014). I valori di CBH, sono stati stimati mediante sopralluoghi in campo su piante danneggiate dal fuoco, ancora presenti nell'area percorsa, e su nuclei di piante non interessate dal passaggio dell'incendio.

La densità del combustibile di chioma CBD in  $\text{kg m}^{-3}$ , rappresenta la massa per unità di volume della biomassa della chioma (Keane et al., 2005; Leone e Lovreglio, 2014), costituita da combustibile di dimensioni inferiori a 3 mm che brucerebbe in un incendio di chioma. I valori della CBD sono stati ripresi dalla letteratura consultata (VanWagner, 1977; Mitsopoulos e Dimitrakopoulos, 2007; Tachajapong et al., 2008; Cruz et al., 2014), per specie arbustive analoghe a quelle presenti nelle aree di studio.

3. Umidità del combustibile (*fuel moisture*) in %

Ulteriori informazioni richieste da Behave riguardano l'umidità del combustibile (*fuel moisture*) in %, definita da:  $(\text{peso fresco} - \text{peso secco}) \times 100 / \text{peso secco}$ .

I valori di umidità assegnati sia per i combustibili morti con time-lag 1-10-100 h che per quelli vivi erbacei e legnosi, utilizzando le tabelle sviluppate da Scott e Burgan 2005, sono riportati in tabella 5.1.4 per i combustibili morti ad 1-10-100 h e in tabella 5.1.5 per i combustibili vivi erbacei e legnosi.

**Tabella: 5.1.4:** Scenari di umidità del combustibile morto con time-lag1-10-100 ore (Scott e Burgan, 2005).

	<b>Scenario D1 Molto basso</b>	<b>Scenario D2 Basso</b>	<b>Scenario D3 Moderato</b>	<b>Scenario D4 Alto</b>
<b>1 ora</b>	3	6	9	12
<b>10 ore</b>	4	7	10	13
<b>100 ore</b>	5	8	11	14

**Tabella: 5.1.5:** Scenari di umidità del combustibile vivo (Scott e Burgan, 2005).

	<b>Scenario L1 Molto basso</b>	<b>Scenario L2 Basso</b>	<b>Scenario L3 Moderato</b>	<b>Scenario L4 Alto</b>
<b>Vivo erbaceo</b>	30	60	90	120
<b>Vivo legnoso</b>	60	90	120	150

Come si può evincere dalle tabelle 5.1.4 e 5.1.5 sono presenti diversi scenari di contenuto di umidità; la scelta della situazione da utilizzare è stata fatta prendendo in considerazione i valori meteorologici della giornata ed in particolare quelli più prossimi all'orario di insorgenza dell'evento in località Sant'Antioco. I dati considerati per la località di Laconi sono quelli della giornata successiva poiché l'area dove è stato effettuato il campionamento è stata percorsa dall'incendio il giorno dopo.

Per quanto riguarda i combustibili morti ad 1-10-100 ore e quelli erbacei e legnosi vivi per Laconi è stato scelto lo scenario di umidità D1 molto bassa e L1 molto bassa, mentre per Sant'Antioco si è optato per la condizione D2 bassa e L2 bassa.

I valori del contenuto in umidità dei combustibili delle chiome in % (FMC), sono stati desunti da lavori scientifici (Fernandes et al., 2000; Fernandes, 2001; Bilgili e Saglam, 2003; Saglam et al., 2008; Alexander e Cruz, 2008; Alexander e Cruz, 2013).

#### 4. Parametri climatici

Le informazioni relative alle condizioni meteorologiche ed in particolare al vento sono state fornite dall'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Sardegna (Arpas) e dai rapporti del CFVA. La simulazione dell'incendio è stata effettuata per Laconi per velocità del vento variabili (15-20-25-30-35 Km h<sup>-1</sup>), che hanno caratterizzato le due giornate dell'incendio; la velocità del vento considerata è pari a 15 Km h<sup>-1</sup>, valore medio della velocità

del vento mentre l'incendio percorreva l'area in cui sono stati effettuati i campionamenti di suolo.

A Sant'Antioco la simulazione è stata effettuata con velocità del vento variabili (15-20-25 Km h<sup>-1</sup>) e si sono esaminati i risultati di quella pari a 25 Km h<sup>-1</sup>, velocità a cui soffiava il vento nel momento in cui insorgeva l'incendio.

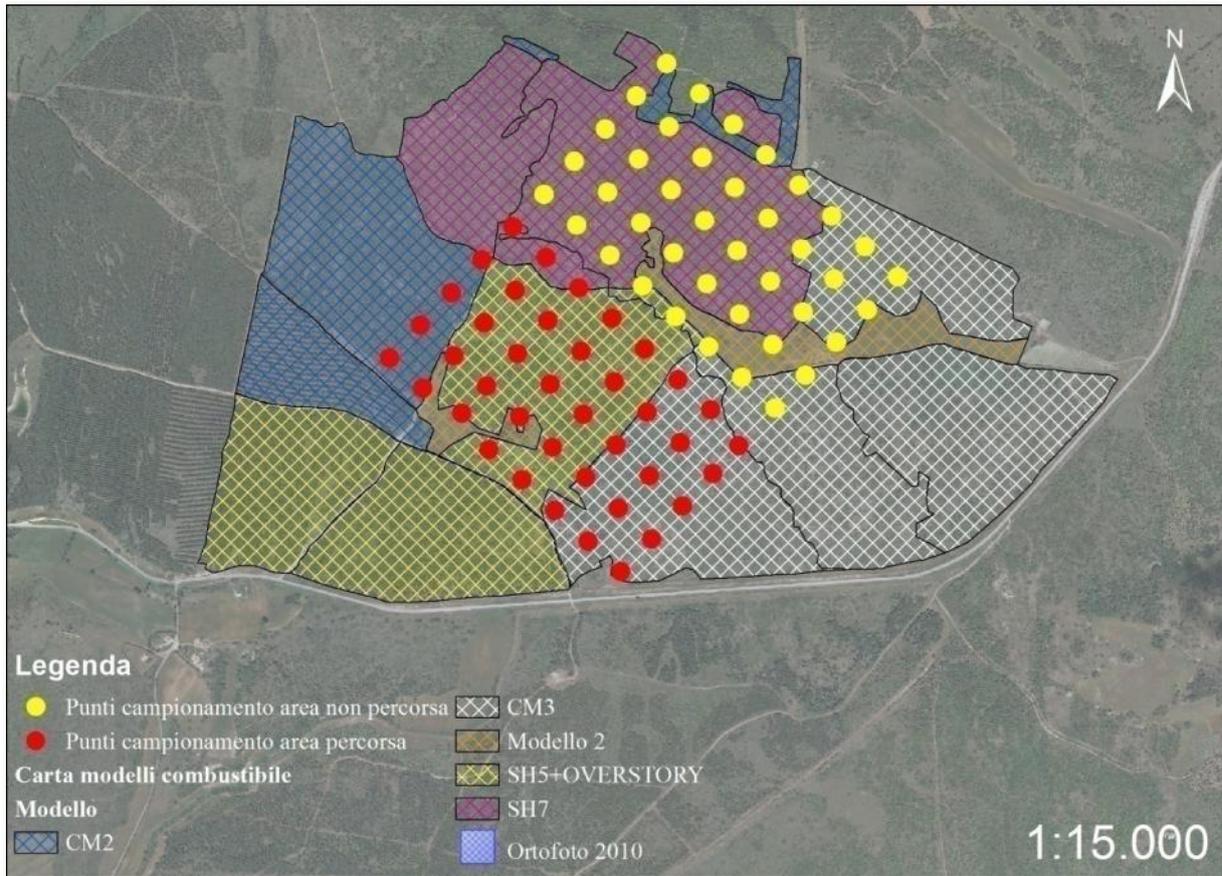
Il fattore di correzione del vento (*Wind Adjustment Factor*) è stato fissato a 1,0 per quei modelli di combustibile in cui era assente il soprassuolo arboreo dominante (*Overstory*); laddove questo era presente, il valore è stato assegnato sulla base della letteratura consultata (Andrews, 2012; [www.fbfrg.org](http://www.fbfrg.org)).

## 5. Condizioni topografiche

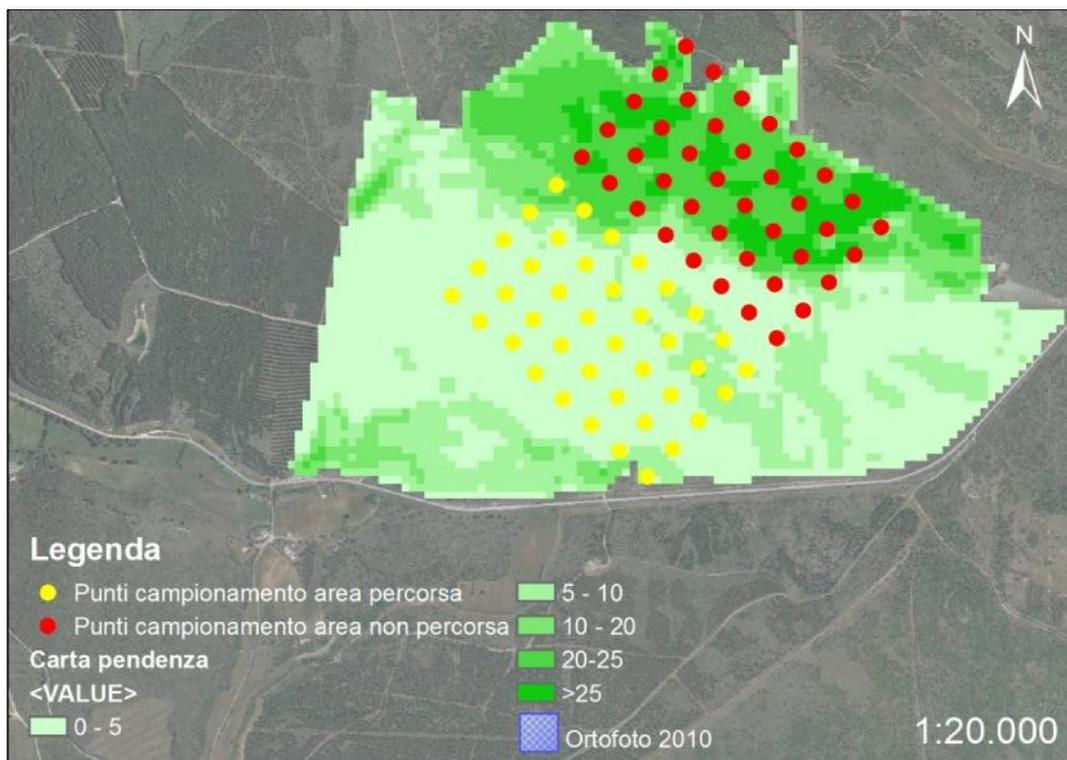
Le informazioni relative alla topografia (pendenza, esposizione) sono state ricavate dal modello digitale del terreno della Regione Sardegna (DTM); il relativo file raster è stato scaricato dal sito ([www.sardegnaoportale.it](http://www.sardegnaoportale.it)) e attraverso l'uso di Qgis sono state realizzate le carte della pendenza (figura 5.1.2 e 5.1.5) e dell'esposizione (figura 5.1.3 e 5.1.6) sia per Laconi che per Sant'Antioco.

Da questi dati input sono stati ottenuti gli output relativi all'intensità del fronte di fiamma in kW m<sup>-1</sup> (*Fireline Intensity*, FI), alla lunghezza di fiamma in m (*Flame Length*, FL), alla velocità di avanzamento del fronte di fiamma m min<sup>-1</sup> (*Surface Rate of Spread*, ROS), all'intensità critica dell'incendio kW m<sup>-1</sup> (*Critical Surface Intensity*, CSI) e alla tipologia di incendio.

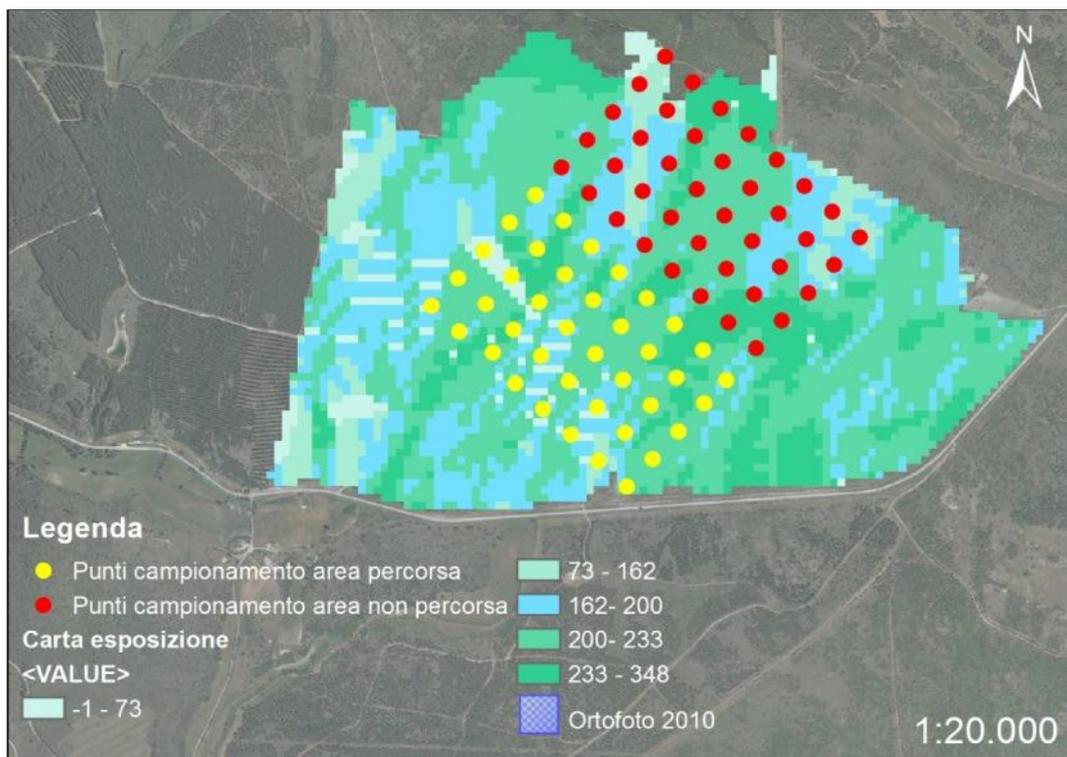
Al fine di rendere più attendibili i risultati della simulazione, per ciascun parametro i valori puntuali dei dati output sono stati corretti del ± 5% del valore medio: è stato attribuito il valore + 5% del valore medio laddove la pendenza e l'esposizione andavano a vantaggio della propagazione del fuoco, viceversa è stato assegnato un valore negativo (- 5% del valore medio) nei punti in cui la pendenza e l'esposizione andavano contro la propagazione.



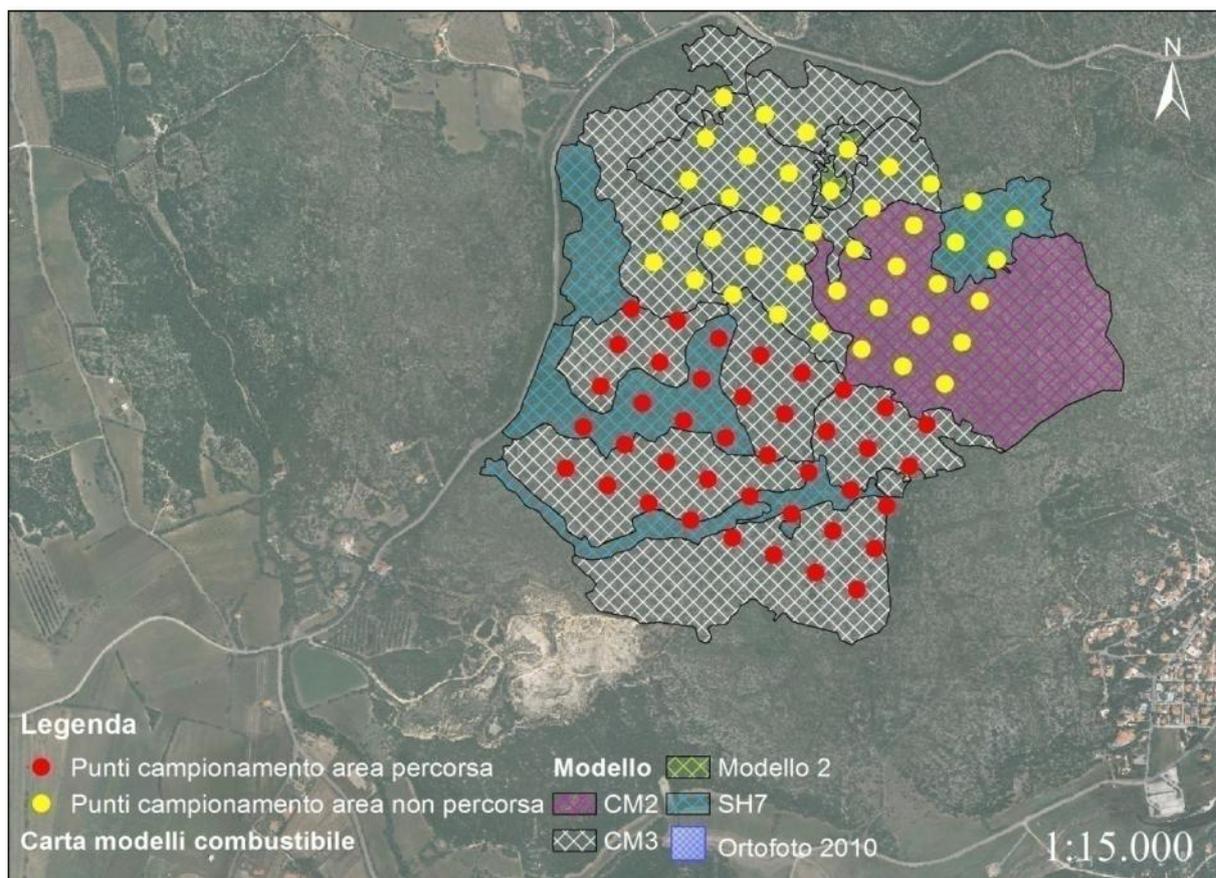
**Figura 5.1.1:** Carta dei modelli di combustibile presenti nell'area di studio di Laconi.



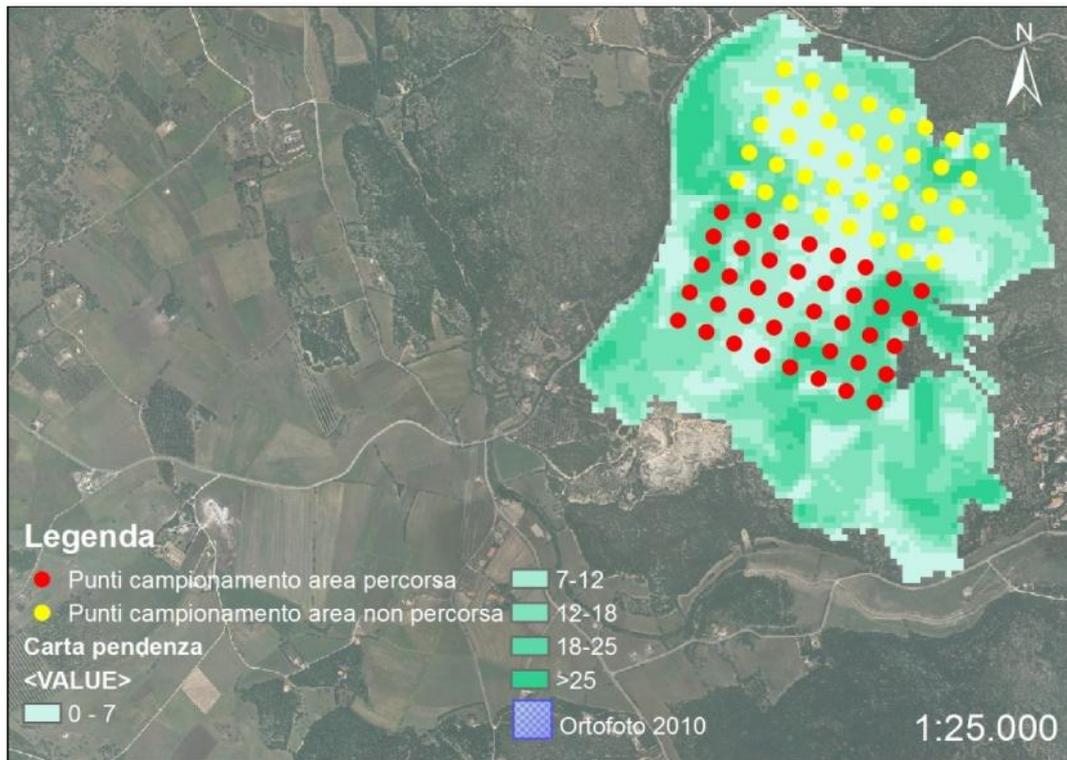
**Figura 5.1.2:** Carta delle pendenze area di studio Laconi.



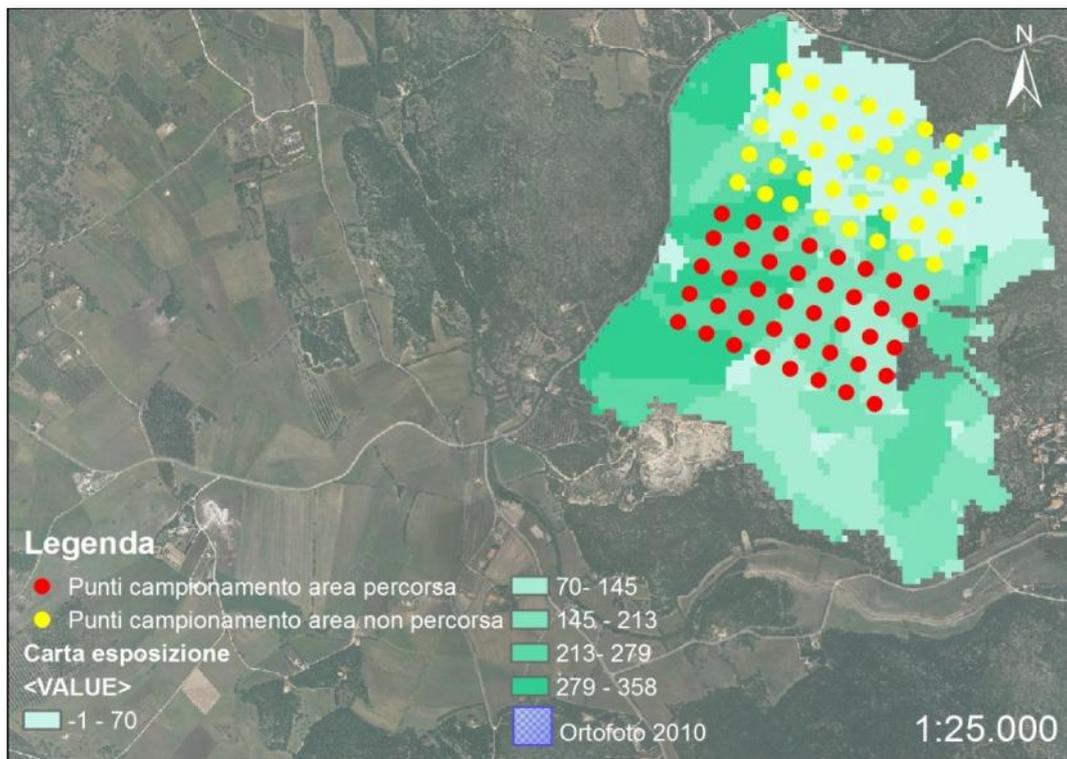
**Figura 5.1.3:** Carta dell'esposizione area di studio Laconi.



**Figura 5.1.4:** Carta dei modelli di combustibile presenti nell'area di studio di Sant'Antioco.



**Figura 5.1.5:** Carta delle pendenze area di studio Sant'Antioco.



**Figura 5.1.6:** Carta dell'esposizione area di studio Sant'Antioco.

## 5.2 Analisi chimico-fisiche

Nelle aree di studio sono stati effettuati i prelievi dei campioni di suolo sia nell'area percorsa che nella adiacente area non percorsa, per un totale di campioni di suolo pari a 160 su cui sono state eseguite le analisi chimico-fisiche.

Attraverso l'utilizzo di un GPS (*Global Positioning System*) è stato localizzato ogni punto di campionamento in campo (figura 5.2.1 a).

I campioni di suolo sono stati prelevati nel periodo tra febbraio e aprile 2015 nell'orizzonte di superficie (*topsoil*), generalmente definito A, ad una profondità di 15 cm, attraverso l'ausilio di una paletta. Prima del prelievo del campione di suolo, in ogni punto è stata rimossa la materia organica superficiale (eventuale vegetazione e/o lo strato di lettiera). Successivamente è stato estratto circa un chilogrammo di suolo ponendolo all'interno di sacchetti di plastica identificati con un'etichetta con il codice del campione (figura 5.2.1 b, c).



**Figura 5.2.1:** a) localizzazione punto di campionamento con GPS; b) prelievo campione di suolo; c) collocazione campione di suolo all'interno del sacchetto in plastica.

I campioni di suolo prelevati in campo sono stati lasciati essiccare a temperatura ambiente in appositi contenitori, secondo le indicazioni fornite dalle metodiche ufficiali (M.I.P.A.F., 2000), salvo diversamente specificato; una volta asciutti sono stati accuratamente omogeneizzati.

Su ogni campione di suolo prelevato sono state condotte le principali analisi chimico-fisiche presso i laboratori di Scienze del Suolo e Pedotecnologie del Dipartimento di Agraria, dell'Università degli Studi di Sassari con sede a Nuoro.

L'indagine fisico-chimica ha permesso di determinare, secondo i "Metodi ufficiali di analisi chimica e fisica del suolo" del Ministero delle Politiche Agricole e Forestali (Decreto Ministeriale del 13/09/1999) (M.I.P.A.F., 2000), i seguenti parametri:

1. Umidità
2. Densità apparente
3. Scheletro (> 2 mm)
4. Frazioni granulometriche e definizione della classe di tessitura sabbia, limo e argilla
5. Conducibilità elettrica
6. pH
7. Sostanza organica
8. Azoto totale
9. Fosforo totale

Per la determinazione dell'idrofobicità del suolo è stato condotto il test WDPT (*Water Drop Penetration Time*) che indica il tempo impiegato da una goccia d'acqua a penetrare un campione di suolo (Saldanha et al., 2015).

Vengono di seguito descritte sinteticamente le metodiche utilizzate per la determinazione dei diversi parametri, indicando con Metodo, seguito da codice numerico, la procedura imposta dal citato D.M.

### **5.2.1 Umidità**

La misura dell'umidità del suolo è fortemente dipendente dalle caratteristiche del suolo stesso nonché dal regime pluviometrico e consente di verificare la disponibilità di acqua nello strato interessato dagli apparati radicali delle piante. Il grado di umidità del suolo (definito umidità residua) è stato calcolato come differenza tra la massa del campione umido prelevato in campo e quella rilevata dopo essiccamento in stufa alla temperatura di 105° C fino a massa costante. “Metodo II.2” (determinazione gravimetrica del contenuto di umidità) (M.I.P.A.F., 2000). I risultati sono stati espressi in  $\text{g kg}^{-1}$ .

### **5.2.2 Densità apparente**

La densità esprime la massa riferita all'unità di volume. Si distingue fra la densità reale, che prende in considerazione solo il volume della frazione solida, e la densità apparente, che prende in considerazione il volume totale compresi quindi gli spazi vuoti.

Il campione di suolo è stato prelevato per mezzo di un carotatore cilindrico a volume noto ( $100 \text{ cm}^3$ ) munito di coperchi mobili e avente il bordo inferiore affilato (figura 5.2.2). In laboratorio si è proceduto con la pesata del campione, successivamente sistemato in stufa a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  e ripesato una volta raffreddato. “Metodo 1.3.1” (calcolo della massa volumica apparente); i risultati sono stati espressi in  $\text{g cm}^{-3}$ .



**Figura 5.2.2:** Carotaggio con cilindro, per la determinazione della densità apparente del suolo.

### 5.2.3 Analisi granulometriche

La frazione inorganica di un suolo è costituita da particelle aventi dimensioni differenti; a quelle con dimensioni superiori a 2 mm viene dato il nome di “scheletro”, mentre la frazione formata da particelle con diametro inferiore a 2 mm è denominata “terra fine”. Lo scheletro può essere ulteriormente suddiviso nelle seguenti classi: pietre (particelle con diametro superiore a 100 mm); sassi o ciottoli (particelle con diametro compreso tra 20 e 100 mm); ghiaia (particelle con diametro compreso tra 2 e 20 mm).

La terra fine, invece, è rappresentata da tre diversi tipi di particelle: sabbia, limo e argilla; queste, in base al diametro, si suddividono secondo la classificazione U.S.D.A. (United States Department of Agriculture) in: sabbia grossa (diametro delle particelle comprese tra 2 mm e 0.5 mm); sabbia fine (diametro delle particelle comprese tra 0.1 mm e 0.05 mm); limo (diametro delle particelle comprese tra 0.05 mm e 0.002 mm); argilla (diametro delle particelle inferiori a 0.002 mm).

L'analisi granulometrica consiste nella determinazione della distribuzione delle singole particelle minerali presenti nel suolo e costituenti la terra fine (dopo la rimozione dello scheletro) in base al loro diametro.

#### **5.2.4 Scheletro**

La determinazione dello scheletro è stata eseguita mediante setacciatura a secco del campione, con un setaccio a maglie da 2 mm, per separare la terra fine, il materiale rimasto sul setaccio costituisce lo scheletro. “Metodo II.1” (preparazione del campione e determinazione dello scheletro) (M.I.P.A.F., 2000). I risultati sono stati espressi in  $\text{g kg}^{-1}$ .

#### **5.2.5 Terra fine (sabbia, limo e argilla)**

Per una corretta determinazione analitica delle diverse frazioni granulometriche che costituiscono la terra fine, è necessario garantire un'ottimale dispersione delle particelle stesse, poiché queste possono essere cementate fra di loro per formare degli aggregati strutturali. I cementi che tendono a legare tra loro le particelle sono rappresentati dalla sostanza organica, dagli ossidi di ferro e dai carbonati (M.I.P.A.F., 2000). Il pretrattamento si è limitato alla sola eliminazione dei cementi organici. A tal fine sono stati pesati 20 g del campione di terra fine, poi inumiditi con acqua distillata e successivamente trattati con una soluzione diluita di perossido di idrogeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) e posti in piastra a circa  $70^\circ \text{C}$  per favorire la rimozione della sostanza organica.

Dopodiché sono stati aggiunti circa 250 ml di acqua distillata e 10 ml di sodio esametafosfato  $[\text{Na}(\text{PO}_3)]_6(50 \text{g L}^{-1})$  per favorire la dispersione delle particelle e impedirne nuovamente l'aggregazione. Dopo aver agitato e lasciato riposare per una notte, la sospensione è stata trasferita in un tubo di sedimentazione mediante passaggio attraverso un filtro a maglie da 0.2 mm sul quale si è raccolta la sabbia grossa. Sono stati eseguiti ripetuti lavaggi con acqua distillata della beuta contenente la sospensione iniziale facendo passare le acque di lavaggio sempre attraverso il filtro e portando a volume il contenuto del tubo a 500 ml. La sabbia raccolta nel filtro è stata trasferita in una capsula di porcellana, condizionata a  $105^\circ \text{C}$  e pesata su bilancia analitica, fatta essiccare in stufa a  $105^\circ \text{C}$  e portata a peso costante in essiccatore.

Le frazioni granulometriche di sabbia fine, limo e argilla, ancora presenti nel tubo di sedimentazione, sono state successivamente separate prelevando la sospensione di particelle a diverse altezze e a tempi prestabiliti, ricavabili dalla “Legge di Stokes”, che si basa sulla

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum “Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo” “Ciclo XXIX”. Università degli Studi di Sassari.

differente velocità di sedimentazione delle particelle in un fluido. Prima di effettuare il prelievo, la soluzione è stata agitata, in seguito sono stati eseguiti due prelievi con l'ausilio di una pipetta da 10 ml, rispettando i tempi di sedimentazione indicati dalla metodica:

1. 1° prelievo: dopo 4 minuti e 48 secondi dal termine dell'agitazione, per ricavare la frazione di limo e argilla;
2. 2° prelievo: dopo 8 ore dal termine dell'agitazione, per ricavare la frazione di sola argilla.

I 10 ml così prelevati sono stati trasferiti in capsule di porcellana (sempre condizionate in stufa a 105°C a peso costante). "Metodo II.4" (dispersione del campione di suolo, rimozione della sostanza organica) e "Metodo II.5" (determinazione della granulometria) (M.I.P.A.F., 2000).

### 5.2.6 Tessitura

Con il termine tessitura si intende la costituzione del suolo espressa come rapporto tra le particelle di diversa dimensione che lo compongono, convenzionalmente suddivise in classi, in funzione del loro diametro. La tessitura si esprime sulla base dei rapporti tra sabbia, limo e argilla, e può essere definita attraverso l'utilizzo dei "triangoli delle tessiture", di cui i più utilizzati sono quelli proposti dall'International Society for the Systems Sciences (I.S.S.S.) e dell'United States Department of Agriculture (U.S.D.A.).

Nel presente studio per la stima della tessitura è stato preso come riferimento il triangolo delle classi tessiture proposto dall'USDA, che individua 12 classi granulometriche di seguito elencate dalla più grossolana alla più fine (il termine "franco", indica che le frazioni di sabbia, limo e argilla, contenute nel suolo sono presenti in uguale percentuale): sabbioso franca, limosa, franco sabbiosa, franca, franco limosa, franco sabbiosa argillosa, franco argillosa, franco limosa argillosa, argilloso sabbiosa, argilloso limosa, argillosa.

### 5.2.7 pH

Il pH rappresenta la misura del grado di acidità nel suolo o, più propriamente, la misura della reazione del suolo (Violante e Adamo, 2000). La reazione del suolo si esprime in unità di pH che deve essere inteso in termini di attività chimica degli idrogenioni, e viene infatti definito come il logaritmo negativo della concentrazione di ioni  $H^+$  nella fase liquida:

$$pH = - \log [H^+]$$

Il pH del suolo dipende:

1. dalla presenza di idrogenioni nella soluzione circolante;
2. dal tipo e dal grado di saturazione dei colloidi argillosi ed organici;
3. dalla natura delle basi di scambio.

Il pH del suolo condiziona la solubilità dei vari elementi minerali, determinando il loro accumulo in forme più o meno disponibili per le piante o la loro lisciviazione verso gli orizzonti più profondi. La conoscenza del pH fornisce quindi indicazioni relative alla disponibilità di elementi minerali nella soluzione del suolo, sia provenienti dalla decomposizione dei minerali di origine che da altre fonti (Sequi, 1989).

Analiticamente il pH è stato determinato per via potenziometrica su un campione di suolo setacciato a 2 mm, immergendo l'elettrodo a vetro di un pH-metro in una sospensione suolo-acqua (in rapporto 1:2.5 cioè 10 g di campione in 25 ml d'acqua distillata), previa calibrazione dell'elettrodo con due soluzioni tampone a pH rispettivamente 4 e 7.

La lettura è stata effettuata utilizzando un pH-metro modello "Crison - micro pH 2001" dotato di elettrodo "Orion 8102SC - Thermo Electron Corporation". "Metodo III.1" (determinazione del grado di reazione pH) (M.I.P.A.F., 2000). I risultati sono stati espressi come unità di pH.

### **5.2.8 Conducibilità elettrica**

La conducibilità elettrica è un parametro molto importante in quanto strettamente legato alla salinità del suolo, infatti, tenuto conto che gli ioni in soluzione acquosa (cationi  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  ed anche anioni,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  ed altri) conducono corrente elettrica, la misura della conduttività elettrica consente di valutare in modo semplice e rapido la quantità totale di sali solubili presenti nel suolo. Essa è rappresentata dal valore reciproco della resistenza elettrica in Ohms di un centimetro cubo di acqua alla temperatura di 25°C.

L'alta salinità di un suolo provoca un aumento della pressione osmotica della soluzione circolante, causando problemi di fitotossicità ed effetti negativi sulla chimica e sulla fisica del suolo (Violante, 2000). La conducibilità elettrica è fortemente influenzata dal contenuto di acqua, dal pH, dalla capacità di scambio cationico, dal potenziale redox, dalla quantità di sostanze umiche e dall'attività microbica, nonché da fattori esterni quali il clima e fattori antropici come l'irrigazione e le concimazioni.

Il metodo utilizzato per la determinazione di tale parametro consiste nella lettura della conduttività elettrica specifica in estratti acquosi di suolo preparati con un rapporto peso

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

campione/volume di acqua distillata pari a 1:2 (15 g di campione in 30 ml d'acqua). La lettura è stata effettuata utilizzando come strumentazione un conduttimetro modello "InoLab Cond Level". Metodo IV.1 (determinazione della conduttività elettrica), (M.I.P.A.F., 2000). I risultati sono stati espressi in  $\text{dS m}^{-1}$ .

### **5.2.9 Azoto totale**

L'analisi dell'azoto totale ( $N_{\text{tot}}$ ) consente la determinazione delle frazioni di azoto organiche e ammoniacali presenti nel suolo. È impropriamente chiamata "azoto totale" perché in realtà non esprime la quantità delle forme ossidate di azoto (nitrati e nitriti) che rappresentano le forme disponibili nonché quelle fissate dai fillosilicati. L'azoto nel suolo è infatti presente in varie forme, due sole delle quali assimilabili dalle piante: quella nitrica, libera nella fase liquida e prontamente disponibile, e quella ammoniacale più lentamente disponibile ed adsorbita sul complesso di scambio ed in equilibrio con una piccola parte presente in soluzione.

La determinazione dell'azoto totale è stata eseguita su 2.500 g di terra fine secondo il procedimento di ossidazione per via umida. "Metodo XIV.3" (determinazione dell'azoto totale per distillazione secondo Kjeldahl) (M.I.P.A.F., 2000). Esso prevede la trasformazione dell'azoto organico presente nel campione in azoto ammoniacale mediante attacco con acido solforico concentrato ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) e perossido di idrogeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ).

La soluzione mineralizzata è stata trasferita quantitativamente in un matraccio tarato da 250 ml, attesa la sedimentazione del residuo insolubile nel matraccio, sono stati trasferiti 200 ml della soluzione nel distillatore. Dopo l'aggiunta di 16 g di idrossido di sodio NaOH, l'ammoniaca formatasi è stata distillata e assorbita su una soluzione a titolo noto di acido solforico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.01 M quantità 50 ml), il cui eccesso è stato poi titolato con idrossido di sodio (NaOH 0.02 M), usando come indicatore acido-base il verde di bromocresolo ( $\text{C}_{21}\text{H}_{14}\text{O}_5\text{Br}_4\text{S}$ ) e di rosso di metile ( $\text{C}_{15}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_2$ ). I risultati sono stati espressi in  $\text{g kg}^{-1}$ .

### **5.2.10 Fosforo totale**

Il fosforo nel suolo è presente quasi esclusivamente come ortofosfato [ $\text{PO}_4^{3-}$ ], anione dell'acido ortofosforico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), in forma inorganica o organica, e come tale viene assorbito e traslocato nelle parti epigee dei vegetali.

Il contenuto totale nel suolo è relativamente basso ed è compreso, normalmente, tra  $0.2 \text{ g kg}^{-1}$  e  $5 \text{ g kg}^{-1}$  (Arduino e Barberis, 2000).

La sua origine può essere sia naturale:

1. legato alla presenza nel suolo di composti organici derivanti dalle spoglie vegetali ed animali ed ai prodotti di sintesi microbica;
2. derivante dalla lisciviazione ed alla dissoluzione delle rocce (ad esempio le apatiti, minerali contenenti fosfato di calcio),
3. sia antropica, derivante dall'utilizzo di fertilizzanti a base minerale.

La determinazione del fosforo totale ( $P_{tot}$ ) prevede la mineralizzazione mediante il trattamento del campione con acido solforico, perossido di idrogeno e acido fluoridrico. Il contenuto di fosforo è stato determinato per spettrofotometria con il metodo del blu di molibdeno, "Metodo XV.1" (determinazione del fosforo totale), (M.I.P.A.F., 2000). Per ogni campione sono stati pesati  $0.500 \text{ g}$  di suolo, trattati con  $0.5 \text{ ml}$  di acido solforico concentrato ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) e circa  $3 \text{ ml}$  di perossido di idrogeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) goccia a goccia avendo cura di agitare bene dopo ogni aggiunta per facilitare la reazione di ossidazione. La miscela è stata riscaldata su piastra a  $50^\circ\text{C}$  per 10-12 minuti per eliminare l'eccesso di  $\text{H}_2\text{O}_2$ . In seguito al raffreddamento il campione è stato trasferito in matraccio tarato di plastica da  $50 \text{ ml}$  e portato a volume con acqua distillata. Per la determinazione dell'analita, un'aliquota della soluzione limpida è stata trasferita in matracci tarati di plastica da  $50 \text{ ml}$ , a questa sono state aggiunte alcune gocce dell'indicatore p-nitrofenolo ( $0.25\%$ ) e l'eccesso di acidità neutralizzato con idrossido di sodio ( $\text{NaOH } 5 \text{ M}$ ) fino a viraggio dell'indicatore a giallo ed infine aggiunti  $8 \text{ ml}$  del reagente solfomolibdico. Dopo 10 minuti il contenuto di fosforo totale è stato determinato per via spettrofotometrica alla lunghezza d'onda di  $720 \text{ nm}$  contro bianco analitico, utilizzando uno spettrofotometro UV-Vis modello "Perkin Elmer Lambda Bio 20". I risultati sono stati espressi in  $\text{mg kg}^{-1}$ .

### **5.2.11 Sostanza organica**

La sostanza organica può avere un ruolo importante nella pedogenesi ed influenzare in misura determinante molte proprietà chimiche, fisiche e biologiche del suolo (Sequi e De Nobilis, 2000):

1. costituisce la principale riserva di nutrienti come azoto, fosforo e zolfo

2. ad opera delle sue capacità chelanti favorisce il mantenimento in forma assimilabile di alcuni metalli come il ferro;
3. contribuisce a determinare la capacità di scambio cationico, favorendo l'assorbimento di cationi e anioni;
4. contribuisce a determinare la capacità tampone nei confronti dei cambiamenti di pH;
5. influenza positivamente la stabilità della struttura e il mantenimento di buone condizioni di permeabilità e areazione.

L'analisi è stata effettuata utilizzando il metodo di ossidazione per via umida, "Metodo VII.3", (determinazione del carbonio organico - Metodo Walkley-Black), (M.I.P.A.F., 2000).

Il carbonio organico viene ossidato ad anidride carbonica, in condizioni standardizzate, con soluzione di potassio bicromato ( $K_2Cr_2O_7$  0.167 M - 10 ml) in presenza di acido solforico concentrato ( $H_2SO_4$  - 20 ml).

Dopo un tempo di attesa di 30 minuti, la reazione viene interrotta per aggiunta di acqua distillata, la quantità di potassio bicromato che non ha reagito viene determinata per titolazione volumetrica con una soluzione di ferro (II) solfato eptaidrato ( $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$  0.5 M) previa aggiunta di acido fosforico ( $H_3PO_4$ -5 ml) e dell'indicatore di ossido-riduzione, sodio 4-difenilamminosolfonato ( $C_{12}H_{10}NaNO_3S$ ) fino al viraggio dal blu al verde.

Il contenuto di carbonio organico è stato espresso in  $g\ kg^{-1}$ .

Il contenuto di sostanza organica è stato invece stimato indirettamente moltiplicando la concentrazione del carbonio organico risultante dalle analisi, per un fattore di conversione pari a 1.724 (fattore di Van Bemmelen), il quale si basa sull'assunto che il carbonio rappresenti mediamente il 58% della composizione elementare della sostanza organica del suolo (Sequi e De Nobilis, 2000).

### **5.2.12 Idrofobicità**

La determinazione dell'idrofobicità è stata effettuata attraverso il test WDPT (*Water Drop Penetration Time*) che indica il tempo di infiltrazione di una goccia d'acqua in un campione di suolo. Il campione essiccato è stato inizialmente setacciato (maglia 2 mm) e attraverso l'utilizzo di un mortaio ridotto in polvere (Saldanha et al., 2015). Successivamente collocato all'interno di una piastra Petri (volume  $25\ cm^3$ ), e somministrando una goccia d'acqua (totale gocce acqua 3) con una pipetta Pasteur contemporaneamente è stato misurato il tempo di infiltrazione delle

gocce d'acqua nel campione di suolo (King, 1981; Saldanha et al., 2015). Ogni goccia è stata rilasciata da una altezza di 10 mm, per minimizzare l'impatto con la superficie, per ogni campione sono state effettuate 6 ripetizioni. I risultati sono stati espressi in secondi (s). Le classi di idrofobicità sono state assegnate seguendo la classificazione di Bisdom et al. (1993) e Doerr et al. (1998) (tabella 5.2.12.1):

**Tabella 5.2.12.1:** Classi di idrofobicità (Bisdom et al.,1993; Doerr et al., 1998).

<b>Classe</b>	<b>Idrofobicità</b>
<5s	assente/permeabile
$5 \leq \text{WDPT} < 60 \text{ s}$	lieve
$60 \leq \text{WDPT} < 600 \text{ s}$	forte
$600 \leq \text{WDPT} < 3600 \text{ s}$	grave

## 5.3 Elaborazioni statistiche

Le analisi statistiche dei dati sono state condotte prevalentemente mediante l'ausilio del software Statistica® 7.1 (StatSoft Inc Development, 2006).

### 5.3.1 ANOVA

Le differenze tra i parametri chimico-fisici dei campioni di suolo stimati nelle aree percorse e non percorse sono state comparate mediante Analisi della Varianza - ANOVA considerando un livello di significatività inferiore al 5% ( $p < 0,05$ ), che permette di comparare due o più gruppi di dati confrontando la variabilità *interna*, a questi gruppi, con la variabilità *tra* i gruppi. L'ANOVA verifica la presenza di differenze statisticamente significative tra medie, mediante il confronto delle varianze. Nel nostro caso è stato inoltre eseguito il test HSD (Honestly Significant Difference) di Tukey per saggiare quali gruppi fossero significativamente differenti tra loro.

### 5.3.2 Principal Factor Analysis (PFA)

L'analisi statistica, in particolare l'analisi multivariata, permette di valutare in maniera integrata le informazioni che si hanno a disposizione, in modo da fornire un'interpretazione più completa del fenomeno che si vuole indagare e poter quindi confermare le ipotesi formulate precedentemente con altre tipologie di elaborazione dei dati (Borůvka et al., 2005).

L'analisi fattoriale, ed in particolare la PFA (Principal Factor Analysis), viene comunemente utilizzata in analisi statistica multivariata applicata alla analisi ed interpretazione dei dati pedologici poiché si è dimostrata molto utile per comprendere meglio i principali processi ed i fenomeni che caratterizzano i suoli indagati (Reimann et al., 2002).

L'analisi fattoriale è inoltre uno strumento utilissimo, poiché consente sia di discriminare quali fattori abbiano il peso maggiore nel determinare la varianza osservata all'interno del modello indagato, sia di discriminare tali fattori rispetto ad altri; caratteristiche queste che non si riscontrano in altri strumenti, comunemente impiegati in analisi multivariata, come la principal component analysis (PCA) che risulta meno affidabile e robusta in questi casi (Reimann et al., 2002).

Affinché la PFA si rilevi davvero affidabile e statisticamente robusta, vanno comunque effettuate delle rigorose operazioni di elaborazione preliminare del dato, come di seguito specificato. Come prima cosa, deve essere verificato che le variabili abbiano o meno una distribuzione normale. Infatti, poiché i dati pedologici raramente mostrano una distribuzione normale (Reimann e Filzmoser; 2000), è consigliabile che, prima di qualsiasi analisi statistica, i dati vengano trasformati in una distribuzione più simmetrica per migliorare la robustezza statistica dei risultati (Reimann e Filzmoser, 2000; Templ et al., 2008). Secondo Reimann et al. (2002) e Templ et al. (2008), la trasformazione Box-Cox (Box e Cox, 1964), utilizzata in questo studio (dopo averne testato l'effettiva capacità, rispetto ad altre trasformazioni, tramite il test di normalità di Kolmogorov–Smirnov), è solitamente la trasformazione più potente, in quanto portala maggior parte dei dati il più vicino possibile alla normalità (Filzmoser et al., 2009).

Sui dati Box-Cox trasformati deve poi essere realizzata una matrice di correlazione di Pearson per stimare il grado di correlazione tra i parametri indagati. Il coefficiente di correlazione di Pearson è una misura di relazione tra due variabili e determina fino a che livello le due variabili risultano tra loro “proporzionali” cioè relazionate linearmente. Sulla matrice di correlazione viene infine realizzata l'analisi dei fattori principali (Principal Factor Analysis - PFA). Si tratta di un metodo di analisi multivariata volto a spiegare le correlazioni fra un insieme di  $p$  variabili osservate attraverso un insieme di  $m$  variabili non osservate (latenti) cui si dà il nome di “fattori” (Reimann et al., 2002). Per facilitare l'interpretazione dei risultati, è stata utilizzata la rotazione *varimax* poiché è una rotazione ortogonale che cerca di modificare i pesi fattoriali in modo da massimizzare la varianza fra i pesi fattoriali relativi ad ogni fattore, semplificando l'interpretazione. Questo tipo di rotazione opera una trasformazione degli assi in modo che, per ogni fattore, esistano poche variabili con pesi fattoriali elevati e più variabili possibile con pesi fattoriali vicino allo zero o trascurabili.

## 7. Risultati e discussioni

Per comprendere e interpretare i parametri chimico fisici dei suoli analizzati, è fondamentale conoscere e definire le caratteristiche degli incendi che hanno alterato e modificato le caratteristiche pedologiche dei substrati che hanno subito l'effetto del fuoco. Pertanto si riportano prima i risultati relativi alla caratterizzazione degli eventi utili per la discussione degli effetti post incendio sui suoli studiati.

### 7.1 Simulazione degli incendi

#### 7.1.1 Caso di studio Laconi

I risultati simulati con il software BehavePlus 5.0.5 sono:

1. la velocità di avanzamento del fronte di fiamma  $\text{m min}^{-1}$  (*Surface Rate of Spread*, ROS): mostra valori compresi tra 4.8 e 34.7  $\text{m min}^{-1}$  con una media pari a  $22.8 \pm 1.5 \text{ m min}^{-1}$ .
2. l'intensità lineare del fronte di fiamma  $\text{kW m}^{-1}$  (*Fireline intensity*, FLI): raggiunge valori massimi di 22466  $\text{kW m}^{-1}$  e minimi di 2188  $\text{kW m}^{-1}$  con una media pari a  $12092 \pm 1229 \text{ kW m}^{-1}$
3. la lunghezza del fronte di fiamma m (*Flame Length*, FL): varia da 2.7 a 8.0 m con una media di  $5.6 \pm 0.3 \text{ m}$  (Tabella, 7.1.1.1).

Per quanto riguarda il tipo di combustibile consumato, l'incendio è risultato essere un incendio di transizione, nello specifico di chioma passivo (*torching*); questo tipo di incendio è stato favorito dalla continuità verticale dei combustibili.

**Tabella 7.1.1.1:** Risultati simulazione del comportamento del fuoco, Laconi.

	ROS ( $\text{m min}^{-1}$ )	FLI ( $\text{kW m}^{-1}$ )	FL (m)
<b>Media</b>	22.8	12092	5.6
<b>Minimo</b>	4.8	2188	2.7
<b>Massimo</b>	34.7	22466	8.0
<b>Errore standard</b>	$\pm 1.5$	$\pm 1229$	$\pm 0.3$

In linea generale i valori di ROS, FLI e FL ottenuti dalla simulazione si allineano con quelli ottenuti da altri lavori condotti in area Mediterranea da Dimitrakopoulos (2002), Bacciu (2009), in condizioni simili di vegetazione.

Secondo la classificazione riportata da "Fire Behavior Field Reference Guide" (National Wildfire Coordinating Group, 2014) (tabella 7.1.1.2), che relaziona la velocità di avanzamento del fronte di fiamma  $m \text{ min}^{-1}$  con la lunghezza di fiamma  $m$ , l'evento di Laconi si può classificare come classe di comportamento estrema per valori di ROS e FL massimi, come classe molto alta per i valori di ROS e FL medi e come classe moderata per valori minimi degli stessi parametri considerati.

**Tabella 7.1.1.2:** Classi di comportamento del fuoco (Fire Behavior Field Reference Guide, 2014).

Classe di comportamento	ROS ( $m \text{ min}^{-1}$ )	FL (m)
Molto Bassa	0.0 - 0.60	0.0 - 0.30
Bassa	0.60 - 1.82	0.30 - 1.22
Moderata	1.82 - 6.70	1.22 - 2.43
Alta	6.70 - 16.74	2.43 - 3.65
Molto alta	16.74 - 47.24	3.65 - 7.62
Estrema	> 47.24	> 7.62

Secondo la classificazione di McCarthy e Tolhurst (1998) (Chatto e Tolhurst, 2004) che identifica le classi di severità del fuoco con i valori di intensità del fronte di fiamma (FLI  $kW \text{ m}^{-1}$ ), di lunghezza di fiamma (m) e del combustibile consumato in bosco (tabella 7.1.1.3) l'evento di Laconi risulta:

1. classe molto alta e alta di severità per i valori massimi e medi di FLI e FL;
2. classe moderata di severità per i valori minimi di FLI e FL.

**Tabella 7.1.1.3:** Comportamento del fuoco secondo la classificazione di McCarthy e Tolhurst (1998) (Chatto e Tolhurst, 2004).

Classi di severità del fuoco	FLI ( $kW \text{ m}^{-1}$ )	FL (m)	Combustibile
0	0	Non percorsa	Non percorsa
1 Bassa	< 500	<1.5	Parziale consumo del combustibile di superficie.
2 Moderata	500 - 3000	1.5 - 6.0	La maggior parte del combustibile di superficie viene consumato con una significativa scottatura del tronco e della chioma.
3 Alta	3000 - 7000	6.0 -15	Completo consumo del combustibile di superficie che porta ad un'esposizione del suolo in alcuni punti. Con un grado elevato di scottatura del tronco e del consumo di chioma.
4 Molto alta	> 7000	> 15	Completo consumo del combustibile sia di superficie che di chioma.

Con i parametri simulati è possibile comprendere la tipologia dell'evento atteso e le attività di soppressione da attuare. Secondo l'interpretazione data da Andrews et al. (2011) (tabella 7.1.1.4), considerando tutti valori di FLI quello di Laconi è stato un evento caratterizzato dalla presenza di salti di fuoco, da incendi di chioma con accelerazioni improvvise del fronte di fiamma in cui le azioni su questo non sono state efficaci, lo stesso si può affermare per i valori medio e massimo di FL. Riferendoci al valore minimo di FL l'indicazione fornita è che si tratta di un evento con possibili difficoltà nel controllo per via della presenza di salti di fuoco e incendi di chioma.

**Tabella 7.1.1.4:** Relazione tra la lunghezza di fiamma e l'intensità lineare negli incendi di superficie e interpretazione dei loro valori nelle attività di soppressione dell'incendio (Fonte: Andrews et al., 2011).

FL (m)	FLI (kW m <sup>-1</sup> )	Interpretazione
< 1.2	<350	Gli incendi possono generalmente essere attaccati alla testa o fianchi da operatori muniti di attrezzi manuali. La fascia realizzata manualmente è in grado di contenere l'incendio.
1.2 – 2.4	350 – 1700	Gli incendi sono troppo intensi per un attacco diretto alla testa da operatori muniti di attrezzi manuali. La fascia realizzata manualmente non garantisce il contenimento dell'incendio. Possono essere efficaci mezzi meccanici quali le ruspe e sostanze ritardanti.
2.4 – 3.4	1700 – 3500	Gli incendi possono presentare seri problemi nel controllo (salti di fuoco, incendi di chioma). Le azioni di controllo alla testa dell'incendio possono risultare inefficaci.
> 3.4	>3500	Salti di fuoco, incendi di chioma e accelerazioni improvvise dell'incendio sono probabili. Le azioni di controllo al fronte dell'incendio sono inefficaci.

Dall'analisi dei parametri di comportamento del fuoco si può affermare che l'incendio di Laconi può essere classificato come un “evento di notevole potenza energetica abbastanza veloce e nel complesso di importante severità anche considerando i valori minimi dei tre parametri stimati.”

### 7.1.2 Caso di studio Sant'Antioco

I risultati stimati dalla simulazione del comportamento del fuoco, sono:

1. la velocità di avanzamento del fronte di fiamma  $\text{m min}^{-1}$  (*Surface Rate of Spread*, ROS): mostra valori compresi tra 38.2 e 49.1  $\text{m min}^{-1}$  con una media pari a  $42.4 \pm 0.5 \text{ m min}^{-1}$ ;
2. l'intensità lineare del fronte di fiamma  $\text{kW m}^{-1}$  (*Fireline intensity*, FLI): valori massimi di 24021  $\text{kW m}^{-1}$  e minimi di 17612  $\text{kW m}^{-1}$  con una media pari a  $21667 \pm 360 \text{ kW m}^{-1}$
3. la lunghezza del fronte di fiamma  $\text{m}$  (*Flame Length*, FL): varia da 6.7 a 8.2 m con valore medio di  $7.6 \pm 0.1 \text{ m}$  (tabella, 7.1.2.1).

**Tabella 7.1.2.1:** Risultati simulazione del comportamento del fuoco, Sant'Antioco.

	ROS ( $\text{m min}^{-1}$ )	FLI ( $\text{kW m}^{-1}$ )	FL (m)
<b>Media</b>	42.4	21667	7.6
<b>Minimo</b>	38.2	17612	6.7
<b>Massimo</b>	49.1	24021	8.2
<b>Errore standard</b>	$\pm 0.5$	$\pm 360$	$\pm 0.1$

Per quanto riguarda le informazioni relative al tipo di combustibile consumato l'incendio è risultato essere un incendio di transizione nello specifico di chioma passivo (*torching*).

Anche in questo caso, i risultati si allineano con quelli ottenuti da altri lavori condotti in area Mediterranea da Dimitrakopoulos (2002) e Bacciu (2009), in condizioni simili di vegetazione nei quali sono stati calibrati e validati dei modelli di combustibile e per ognuno di questi vengono riportati i range di oscillazione dei valori relativi a questi parametri.

Secondo la classificazione riportata da "Fire Behavior Field Reference Guide" (National Wildfire Coordinating Group, 2014), l'evento di Sant'Antioco rientra come classi di comportamento estrema per valori di ROS e FL massimi e medi e come classe molto alta per valori minimi degli stessi parametri considerati.

Secondo la classificazione di McCarthy e Tolhurst (1998) (Chatto e Tolhurst, 2004) l'evento di Sant'Antioco risulta di classe molto alta e alta di severità per i valori massimi, medi e minimi di FLI e FL.

Per quanto riguarda le attività di soppressione da attuare, secondo l'interpretazione data da Andrews et al. (2011), considerando tutti valori di FLI e di FL, quello di Sant'Antioco è stato “un evento caratterizzato dalla presenza di salti di fuoco, da incendi di chioma con accelerazioni improvvise del fronte di fiamma e le azioni su questo risultano inefficaci.”

Dall'analisi dei parametri del comportamento del fuoco anche l'evento di Sant'Antioco deve essere stato di “notevole violenza sia in termini energetici che di diffusibilità considerando che anche per valore minimi ricade nel tipo di incendio a classe di comportamento e a severità alta.”

## 7.2. Parametri chimico-fisici

Nelle tabelle 7.2.1, 7.2.2, 7.2.3, 7.2.4 sono riportati i risultati dei parametri chimico-fisici dei campioni di suolo prelevati a Laconi e a Sant'Antioco, raggruppati per area percorsa e non percorsa.

Per ciascun parametro è stata saggiata la significatività delle differenze tra le aree percorse e non percorse con l'Analisi della Varianza (ANOVA) con un livello di significatività inferiore al 5% ( $p < 0,05$ ), seguita dal cosiddetto test di onestà di Tukey (tabella 7.2.5 e 7.2.6)

I dati sono stati espressi come media  $\pm$  errore standard e sono stati rappresentati attraverso degli istogrammi che mostrano l'andamento di ciascun parametro nelle diverse aree.

### 7.2.1 Densità apparente

La densità apparente è un importante indicatore di qualità del suolo e la sua misura permette di valutare il suo grado di compattazione. È un parametro direttamente correlato alla porosità del suolo, in particolare all'aumentare della densità apparente la porosità del suolo diminuisce. Questa proprietà fisica influenza direttamente la dinamica della fase liquida e di quella aeriforme nel suolo e, indirettamente, la fertilità fisica (Dazzi, 2013). La densità apparente è influenzata da diversi fattori come l'origine dei suoli, la tessitura, l'uso del suolo ed il tipo di soprassuolo (Logdson e Karlen, 2004).

I risultati relativi alla densità apparente rivelano come questa non mostri differenze statisticamente significative negli orizzonti di superficie (A) dei suoli percorsi e non percorsi dal fuoco presenti in entrambe le aree.

Nei suoli percorsi di Laconi (PL), la densità apparente varia da 0.65 a 1.17 g cm<sup>-3</sup> con una media di 0.92  $\pm$  0.02 g cm<sup>-3</sup>, in quelli non percorsi (NPL) i valori sono compresi tra 0.29-1.22 g cm<sup>-3</sup> con una media di 0.88  $\pm$  0.03 g cm<sup>-3</sup>.

I suoli percorsi a Sant'Antioco (PSA) registrano valori di densità apparente compresi tra 0.66 e 1.25 g cm<sup>-3</sup>, con una media di 0.94  $\pm$  0.02 g cm<sup>-3</sup>; in quelli non percorsi (NPSA) oscillano tra 0.64 e 1.22 g cm<sup>-3</sup>, con un valore medio di 1.00  $\pm$  0.02 g cm<sup>-3</sup>.

In studi simili a questo, condotti in Portogallo da Stoof et al. (2015) al fine di valutare gli effetti indotti dal fuoco (intensità evento e temperature raggiunte al suolo) sulle proprietà del suolo, è emerso che l'incendio non ha provocato significative variazioni sulla densità apparente. La

mancanza di queste differenze è stata associata alle temperature non estremamente elevate raggiunte al suolo, benché l'intensità del fuoco fosse talvolta "localmente" elevata (15000 kW m<sup>-1</sup> in alcuni punti). Gli autori attribuiscono questo risultato all'elevata umidità del suolo ed alla conseguente mancanza di correlazione tra intensità lineare del fronte di fiamma e riscaldamento del suolo (Stoof et al., 2013).

Ulteriori lavori sono stati sviluppati da Munoz-Rojas et al. (2016) in Australia su ecosistemi semi-aridi, con un monitoraggio effettuato per 14 anni. I dati rivelano che i valori di densità apparente non hanno subito variazioni statisticamente significative; questo è dovuto probabilmente alle basse temperature, raggiunte durante la combustione in ecosistemi semi-aridi (Wright e Clarke, 2008). Le basse temperature non sono in grado di provocare un riscaldamento del suolo tale da causare cambiamenti su questo parametro fisico (Cerdà e Doerr, 2005; Úbeda et al., 2009).

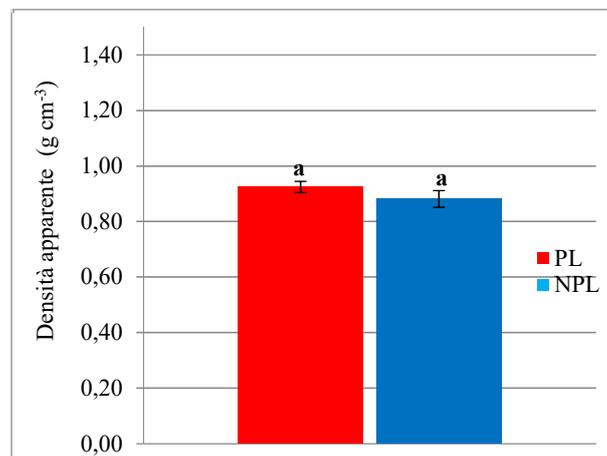
Questo risultato appare del tutto coerente con altri studi effettuati sia in campo che in laboratorio (Kutiel et al., 1995; Badía e Martí, 2003; Hatten et al., 2005; Stoof et al., 2010), dove i valori di densità apparente misurati ad un anno di distanza dall'evento non differiscono significativamente da quelli rilevati  $\pm 2/3$  giorni dall'incendio (Shakesby et al., 2013).

Considerando che i campioni di suolo analizzati sono stati prelevati nell'orizzonte A (15 cm), probabilmente a questa profondità le temperature raggiunte durante l'incendio non sono state così elevate tali da creare variazioni statisticamente significative su questo parametro. Infatti prendendo in esame i lavori di DeBano et al. (1977), Neary et al. (1999) e Verma e Jayakumar (2012) che riportano per incendi di alta severità temperature raggiunte al suolo non superiori a 675°C in superficie, 190°C a 2.5 cm e 75°C a 5.0 cm (tabella 7.2.1.1), si può tranquillamente considerare che per gli eventi classificati ad alta severità a Laconi e molto alta a Sant'Antioco non avranno registrato alte temperature nei primi 15 cm di suolo.

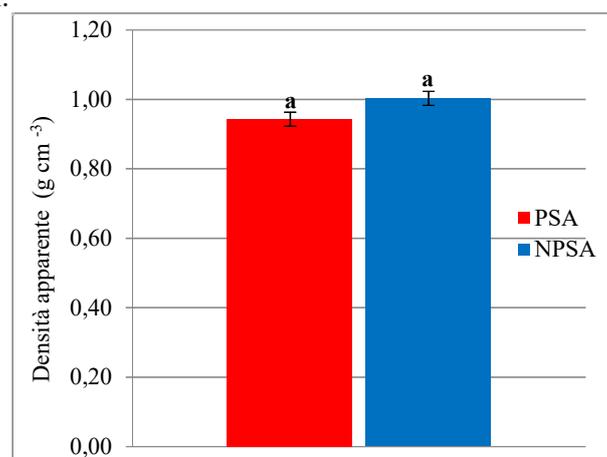
**Tabella 7.2.1.1:** Comparazione delle classi di severità con le temperature su vegetazione arbustiva (chaparral) (DeBano et al., 1977; Neary et al., 1999; Verma e Jayakumar, 2012)

	Severità		
	Bassa	Moderata	Alta
<b>Temperatura in superficie</b>	250°C	400°C	675°C
<b>Temperatura a 2.5 cm</b>	100°C	175°C	190°C
<b>Temperatura a 5.0 cm</b>	>50°C	50°C	75°C

È da rilevare che, anche se non vi sono differenze statisticamente significative i valori medi di densità apparente a Laconi a distanza di 2 anni dall'evento risultano tendenzialmente maggiori nell'area percorsa rispetto all'area non percorsa. Evidenziare la presenza di determinati trend, anche quando questi non abbiano una precisa risultanza statistica, è per alcuni autori fondamentale al fine di meglio comprendere i processi in atto. Infatti, alcuni autori riportano che la densità apparente nei suoli forestali è soggetta ad incrementi tendenziali dopo il passaggio del fuoco (Certini, 2005; Boerner et al., 2009), per effetto del collasso degli aggregati organo-minerali del suolo, dell'intasamento dei pori da parte delle ceneri e della flocculazione delle argille, processi che complessivamente determinano una diminuzione della porosità e della permeabilità del suolo (Durgin e Vogelsang, 1984; Certini, 2005; Ebel et al., 2012; Stoof et al., 2015).



**Figura 7.2.1.1:** Comparazione tra contenuti medi in densità apparente tra area percorsa (PL) e non percorsa (NPL) a Laconi.



**Figura 7.2.1.2:** Comparazione tra contenuti medi in densità apparente tra area percorsa (PSA) e non percorsa (NPSA) a Sant'Antioco.

### 7.2.2 Sabbia, limo e argilla

Nei suoli percorsi in località Laconi (PL) il quantitativo di sabbia varia dal 7 al 41%, con un valore medio pari a  $19\pm 3\%$ , mentre in quelli non percorsi Laconi (NPL) il contenuto di sabbia è compreso tra 3 e 38%, con una media di  $15\pm 3\%$ .

I risultati della ANOVA per i contenuti in sabbia non rivelano differenze statisticamente significative tra area percorsa e non percorsa.

Gli orizzonti di superficie dei suoli PL mostrano valori del contenuto medio in limo e argilla pari a  $72\pm 3\%$  e  $9\pm 3\%$ , mentre nei suoli NPL risulta pari a  $73\pm 3\%$  e  $12\pm 3\%$ .

Come per la sabbia, anche per queste due frazioni granulometriche non si evidenziano differenze statisticamente significative ( $p < 0,05$ ). Dal punto di vista della tessitura si tratta in entrambe i casi (area percorsa e non percorsa) di suoli franco-limosi. Anche in studi precedenti di Munoz-Rojas et al. (2016) e Parlak (2011) si evidenziano differenze non significative dopo il passaggio del fuoco e gli stessi autori evidenziano che le diverse frazioni granulometriche (sabbia, limo e argilla) mostrano spesso una elevata resistenza al fuoco.

I suoli percorsi in località di Sant'Antioco (PSA) presentano un valore medio di sabbia, limo e argilla di  $17\pm 3\%$ ,  $74\pm 2\%$  e  $9\pm 1\%$ ; mentre il contenuto medio nei suoli non percorsi Sant'Antioco (NPSA) risulta pari a  $9\pm 1\%$ ,  $76\pm 2\%$  e  $15\pm 2\%$ . Anche in questo caso si tratta dunque di suoli a tessitura franco-limosa.

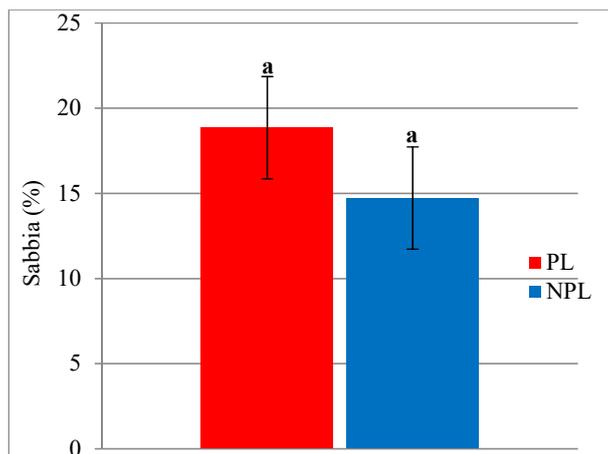
I risultati dell'ANOVA mostrano che, relativamente al contenuto in limo tra le due aree, non esistono differenze significative ( $p < 0,05$ ), mentre queste si rilevano per i valori medi della sabbia e dell'argilla che risultano significativamente differenti ( $p < 0,05$ ).

Nelle aree percorse la sabbia è statisticamente superiore rispetto a quelle non percorse, mentre l'opposto vale per l'argilla. Questo risultato è estremamente interessante poiché mostra la tendenza verso probabili processi erosivi in atto nelle aree percorse da incendio. Infatti, come indicato in altri lavori, la composizione granulometrica degli orizzonti di superficie non cambia in modo diretto ma per effetto dell'erosione, che può rimuovere selettivamente la frazione più fine (Certini, 2005). A causa della mancanza di copertura vegetale le piogge battenti potrebbero aver innescato processi erosivi superficiali, con allontanamento delle frazioni più fini (argilla), arricchendo invece il suolo della frazione residuale sabbiosa. Tale processo è particolarmente evidente a Sant'Antioco, rispetto a Laconi, probabilmente perché le pendenze risultano estremamente più marcate e per effetto del fronte di fiamma che con la sua notevole potenza

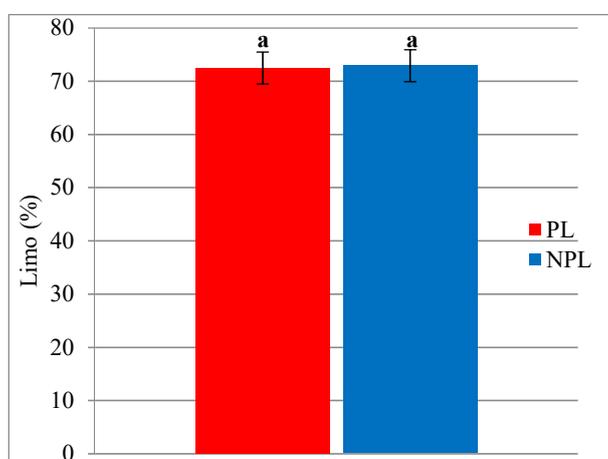
energetica ha coinvolto e danneggiato tutto il complesso vegetazionale. Con molta probabilità il duplice effetto pendenza/incendio a Sant'Antioco ha ampliato notevolmente i processi erosivi idrici superficiali.

Inoltre è interessante rilevare come lo stesso risultato sia già stato riscontrato in precedenti studi (Sertso e Sanchez, 1978; Giovannini et al., 1988; Ulery e Graham, 1993; Terefe et al., 2008; Parlak, 2011; Verma e Jayakumar, 2012) dove però spesso tale differenza viene motivata da una maggiore sensibilità strutturale delle argille che potrebbe condurre alla calcinazione del ferro e degli alluminosilicati.

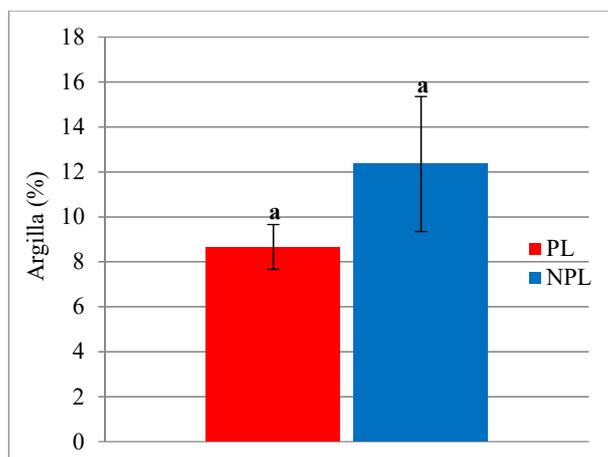
Nel nostro caso invece, benché tale processo non possa escludersi a priori, appare comunque più evidente una forte influenza di processi del tipo fisico-idrologico fortemente connessi alle pendenze e al tipo di incendio molto severo.



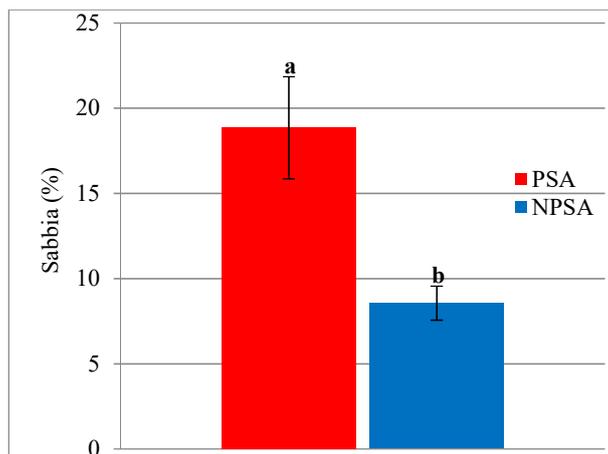
**Figura 7.2.2.1:** Comparazione contenuti medi in sabbia tra area percorsa (PL) e non percorsa (NPL) a Laconi.



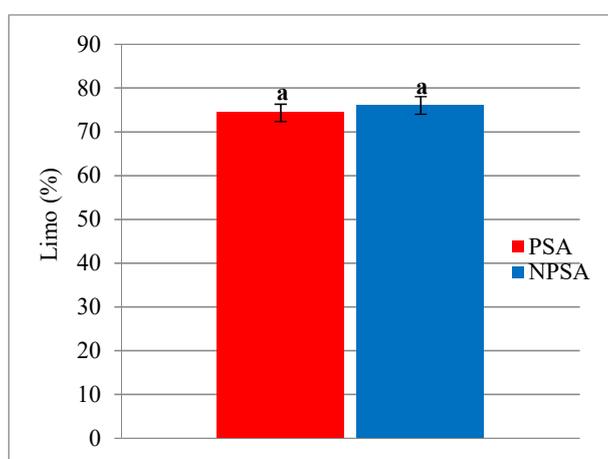
**Figura 7.2.2.2:** Comparazione contenuti medi in limo tra area percorsa (PL) e non percorsa (NPL) a Laconi.



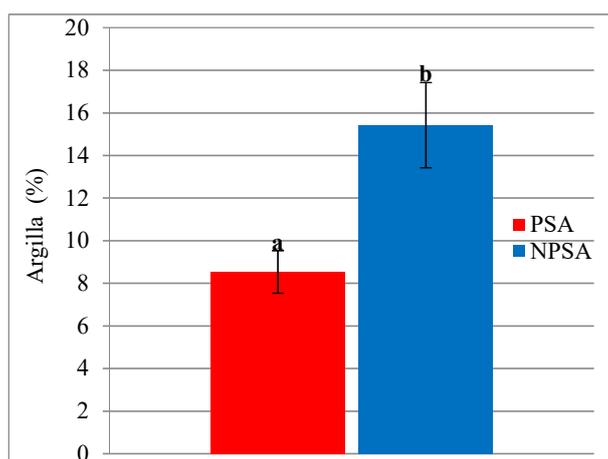
**Figura 7.2.2.3:** Comparazione contenuti medi in argilla tra area percorsa (PL) e non percorsa (NPL) a Laconi.



**Figura 7.2.2.4:** Comparazione contenuti medi in sabbia tra area percorsa (PSA) e non percorsa (NPSA) a Sant’Antioco.



**Figura 7.2.2.5:** Comparazione contenuti medi in limo tra area percorsa (PSA) e non percorsa (NPSA) a Sant’Antioco.



**Figura 7.2.2.6:** Comparazione tra contenuti medi in argilla tra area percorsa (PSA) e non percorsa (NPSA) a Sant’Antioco.

### 7.2.3 pH

Nei suoli percorsi in località Laconi (PL) il pH mostra valori che vanno da 6.5 a 8.2, con una media di  $7.6 \pm 0.05$ ; nei suoli non percorsi nell'area di Laconi (NPL) si presentano valori molto simili, compresi tra 6.3-7.8 con una media di  $7.4 \pm 0.05$ . In entrambe i casi si tratta dunque di pH debolmente alcalini.

Nei suoli percorsi in località Sant'Antioco (PSA) si rilevano, a causa della simile natura del substrato pedogenetico (in entrambe i casi calcari), pH molto simili a quelli di Laconi (range 7.0-8.2 media  $7.5 \pm 0.05$ ). Stesso discorso vale ovviamente per i suoli non percorsi in località di Sant'Antioco (NPSA) dove si rilevano range da 6.4-8.4 ed una media di  $7.3 \pm 0.05$ . Anche in questo caso dunque si tratta di pH mediamente debolmente alcalini.

Dall'analisi della varianza sui valori medi di pH non risultano differenze statisticamente significative ( $p < 0.05$ ), per entrambe i siti indagati, tra aree percorse e non percorse.

È stato rilevato come il pH negli orizzonti di superficie aumenti solitamente nelle fasi immediatamente successive al passaggio dell'incendio, ma dopo qualche tempo (spesso poche settimane) i valori ritornano a valori pre-incendio (Cerdà e Robichaud, 2009).

Ricordiamo che dal momento del campionamento dei suoli alla data degli incendi, nel nostro caso di studio, sono passati rispettivamente 2 anni a Laconi e 5 a Sant'Antioco.

L'incremento del pH, a seguito del passaggio del fuoco, è di solito temporaneo, in quanto dovuto alla combustione di materia organica e alla produzione di ceneri in grado di incrementare il contenuto in cationi basici al suolo (Ulery et al., 1995; Fernandez et al., 1997; Arocena e Opio, 2003; Dikici e Yilmaz, 2006; Montoya et al., 2013; Xue et al., 2014).

Nei periodi immediatamente successivi ad un evento, le prime piogge porteranno comunque ad una rimozione per lisciviazione, spesso rapida, di questi cationi generalmente molto solubili (Jordán et al., 2010; Pereira et al., 2010). Questo processo è inoltre fortemente condizionato da fattori quali quantità di cenere rilasciata durante la combustione, composizione chimica delle ceneri, pH iniziale del suolo e sua tessitura (Wells et al., 1979; Cass et al., 1984, Mataix-Solera, 1999, Cerdà e Robichaud, 2009). In altre ricerche si evidenzia inoltre come il variare del pH post-incendio possa essere fortemente influenzato dall'intensità lineare e dalle temperature raggiunte durante l'incendio (Certini, 2005) e che significativi aumenti di pH si verificano ad alte temperature raggiunte nel suolo ( $>450^{\circ}\text{C}$  - $500^{\circ}\text{C}$ ), (Badia e Martí, 2003)

DeBano et al. (1977), Neary et al. (1999) e Verma e Jayakumar (2012) riportano che durante incendi di alta severità le temperature raggiunte al suolo risultano di 675°C in superficie, 190°C a - 2.50 cm e 75°C a - 5.0 cm (tabella 7.2.3.1).

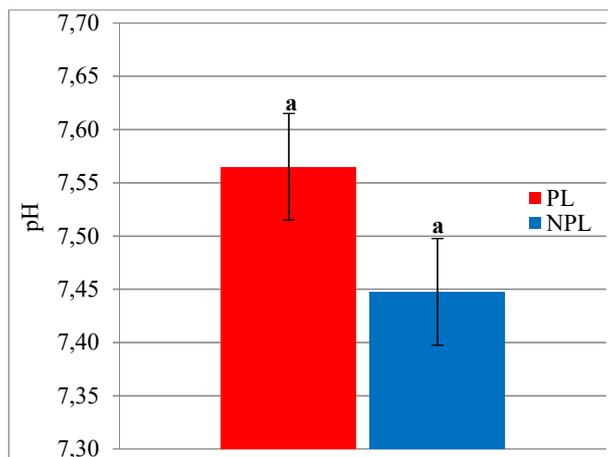
**Tabella 7.2.3.1:** Comparazione delle classi di severità con le temperature su vegetazione arbustiva (chaparral) (DeBano et al., 1977; Neary et al., 1999; Verma e Jayakumar, 2012)

	Severità		
	Bassa	Moderata	Alta
<b>Temperatura in superficie</b>	250°C	400°C	675°C
<b>Temperatura a - 2.50 cm</b>	100°C	175°C	190°C
<b>Temperatura a - 5.0 cm</b>	>50°C	50°C	75°C

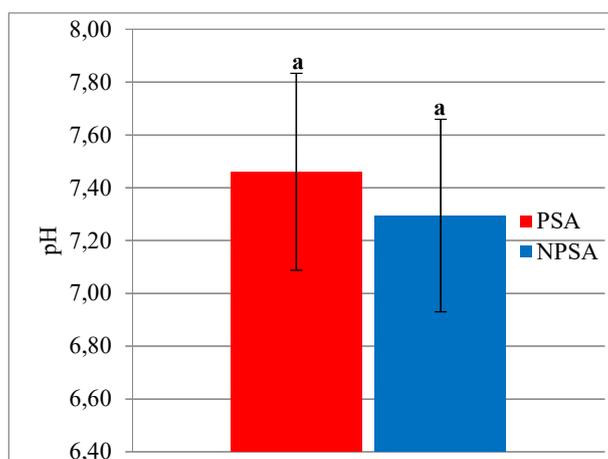
Nel presente lavoro il campionamento di suolo è stato effettuato nell'orizzonte A (15 cm), probabilmente a questa profondità le temperature non erano così elevate tali da creare variazioni statisticamente significative su questo parametro, nonostante si tratti di eventi ad alta severità a Laconi e molto alta a Sant'Antioco.

I risultati ottenuti nelle aree di studio di Laconi e Sant'Antioco, sono in linea con quelli rilevati da Úbeda et al. (2009) e da Montoya et al. (2013), nei loro studi sulle conseguenze del fuoco sulle proprietà del suolo in Catalogna (NE Spagna) e Granada (Spagna del sud).

È emerso infatti come non vi siano differenze statisticamente significative tra i valori di pH riscontrati in campioni di suolo incombusti e combusti. Questi risultati concordano inoltre con quanto riportato da Certini (2005) relativamente alle variazioni di pH indotte dal passaggio del fuoco nei suoli calcarei; l'autore, nella sua review sugli effetti dell'incendio sul suolo, riporta infatti come tali cambiamenti siano spesso trascurabili in questa tipologia di suoli.



**Figura 7.2.3.1:** Comparazione tra contenuti medi di pH tra area percorsa (PL) e non percorsa (NPL) a Laconi.



**Figura 7.2.3.2:** Comparazione tra contenuti medi di pH tra area percorsa (PSA) e non percorsa (NPSA) a Sant'Antioco.

#### 7.2.4 Conducibilità elettrica

La misura della conducibilità elettrica (CE) fornisce una stima della concentrazione dei sali solubili presenti nel suolo. I sali solubili presenti, indipendentemente dalla propria origine sono indispensabili per la nutrizione delle piante, ma la concentrazione deve essere contenuta entro certi valori.

Nelle aree indagate a Laconi i valori medi nei suoli percorsi (PL) e non percorsi (NPL) risultano essere pari a  $0.32 \pm 0.01 \text{ dS m}^{-1}$  e  $0.35 \pm 0.03 \text{ dS m}^{-1}$ .

I valori medi ottenuti a Sant'Antioco per i suoli percorsi (PSA) e per quelli non percorsi (NPSA) risultano pari a  $0.24 \pm 0.01 \text{ dS m}^{-1}$  e  $0.21 \pm 0.01 \text{ dS m}^{-1}$ .

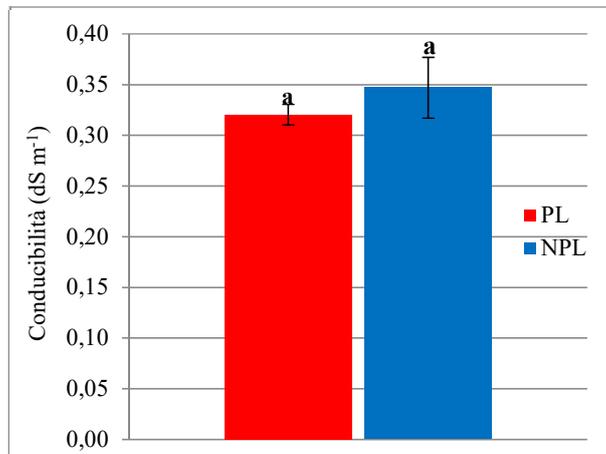
L'ANOVA mostra che i valori medi di CE sia per Laconi che per Sant'Antioco, non mostrano alcuna differenza statisticamente significativa ( $p < 0.05$ ) tra area percorsa e non percorsa.

La CE del suolo è un parametro poco riportato nei lavori relativi agli effetti del fuoco sul suolo; generalmente essa aumenta dopo il passaggio del fuoco a causa del rilascio di ceneri ricche di elementi alcalino terrosi.

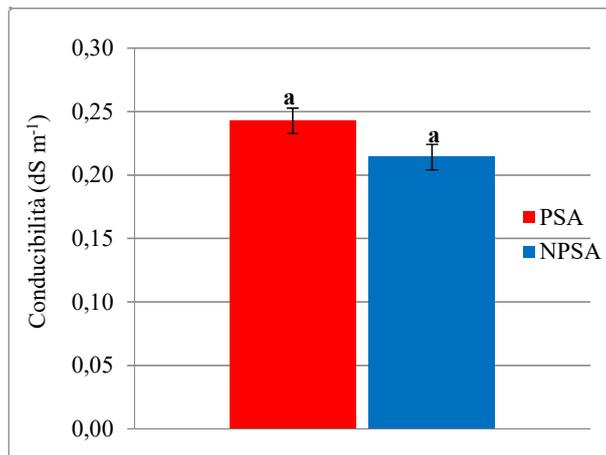
I risultati ottenuti nella presente ricerca, sono in linea con quelli osservati da Úbeda e Outeiro (2009), in Spagna, su un'area percorsa da incendi, dove non sono state rilevate differenze statisticamente significative nei valori di CE pre e post incendio. In uno studio condotto da Pardini et al. (2004), nel nord-est della Spagna, è stato rilevato un leggero incremento della CE ma anche in questo caso questo non è risultato statisticamente significativo.

In altri studi è stato invece osservato l'opposto, con valori medi di CE nelle aree non percorse inferiori rispetto a quelle percorse. Ad esempio Alcañiz et al. (2016), in uno studio condotto in Catalogna, hanno rilevato che i valori di CE, un anno dopo l'evento, risultavano inferiori rispetto a quelli rilevati prima dell'incendio; secondo gli autori questo è attribuibile alla lisciviazione degli ioni (Ubeda et al., 2005; Alcañiz et al., 2016) per scorrimento superficiale (Badía e Martí, 2008). Infatti, nella stessa area, nove anni dopo l'evento, i valori di CE risultavano superiori ai valori pre-incendio, per effetto della ricolonizzazione dell'area percorsa dal fuoco da parte della vegetazione (Scharenbroch et al., 2012, Alcañiz et al., 2016). Nel caso di Laconi ad una distanza di 2 anni dal passaggio del fuoco, i valori di CE risultano inferiori nell'area percorsa a conferma di quanto affermato da Alcañiz et al. (2016) ed Ubeda et al. (2005). A Sant'Antioco a distanza di 5 anni dal passaggio del fuoco i valori di CE risultano

superiori nell'area percorsa in linea con quanto Scharenbroch et al. (2012) e Alcañiz et.al. (2016) hanno dimostrato.



**Figura 7.2.4.1:** Comparazione tra contenuti medi in CE tra area percorsa (PL) e non percorsa (NPL) a Laconi.



**Figura 7.2.4.2:** Comparazione tra contenuti medi in CE tra area percorsa (PSA) e non percorsa (NPSA) a Sant'Antioco.

### 7.2.5 Azoto totale

L'azoto (N) è uno dei macroelementi più importanti per la pianta ed è per questo considerato uno dei fattori principali di fertilità del suolo. Nel suolo si può trovare sia in forma organica che inorganica, che complessivamente costituiscono l'azoto totale(N). Nel suolo il 97-99% dell'azoto totale è costituito da azoto organico, mentre il rimanente è quello utilizzato/adsorbito dalle piante (forma ammoniacale e nitrica).

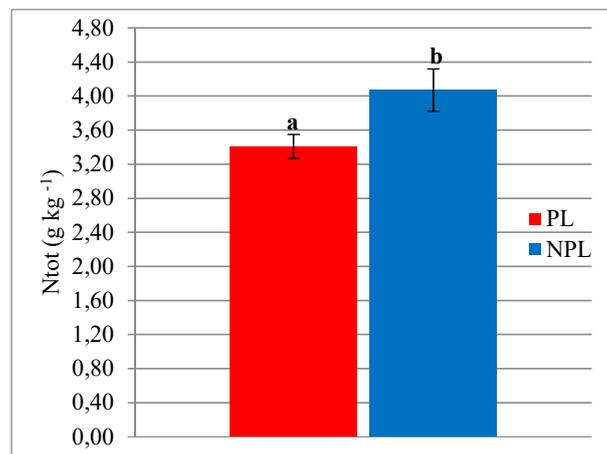
Il contenuto medio di N totale (N<sub>tot</sub>) nei suoli percorsi di Laconi (PL) è pari a  $3.4 \pm 0.1 \text{ g kg}^{-1}$  mentre in quelli non percorsi (NPL) è  $4.1 \pm 0.3 \text{ g kg}^{-1}$ . A Sant'Antioco nell'area percorsa (PSA) e non percorsa (NPSA) sono stati invece rilevati i seguenti valori medi  $2.0 \pm 0.1 \text{ g kg}^{-1}$  e  $2.1 \pm 0.1 \text{ g kg}^{-1}$ .

L'ANOVA evidenzia che i contenuti medi in N<sub>tot</sub> nei suoli di Laconi risultano statisticamente superiori ( $p < 0.05$ ) nell'area non percorsa rispetto a quella percorsa; per i suoli di Sant'Antioco non esiste alcuna differenza statisticamente significativa ( $p < 0.05$ ) tra le due aree.

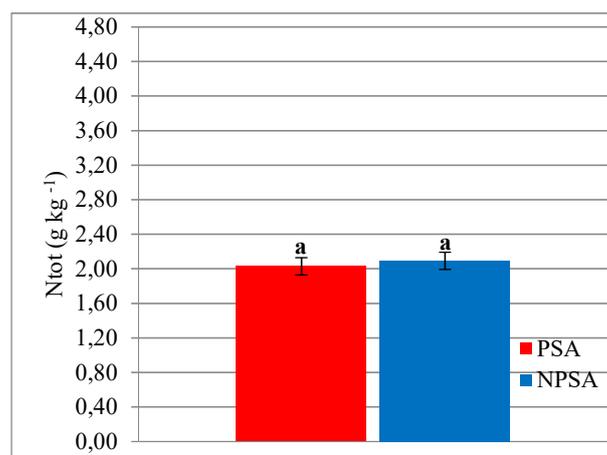
I contenuti in N del suolo risultano spesso fortemente dipendenti dalle temperature e dall'intensità raggiunte durante l'incendio (Pereira et al., 2012). Nelle fasi immediatamente successive si può solitamente assistere ad un decremento di questo elemento, causato da perdite per volatilizzazione (Fisher e Binkley, 2000; Certini, 2005) soprattutto quando si raggiungono temperature ed intensità elevate. Le ricerche hanno rilevato risultati contrastanti, ovvero: un aumento (Kovacic et al., 1986; Schoch e Binkley, 1986; Covington e Sackett, 1992; Grogan et al., 2000); una diminuzione (Raison et al., 1987; Turner et al., 2007); o variazioni non statisticamente significative dopo il passaggio del fuoco (Simard et al., 2001; Moghaddas e Stephens, 2007). Questa forte variabilità nei risultati può essere riconducibile a fattori ambientali prettamente legati al tipo di suolo (Alcañiz et al., 2016).

A seguito di incendi di bassa intensità, l'azoto nel suolo può essere più disponibile attraverso sia processi biologici che non biologici in grado di convertire le forme organiche nelle forme inorganiche dell'ammonio ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) e del nitrato ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ). Tuttavia, su incendi di media ed alta intensità si assiste ad una riduzione del quantitativo in azoto (Mataix-Solera e Guerrero, 2007; Alcañiz et al., 2016), sia per via diretta, attraverso il consumo per combustione, sia attraverso la volatilizzazione in  $\text{NH}_4$ . Inoltre l' $\text{NO}_3$ , che a seguito della combustione può subire una conversione, può essere perso attraverso denitrificazione, lisciviazione o ruscellamento superficiale. Trattandosi a Laconi di un incendio ad alta potenza energetica e quindi ricadente

all'interno di una classe di severità alta, questo potrebbe aver causato una riduzione del quantitativo di azoto. Inoltre a causa del passaggio dell'incendio si potrebbero essere innescati dei fenomeni di ruscellamento/erosione superficiale con conseguente lisciviazione ed allontanamento dell'azoto. Da questo punto di vista, secondo studi di Badia e Martì (2003), su substrati calcarei in area mediterranea, il quantitativo di azoto perso in simili condizioni può rappresentare i 2/3 del quantitativo totale pre-incendio soprattutto (ma non solo). A Sant'Antioco anche se non intercorre una differenza tra le due aree (PSA e NPSA), nell'area percorsa il quantitativo di N risulta leggermente inferiore. Si ricorda che l'incendio è stato classificato come evento a severità molto alta ma il passaggio del fuoco dal campionamento del suolo è avvenuto dopo 5 anni. Probabilmente l'ecosistema in questo periodo di tempo potrebbe aver ripristinato le condizioni pre-incendio e non ha pertanto fatto registrare la riduzione significativa di azoto.



**Figura 7.2.5.1:** Comparazione tra contenuti medi in Ntot tra area percorsa (PL) e non percorsa (NPL) a Laconi.



**Figura 7.2.5.2:** Comparazione tra contenuti medi in Ntot tra area percorsa (PSA) e non percorsa (NPSA) a Sant'Antioco.

## 7.2.6 Fosforo totale

Il fosforo (P) è presente nel suolo quasi esclusivamente come ortofosfato in forma inorganica o organica. Il contenuto totale di fosforo nei suoli è relativamente basso ed è compreso normalmente tra 0.2-5 g kg<sup>-1</sup> (Arduino e Barberis, 2000).

I valori medi di fosforo totale nell'area percorsa Laconi (PL) e non percorsa (NPL) risultano pari a 511.4 ± 24 mg kg<sup>-1</sup> per le prime mentre per le seconde 540.8 ± 35 mg kg<sup>-1</sup>.

Nei suoli analizzati a Sant'Antioco su area percorsa (PSA) e non (NPSA) il contenuto medio di fosforo totale risulta pari a 313.2 ± 27.6 mg kg<sup>-1</sup> e 287.8 ± 14.3 mg kg<sup>-1</sup>.

I risultati relativi all'ANOVA per il quantitativo di fosforo totale sia per Laconi che per Sant'Antioco non mostrano differenze statisticamente significative (p<0,05).

Il fosforo organico dopo il passaggio del fuoco mineralizza in ortofosfato, la perdita per mineralizzazione è spesso trascurabile. Qualora non venga prontamente assunto dalla vegetazione, può subire processi di precipitazione in forme minerali poco disponibili (Certini, 2005).

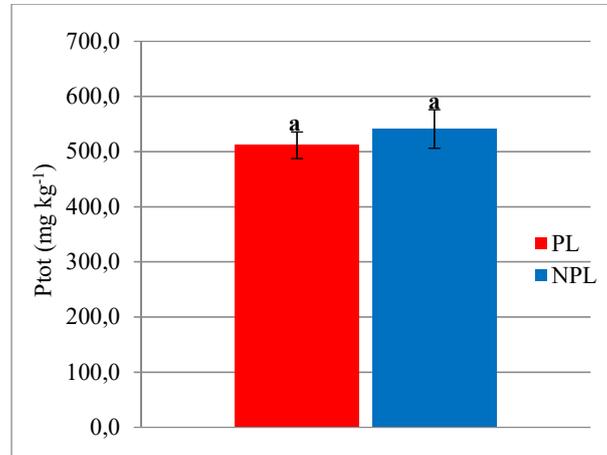
La disponibile di fosforo aumenta dopo il passaggio del fuoco per effetto della combustione della vegetazione, la conseguente incorporazione di cenere nel suolo e la mineralizzazione del fosforo organico (Giovannini e Lucchesi, 1997; Mataix-Solera, 1999; Pereira et al., 2012; Alcañiz et.al., 2016).

Pertanto, gli incendi determinano un arricchimento di P disponibile (Serrasolsas e Khanna 1995; Certini, 2005), ma questo arricchimento è destinato a diminuire. Infatti, in terreni acidi ortofosfato si lega agli ossidi di Al, Fe, Mn, mentre in terreni neutri o alcalini si lega a Ca-minerali o precipitati come discreti Ca-fosfato (Certini, 2005).

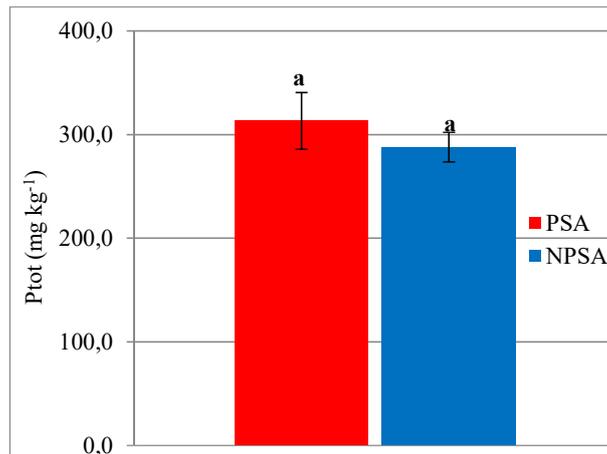
Dall'analisi della varianza emerge che sia per il caso di studio di Laconi che per quello di Sant'Antioco non esiste una differenza statistica significativa, in accordo con altri lavori, dai quali si evince che il quantitativo di fosforo incrementa in modo temporaneo. Anche se non vi è una differenza significativa tra le due aree (PL e NPL) a Laconi, a distanza di due anni dall'evento, il quantitativo di fosforo è minore nell'area percorsa. Alcañiz et.al (2016) in Spagna notarono che a distanza di un anno dal passaggio del fuoco il contenuto in fosforo dell'area percorsa era minore rispetto ai valori pre-incendio.

A Sant'Antioco il quantitativo di fosforo è maggiore nell'area percorsa rispetto all'area testimone, in linea con altri lavori di Úbeda et al. (2005), Romana et al. (1994) infatti, dai loro

studi emerge che il quantitativo di fosforo nell'area percorsa è ancora superiore dopo diversi anni dal passaggio del fuoco, ed in particolare Macadam (1987) evidenzia che dopo anni dal passaggio del fuoco, il quantitativo di fosforo presente nell'orizzonte minerale era incrementato del 50% rispetto ai valori riscontrati subito dopo la combustione (Xue et al., 2014).



**Figura 7.2.6.1:** Comparazione tra contenuti medi in Ptot tra area percorsa (PL) e non percorsa (NPL) a Laconi.



**Figura 7.2.6.2:** Comparazione tra contenuti medi in Ptot tra area percorsa (PSA) e non percorsa (NPSA) a Sant'Antioco.

### 7.2.7 Sostanza organica

La sostanza organica (SO) ha un ruolo importante nella pedogenesi ed influenza, in misura determinante, molte proprietà fisico-chimiche del suolo: costituisce la principale riserva nel suolo di macronutrienti come N, P, S, contribuisce in maniera sostanziale a determinare la capacità di scambio cationico; inoltre influenza positivamente la stabilità della struttura, la permeabilità e l'aerazione del suolo. La SO del suolo, rappresenta il terzo più grande pool di carbonio negli ecosistemi dopo oceani e rocce, con un totale globale stimato di 1526 PgC (Lal, 2004). La presenza dell'orizzonte organico di superficie (O) e di quello organo-minerale (ad esempio gli A di tipo mollico o umbrico) risulta spesso fondamentale in quanto in grado di fornire una certa protezione del suolo, mitigando l'erosione, aiutando nella regolazione della temperatura del suolo, fornendo l'habitat ed il substrato per la fauna tellurica (Neary et al., 1999).

I suoli percorsi (PL) e non percorsi (NPL) nell'area in località di Laconi mostrano un quantitativo medio di SO pari a  $110 \pm 4 \text{ g kg}^{-1}$  e  $135 \pm 7 \text{ g kg}^{-1}$ . I valori medi a Sant'Antioco per le aree PSA e NPSA risultano pari a  $65 \pm 3 \text{ g kg}^{-1}$  e  $67 \pm 3 \text{ g kg}^{-1}$ .

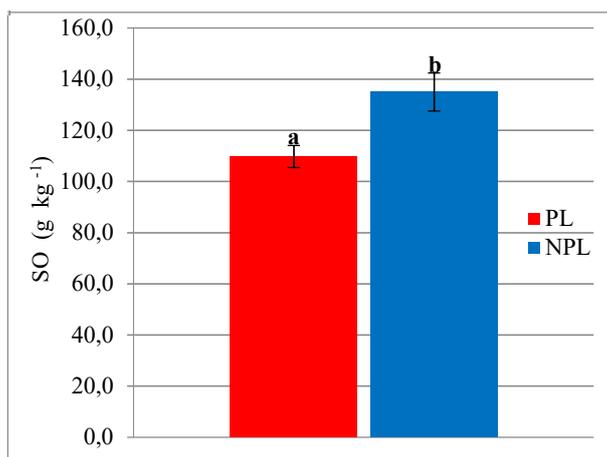
L'ANOVA rivela come esista una differenza statisticamente significativa ( $p < 0.05$ ) tra l'area PL e NPL di Laconi, con valori di SO inferiori nell'area percorsa.

Per i suoli di Sant'Antioco non è stata invece rilevata alcuna differenza statisticamente significativa.

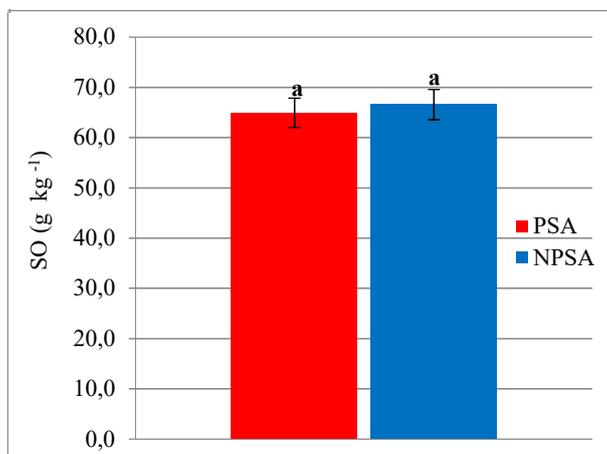
L'effetto del fuoco sulla SO è altamente variabile, a seconda dell'intensità del fuoco e della sua durata, dell'umidità dell'orizzonte di superficie, del tipo di suolo e del tipo di vegetazione (Neary et al., 1999; González-Perez et al., 2004; Granged et al., 2011; Verma e Jayakumar, 2012; Alcañiz et al., 2016). La combustione può portare alla perdita o alla completa distruzione della SO, ma questo fenomeno è in stretta relazione all'intensità del fuoco (Certini, 2005; Carballas et al., 2009). Bassi valori di intensità provocano piccole variazioni nel quantitativo di sostanza organica, mentre incendi intensi possono causare significative variazioni nel contenuto di questo parametro (Johnson, 1992; Verma e Jayakumar, 2012).

Quello di Laconi è risultato un incendio ad alta potenza energetica e classificato come ad alta di severità per i valori di intensità lineare. Probabilmente il tipo di incendio ha influito sulla variazione del contenuto in SO nell'area percorsa. Quanto emerso dall'ANOVA per Laconi è in linea con precedenti ricerche svolte da Sertsu e Sanchez, (1978); Sanroque et al., (1987);

Ferran et al., (1991); Fernandez et al., (1997); Giovannini e Lucchesi, (1997); Marcos et al., (1998); Terefe et al., (2008). A Sant'Antioco, anche se non intercorre una differenza tra le due aree (P e N), nell'area percorsa il quantitativo di SO risulta leggermente inferiore. In questa area di studio potrebbe essere accaduto quanto detto precedentemente per l'azoto, ossia che probabilmente l'ecosistema dopo 5 anni dall'evento (di notevole potenza energetica) potrebbe aver ripristinato le condizioni vegetazionali pre-incendio.



**Figura 7.2.7.1:** Comparazione tra contenuti medi in SO tra area percorsa (PL) e non percorsa (NPL) a Laconi.



**Figura 7.2.7.2:** Comparazione tra contenuti medi in SO tra area percorsa (PSA) e non percorsa (NPSA) a Sant' Antioco.

## 7.2.8 Idrofobicità

Nei suoli percorsi di Laconi (PL) il valore medio di idrofobicità è risultato pari  $0.9 \pm 0.1$  s, mentre nei suoli non percorsi (NPL) mostra un valore medio di  $2.3 \pm 0.5$  s. I valori medi dell'area di studio a Sant'Antioco (percorsa e non percorsa) risultano invece assolutamente comparabili essendo pari a  $0.8 \pm 0.1$ s e  $0.8 \pm 0.1$  s. Dall'analisi della varianza risulta invece una differenza statisticamente significativa ( $p < 0.05$ ) tra area P e NP di Laconi.

Dai risultati ottenuti emerge come sia i suoli di Laconi che quelli di Sant'Antioco rientrino nella prima classe (Classe 1) di idrofobicità della classificazione di Bisdom et al. (1993) e Doerr et al. (1998), poiché i valori di WDPT (*Water Drop Penetration Time*) risultano mediamente al di sotto dei 5 s. Sono dunque entrambe definibili, secondo le medesime classificazioni, come suoli ad idrofobicità assente (permeabili) (tabella 7.2.8.1).

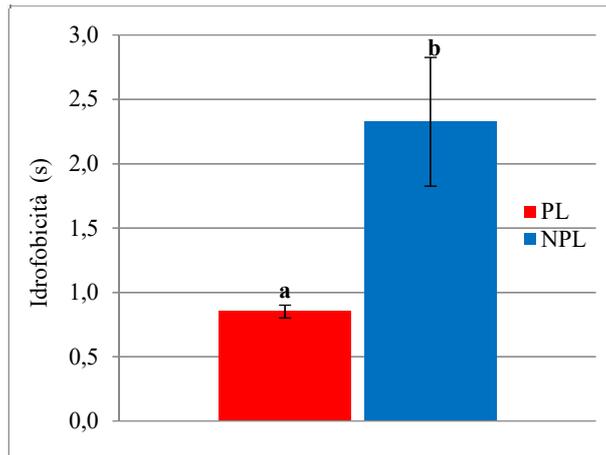
**Tabella 7.2.8.1:** Classi di idrofobicità (Bisdom et al., 1993; Doerr et al., 1998).

Classe	Idrofobicità
<5s	assente/permeabile
$5 \leq \text{WDPT} < 60$ s	lieve
$60 \leq \text{WDPT} < 600$ s	forte
$600 \leq \text{WDPT} < 3600$ s	grave

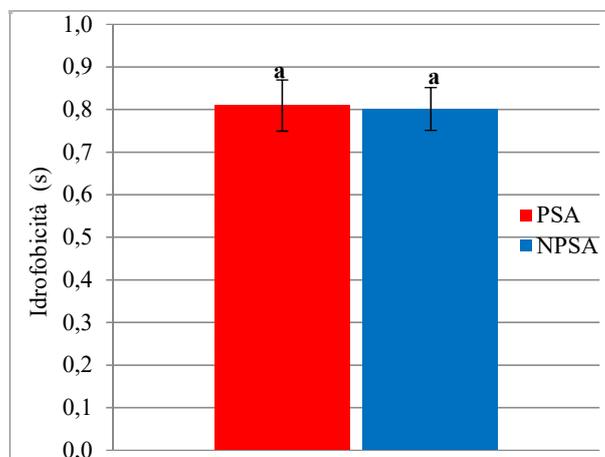
L'idrorepellenza è fortemente influenzata dalla tipologia di suolo. Ad esempio, i suoli calcarei sembrano essere meno inclini a sviluppare idrorepellenza rispetto a quelli acidi (Jordan et al., 2011). Mataix-Solera e Doerr (2004) e Mataix-Solera et al. (2008) hanno dimostrato come la mineralogia delle argille rivesta un ruolo fondamentale nel controllo dell'idrorepellenza del suolo. Da studi effettuati da Roberts e Carbon (1972) è emerso come l'idrofobicità non si sviluppi in condizioni alcaline. Le sostanze idrofobiche sono spesso associate con gli acidi umici presenti nella frazione organica del suolo (Roberts e Carbon, 1972; Ma'shum et al., 1988; Bisdom et al., 1993), componente questa insolubile a pH acidi, ma solubile in condizioni alcaline; pertanto questa frazione in terreni alcalini si discioglierrebbe, impedendo o riducendo drasticamente lo sviluppo di condizioni idrofobiche.

Dall'analisi della varianza risulta che non esistono differenze statisticamente significative tra area percorsa e non percorsa per Sant'Antioco. A Laconi, si è rilevata una differenza statisticamente significativa con una maggiore idrofobicità nell'area non percorsa (NPL) rispetto a quella percorsa (PL). Per spiegare tale differenza si debbono considerare adeguatamente differenti fattori e variabili. L'idrofobicità si verifica naturalmente, in assenza

del fuoco, in aree forestali, arbustive, agricole e di pascolo (Persiani, 2004). Si può verificare in diversi modi: a seguito dell'essiccamento della sostanza organica del suolo (Jamison, 1942; Gilmour, 1968; Cerdà e Robichaud, 2009), dalle sostanze organiche presenti nella lettiera (Robert e Carbon, 1972; DeBano, 1981; Cerdà e Robichaud, 2009), da prodotti idrofobici prodotti dal micelio dei funghi (Band e Harris, 1964; Savage et al., 1969b; Cerdà e Robichaud, 2009), da materia organica idrofobica mescolata con particelle di suolo minerale (Das e Das, 1972; Mc Ghie e Posner, 1980; DeBano, 1981; Cerdà e Robichaud, 2009), dal riscaldamento della sostanza organica a seguito della combustione che può portare alla distillazione di alcuni composti in grado di migrare, sotto forma di gas, lungo il profilo del suolo (Cerdà e Robichaud, 2009). Ancora, da specifici studi effettuati sulla lettiera di *Pinus pinaster* Aiton., si evince come questo possa indurre grave idrofobicità al suolo (Doerr et al., 1998). Pertanto, essendo un parametro sul quale diverse variabili possono entrare in gioco, si può rilevare che la maggiore idrofobicità dell'area non percorsa rispetto a quella percorsa a Laconi possa essere riconducibile a diverse variabili concomitanti piuttosto che ad una sola e ben identificabile causa. Da questo punto di vista, l'analisi statistica multivariata si rivelerà fondamentale al fine di meglio comprendere tali differenze tra i due siti indagati.



**Figura 7.2.8.1:** Comparazione tra valori medi di idrofobicità tra area percorsa (PL) e non percorsa (NPL) a Laconi.



**Figura 7.2.8.2:** Comparazione tra valori medi di idrofobicità tra area percorsa (PSA) e non percorsa (NPSA) a Sant' Antioco.

**Tabella 7.2.1: Risultati analisi chimico-fisiche area percorsa Laconi.**

Campione	Scheletro (g kg <sup>-1</sup> )	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	Densità App. (g cm <sup>-3</sup> )	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Idrofobicità (s)	Ntot (g kg <sup>-1</sup> )	Ptot (mg kg <sup>-1</sup> )	SO (g kg <sup>-1</sup> )	Tessitura*
	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL
1	141	14	77	9	0.80	7.7	0.41	0.8	3.8	607.1	148.6	FL
2	29				0.88	7.6	0.29	0.9	5.2	669.7	138.4	
3	54	12	78	11	1.06	7.3	0.40	0.7	4.6	394.6	139.8	FL
4	65				0.96	7.8	0.24	1.2	4.4	456.1	117.1	
5	154	18	75	6	1.06	7.9	0.34	0.7	5.0	453.4	125.0	FL
6	75				0.83	7.3	0.45	0.7	4.5	649.6	132.6	
7	155				0.66	7.4	0.45	1.5	3.7	617.1	179.0	
8	59				0.73	8	0.36	0.5	5.0	826.4	129.2	
9	15				0.75	7.7	0.24	0.6	3.3	463.2	114.8	
10	43				1.03	7.8	0.26	0.8	3.5	497.2	122.0	
11	6	28	67	5	0.86	7.1	0.32	0.8	3.6	433.4	106.8	FL
12	15				1.00	7.4	0.44	0.7	4.1	588.5	112.5	
13	86	18	76	7	1.17	7.7	0.23	0.5	3.9	730.9	82.3	FL
14	32				0.96	7.7	0.30	1.1	3.9	678.4	122.4	
15	108	22	69	9	1.10	7.9	0.26	0.7	2.3	514.7	91.4	FL
16	24				0.97	7.6	0.23	0.7	2.2	404.5	73.6	
17	17				0.93	7.3	0.26	1.1	3.2	351.1	90.5	
18	4				0.78	7.9	0.30	0.5	3.8	452.2	105.9	
19	8				1.02	7.8	0.34	1.0	2.2	332.4	99.5	
20	68				0.86	7.3	0.26	0.9	3.3	391.4	88.5	
21	11	7	83	10	0.98	7.1	0.25	0.8	2.5	553.7	83.4	L
22	6				1.17	7.9	0.30	0.7	2.6	360.5	78.2	
23	4	8	80	12	0.84	7.9	0.33	0.9	3.9	660.0	144.8	FL
24	7				1.05	7.5	0.20	0.8	2.4	416.1	67.4	
25	80	32	61	7	0.77	7.6	0.35	1.2	2.9	454.7	122.8	FL
26	14				0.88	6.5	0.28	0.9	3.9	607.2	103.1	
27	40				1.04	7.7	0.32	0.6	2.6	410.7	103.0	
28	8				0.93	7.7	0.37	0.5	2.8	443.7	94.2	
29	39				1.06	7.5	0.32	0.4	3.6	491.3	106.6	
30	8				1.12	7.4	0.25	0.9	1.7	338.8	60.8	
31	17	12	79	9	0.91	7.3	0.32	1.5	4.4	959.6	125.1	FL
32	76				0.74	7.7	0.54	1.1	3.8	398.0	132.1	
33	128	14	76	10	0.82	6.7	0.29	0.9	3.2	406.1	132.9	FL
34	11				0.75	8.2	0.32	0.5	2.4	248.2	87.0	
35	1	41	50	10	0.86	7.8	0.24	1.7	3.1	452.2	143.3	F
36	27				1.07	7.5	0.58	0.8	2.7	430.8	77.7	
37	42				1.09	8	0.27	1.4	2.5	376.5	71.5	
38	18				1.05	7.2	0.30	0.6	3.2	573.7	74.2	
39	12				0.65	7.8	0.29	0.6	4.1	829.4	150.7	
40	141				0.78	7.4	0.32	0.9	2.7	532.1	112.7	

\*Tessitura: F= franca; FL = franco-limosa; L=limosa

**Tabella 7.2.2:** Risultati analisi chimico-fisiche area non percorsa Laconi.

Campione	Scheletro (g kg <sup>-1</sup> )	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	Densità App. (g cm <sup>-3</sup> )	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Idrofobicità (s)	Ntot (g kg <sup>-1</sup> )	Ptot (mg kg <sup>-1</sup> )	SO (g kg <sup>-1</sup> )	Tessitura*
	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL
1	56	17	75	7	1.02	7.7	0.15	0.7	2.1	439.4	98.5	FL
2	20				1.12	7.8	0.16	1.5	3.2	359.4	88.7	
3	2	3	87	9	0.78	7.4	0.26	1.2	4.8	489.1	165.7	L
4	21				0.80	7.4	0.28	0.5	5.5	992.1	149.4	
5	80	6	91	3	0.70	7.7	0.13	0.9	2.8	318.7	80.0	L
6	98				1.19	7.4	0.31	1.4	3.4	415.1	116.7	
7	6				0.92	6.3	0.17	1.1	2.5	386.1	118.6	
8	46				0.82	7.6	0.31	0.8	4.3	722.3	145.6	
9	139				1.04	7.8	0.26	0.7	3.6	691.7	135.4	
10	290				0.89	7.5	0.23	0.7	4.2	1105.9	125.1	
11	1	8	76	17	1.21	7.3	0.15	1.3	1.8	409.8	71.2	FL
12	16				0.94	7.4	0.25	2.6	3.5	669.3	121.8	
13	110	17	66	17	0.67	7.7	0.23	0.8	4.0	409.8	104.1	FL
14	318				0.95	7.6	0.24	1.7	3.8	427.0	105.1	
15	396	38	59	4	1.05	7.6	0.57	3.4	5.8	538.7	181.5	FL
16	22				1.07	7	0.29	1.7	4.1	368.9	131.7	
17	80				0.76	7.5	0.38	0.8	4.3	677.7	165.4	
18	103				0.71	7.4	0.47	2.0	3.9	368.9	131.7	
19	98				0.67	7.7	0.34	1.4	4.7	440.8	128.4	
20	247				0.93	7.5	0.42	1.5	4.3	599.9	137.0	
21	5	4	75	21	1.00	7	0.17	0.8	3.1	484.6	102.5	FL
22	18				1.00	7.1	0.29	0.6	2.6	465.5	118.6	
23	259	19	75	5	0.69	7.8	0.83	2.1	3.3	413.1	121.9	FL
24	97				0.50	6.9	0.49	18.2	8.3	460.4	303.9	
25	573	13	70	17	1.14	7.7	0.32	3.3	2.1	463.2	92.7	FL
26	53				1.23	7.6	0.18	0.9	3.3	446.4	104.7	
27	127				0.83	7.4	0.24	1.2	6.1	992.1	153.2	
28	236				0.73	7.8	0.48	10.3	4.0	387.8	163.2	
29	209				0.83	7.3	0.28	1.9	4.7	431.0	131.7	
30	202				0.99	7.5	0.32	1.7	4.5	257.1	123.8	
31	79	18	77	5	0.85	7.6	0.46	4.6	4.2	363.3	149.2	FL
32	61				1.00	7.6	0.38	1.5	2.5	524.0	82.5	
33	44	30	61	9	0.74	7.3	0.50	0.9	5.8	842.2	214.9	FL
34	87				0.92	7.4	0.14	1.5	2.9	645.8	92.3	
35	1	3	64	33	1.02	7.4	0.08	2.8	0.9	441.2	69.9	FLA
36	195				1.23	7.5	0.95	2.4	4.9	374.3	140.5	
37	189				0.81	7.4	0.51	1.1	4.8	391.4	136.3	
38	135				0.78	7.5	0.80	7.3	7.9	768.3	171.6	
39	160				0.46	7.4	0.44	1.5	6.9	1191.9	158.7	
40	161				0.29	7.4	0.45	2.0	3.3	457.3	267.2	

\*Tessitura: FL = franco-limoso; FLA= franco-limoso-argilloso; L=limoso

**Tabella 7.2.3:** Risultati analisi chimico-fisiche area percorsa Sant'Antioco.

Campione	Scheletro (g kg <sup>-1</sup> )	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	Densità App. (g cm <sup>-3</sup> )	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Idrofobicità (s)	Ntot (g kg <sup>-1</sup> )	Ptot (mg kg <sup>-1</sup> )	SO (g kg <sup>-1</sup> )	Tessitura*
	PSA	PSA	PSA	PSA	PSA	PSA	PSA	PSA	PSA	PSA	PSA	PSA
1	9	6	80	14	0.77	7	0.16	0.8	1.4	298.2	49.0	FL
2	262				0.80	7.7	0.32	0.7	4.3	315.7	94.0	
3	58	6	80	14	1.10	7.4	0.21	0.4	1.5	235.0	75.7	FL
4	128				0.89	7.2	0.24	1.2	2.0	263.1	80.8	
5	71	8	86	7	0.77	7.7	0.19	0.9	1.7	299.6	67.6	L
6	117				0.77	7.6	0.25	0.5	1.8	359.7	62.3	
7	12				1.24	7	0.20	0.9	1.1	238.9	43.8	
8	19				0.87	7.4	0.30	1.1	4.6	876.1	91.6	
9	50				0.91	7.4	0.25	0.9	3.1	299.4	59.1	
10	162				1.09	7.7	0.26	1.1	1.4	286.4	39.8	
11	239	27	68	5	0.66	7.7	0.27	0.8	1.9	238.7	76.8	FL
12	167				0.78	8	0.45	0.5	2.7	332.8	73.0	
13	22	12	75	13	1.06	8	0.30	0.6	1.1	260.4	50.7	FL
14	2				1.08	7	0.22	0.6	1.1	244.1	28.1	
15	8	12	76	11	1.21	7.4	0.18	1.0	1.3	162.6	50.8	FL
16	15				0.90	7.3	0.14	0.9	1.4	347.9	84.8	
17	197				1.05	7.8	0.37	0.8	2.3	500.2	56.8	
18	25				0.96	7.3	0.19	0.5	1.7	177.2	54.6	
19	25				1.05	7.4	0.18	1.5	1.6	170.1	61.3	
20	7				0.82	7.3	0.10	0.5	1.5	173.6	55.5	
21	4	24	66	9	0.88	7.1	0.37	0.4	1.8	219.3	56.8	FL
22	10				1.02	7.8	0.27	0.6	2.0	235.0	64.2	
23	130	23	70	7	0.85	7.4	0.15	0.7	2.0	225.2	61.3	FL
24	16				1.08	7.3	0.21	2.1	1.5	184.2	54.7	
25	71	27	67	6	0.92	7.1	0.24	1.3	2.2	207.0	74.9	FL
26	34				0.87	7.7	0.24	0.5	1.9	221.0	52.6	
27	23				0.66	7.5	0.16	0.5	1.7	168.4	56.0	
28	80				0.89	7.3	0.15	1.2	3.8	305.0	96.1	
29	54				0.71	7.5	0.27	0.5	3.5	221.9	67.2	
30	17				1.00	7.4	0.37	0.3	2.9	264.2	56.0	
31	58	30	66	4	0.97	7.9	0.29	0.4	2.0	299.2	62.5	FL
32	18				1.12	7.4	0.17	1.1	1.5	265.6	65.9	
33	25	27	69	4	1.12	7.3	0.09	1.0	1.8	339.5	73.4	FL
34	107				1.25	7.7	0.26	0.7	1.4	288.1	60.1	
35	8	4	87	9	1.10	7.3	0.18	0.7	1.8	365.2	72.0	L
36	23				1.11	7	0.20	0.8	2.2	360.9	82.5	
37	51				0.74	7.5	0.33	0.5	4.0	862.5	115.3	
38	59				0.82	8.2	0.31	0.6	0.7	875.2	22.0	
39	17				0.97	7.3	0.28	1.2	1.5	270.2	59.7	
40	37				0.86	7.4	0.39	1.2	1.5	272.2	87.7	

\*Tessitura: FL = franco-limosa; L=limosa

**Tabella 7.2.4:** Risultati analisi chimico-fisiche area non percorsa Sant'Antioco.

Campione	Scheletro (g kg <sup>-1</sup> )	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	Densità App. (g cm <sup>-3</sup> )	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Idrofobicità (s)	Ntot (g kg <sup>-1</sup> )	Ptot (mg kg <sup>-1</sup> )	SO (g kg <sup>-1</sup> )	Tessitura*
	NPSA	NPSA	NPSA	NPSA	NPSA	NPSA	NPSA	NPSA	NPSA	NPSA	NPSA	NPSA
1	4	7	70	23	1.08	7.1	0.11	1.5	1.6	357.7	63.0	FL
2	1				1.04	7.1	0.30	0.8	1.9	235.7	72.0	
3	12	4	77	19	0.90	7.7	0.09	0.7	2.0	319.2	52.4	FL
4	7				1.18	7.5	0.10	1.0	2.1	258.6	59.1	
5	2	11	80	9	0.96	7.3	0.12	0.9	2.3	415.0	57.5	L
6	3				1.08	7.4	0.08	1.2	1.7	324.1	52.0	
7	4				1.10	7	0.28	0.9	1.4	366.7	50.2	
8	10				1.13	7.5	0.24	1.0	1.8	260.8	56.9	
9	5				0.87	7.2	0.16	1.2	2.4	289.5	70.7	
10	14				0.81	7.2	0.22	0.5	2.1	385.6	56.8	
11	2	8	85	7	1.06	7.4	0.09	1.4	1.7	360.6	48.0	L
12	117				0.84	8.1	0.24	0.7	2.7	216.1	77.2	
13	4	7	76	16	1.11	7.1	0.15	0.8	1.7	272.6	61.7	L
14	32				0.94	7.3	0.27	0.8	1.9	272.2	61.8	
15	5	12	72	15	1.18	7	0.19	0.6	1.8	218.4	46.6	FL
16	2				1.00	6.8	0.11	1.1	1.5	192.3	54.7	
17	19				0.92	7.3	0.32	0.5	2.2	187.5	63.8	
18	3				1.40	6.4	0.25	0.9	1.4	224.9	45.7	
19	18				0.64	7	0.21	0.5	3.4	427.1	99.0	
20	5				0.97	6.7	0.26	0.5	2.3	192.8	66.2	
21	1	11	73	17	0.83	6.8	0.35	0.3	1.6	245.7	69.1	FL
22	107				0.99	7.3	0.27	0.3	2.6	252.0	94.3	
23	2	8	71	20	1.27	7	0.10	0.9	1.2	281.6	45.7	FL
24	60				0.81	7.6	0.51	0.4	1.3	185.2	49.8	
25	17	10	65	24	1.02	8.4	0.25	0.9	1.5	168.7	70.4	FL
26	119				0.87	8.2	0.25	0.7	2.1	271.7	83.9	
27	5				1.12	8.1	0.17	1.0	2.6	317.3	72.4	
28	20				0.94	7.6	0.19	0.7	3.0	311.1	72.0	
29	50				0.90	7.6	0.32	0.6	4.5	167.9	107.8	
30	6				1.22	6.9	0.16	0.7	2.3	262.0	57.5	
31	20	10	78	12	0.89	7.5	0.19	0.8	2.5	350.0	70.7	FL
32	36				0.79	7.1	0.26	0.5	1.9	271.7	96.1	
33	2	8	84	8	1.21	7.3	0.11	1.3	1.6	165.4	58.3	L
34	16				1.10	6.8	0.25	0.5	2.0	226.8	53.0	
35	2	5	80	14	1.07	7.1	0.28	0.9	1.6	191.9	70.4	FL
36	2				0.86	7.3	0.08	1.6	1.4	435.0	43.8	
37	102				1.02	8.1	0.25	1.0	2.2	329.1	93.5	
38	4				0.97	6.9	0.28	0.7	2.9	504.5	92.2	
39	10				0.86	7.1	0.30	0.4	2.6	537.6	74.6	
40	2				1.19	7	0.23	0.6	2.5	260.8	71.3	

\*Tessitura: FL = franco-limosa; L=limosa

**Tabella 7.2.5:** Analisi della Varianza (ANOVA) ( $p < 0.05$ ) parametri fisico-chimici area di studio Laconi.

	Scheletro (g kg <sup>-1</sup> )	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	Densità App. (g cm <sup>-3</sup> )	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Idrofobicità (s)	Ntot (g kg <sup>-1</sup> )	Ptot (mg kg <sup>-1</sup> )	SO (g kg <sup>-1</sup> )
<b>Percorsa</b>	46a	19a	72a	9a	0.92a	7.6a	0.32a	0.9a	3.4a	511.4a	109.8a
<b>Non percorsa</b>	126b	15a	73a	12a	0.88a	7.4a	0.35a	2.3b	4.1b	540.8a	135.0b

**Tabella 7.2.6:** Analisi della Varianza (ANOVA) ( $p < 0.05$ ) parametri fisico-chimici area di studio Sant'Antioco.

	Scheletro (g kg <sup>-1</sup> )	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	Densità App. (g cm <sup>-3</sup> )	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Idrofobicità (s)	Ntot (g kg <sup>-1</sup> )	Ptot (mg kg <sup>-1</sup> )	SO (g kg <sup>-1</sup> )
<b>Percorsa</b>	61a	17a	74a	9a	0.94a	7.5a	0.24a	0.8a	2.0a	313.2a	64.9a
<b>Non percorsa</b>	21a	9b	76a	15b	1.00a	7.3a	0.21a	0.8a	2.1a	287.8a	66.6a

### 7.3 Analisi statistica multivariata

Come riportato in “Materiali e metodi” è stata effettuata anche l’analisi fattoriale, ed in particolare la PFA (*Principal Factor Analysis*), comunemente utilizzata in analisi statistica multivariata applicata all’analisi ed interpretazione dei dati pedologici e molto utile per comprendere meglio i principali processi ed i fenomeni che caratterizzano i suoli indagati (Reimann et al., 2002). L’analisi fattoriale consente sia di discriminare quali fattori abbiano il peso maggiore nel determinare la varianza osservata all’interno del modello indagato, sia di discriminare tali fattori rispetto ad altri.

In Tabella 7.3.1 vengono riportati i pesi fattoriali (sia per Laconi che per Sant’Antioco) ottenuti mediante metodo di rotazione *varimax normalizzato*. Si tratta di una rotazione ortogonale che cerca di modificare i pesi fattoriali in modo da massimizzare la varianza fra i pesi fattoriali relativi ad ogni fattore, semplificando l’interpretazione. Questo tipo di rotazione opera una trasformazione degli assi in modo che, per ogni fattore, esistano poche variabili con pesi fattoriali elevati e più variabili possibile con pesi fattoriali vicino allo zero o trascurabili.

In entrambe i casi la PFA il numero di fattori estratti dalla PFA aventi autovalori  $> 1$  è 4 e dunque altamente significativi (benché con peso decrescente da F1 a F4) dal punto di vista statistico. Inoltre, in entrambi i casi questo modello, con soli quattro fattori, è sufficiente per spiegare oltre i 3/4 della varianza totale osservata (81% per Laconi e 75% per Sant’Antioco). Di seguito si riporta l’interpretazione dei quattro fattori per entrambe le aree indagate.

#### FATTORE 1

##### **Laconi – Influenza dell’incendio sui processi erosivi superficiali**

Il fattore 1, quello più importante di tutti (spiega il 32.6% della varianza totale), lega positivamente tra loro scheletro e densità apparente dei suoli con tutti i parametri legati agli incendi (velocità di avanzamento, intensità e lunghezza del fronte di fiamma), mentre questi stessi parametri mostrano una correlazione inversa con l’idrofobicità. Poiché si tratta di correlazioni multiple, la spiegazione di tale fattore si deve ricercare in più fattori tra essi direttamente o indirettamente correlati. In particolare in questo fattore i parametri legati agli incendi (velocità di avanzamento, intensità e lunghezza del fronte di fiamma) sono tra essi tutti fortemente correlati positivamente, con pesi fattoriali prossimi al massimo (1). Dunque all’aumentare di 1 dei 3 fattori, aumenteranno pure gli altri 2 e viceversa. Osservando adesso i

parametri più prettamente pedologici, si denota immediatamente come all'aumentare dello scheletro aumenti la densità apparente e diminuisca l'idrofobicità. Per capire al meglio questo tipo di correlazione, occorre rifarsi alle caratteristiche pedologiche dei suoli indagati.

Dai dati fisico-chimici analizzati si denota come l'orizzonte di superficie campionato (orizzonte A) si caratterizzi per una tessitura prevalentemente franco-limoso, una bassa densità apparente (range 0.65-1.17%, valore medio =  $0.92 \pm 0.02 \text{ g cm}^{-3}$ ) ed un elevato contenuto in scheletro (range 0.1-15.5%, valore medio =  $4.6 \pm 7.3 \text{ g kg}^{-1}$ ). In questi orizzonti dunque all'aumentare del contenuto in scheletro si rileva una maggiore densità apparente. Inoltre all'aumentare del contenuto in scheletro diminuisce l'idrofobicità. Si potrebbe trattare, in entrambe i casi, di un effetto prevalentemente fisico dovuto alla creazione di maggiori spazi (presenza dello scheletro) e, conseguentemente, di una macroporosità più elevata in grado dunque di determinare una più veloce infiltrazione delle acque e dunque, indirettamente, una minore idrofobicità. Nella loro interezza dunque tali correlazioni multiple, estremamente complesse se viste nel loro insieme ma spiegabili quando interpretate nel dettaglio, si potrebbero leggere come di seguito ipotizzato. Nei suoli indagati all'aumentare dei parametri legati agli incendi (velocità di avanzamento, intensità e lunghezza del fronte di fiamma) si ha una maggiore presenza in scheletro, probabilmente dovuta ad una più marcata enfaticizzazione dei processi di erosione idrica superficiale (che interessano maggiormente il trasporto della cosiddetta terra fine quale sabbia, limo ed argilla < 2 mm di diametro e dunque più soggetta ad erosione idrica superficiale, lasciando invece sul posto lo scheletro che rappresenta la frazione più pesante > 2 mm) che risultano maggiormente intensi all'aumentare delle superfici interessate, dell'intensità e della lunghezza del fronte di fiamma. Questo "arricchimento residuale in scheletro" porta sia ad una maggiore densità apparente (il rapporto m/v aumenta poiché è più alta la massa dovuta ad una maggiore presenza in scheletro) che ad una minore idrofobicità ed in entrambe i casi si tratterebbe di un effetto marcatamente fisico che influirebbe sulla idrologia delle acque superficiali. Di fatto dunque questi suoli mostrerebbero una scarsa idrofobicità propria a causa dell'intensità severa dell'incendio analizzato, che ha portato ad effetti erosivi con conseguente arricchimento in scheletro residuale e diminuzione dell'idrofobicità. Dunque la relazione inversa osservata tra parametri legati all'incendio vs idrofobicità non sarebbe di tipo diretto (all'aumentare dei parametri legati agli incendi diminuisce l'idrofobicità) ma indiretto (all'aumentare dei parametri legati agli incendi, aumentano i processi erosivi che portano ad un arricchimento residuale superficiale in scheletro che determina una diminuzione

dell'idrofobicità). Che questo "effetto fisico" evidente sia dovuto al passaggio dell'incendio ad alta potenza energetica si evince chiaramente anche dai risultati dell'ANOVA precedentemente discussi. Infatti, e non a caso, nelle aree percorse da incendi severi come quelli studiati, il quantitativo in scheletro è statisticamente differente da quelle non percorse.

Questo fattore può dunque essere denominato “influenza dell'incendio sui processi erosivi superficiali” che è tanto maggiore quanto più intenso sia l'incendio.

### **Sant'Antioco – Influenza della morfologia sull'intensità dell'incendio**

Il fattore 1, che spiega il 26.9% della varianza totale, lega positivamente tra loro pendenze e parametri di fertilità del suolo (N, P, e SO) con intensità e lunghezza del fronte di fiamma. Si tratta in questo caso di una correlazione multipla più semplice rispetto a quella precedentemente osservata per Laconi. All'aumentare delle pendenze, incrementano sia l'intensità che la lunghezza del fronte di fiamma che a loro volta portano alla combustione di una maggiore quantità di massa vegetale che rilascia una maggiore quantità di residuo organico al suolo con conseguente aumento sia di fosforo che di azoto (la Soil Organic Matter è la principale fonte di questo due macronutrienti al suolo). In questo caso dunque, rispetto a Laconi, è interessante osservare come le pendenze assumano un ruolo fondamentale. Inoltre comparando le pendenze dei due differenti siti indagati, è possibile comprendere come questo avvenga. Per Laconi si rilevano pendenze comprese nel range 0-20.2% con valore medio di  $4.0 \pm 0.6\%$ . Per Sant'Antioco invece si rilevano pendenze assai più accentuate comprese nel range 3.7-31.9% con valore medio di  $15.0 \pm 1.3\%$ , superiori dunque del 275% rispetto a Laconi. In simili condizioni dunque il fattore morfologico, in presenza di incendi, anche in questo caso classificato ad alta severità, diventa assai più rilevante quando non addirittura fondamentale. Questo fattore può dunque essere denominato “influenza della morfologia sull'intensità dell'incendio”.

## **FATTORE 2**

### **Laconi – Influenza delle pendenze sui processi idrologici superficiali**

Il fattore 2 (21.6% della varianza totale spiegata), lega positivamente tra loro le pendenze, la sabbia, il pH e l'idrofobicità dei suoli, mentre questi stessi parametri mostrano una correlazione inversa con le frazioni granulometriche più fini (in particolare il limo). Questo fattore ci mostra dunque come all'aumentare delle pendenze vi siano suoli più marcatamente sabbiosi e meno

limosi e come gli stessi si caratterizzano per un pH ed una idrofobicità più marcati. Anche in questo caso dunque, come precedentemente osservato per F1, pare vi sia una certa influenza dei processi erosivi. Infatti nelle aree caratterizzate da una maggiore pendenza, i suoli si caratterizzano per una frazione fina (quella < 2 mm) dove maggiormente abbonda la frazione sabbiosa, quella più pesante e meno soggetta (rispetto alla fine, dunque limo ed argilla) ai processi erosivi. Dunque all'aumentare delle pendenze, vi sarà maggiore trasporto idrico superficiale (erosione idrica superficiale) che andrà ad interessare soprattutto le frazioni più fini e leggere. Che tale correlazione sia soprattutto con il limo mentre non vi sia con l'argilla si spiega ancora una volta con la natura stessa dei suoli indagati. Come precedentemente osservato si tratta infatti di suoli franco-limosi in cui la frazione fine più abbondante è il limo (range 50-83%, valore medio =  $72 \pm 3\%$ ) mentre quella meno presente è l'argilla (5-12%,  $9 \pm 1\%$ ). La mancanza totale dunque di correlazione inversa tra pendenze ed argilla è dovuta semplicemente al fatto che nei suoli indagati vi sia scarsissima presenza di argilla in superficie e dunque i processi erosivi tenderanno ad interessare le frazioni fini più abbondanti (il limo).

Anche la correlazione tra pendenze e pH può avere una spiegazione di tipo fisico. Nelle aree a maggiore pendenza si avranno infatti maggiori processi erosivi superficiali ma dal punto di vista idrologico le acque tenderanno a muoversi seguendo le pendenze senza dunque infiltrarsi e lisciviare i suoli in questione. Sebbene infatti un suolo sabbioso tenda ad essere più lisciviato e dunque a mostrare un pH più acido, dobbiamo tenere in considerazione come in questo suoli (come già osservato in F1) i processi più prettamente fisici e idrologici tendano a giocare un ruolo assolutamente fondamentale. Dunque all'aumentare delle pendenze, aumentano i processi erosivi, mediati da uno scorrimento prevalentemente superficiale (laterale), che porta all'allontanamento delle frazioni più fini dominanti (il limo) ed alla presenza di un suolo più sabbioso ma meno lisciviato poiché le acque tendono a scorrere prevalentemente in superficie senza infiltrarsi e lisciviare lo stesso. Sempre per lo stesso motivo, si osserva una correlazione positiva tra pendenze ed idrofobicità. Infatti aumentando le pendenze aumenta lo scorrimento superficiale con meno acqua che si infiltra e dunque un suolo, indirettamente, più idrofobico. Come già osservato per F1 anche in questo caso dunque l'idrofobicità di questi suoli sembra assai più legata a fattori fisici e idrologici che chimici o bio-chimici.

In definitiva dunque questo fattore può essere denominato "influenza delle pendenze sui processi idrologici superficiali".

### **Sant'Antioco – Tessitura dei suoli indagati**

F2 spiega in questo caso il 19.9% della varianza totale e lega in maniera inversa la sabbia alle frazioni limo-argilla. Si tratta di una correlazione direttamente legata alla natura pedologica dei suoli indagati. Semplicemente ci indica che tra tutti i parametri indagati, il secondo fattore più importante nel spiegare la varianza totale osservata è legata alla natura stessa dei suoli in cui all'aumentare della frazione sabbiosa diminuiscono quelle più fini (limo ed argilla) e/o viceversa. Come già osservato in precedenza per Laconi, anche in questo caso il secondo fattore risulta dunque fortemente influenzato (benché con modalità ovviamente differenti) dalle frazioni granulometriche del suolo.

Questo fattore può essere semplicemente denominato “tessitura dei suoli indagati”.

### **FATTORE 3**

#### **Laconi – Influenza della SO su alcune proprietà del suolo**

F3 (16.3% della varianza totale spiegata) lega positivamente tra loro conducibilità, N e Sostanza Organica (SO) nei suoli, mentre correla inversamente questi parametri alla densità apparente. Tale correlazioni multiple ci indicano semplicemente come con l'aumentare del quantitativo in sostanza organica, diminuisca ovviamente la densità apparente ed aumenti il contenuto in N (di cui la SOM è la principale fonte) e la conducibilità elettrica (più SOM è presente, maggiore è il quantitativo di cationi basici e più elevata sarà la conducibilità elettrica). Questo fattore può essere denominato “influenza della SOM su alcune proprietà del suolo”.

#### **Sant'Antioco – Influenza delle pendenze sui processi idrologici superficiali**

F3 (16.6% della varianza totale spiegata) mostra alcune similitudini con il fattore F2 di Laconi, benché le motivazioni risultino differenti. F3 lega tra loro le pendenze, l'idrofobicità e la velocità di avanzamento del fronte di fiamma, mentre correla inversamente questi parametri con la conducibilità. Questo fattore ci mostra come con l'aumentare delle pendenze, aumenti la velocità di avanzamento del fronte di fiamma e, di conseguenza, l'idrofobicità dei suoli indagati. La correlazione inversa con la CE potrebbe, anche in questo caso, avere una spiegazione più prettamente fisico-idrologica che bio-chimica. Come già rilevato infatti in F1, in questi suoli le pendenze giocano un ruolo fondamentale. All'aumentare delle pendenze aumentano i processi di scorrimento superficiale, che determinano una più spinta lisciviazione

di tali orizzonti, con allontanamento dei cationi più solubili e dunque conseguente diminuzione della conducibilità.

Questo fattore può dunque essere denominato come l’F2 di Laconi, “influenza delle pendenze sui processi idrologici superficiali” benché rispetto a Laconi questo fattore assuma per Sant’Antioco una importanza decisamente meno rilevante (poiché in grado di spiegare una parte meno consistente della varianza totale osservata) e sia rilevabile mediante processi differenti.

## **FATTORE 4**

### **Laconi – Macronutrienti al suolo**

F4 (10.3% della varianza totale spiegata) lega positivamente soltanto P e N, mostrando semplicemente che all’aumentare di uno dei due aumenta l’altro e viceversa. Si tratta di un fattore di minore importanza rispetto agli altri tre indagati e che semplicemente mostra come vi sia una certa correlazione tra i due principali macronutrienti del suolo.

Questo fattore può essere dunque semplicemente denominato “macronutrienti al suolo”.

### **Sant’Antioco – Influenza dell’incendio sul contenuto di N e pH del suolo**

L’F4 (11.2% della varianza totale spiegata) lega tra loro il pH, l’azoto e la velocità di avanzamento del fronte di fiamma. In pratica questo significa che all’aumentare della velocità di avanzamento dell’incendio aumenterà pure il contenuto in azoto (presente nelle ceneri rilasciate al suolo) e anche il pH al suolo (sempre a causa delle ceneri che tendono solitamente ad innalzare i valori di pH). Anche in questo caso tale fattore, benché di estremo risulta comunque di valore statisticamente inferiore rispetto agli altri tre indagati, come dimostrato sia dalla minore percentuale di varianza spiegata sul totale che dall’autovalore nettamente inferiore rispetto ai primi tre fattori indagati.

Questo fattore può essere denominato “influenza dell’incendio sul contenuto di N e pH del suolo”.

**Tabella 7.3.1:** Pesì fattoriali(n=40); Metodo di estrazione: analisi dei fattori principali(PFA); Metodo di rotazione: Varimax; pesì marcati >0.5

	Laconi					Sant'Antioco			
	F1	F2	F3	F4		F1	F2	F3	F4
Pendenza	-0.048	<b>0.911</b>	0.073	0.037		<b>0.595</b>	0.237	<b>-0.663</b>	0.187
Scheletro	<b>0.588</b>	-0.094	0.209	-0.118		-0.216	-0.293	0.067	0.117
Sabbia	-0.076	<b>0.855</b>	-0.078	-0.262		-0.227	<b>-0.926</b>	0.190	0.015
Limo	0.143	<b>-0.902</b>	0.053	0.288		0.312	<b>0.789</b>	-0.328	0.035
Argilla	-0.269	-0.096	0.139	-0.020		-0.031	<b>0.863</b>	0.163	-0.110
Densità apparente	<b>0.590</b>	-0.143	<b>-0.547</b>	0.393		-0.310	0.240	0.029	0.132
pH	0.361	<b>0.584</b>	-0.026	0.491		-0.022	-0.094	0.062	<b>0.930</b>
Conducibilità	0.235	-0.174	<b>0.890</b>	-0.040		0.163	-0.206	<b>0.837</b>	0.196
Idrofobicità	<b>-0.780</b>	<b>0.570</b>	0.129	0.063		-0.010	-0.087	<b>-0.717</b>	-0.204
Ntot	0.247	-0.167	<b>0.617</b>	<b>0.573</b>		<b>0.659</b>	-0.038	0.131	<b>0.632</b>
Ptot	-0.362	-0.236	-0.112	<b>0.820</b>		<b>0.500</b>	0.197	-0.037	0.465
SO	-0.176	0.270	<b>0.875</b>	-0.037		<b>0.504</b>	-0.333	0.152	-0.225
Velocità avanzamento del fronte di fiamma	<b>0.977</b>	-0.039	0.007	-0.085		-0.090	-0.016	<b>-0.690</b>	<b>0.514</b>
Intensità lineare del fronte di fiamma	<b>0.957</b>	0.033	0.028	0.064		<b>0.899</b>	0.192	0.117	-0.066
Lunghezza di fiamma	<b>0.967</b>	0.077	0.024	0.050		<b>0.887</b>	0.194	-0.039	0.055
Varianza proporzionale (%)	32.6	21.6	16.3	10.3		26.9	19.9	16.6	11.2
Varianza cumulativa (%)	32.6	54.2	70.6	80.8		26.9	46.8	63.4	74.6
Autovalori	4.900	3.232	2.445	1.542		4.032	2.980	2.495	1.677

## 8. Conclusioni

Con la presente ricerca si è voluto contribuire alle conoscenze degli effetti degli incendi sul suolo in ambiente mediterraneo. Benché siano abbastanza numerose le ricerche in questo ambito, la problematica degli incendi continua ad avere una forte rilevanza sociale, economica ed ambientale, richiedendo dunque ulteriori contributi dalla ricerca scientifica per meglio comprenderne le effettive ricadute. Inoltre, le ricerche condotte su tale tematica hanno spesso preso in considerazione o solo i parametri pedologici in aree percorse e non, ma raramente quelli che caratterizzano gli incendi. L'aspetto innovativo di questa ricerca è stato comparare i due aspetti, tipi di suolo e di incendio, sulla base di precisi parametri stimati in laboratorio e attraverso software di simulazione del fronte di fiamma e analizzarli successivamente con robusti strumenti di analisi statistica multivariata. Sono state dunque indagate, sulla base di una precisa e metodologica selezione, due aree del centro-sud Sardegna caratterizzate entrambe da una rilevante superficie percorsa da incendio (> 100 ha), da substrato calcareo, da condizioni climatiche tipicamente Mediterranee e da simile copertura vegetale e pedologica.

I risultati dalla simulazione del comportamento del fuoco ottenuti utilizzando BehavePlus 5.0.5 evidenziano che, per entrambi i siti, gli incendi sono stati particolarmente intensi e di difficile contenimento e si sono caratterizzati in modo leggermente diverso: in località Laconi si è trattato di un evento a comportamento moderato, con severità alta, mentre in località Sant'Antioco con comportamento estremo e severità molto alta (tabella 8.1) (valori intensità lineare (12092 kW m<sup>-1</sup> a Laconi e 21667 kW m<sup>-1</sup> a Sant'Antioco).

**Tabella 8.1:** Riassunto parametri incendi.

Località incendio	Classe di comportamento	Classe di severità	Tipo di intervento
Laconi	Moderata	Alta	Salti di fuoco, incendi di chioma e accelerazioni improvvise dell'incendio sono probabili. Le azioni di controllo al fronte dell'incendio sono inefficaci.
Sant'Antioco	Estrema	Molto alta	Salti di fuoco, incendi di chioma e accelerazioni improvvise dell'incendio sono probabili. Le azioni di controllo al fronte dell'incendio sono inefficaci.

Analizzando i parametri chimico fisici stimati sui campioni dei suoli in relazione alle diverse aree prese in esame (P = percorsa e NP = non percorsa) (tabella 8.2) e in considerazione del tipo di incendio che si è sviluppato nelle due località, si può affermare che:

1. i valori medi di sabbia risultano superiori nell'area P rispetto quella NP, in particolare a Sant'Antioco questa differenza è risultata statisticamente significativa mentre a Laconi non è risultata significativa.
2. i valori medi di argilla risultano inferiori nell' area P rispetto a quella NP; nei campioni di Sant'Antioco la differenza dei valori è stata statisticamente stimata in modo significativo
3. i valori medi di sostanza organica (SO) e azoto totale (Ntot) risultano inferiori nell'area P rispetto a quella NP, a Laconi questa differenza è risultata significativa;
4. i valori medi di idrofobicità risultano bassi in tutti i casi tranne nell'area non percorsa di Laconi che hanno un valore leggermente più alto pur registrando una idrofobicità assente,
5. i valori medi di densità apparente, pH, conducibilità e fosforo non variano in modo significativo in entrambe le aree delle due località.

**Tabella 8.2:** Riassunto risultati medi parametri fisico-chimici.

Parametri fisico-chimici suolo	Area percorsa		Non percorsa	
	Laconi	Non percorsa	Sant'Antioco	Non percorsa
Sabbia (%)	19a	15a	17a	9b
Limo (%)	72a	73a	74a	76a
Argilla (%)	9a	12a	9a	15b
Scheletro (g kg <sup>-1</sup> )	46a	126b	61a	21a
Densità apparente (g cm <sup>-3</sup> )	0.92a	0.88a	0.94a	1.0a
pH	7.6a	7.4a	7.5a	7.3a
CE (dS m <sup>-1</sup> )	0.32a	0.35a	0.24a	0.2a
Idrofobicità (s)	0.9a	2.3b	0.8a	0.8a
Ntot (g kg <sup>-1</sup> )	3.4a	4.1b	2.0a	2.1a
Ptot (mg kg <sup>-1</sup> )	511.4a	540.8a	313.2a	287.8a
SO (g kg <sup>-1</sup> )	109.8a	135.0b	64.9a	66.6a

I risultati dimostrano la interessante tendenza di questi suoli verso probabili processi erosivi principalmente nelle aree percorse da incendio. Infatti, come indicato in altri lavori, la composizione granulometrica degli orizzonti di superficie cambia per effetto dell'erosione, che può rimuovere selettivamente la frazione più fine (Certini, 2005). A causa della mancanza di copertura vegetale, le piogge battenti potrebbero essere state responsabili dell'instaurarsi di processi erosivi superficiali, che avrebbero portato all'allontanamento delle frazioni più fini (argilla) arricchendo invece il suolo della frazione residuale sabbiosa. Tale processo è particolarmente evidente a Sant'Antioco, rispetto a Laconi, probabilmente perché le pendenze risultano più marcate e per effetto di un incendio ad intensa potenza energetica che ha coinvolto

e danneggiato tutto il complesso vegetazionale. Il duplice effetto pendenza/incendio a Sant'Antioco ha ampliato notevolmente i processi erosivi idrici superficiali.

A Laconi i valori di Ntot e SO variano in modo significativo, dopo il passaggio del fuoco. In incendi di media ed alta intensità si assiste ad una riduzione del quantitativo in azoto (Mataix-Solera e Guerrero, 2007; Alcañiz et al., 2016), sia direttamente attraverso il consumo per combustione, sia attraverso la volatilizzazione in NH<sub>4</sub>. La combustione può portare alla perdita o alla completa distruzione della SO, ma questo fenomeno è in stretta relazione all'intensità del fuoco (Certini, 2005; Carballas et al., 2009). Bassi valori di intensità provocano piccole variazioni nel quantitativo di sostanza organica, mentre incendi intensi possono causare significative variazioni nel contenuto di questo parametro (Johnson, 1992; Verma e Jayakumar, 2012). A Laconi, trattandosi di un incendio ad alta severità, questo potrebbe aver causato significative variazioni su questi parametri.

I suoli calcarei sembrano essere meno inclini a sviluppare idrorepellenza rispetto a quelli acidi (Jordan et al., 2011). Mataix-Solera e Doerr (2004) e Mataix-Solera et al. (2008) hanno dimostrato come la mineralogia delle argille rivesta un ruolo fondamentale nel controllo dell'idrorepellenza del suolo. Da studi effettuati da Roberts e Carbon (1971) è emerso come l'idrofobicità non si sviluppi in condizioni alcaline. Le sostanze idrofobiche sono spesso associate con gli acidi umici presenti nella frazione organica del suolo (Roberts e Carbon, 1971; Ma'shum et al., 1988; Bisdom et al., 1993), componente questa insolubile a pH acidi, ma solubile in condizioni alcaline; pertanto questa frazione in terreni alcalini si disciolgerebbe, impedendo o riducendo drasticamente lo sviluppo di condizioni idrofobiche.

A Laconi, si è rilevata una differenza statisticamente significativa con una maggiore idrofobicità nell'area NP rispetto a quella P. Per spiegare tale differenza si debbono considerare adeguatamente differenti fattori e variabili (essiccamento della sostanza organica del suolo, sostanze organiche presenti nella lettiera, prodotti idrofobici prodotti dal micelio dei funghi, materia organica idrofobica mescolata con particelle di suolo minerale, dal riscaldamento della sostanza organica a seguito della combustione) (Jamison, 1942; Band e Harris, 1964; Gilmour, 1968; Savage et al., 1969; Das e Das, 1972; Robert e Carbon, 1972; Mc Ghie e Posner, 1980; DeBano, 1981; Doerr et al., 1998).

Per comprendere meglio tali effetti, nonché le correlazioni multiple esistenti tra parametri legati al fuoco ed agli incendi, si è dunque proceduto ad una elaborazione statistica multivariata di tipo robusto.

La PFA ha permesso di rilevare l'esistenza di un modello a 4 fattori, in grado di spiegare oltre l'80% della varianza totale. In tabella 8.3 vengono riassunti i 4 fattori estratti con la loro rispettiva denominazione, così da avere un confronto immediato tra essi e consentirne una più facile comparazione.

**Tabella 8.3:** Riassunto dei principali fattori estratti tramite PFA.

Fattori	Laconi	Sant'Antioco
	Denominazione e Varianza spiegata	Denominazione e Varianza spiegata
F1	Influenza dell'incendio sui processi erosivi superficiali 32.6	Influenza della morfologia sull'intensità dell'incendio 26.9
F2	Influenza delle pendenze sui processi idrologici superficiali 21.6	Tessitura dei suoli indagati 19.9
F3	Influenza della SO su alcune proprietà del suolo 16.3	Influenza delle pendenze sui processi idrologici superficiali 16.6
F4	Macronutrienti al suolo 10.3	Influenza dell'incendio sul contenuto di N e pH del suolo 11.2

Vi sono alcuni interessanti punti che accomunano le due aree indagate, sia da un punto di vista meramente statistico che dei processi pedologici, idrologici eventualmente influenzati dal passaggio dell'incendio. Per quanto attiene le comunanze statistiche, in entrambe i casi, la PFA estrae 4 fattori, tutti con autovalori e varianza relativa (proporzionale) abbastanza simili. Questo indica chiaramente come in soli 4 fattori si condensi buona parte della varianza statistica totale osservabile all'interno del sistema indagato. Altre cose in comune, ma più prettamente legate ai processi pedo-idrologici ed all'influenza esercitata su di essi dagli incendi, sono rilevabili nella presenza di un fattore con identica denominazione (benché derivante da processi differenti ed in grado di influire con differente severità sulla varianza totale osservata).

Per quanto attiene Laconi, appare evidente come gli incendi abbiano avuto una certa influenza sui processi erosivi superficiali, essendo questo fattore in grado di spiegare la maggiore varianza (F1 Influenza dell'incendio sui processi erosivi superficiali 32.6). Infatti nei suoli indagati, all'aumentare dei parametri legati agli incendi (velocità di avanzamento, intensità e lunghezza del fronte di fiamma) si ha una maggiore presenza in scheletro, probabilmente dovuta ad una più marcata enfaticizzazione dei processi di erosione idrica superficiale. Questi interessano

maggiormente il trasporto della cosiddetta terra fine (quale sabbia, limo ed argilla < 2 mm di diametro e dunque più soggetta ad erosione idrica superficiale), lasciando invece sul posto lo scheletro che rappresenta la frazione più pesante > 2 mm, e risultano maggiormente intensi all'aumentare delle superfici interessate, dell'intensità e della lunghezza del fronte di fiamma. Questo "arricchimento residuale in scheletro" porta sia ad una maggiore densità apparente che ad una minore idrofobicità; in entrambi i casi si tratterebbe di un effetto marcatamente fisico che influirebbe sulla idrologia delle acque superficiali. Di fatto, dunque, questi suoli mostrerebbero una scarsa idrofobicità propria a causa dell'intensità dell'incendio, che ha portato ad effetti erosivi con conseguente arricchimento in scheletro residuale e diminuzione dell'idrofobicità.

Invece a Sant'Antioco è prima di tutto la morfologia (le forti pendenze soprattutto) a determinare una certa influenza sull'intensità dell'incendio (F1 Influenza della morfologia sull'intensità dell'incendio 26.9) dato questo confermato anche dal terzo fattore estratto (F3 Influenza dell'incendio sul contenuto di N e pH del suolo 16.6).

A Sant'Antioco, le accentuate pendenze favoriscono una maggiore intensità degli incendi e anche dei successivi processi erosivi; il fattore morfologico, in presenza di incendi, diventa assai più rilevante, quando non addirittura fondamentale.

È interessante rilevare che anche per Laconi il fattore pendenza assume una certa importanza, ma in maniera decisamente inferiore rispetto a Sant'Antioco. Non a caso, le due aree si differenziano enormemente da questo punto di vista, con Sant'Antioco che si caratterizza per pendenze medie superiori del 275% rispetto a Laconi. In simili condizioni, le pendenze diventano un fattore fondamentale nel determinare e caratterizzare il sistema nel suo complesso. Quando le pendenze diventano meno marcate, come nel caso di Laconi, le proprietà del suolo assumono peso maggiore.

Si può affermare dunque che il fattore morfologico ancor più in presenza di incendi classificati ad alta severità, diventa assai più rilevante quando non addirittura fondamentale. Questo fattore può dunque essere denominato "influenza della morfologia sull'intensità di un incendio ad alta severità".

L'analisi statistica multivariata robusta ha consentito di rilevare come, in generale, per entrambe le stazioni indagate, gli incendi abbiano giocato un ruolo fondamentale e non a caso la PFA estrae in entrambe i casi quasi tutti i parametri legati agli incendi (con la sola esclusione del tasso di diffusione superficiale per Sant'Antioco, che comunque viene estratto in F3) già

nel primo e più importante fattore. In particolare si rileva come gli incendi possano aver esercitato una certa influenza sui processi idrologici superficiali (erosione idrica superficiale) e come tale influenza sia stata amplificata in condizioni di forte pendenze, in grado di aumentare l'intensità degli incendi e, conseguentemente, quella dei processi erosivi sottesi.

Per concludere: l'effetto del fuoco sul sistema suolo dipende da diversi fattori quali l'intensità del fuoco, le condizioni climatiche e topografiche (Cerdà e Robichaud, 2009; Wright e Clarke, 2008). Le conseguenze sul suolo, in seguito al passaggio del fuoco, dipendono strettamente dal regime degli incendi (intensità, stagione, tempo di ritorno) ma anche da altri diversi aspetti: caratteristiche del suolo, tipo di copertura vegetale nonché dalla severità dell'incendio, a sua volta risultato dell'intensità, della velocità di propagazione etc. (Certini, 2005; Alcañiz et al., 2016). La parziale o totale eliminazione della copertura vegetale, a seguito di eventi ad alta severità con forte potenza energetica, le accentuate pendenze, espongono il suolo all'azione degli agenti atmosferici, rendendolo ancora più vulnerabile a fenomeni erosivi superficiali.

Le aree percorse oggetto di studio mostrano la tendenza verso processi erosivi in atto, fenomeno causato probabilmente amplificato dall'effetto cumulato pendenza/ incendi ad alta severità.

Al fine di arginare questi fenomeni erosivi in entrambe le aree di studio percorse (Laconi e Sant'Antioco), sarebbe importante intervenire con tecniche di recupero post-incendio ed utilizzando tecniche a basso impatto ambientale ed in particolare quelle che contemplano criteri di ingegneria naturalistica e di bioingegneria. Queste tecniche consistono nel realizzare delle briglie di contenimento attraverso l'utilizzo di materiali degradabili e facilmente disponibili, quindi presenti nel sito stesso come pietrame e legname derivante da interventi di selvicoltura (Cerrillo e Rodriguez, 2016). Sono opere che hanno il vantaggio di contenere i processi erosivi che si innescano nella fase post-incendio, di favorire il ritorno della vegetazione arborea e arbustiva spontanea e di essere a basso impatto ambientale ed economico. In molte aree del bacino del mediterraneo sono condotte attualmente sperimentazioni in tal senso che fanno registrare interventi di successo nel contenimento, degli impatti post-incendio in aree a forte pendenza (Tardio e Mickovski, 2016). L'auspicio è che questa ricerca possa avere un proseguo proprio in questo campo, al fine di fornire le informazioni di base per la realizzazione di progetti di bioingegneria utili ad arginare gli effetti del fuoco sul suolo e a favorire i processi di ripristino e recupero degli ambienti mediterranei.

## 9. Bibliografia

Abella S.R., Engel E.C., 2013. Influences of wildfires on organic carbon, total nitrogen and other properties of desert soils. *Soil Science Society of America Journal*, 77: 1806–1817.

Agee J.K., 1996. The influence of forest structure on fire behaviour. *Proceedings of the 17th Annual Forest Vegetation Management Conference*, January 16–18, Redding, CA. 1996: 52–68.

Alauzis M.V., Mazzarino M.J., Raffaele E., Roselli L., 2004. Wildfires in NW Patagonia: long-term effects on a *Nothofagus* forest soil. *Forest Ecology and Management*, 192:131–142.

Albini F.A., 1976. Estimating wildfire behavior and effects. United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT–30.

Alcañiz M., Outeiro L., Francos M., Farguell J., Úbeda X., 2016. Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgrí Massif, Catalonia, Spain). *Science of the Total Environment*, Elsevier, 572:1329–1335.

Alexander M.E., 1982. Calculating and interpreting forest fire intensities. *Canadian Journal of Botany*, 60: 349–357.

Alexander M.E., Cole F.V., 1995. Predicting and interpreting fire intensities in Alaskan black spruce forests using the Canadian system of fire danger rating. In: *Managing Forests to Meet People's Needs. Proceedings of 1994 Society of American Foresters, Canadian Institute of Forestry Convention*, Anchorage: 185–192.

Alexander M.E., Cruz M.G., 2013. Assessing the effect of foliar moisture on the spread rate of crown fires. *International Journal of Wildland Fire*, 22: 415–427.

Alexander M.E., Cruz M.G., 2013. Limitations on the accuracy of model predictions of wildland fire behaviour: A state of the knowledge overview. *The forestry Chronicle*, 89 (3): 370–381.

Anderson H.E., 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT–122.

[https://www.fs.fed.us/rm/pubs\\_int/int\\_gtr122.pdf](https://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_gtr122.pdf)

Andreae M.O., Merlet P., 2001. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochem. Cycles*, 15: 955–96.

Andrews P.L., Queen L.P., 2001. Fire modeling and information system technology. *International Journal of Wildland Fire*, 10(4): 343–352.

Andrews P.L., Bevins C.D., Seli R.C., 2003. BehavePlus fire modeling system version 2.0 user's guide. United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report –106.

Andrews P.L., 2008. BehavePlus fire modeling system, version 4.0: variables. United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report – 213.

Andrews P.L., 2009. BehavePlus fire modeling system, version 5.0: variables. United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report –213.

Andrews P.L., 2010. Do you BEHAVE? Application of the BehavePlus fire modeling system. *Proceedings of 3<sup>rd</sup> Fire Behavior and Fuels Conference*, October 25-29 2010, Spokane, Washington, 17.

Andrews P.L., Heinsch F.A., Schelvan L., 2011. How to generate and interpret fire characteristics charts for surface and crown fire behavior. United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report – 253.

Andrews P.L., 2012. Modeling Wind Adjustment Factor and Midflame Wind Speed for Rothlernel's Surface Fire Spread Model. United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report –266.

Arca B., Salis M., Santoni P., Rossi J.P., Spano D., 2015. La modellistica del comportamento degli incendi. Strumenti e modelli a supporto della pianificazione, e prevenzione degli incendi boschivi. PROTERINA 2. Il secondo passo nella protezione dei rischi naturali: gli investimenti sul territorio, 50–80.

Arcenegui V., Mataix-Solera J., Guerrero C., Zornoza R.D., Mataix-Beneyto J., García-Orenes F., 2008. Immediate effects of wildfires on water repellency and aggregate stability in Mediterranean calcareous soils. *Catena*, 74: 219–226.

Arduino E., Barberis E., 2000. Metodi di analisi chimica dei suoli. M.I.P.A.A.F., Edizione Franco Angeli, Milano.

Arocena J.M., Opio C., 2003. Prescribed fire-induced changes in properties of subboreal forest soils. *Geoderma*, 113: 1–16.

Aru A., Baldaccini P., Vacca A., 1991. Nota illustrativa alla carta dei suoli della Sardegna. Regione Autonoma della Sardegna, Assessorato della Programmazione, Bilancio e Assetto del territorio. Centro Regionale di Programmazione; Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Scienze della Terra, Cagliari.

Ascoli D., Bovio G., 2014. Sistemi esperti per la progettazione del fuoco prescritto. In: Bovio G., Corona P., Leone V. (Eds.), *Approcci innovativi nella gestione integrata dei combustibili*

forestali per prevenire gli incendi boschi. Compagnia delle Foreste S.r.l., Arezzo, Italia. 117–124.

Azema J., Chabrier G., Fourcade E., Jaffrezo M., 1977. Nouvelles données micropaléontologiques, stratigraphiques et paléogéographiques sur le Portlandien et le Néocomien de Sardaigne. *Revue de Micropaléontologie*, 20: 125–139.

Aznar J.M., González-Pérez J.A., Badía D., Martí C., 2013. At what depth are the properties of a gypseous forest topsoil affected by burning. *Land Degradation and Development*, 12 (2): 118–125.

Bacciu V.M., 2009. Maquis fuel model development to support spatially-explicit fire modeling applications. Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze e Biotecnologie dei Sistemi Agrari e Forestali e delle Produzioni Alimentari, Ciclo XXV, Università degli Studi di Sassari.

Badía D., Martí C., 2003. Plant Ash and Heat Intensity Effects on Chemical and Physical Properties of Two Contrasting Soils. *Arid Land Research and Management*, 17: 23–41.

Badía D., Martí C., 2008. Fire and rainfall energy effects on soil erosion and runoff generation in semi-arid forested lands. *Arid Land Research and Management*, 22: 93–108.

Barberi F., Cherchi A., 1980. Excursion sur le Mésozoïque et le Tertiaire de la Sardaigne Occidentale, C.N.R. – Progetto Finalizzato Geodinamica, 345: 115.

Barberi F., D’Onofrio S., 1985. Benthic Foraminifera of the Fangario Formation (Cagliari, Sardinia). *Bollettino della Società Paleontologica Italiana*, 23: 439–437.

Barbosa P., Amatulli G., Camia A., Kucera J., Libertà G., Ayanz J.S.M., Schmuck G., Schulte E., Dierks. H., 2006. Forest Fires in Europe 2006. Scientific and Technical Research series, 22931: 1–77.

Barca S., Costamagna L.G., 1997. Il bacino eocenico del Sulcis (Sardegna SO): nuove evidenze tettoniche ed inquadramento geodinamico. Convegno-Escursione: La Fossa Sarda nell'ambito dell'evoluzione geodinamica cenozoica del Mediterraneo Occidentale. Libro Guida e Riassunti, 19–22 giugno 1997, Villanovaforru, CA, 70–71.

Barca S., Costamagna L.G., 1997a. Compressive Alpine tectonics in Western Sardinia (Italy): geodynamic consequences. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Series Paris*, 325: 791–787.

BehavePlus 5.0.5., 2011. United States Department of Agriculture, Forest Service.

<https://www.frames.gov/partner-sites/behaveplus/software-manuals/>

Bilgili E., Saglam B., 2003. Fire behaviour in maquis fuels in Turkey. *Forest Ecology and Management*, 184: 201–207.

Bisdom E.B.A., Dekker L.W., Schoute J.F.T., 1993. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma*, 56: 105–118.

Blasi C., Bovio G., Corona P., Marchetti M., Maturani A., 2004. Quadro dei contenuti e riferimenti concettuali. In: Blasi C., Bovio G., Corona P., Marchetti M., Maturani A. (Eds.), *Incendi e complessità ecosistemica- Dalla pianificazione forestale al recupero ambientale*. Palombi & Partner, Roma, Italia, 13–17.

Boerner R.E.J., Huang J., Hart S.C., 2009. Impacts of fire and fire surrogate treatments on forest soil properties: a meta-analytical approach. *Ecological Applications*, 19(2): 338–358.

Bond R.D., Harris J.R., 1964. The influence of the microflora on physical properties of soil. Effects associated with filamentous algae and fungi. *Australian Journal of Soil. Research.*, 2: 111–122.

Borůvka L., Mládková L., Drábek O., Vašát R., 2005. Factors of spatial distribution of forest floor properties in the Jizerské Mountains. *Plant, Soil and Environment*, 51: 316–321.

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

Bottai L., Montagni A., Maselli F., 2008. Il telerilevamento per il monitoraggio degli effetti degli incendi forestali, *Rivista Italiana di telerilevamento*, 40 (1): 75–87.

Bovio G., Camia A., 2004. Caratterizzazione pirologica degli incendi boschivi. In: Blasi C., Bovio G., Corona P., Marchetti M., Maturani A. (Eds.), *Incendi e complessità ecosistemica- Dalla pianificazione forestale al recupero ambientale*. Palombi & Partner, Roma, Italia, 87–98.

Bovio G., Manes F., 2004. Immissione di inquinanti in atmosfera. In: Blasi C., Bovio G., Corona P., Marchetti M., Maturani A. (Eds.), *Incendi e complessità ecosistemica- Dalla pianificazione forestale al recupero ambientale*. Palombi & Partner, Roma, Italia, 25–28.

Bovio G., 2011. Criteri generali. In: Bovio G., Ascoli D., Valsecchi C., Bottero A. (Eds.), *Progetto di ricerca “Indagine sulle caratteristiche degli incendi boschivi e sulle dinamiche di risposta degli ecosistemi forestali”*. Regione Piemonte e Dipartimento AgroSelviTer dell’Università di Torino.

Box G.E.P., Cox D.R., 1964. An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society*, 26: 211–252.

Bradstock R., Gill A.M., Williams R.J., 2012. Future fire regimes of Australian ecosystems: new perspectives on enduring questions of management. In: Bradstock R.A, Gill A.M., Williams R.J. (Eds.), *Flammable Australia: Fire Regimes, Biodiversity and Ecosystems in a Changing World*. Collingwood, Vic: CSIRO Publis, 307–324

Brugger S.P., 2007. Effetto di un incendio di superficie sulla crescita di castagni e ontani neri sul versante sudalpino Svizzero. *Bollettino della Società ticinese di Scienze naturali*, 95: 15–22.

Byram, G. M., 1959. Combustion of forest fuels. In: Davis, K. P. (Ed.), *Forest fire: control and Use*. McGraw-Hill, New York, 61–89.

Carballas T., Marín A., Diaz-Raviña M., 2009. Efecto de los incendios forestales sobre los suelos de Galicia. In: Cerdà A., Mataix-Solera J., (Eds.), Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles. Valencia: Cátedra de Divulgació de la Ciència, Universitat de València, FUEGORED, 269–301.

Carmignani L., Barca S., Oggiano G., Pertusati P.C., Salvadori I., 2001. Carta Geologica d'Italia, Regione Autonoma della Sardegna, Assessorato all'Industria, Scala 1:200.000. <http://www.geologi.sardegna.it/documenti/cartografia-geologica/>.

Carreiras M., Ferreira A.J.D., Valente S., Fleskens L., Gonzales-Pelayo Ó., Rubio J.L., Stoof C.R., Coelho C.O.A., Ferreira C.S.S., Ritsema C.J., 2014. Comparative analysis of policies to deal with the wildfire risk. *Land Degradation & Development*, 25: 92–103.

Cerapia V.R., 2006. Predição do índice de risco de incêndio e modelagem computacional do comportamento do avanço da frente do fogo no Parque Nacional da Floresta da Tijuca. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Cerdà A., 1998. Changes in overland flow and infiltration after a rangeland fire in a Mediterranean scrubland. *Hydrological Process.*, 12(7): 1031– 1042.

Cerdà A., Doerr S., 2005. Influence of vegetation recovery on soil hydrology and erodibility following fire: an 11-year investigation. *International Journal Wildland Fire*, 14: 423– 437.

Cerdà A., Doerr S.H., 2008. The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *Catena*, 74 (3): 256– 263.

Cerdà A., Robichaud P.R., 2009. *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies*. Enfield, NH, USA: Science Publishers, ISBN 9781578085262.

Cerrillo G.T., Rodriguez L.G., 2016. Monitoring of Erosion Preventive Structures Based on Eco-Engineering Approaches: The Case of the Mixed Check Dams of Masonry and Forest Residues. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 9 (1): 103–107

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

Certini G., 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143: 1–10.

CFS, 2016. Bollettino incendi boschivi per Regione, dati provvisori 2016 emissione del 15/12/2016.

[file:///C:/Users/simona/Downloads/AIB\\_statistica\\_provvisoria\\_27\\_11\\_2016%20\(6\).pdf](file:///C:/Users/simona/Downloads/AIB_statistica_provvisoria_27_11_2016%20(6).pdf)

CFS, 2016. Relazione sull'attività operativa primo semestre 2016 in tema di Tutela Ambientale e Pubblica sicurezza Protezione civile e Pubblico soccorso, Analisi del fenomeno degli incendi boschivi.

[www.corpoforestale.it/flex/cm/pages/ServeAttachment.php/L/IT/D/.../P/.../E/pdf](http://www.corpoforestale.it/flex/cm/pages/ServeAttachment.php/L/IT/D/.../P/.../E/pdf)

Chabrier G., Fourcade E. and Jaffrezo M., 1975. Sur le Crétacé du Nord-Ouest de la Sardaigne. *Société Géologique de France*, 15: 131–134.

Chabrier G., Fourcade E., 1975a. Sur le Crétacé du Nord-Ouest de la Sardaigne (présence de Valanginien à faciés pyrénéo-provençal). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 280: 563– 566, Paris.

Chabrier G., Fourcade E., 1975b. Sur le Jurassique du Nord-Ouest de la Sardaigne. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 280: 493–496.

Chatto K., Tolhurst K.G., 2004. The relationship between fireline intensity and the ecological and economic effects of fire, and methods currently used to collect fire data: a review. *Fire Management Department of Sustainability and Environment, Report 67*.

Ciais P.H., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ogée J., Allard V., Aubinet M., Buchmann N., Bernhofer C.H.R., Carrara A., Chevallier F., De Noblet N., Friend A.D., Friedlingstein P., Grünwald T., Heinesch B., Keronen P., Knohl A., Krinner G., Loustau D., Manca G., Matteucci G., Miglietta F., Ourcival J.M., Papale D., Pilegaard K., Rambal S., Seufert G., Soussana J.F., Sanz M.J., Schulze E.D., Vesala T., Valentini R., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437 (7058): 529–534.

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

Conte A., 1989. Studio petrografico, mineralogico e geochimico delle rocce magmatiche calcoalcaline dei distretti di Sarroch (Sardegna meridionale) e di S. Antioco (Sardegna Sudoccidentale). Tesi di dottorato, II ciclo, Università di Roma “La Sapienza”, 202.

Corda F., 2011. Applicazione del metodo Delphi come nuova tecnica d’indagine per la conoscenza delle cause degli incendi boschivi. Tesi di laurea in Sistemi Forestali e Ambientali, Dipartimento di Agraria, Università degli Studi di Sassari.

Covington W.W., Sackett S.S., 1992. Soil mineral nitrogen changes following prescribed burning in ponderosa pine. *Forest Ecology and Management*, 54: 175–191.

Cruz M.G., Alexander M.E., 2010. Assessing crown fire potential in coniferous forests of western North America: a critique of current approaches and recent simulation studies. *International Journal of Wildland Fire*, 19: 377–398.

Cruz M.G., Alexander M.E., Dam E.J., 2014. Using Modeled Surface and Crown Fire Behavior Characteristics to Evaluate Fuel Treatment Effectiveness: A Caution. *Journal of Forest Science*, 60: 1000–1004.

D’Angelo M., Enne G., Madrau S., Zucca C., 1998. Land use and desertification in a Mediterranean context: the Baronie Region, Sardinia (Italy). *Desertificação Mediterrâneo 12/13*, Lisboa, Instituto Mediterrânico, Universidade Nova de Lisboa, 243-268.

Das D.K., Das B., 1972. Characterization of water repellency in Indian soils. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 42: 1099–1102.

Dazzi C., 2013. *Fondamenti di Pedologia*. Le Pensur Editore, Brienza, Italia.

De Luis M., González-Hidalgo J.C., Raventós J., 2003. Effects of fire and torrential rainfall on erosion in a Mediterranean gorse community. *Land Degradation and Development*, 14: 203–213.

De Ronde C., Goldammer J.G., Wade D.D. and Soares R.V., 1990. Prescribed fire in industrial plantations. In: Goldammer J.G. (Ed.), *Fire in the Tropical Biota: Ecosystem Processes and Global Challenges*. Springer Verlag Ecological Studies, 84: 216–265

DeBano L.F., 1969a. The relationship between heat treatment and water repellency. In: DeBano, L.F., Letey J., (Eds.). *Proceedings of a Symposium on Water Repellent Soils, 6-10 May 1969, Riverside, CA*. University of California, Riverside, 265–279.

DeBano L.F., 1969b. Observations on water repellent soils in western United States. In: DeBano, L.F., Letey J., (Eds.), *Proceedings of a Symposium on Water Repellent Soils, 6-10 May 1969, Riverside, CA*. University of California, Riverside, 17– 29, 354.

DeBano L.F., Mann L.D., Hamilton D.A., 1970. Translocation of hydrophobic substances into soil by burning organic litter. *Soil Science Society of America Journal*, 34: 130–133.

DeBano L.F., Dunn P.H., Conrad C.E., 1977. Fire's effect on physical and chemical properties of chaparral soils. In: Mooney, H.A., Conrad, C.E. (Technical Coordinators), *Proceedings of the Symposium on the Environmental Consequences of Fire and Fuel Management in Mediterranean Ecosystems*. United States Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report WO-3, Washington, D.C. 65–74.

DeBano L.F., 1981. Water repellent soils: a state-of-the-art. United States Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report PSW-46, 21.

DeBano L.F., Neary D.G., Folliott P.F., 1998. *Fire's effects on ecosystems*. John Wiley and Sons, New York, USA.

DeBano L.F., 2000. The role of fire and soil heating on water repellence in wild land environments: a review. *Journal of Hydrology*, 231: 195–206.

Delitti W.A., Ferran L., Trabud L., Vallejo V.R., 2005. Effects of fire recurrence in *Quercus coccifera* L. shrublands of the Valencia region (Spain): I. Plant composition and productivity. *Plant Ecology*, 177: 50–70.

Díaz-Delgado R., Lloret F., Pons X., Terradas J., 2002. Satellite evidence of decreasing resilience in Mediterranean plant communities after recurrent wildfires. *Ecology*, 83: 2293–2303.

Dikici H., Yilmaz CH., 2006. Peat fire effects on some properties of an artificially drained peatland. *Journal of Environmental Quality*, 35: 866–870.

Dimitrakopoulos A.P., 2002. Mediterranean fuel models and potential fire behaviour in Greece. *International Journal of Wildland Fire*, 11(2): 127–130.

Dimitriou A., Mantakas G., Kouvelis S., 2001. An analysis of key issues that underlie forest fires and shape subsequent fire management strategies in 12 countries in the Mediterranean basin. Final report prepared by Alcyon for WWF Mediterranean Programme Office and IUCN.

Dinesh R., Chaudhuri S.G., 2013. Soil biochemical/microbial indices as ecological indicators of land use change in mangrove forests. *Ecological Indicators*, 32: 253–258.

Doerr S.H., Shakesby R.S., Walsh R.P.D., 1998. Spatial variability of soil hydrophobicity in fire-prone eucalyptus and pine forests, Portugal. *Soil Science*, 163: 313–324.

Doerr S.H., Shakesby R.A., Walsh R.P.D., 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 51: 33–65.

Duce P., Pellizzaro G., Arca B., Ventura A., Bacciu V., Salis M., Bortolu S., Spano D., Santoni P., Barboni T., Leroy V., Cancellieri D., Leoni E., Ferrat L., Perez Y., 2012. Fuel types and potential fire behaviour in Sardinia and Corsica islands: a pilot study. In: Spano D., Bacciu V., Salis M., Sirca C. (Eds.), *Modelling Fire Behaviour and Risk*. Nuova StampaColor S.r.l., Muros (Italia), 2–8.

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum “Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo” “Ciclo XXIX”. Università degli Studi di Sassari.

Duguy B., Alloza J.A., Roder A., Vallejo R., Pastor F., 2007. Modelling the effects of landscape fuel treatments on fire growth and behaviour in a Mediterranean landscape (eastern Spain). *International Journal of Wildland Fire*, 16: 619–632.

Durgin P.B., Vogelsang P.J. 1984. Dispersion of kaolinite by water extracts of Douglas-fir ash. *Canadian Journal of Soil Science*, 64: 439–443.

Ebel B.A., Moody J.A., Martin D.A., 2012. Hydrologic conditions controlling runoff generation immediately after wildfire. *Water Resources Research*, 48 (3): W03529.

EFFIS, 2010. The European Forest Fire Information System (EFFIS), <http://forest.jrc.ec.europa.eu>.

Ente Autonomo del Flumendosa, 1998. Nuovo studio dell'idrologia superficiale della Sardegna. Regione Autonoma della Sardegna, Assessorato della Programmazione, Bilancio ed Assetto del Territorio, Centro Regionale di Programmazione, Cagliari, CD-rom.

Eugenio M., Lloret F., 2004. Fire recurrence effects on the structure and composition of Mediterranean *Pinus halepensis* communities in Catalonia (Northeast Iberian Peninsula). *Ecoscience*, 11: 446–454.

Eugenio M., Verkaik I., Lloret F., Espelta J.M., 2006. Recruitment and growth decline in *Pinus halepensis* populations after recurrent wildfires in Catalonia (NE Iberian Peninsula). *Forest Ecology and Management*, 231: 47–54.

Feingold G., Jiang H., Harrington J.K., 2005. On smoke suppression of clouds in Amazonia. *Geophysical Research Letters*, 32.

Fernandez I., Cabaneiro A., Carballas T. 1997. Organic matter changes immediately after a wildfire in an Atlantic forest soil comparison with laboratory soil heating. *Soil Biology and Biochemistry*, 29: 1–11.

Fernandes P.M., Catchpole W.R., Rego F.C., 2000. Shrubland fire behavior modelling with microplot data. *Canadian Journal of Forest Research*, 30: 889–899.

Fernandes P.M., 2001. Fire spread prediction in shrub fuels in Portugal. *Forest Ecology and Management* 144: 67–74.

Fernandes P.M., 2002. Desenvolvimento de relações preditivas para uso no planeamento de fogo controlado em povoamentos de *Pinus pinaster* Ait.. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) - Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.

Ferran A., Castell C., López A. L., Vailejo V. R., 1991. Els efectes del foc en pinedes de la Catalunya Central. *Butlletí de la Institució Catalana d'Història Natural*, 59: 129–143.

Field C.B., Behrenfeld M.J., Randerson J.T., Falkowski P., 1998. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281: 237–240.

Filzmoser P., Hron K., Reimann C., 2009. Univariate statistical analysis of environmental (compositional) data: Problems and possibilities. *Science of the Total Environment*, 407: 6100–6108.

Finney M.A., 2004. FARSITE: fire area simulator: model development and evaluation. United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, RP-4.

Finney M.A., 2006. An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In: Andrews P. L., Butler B.W. (Eds.), *Fuels Management-How to Measure Success. Proceedings...* Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006., 213–220.

Fiorucci P., Gaetani F., Minciardi R., 2007. Development and application of a system for dynamic wildfire risk assessment in Italy. *Environmental Modelling & Software* 23: 690–702.

Fire Behavior Field Reference Guide, <http://www.fbfrg.org>.

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

Fisher R.F., Binkley D., 2000. Ecology and management of forest soils, 3rd Edition. John Wiley & Sons, New York, 2000.

Fois C., 2014. Simulazione del comportamento del fuoco in ambiente mediterraneo, mediante il simulatore FARSITE. Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze e Biotecnologie dei Sistemi Agrari e Forestali e delle Produzioni Alimentari, Ciclo XXVI, Università degli Studi di Sassari.

Fourcade E., Azéma J., Chambrier G., Chauve P., Foucault A., Rangheard Y., 1977. Liaisons paléogéographiques au Mésozoïque entre les zones externes bétiques, baléares, corso-sarde et alpines. Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn., 19: 377–388.

García-Corona R., Benito E., De Blas. E., Varela M.E., 2004. Effects of heating on some soil physical properties related to its hydrological behaviour in two north-western Spanish soils. International Journal of Wildland Fire, 13: 195–199.

Geoportale Ispra Ambiente, <http://www.geoportale.isprambiente.it>.

Gessa C., Testini C., 1989. Il pH del suolo e la sua regolazione. Chimica del suolo (coord. Sequi P.), Pàtron Editore, Bologna.

Gilmour D.A., 1968. Water repellence of soils related to surface dryness. Australian Forestry, 32: 143–148.

Giovannini G., Lucchesi S., 1997. Modifications induced in soil physico-chemical parameters by experimental fires at different intensities, Soil Science, 162: 479–486.

Giovannini G., Lucchesi S., Giaghetti M., 1988. Effects of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility, Soil Science, 146: 255–261.

Gonzalez-Perez J.A., Gonzalez-Vila F.J., Almendros G. et al., 2004. The effect of fire on soil organic matter-a review. Environment International, 30: 855–870.

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

Granged A., Zavala L., Jordán A., Barcenos-Moreno G., 2011. Post-fire evolution of soil properties and vegetation cover in a Mediterranean heathland after experimental burning: a 3-year study. *Catena*, 164: 85–94.

Grogan P, Bruns TD, Chapin FS III, 2000, Fire effects on ecosystem nitrogen cycling in a Californian bishop pine forest. *Oecologia*, 122: 537–544.

Grosso A., Pilia M., 2011. Studio di impatto ambientale, Comune di Sant’Antioco, Provincia di Carbonia-Iglesias.

Guénon R., Vennetier M., Dupuy N., Roussos S., Pailler A., Gros R., 2013. Trends in recovery of Mediterranean soil chemical properties and microbial activities after infrequent and frequent wildfires. *Land Degradation and Development*, 24 (2): 115–128.

Guida R.J., Abella S.R., Smith W.J., Stephen H., Roberts C.L., 2014. Climate change and desert vegetation distribution: assessing thirty years of change in southern Nevada’s Mojave Desert. *The Professional Geographer*, 66 (2): 311–322.

Harmon M.E., Bond-Lamberty B., Tang J., Vargas R., 2011. Heterotrophic respiration fluxes in disturbed forests: A review with examples from North America. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 116: G00K04.

Hatten J., Zabowski D., Scherer G., Dolan E., 2005. A comparison of soil properties after contemporary wildfire and fire suppression. *Forest Ecology and Management*, 220 (1–3): 227–241.

Herman J., 2009. Fire recurrence effects on aboveground plant and soil carbon in Mediterranean shrublands with Aleppo pine (*Pinus halepensis*). MSc thesis, Forest Ecology and Management Group, Final report.

Hobbs P.V., Reid J.S., Kotchenruther R.A., Ferek R.J., Weiss R., 1997. Direct radiative forcing by smoke from biomass burning. *Science*, 275: 1777–1778.

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum “Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo” “Ciclo XXIX”. Università degli Studi di Sassari.

Hodzic A., Madronich S., Bohn B., Massie S., Menut L., Wiedinmyer C., 2007. Wildfire particulate matter in Europe during summer 2003: meso-scale modeling of smoke emissions, transport and radiative effects. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7: 4043–4064.

Houghton R.A., Hackler J.L., Lawrence K.T., 1999. The U.S. carbon budget: contributions from land-use change. *Science*, 285(5427): 574–57.

Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., Van Der Linden P.J., Xiaosu D., 2001. *Climate Change. The Scientific basis*. Cambridge, UK. Cambridge University Press.

Hyde K., Woods S.W., Donahue J., 2007. Predicting gully rejuvenation after wildfire using remotely sensed burn severity data. *Geomorphology*, 86 (3–4): 496–511.

Inbar M., Tamir M., Wittenberg L., 1998. Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. *Geomorphology*, 24: 17–33.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. *The Physical Science Basis*.

Jamison Vernon C., 1942. The slow reversible drying of sandy surface soils beneath citrus trees in central Florida. *Soil Science Society of America*, 7: 36–41.

Johnson D.W., 1992. Effects of forest management on soil carbon storage. *Water, Air and Soil Pollution*, 64: 83–120.

Jordán A., González F.A., Zavala L.M., 2010. Re-establishment of soil water repellency after destruction by intense burning in a Mediterranean heathland (SW Spain). *Hydrological Processes*, 24: 736–748.

Jordán A., Zavala L.M., Mataix-Solera J., Nava A.L., Alanís N., 2011. Effect of fire severity on water repellency and aggregate stability on Mexican volcanic soils. *Catena*, 84: 136–147.

JRC–IES, 2013. Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2012. European Union, Office for Official Publications of the European Communities, Scientific and Technical Research series, Luxembourg.

Keane R.E., Reinhardt E.D., Scott J., Gray K., Reardon J., 2005. Estimating forest canopy bulk density using six indirect methods. *Canadian Journal of Forest Research*, 35: 724–739.

Keeley J.E., 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal Wildland Fire*, 18 (1): 116–126.

King P.M., 1981. Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement. *Australian Journal of Soil Research*, 19: 275–285.

Knox K.J.E., Clarke P.J., 2006. Fire season and intensity affect shrub recruitment in temperate sclerophyllous woodlands. *Oecologia*, 149: 730–739.

Koren I.L., Kaufman Y.J., Remer L.A., Martins J.V., 2004. Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation. *Science*, 303: 1342–1345.

Kovacic D.A., Swift D.M., Ellis J.E., Hakonson T.E., 1986. Immediate effects of prescribed burning on mineral soil nitrogen in ponderosa pine of New Mexico. *Soil Science*, 141: 71–75.

Kutiel P., Lavee H., Segev M., Benyamini Y., 1995. The effect of fire-induced surface heterogeneity on rainfall–runoff–erosion relationships in an eastern Mediterranean ecosystem, Israel. *Catena*, 25(1–4): 77–87.

Langmann B., Bryan D., Textor C., Trentmann J., van der Werf G.F., 2009. Vegetation fire emissions and their impact on air pollution and climate. *Atmospheric Environment*, 43: 107–108.

Leone V., Lovreglio R., 2005. Forest fires prevention and limitation of the greenhouse effect. *Forest@*, 2: 160–165.

Leone V., Bovio G., Cesti G., Lovreglio R., 2008. Il Direttore delle Operazioni di Spegnimento degli incendi boschivi: manuale tecnico. Corpo Forestale dello Stato.

Leone V., Lovreglio R., 2011. Le conseguenze del passaggio del fuoco sul terreno. *Geologia dell'ambiente*, 3: 8–15.

Leone V., Lovreglio R., 2014. Basi teoriche della gestione e caratterizzazione dei combustibili forestali. In: Bovio G., Corona P., Leone V. (Eds.), *Approcci innovativi nella gestione integrata dei combustibili forestali per prevenire gli incendi boschivi*. Compagnia delle Foreste S.r.l., Arezzo, Italia, 29–32.

Leopardi M., Scorzini A.R., 2014. Effects of wildfires on peak discharges in watersheds. *©iForest – Biogeosciences and Forestry*, 8: 302–307.

Lloret F., Vila M., 2003. Diversity patterns of plant functional types in relation to fire regime and previous land use in Mediterranean woodlands. *Journal of Vegetation Science*, 14: 387–398.

Logsdon S.D., Karlen D.L., 2004. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 78: 143–149.

Ma'shum M., Tate M.E., Jones G.P., Oades J.M., 1988. Extraction and characterisation of water-repellent material from Australian soils. *Soil Science*, 39: 99–110.

Macadam A.M., 1987. Effects of broadcast slash burning on fuels and soil chemical properties in the sub-boreal spruce zone of central British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research* 17: 1577–1584.

Malkinson D., Wittenberg L., 2011. Post fire induced soil water repellency - modeling short and long-term processes. *Geomorphology*, 125: 186–192.

Mancini M., 2013. La risposta della produttività primaria al clima ed ai suoi cambiamenti: un'analisi modellistica per alcune tipologie forestali italiane. Università degli Studi della Tuscia di Viterbo, Dipartimento di Scienze dell'Ambiente Forestale e delle sue Risorse (Disafri), Corso di Dottorato di Ricerca, Ecologia Forestale XXIII Ciclo, 11.

Marchetti M., Ricotta C., 2004. Struttura del Paesaggio. In: Blasi C., Bovio G., Corona P., Marchetti M., Maturani A. (Eds.), *Incendi e complessità ecosistemica- Dalla pianificazione forestale al recupero ambientale*. Palombi & Partner, Roma, Italia, 28 –29.

Marcos E., Luis-Calabuig E. and Tárrega R., 1998. Chemical soil changes in shrubland after experimental fire. In: Trabaud L. (Ed.), *Fire management and landscape ecology*. International Association of Wildland Fire, Fairfield, Washington, USA, 3–11.

Martin D.A. e Moody A., 2001. Comparison of soil infiltration rates in burned and unburned mountainous watersheds. *Hydrological processes*, 15: 2893–2903.

Masse J.P., Allemann J., 1982. Relation entre les séries carbonatées de plate-forme provençale et sarde au Crétacé inférieur. *Cretaceous Research*, 3: 19–33.

Mataix-Solera J., 1999. Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales. Contribución a su conservación y regeneración. Facultad de Ciencias. Universidad de Alicante, Alicante. Spain (Tesis Doctoral).

Mataix-Solera J., Doerr S.H., 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forest in southeastern Spain. *Geoderma*, 118: 77–88.

Mataix-Solera J., Guerrero C., 2007. Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas. In: Mataix-Solera, J. (Ed.), *Incendios forestales, suelos y erosión hídrica*. Caja Mediterráneo. Alacant.

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

Mataix-Solera J., Arcenegui V., Guerrero C., Jordán M.M., Dlapa P., Tessler N., Wittenberg L., 2008. Can terra rossa become water repellent by burning. A laboratory approach. *Geoderma*, 147: 178–184

Mataix-Solera J., Cerdà A., Arcenegui V., Jordán A., Zavala L.M., 2011. Fire effects on soil aggregation: a review, *Earth Science Reviews*, 109 (1–2): 44–60.

Maxia C., 1963b. Giura e Creta nella regione di Maladroxia (Isola di S. Antioco) Sardegna sud-occidentale. Istituto di Geologia. Università di Cagliari, 13: 1–35.

Mazzoleni S., Aronne G., 1993. Introduzione all'ecologia degli incendi. Liguori Editore, Napoli, Italia.

Mazzoleni S., Esposito A., 2004. Ciclo dei nutrienti. In: Blasi C., Bovio G., Corona P., Marchetti M., Maturani A. (Eds.), *Incendi e complessità ecosistemica- Dalla pianificazione forestale al recupero ambientale*. Palombi & Partner, Roma, Italia, 23–25.

McCarthy G.J., Tolhurst K.G., 1998. Effectiveness of Firefighting First Attack Operations by the Department of Natural Resources and Environment from 1991/92 – 1994/95, Research Report No. 45, Fire Management, Department of Natural Resources and Environment, Victoria, 32.

McGhie D.A. and Posner A.M., 1980. Water repellence of a heavy textured Western Australian surface soil. *Australian Journal of Soil Research*, 18: 309–323.

Melosu G., 2013. Analisi dati meteo, incendio 7/8/9 agosto 2013 (Isili, Nurallao, Laconi).

Ministero delle Politiche Agricole e Forestali, 2000. *Metodi di analisi fisica dei suoli*. Ed. Franco Angeli, Milano.

Mistry J., Berardi A., 2005. Assessing fire potential in a Brazilian Savanna Nature Reserve. *Biotropica*, 37(3): 439–451.

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

Mitsopoulos I.D., Dimitrakoupolos A.P., 2006. Canopy fuel characteristics and potential crown fire behavior in Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) forests. *Annals of Forest Science*, 64: 287–299.

Moghaddas E., Stephens S.L., 2007. Thinning, burning, and thin-burn fuel treatment effects on soil properties in a Sierra Nevada mixed-conifer forest *Forest Ecology and Management*. 250: 156–166.

Mohr H.H.; Waldrop T.A., Simon D.M., 2004. Using BehavePlus for predicting fire behavior in Southern Appalachian hardwood stands subjected to fuel reduction treatments. In: Connor K.F. (Ed.). 12th biennial southern silvicultural research conference. Proceedings... Asheville, NC: United States Department of Agriculture - Forest Service, Southern Research Station, 71-73.

Mohr H.H., Waldrop T. A., Rideout S., Phillips R.J., Flint C.T., 2010. Effectiveness of fire and fire surrogate treatments for controlling wildfire behavior in Piedmont Forests: a simulation study. In: Stanturf J.A. (Ed.). 14th biennial southern silvicultural research conference. Proceedings... Asheville, NC: United States Department of Agriculture - Forest Service, Southern Research Station, 565–567.

Montoya S., Marin G., Ortega E., 2013. Impact of prescribed burning on soil properties in a Mediterranean area (Granada, SW Spain). *Spanish Journal of Soil Science*, 4(1).

Moody J.A., Smith J.D., Regan B.W., 2005. Critical shear stress of cohesive soils subjected to temperatures typical of wildfires. *Journal of Geophysical Research*, 110: 1–13.

Moody J.A., Shakesby R.A., Robichaud P.R., Cannon S.H., Martin D.A., 2013. Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. *Earth-Science Reviews*, 122: 10–37.

Moreira F., Viedma O., Arianoutsou., Curt T., Koutsias N., Rigolot E., Barabati A., Corona P., Vaz P., Xanthopoulos G., Mouillot F., Bilgili E., 2011. Landscape wildfire interactions in

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

southern Europe: Implications for landscape management. *Journal of Environmental Management*, 92: 2389– 2402.

Mou G., 2014. Sviluppo di tecniche innovative per la gestione integrata dei combustibili nella prevenzione degli incendi boschivi in foreste mediterranee. Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze e Biotecnologie dei Sistemi Agrari e Forestali e delle Produzioni Alimentari, Indirizzo “Monitoraggio e controllo degli ecosistemi forestali in ambiente mediterraneo”, Ciclo XXVII, Università degli studi di Sassari.

Munoz-Rojas M., Martini D., Erickson T., Merritt D., Dixon K., 2015. Recovery of microbial community structure and functioning after wildfire in semi-arid environments: optimising methods for monitoring and assessment. *Geophysical Research Abstracts*, 17: 3947–1.

Munoz-Rojas M., Erickson T.E., Martini D., Dixon K.W., Merritt D.J., 2016. Soil physicochemical and microbiological indicators of short, medium and long term post-fire recovery in semi-arid ecosystems. Elsevier, *Ecological Indicators*, 63: 14–22.

National Wildfire Coordinating Group, 2014. Fire Behavior Field Reference Guide, <http://www.fbfrg.org>.

Naveh Z., 1990. Fire in the Mediterranean – a landscape ecological perspective. In: Goldammer JG, Jenkins MJ, (Eds.), *Fire in ecosystems dynamics: Mediterranean and Northern perspective*. The Hague: SPB Academic Publishing, 1–20.

Neary D.G., Klopatek C.C., DeBano L.F. et al., 1999. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management*, 122: 51–71.

Neary D.G., Ryan K.C., DeBano L.F., 2005. *Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report-42, 250.

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum “Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo” “Ciclo XXIX”. Università degli Studi di Sassari.

Omi P.N., 2005. Forest fires: a reference handbook. Contemporary World Issues series. ABC-CLIO, Santa Barbara, California, USA.

Onda Y., Dietrich W.E., Brooker F., 2008. Evolution of overland flow after a severe forest fire Point, Reyes, California. *Catena*, 72: 13–20.

Paoletti E., 2007. Impact of environmental pollution and climate change on forest ecosystems: the activity of the IUFRO Research Group 7.01. *Forest@*, 4 (4): 451–459.

Pardini G., Gispert M., Dunjó G., 2004. Relative influence of wildfire on soil properties and erosion processes in different Mediterranean environments in NE Spain. *Science of the Total Environment*, 328: 237–246.

Parlak M., 2011. Effect of heating on some physical, chemical and mineralogical aspects of forest soil. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 19: 143–152.

Pastor E., Zárata L., Planas E., Arnaldos J., 2003. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29: 139–153.

Pausas J.G., 2004. Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean basin). *Climatic Change*, 63: 337–350.

Pausas J.G., Llovet J., Rodrigo A., Vallejo R., 2008. Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin: A review. *International Journal of Wildland Fire*, 17(6): 713–723.

Pereira P., Bodí M., Úbeda X., Cerdà A., Mataix-Solera J., Balfour V., Woods S., 2010. Las cenizas en el ecosistema suelo. In: Cerdà A., Jordán A., (Eds.), *Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales*. Càtedra de Divulgació de la Ciència, Universitat de València: Valencia, Spain, 349–402.

Pereira P., Úbeda X., Martin D., 2012. Fire severity on ash chemical composition and water-extractable elements. *Geoderma*, 191: 105–114.

Pérez-Cabello F., Ibarra P., Echeverría M.T., de la Riva J., 2010. Post-fire land degradation of *Pinus sylvestris* L. woodlands after 14 years. *Land Degradation and Development*, 21: 145–160.

Persiani A.M., 2004. Componente biologica. In: Blasi C., Bovio G., Corona P., Marchetti M., Maturani A. (Eds.), *Incendi e complessità ecosistemica- Dalla pianificazione forestale al recupero ambientale*. Palombi & Partner, Roma, Italia, 33–37.

PFAR, 2007. Piano Forestale Ambientale Regionale, redatto ai sensi del D. Lgs. 227/2001, approvato con Delibera 53/9 del 27.12.2007. Distretto n. 17.

Piano AIB 2011-2013. Regione Autonoma della Sardegna.

Podgorny I.A., Li F., Rammanathan V., 2003. Large aerosol radiative forcing due to the 1997 Indonesian forest fire. *Geophysical Research Letters*, 30.

Prosser I.P., William L., 1998. The effect of wildfire on runoff and erosion in native *Eucalyptus* forest. *Hydrological Processes*, 12: 251–265.

Pyne S.J., Andrews P.L., Laven R.D., 1996. *Introduction to Wildland Fire*. John Wiley & Sons Inc., NY.

Reinhardt E.D., Keane R.E., 2001. Modelling fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 10: 373–380.

Raison R.J., Connell M.J., Khanna P.K., 1987. Methodology for studying fluxes of soil mineral-N in situ. *Soil Biology and Biochemistry*, 19: 521–530.

Reid J., Koppman R., Eck T., Eleuterio D., 2005. A review of biomass burning emissions part II: intensive physical properties of biomass burning particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(3): 799–825.

Reimann C., Filzmoser P., 2000. Normal and lognormal data distribution in geochemistry: Death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental Geology*, 39: 1001–1014.

Reinhardt E.D., Keane R.E., Brown J.K., 2001. Modeling fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 10: 373–380.

Reimann C., Filzmoser P., Garrett R.G., 2002. Factor analysis applied to regional geochemical data: Problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 17: 185–206.

Reinhardt E., Crookston N.L., 2003. The fire and fuels extension to the forest vegetation simulator. United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report –116.

Roberts F.J., Carbon B.A., 1972. Water repellency in sandy soil of south-western Australia. II. Some chemical characteristics of the hydrophobic skins. *Aust. Journal of Soil Research.*, 10:24–42.

Robichaud P.R., 2000. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in northern Rock Mountain forests, USA. *Journal of Hydrology*, 220–232.

Robichaud P.R., Beyers J.L., Neary D.G., 2006. Post-fire watershed rehabilitation. In: Neary D.G., Ryan K.C., DeBano L.F., (Eds.), *Fire effects on soil and water*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report - 42 (4): 179–198.

Romanya J., Khanna P.K., Raison R.J., 1994. Effects of slash burning on soil phosphorus fractions and sorption and desorption of phosphorus. *Forest Ecology Management*, 65: 89–103.

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum “Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo” “Ciclo XXIX”. Università degli Studi di Sassari.

Ronga F., 2011. Petrogenesi delle vulcaniti del Sulcis (Sardegna sud-occidentale). Tesi di Dottorato di Ricerca in Petrografia e Petrologia, XIII Ciclo, Università degli Studi di Catania in consorzio con Università degli Studi di Napoli “Federico II”.

Rothermel R. C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Research Paper INT-115.

Rothermel R.C., Deeming J.E., 1980. Measuring and interpreting fire behavior for correlation with fire effects. United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report, INT-93.

Rothermel R.C., 1983. How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fires. United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station General Technical Report, INT-143.

Roussopoulos P.J., Johnson V.J., 1975. Help in making fuel management decisions. United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Research Paper Res. Pap., NC-112.

Saglam B., Bilgili E., Kucuk O., Durmaz B.D., 2008. Fire behavior in Mediterranean shrub species (maquis). African Journal of Biotechnology, 7: 4122–4129.

Saldanha V.E., Reichert J.M., Prevedello J., Oladele G., Dalvan J.R., 2015. Soil hydrophobicity: comparative study of usual determination methods Hidrofobicidade do solo: estudo comparativo dos métodos usuais de determinação. ISSN 0103-8478 Ciência Rural, Santa Maria, 45(2): 260–266.

Salis M., 2008. Fire behaviour simulation in Mediterranean maquis using Farsite (Fire Area Simulator). Tesi di Dottorato di ricerca in Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, XX ciclo, Università degli Studi di Sassari.

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum “Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo” “Ciclo XXIX”. Università degli Studi di Sassari.

Salis M., Ager A.A., Arca B., Finney M.A., Bacciu V., Duce P., Spano D., 2012. Assessing exposure of human and ecological values to wildfire in Sardinia, Italy. *International Journal of Wildland Fire*, 22: 549–565.

Sanroque P., Rubio J. L. and Mansanet J., 1987. Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo, en la composición florística y en la erosión hídrica de zonas forestales. *Revue de Ecologie et Biologie du Sol*, 22(13): 1–147.

Santoni P.A., Filippi J.B., Balbi J.H., Bosseur F., 2011. Wildland fire behaviour case studies and fuel models for landscape-scale fire modelling. *Journal of Combustion*, 2011: 613424.

Sardegna Foreste, <http://www.sardegnaambiente.it/>.

Sardegna Geoportale, <http://www.sardegnageoportale.it/>.

Savage S.M., Martin J.P., Letey J., 1969b. Contribution of some soil fungi to natural and heat induced water repellency in sand. *Soil Science Society of America*, 33: 405–409.

Scharenbroch B.C., Nix B., Jacobs K.A., Bowles M.L., 2012. Two decades of low-severity prescribed fire increases soil nutrient availability in Midwestern, USA oak (*Quercus*) forest. *Geoderma*, 183–184, 80–91.

Schimann H., Petitjean C., Guitet S., Reis T., Domenach A.M., Roggy J.C., 2012. Microbial bioindicators of soil functioning after disturbance: the case of goldmining in tropical rainforests of French Guiana. *Ecological Indicators*, 20: 34–41.

Schoch P., Binkley D., 1986. Prescribed burning increased nitrogen availability in a mature loblolly pine stand. *Forest Ecological Management*, 14: 13–22.

Scott D.F., Van Wik D.B., 1990. The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behaviour of an afforested catchment. *Journal of Hydrology*, 121: 239–256.

Scott J.H., Burgan R.E., 2005. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. Fort Collins, CO: United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station., General technical report-153. [https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs\\_gtr153.pdf](https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr153.pdf)

Sequi P., 1989. Chimica del suolo. Pàtron Editore. Bologna.

Sequi P., De Nobilis M., 2000. Metodi di analisi chimica dei suoli. M.I.P.A.F. Ed. Franco Angeli, Milano.

Serrasolsas I., Khanna P.K., 1995. Changes in heated and autoclaved forest soils of S.E. Australia. II. Phosphorus and phosphatase activity. *Biogeochemistry*, 29: 25–41.

Sertsu S.M., Sanchez P.A., 1978. Effects of heating on some changes in soil properties in relation to an Ethiopian land management practice. *Soil Science Society of America Journal*, 42: 940–944.

Shakesby R.A., Doerr S.H. 2006. Wildfire as hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews*, 74: 269–307.

Shakesby R.A., Bento C.P.M., Ferreira C.S.S., Ferreira A.J.D., Stoof C.R., Urbanek E., Walsh, R.P.D., 2013. Impacts of prescribed fire on soil loss and soil quality: an assessment based on an experimentally-burned catchment in central Portugal. *Catena*, 128: 278–293.

Simard D.G., Fyles J.W., Pare' D., Nguyen T., 2001. Impacts of clearcut harvesting and wildfire on soil nutrient status in the Quebec boreal forest. *Canadian Journal of Soil Science*, 81: 229–237.

Soil Taxonomy, Natural Resources Conservation Service, USDA. <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/.../soils/.../taxonomy/>

StatSoft Development, 2006. Statistica 7.1., StatSoft Italia SrL, Padova.

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

Stephens S.L., Finney M.A., 2002. Prescribed fire mortality of Sierra Nevada mixed conifer tree species. *Forest Ecology and Management*, 162: 261–271.

Stoof C.R., Wesseling J.G., Ritsema C.J., 2010. Effects of fire and ash on soil water retention. *Geoderma*, 159 (3–4): 276–285.

Stoof C.R., Vervoort R.W., Iwema J., Van De Elsen, Ferreira A.J.D., Ritsema C.J., 2012. Hydrological response of a small catchment burned by experimental fire. *Hydrology and Earth, 16: 267–285.*

Stoof C.R., Moore D., Fernandes P.M., Stoorvogel J.J., Fernandes R.E.S., Ferreira A.J.D., Ritsema C.J., 2013. Hot fire, cool soil. *Geophysical Research Letters*, 40: 1534–1539.

Stoof C.R., Ferreira J.D.A., Mol W., Van den Berg J., De Kort A., Drooger S., Slingerland E.C., Mansholt A.U., Ferreira C.S.S., Ritsema J.C., 2015. Soil surface changes increase runoff and erosion risk after a low–moderate severity fire. *Geoderma*, 239–240, 58–67.

Sullivan A.L., 2009a. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models. *International Journal of Wildland Fire*, 18: 349–368.

Sullivan A.L., 2009b. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *International Journal of Wildland Fire*, 18: 369–386.

Sullivan A.L., 2009c. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Wildland Fire*, 18: 387–403.

Tachajapong W., Jesse Lozano J., Mahalingam S., Zhou X., Weise D.R., 2008. An investigation of crown fuel bulk density effects on the dynamics of crown fire initiation in shrublands. *Combustion Science and Technology*, 180: 593–615.

Tardio G., Mickovski S.M., 2016. Implementation of eco-engineering design into existing slope stability design practices. *Ecological Engineering*, 92: 138–147.

Templ M., Filzmoser P., Reimann C., 2008. Cluster analysis applied to regional geochemical data: Problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 23: 2198–2213.

Terefe T., Mariscal-Sancho I., Peregrina F. e Espejo R., 2008. Influence of heating on various properties of six Mediterranean soils: A laboratory study. *Geoderma*, 143: 273–280.

Tessler N., Sapir J., Wittemberg L., 2015. Recovery of Mediterranean vegetation after recurrent forest fires: insight from the 2010 forest fire on Mount Carmel, Israel. *Land Degradation and Development*, 27: 1424–1431

Thomas A.D., Walsh R.P.D., Shakesby R.A., 1999. Nutrient losses in eroded sediment after fire in eucalyptus and pine forests in the wet Mediterranean environment of northern Portugal, *Catena*, 36: 203–302.

Trabaud L., Galtié J.F., 1996. Effects of fire frequency on plant communities and landscape pattern in the Massif des Aspres (Southern France). *Landscape Ecology Journal*, 11: 215–224.

Turner M. G., Smithwick E. A. H., Metzger K. L., Tinker D. B., and Romme W. H., 2007. Inorganic nitrogen availability following severe stand-replacing fire in the Greater Yellowstone Ecosystem. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 104:4782–4789.

Úbeda X., Lorca M., Outeiro L., Bernia S., Castellnou M., 2005. Effects of prescribed fire on soil quality in Mediterranean grassland (Prades Mountains, north-east Spain). *International Journal Wildland Fire*, 14: 379–384.

Úbeda X., Outeiro L.R., Sala M., 2006. Vegetation regrowth after a differential intensity forest fire in a Mediterranean environment, northeast Spain. *Land Degradation and Development*, 17: 429–440.

Úbeda X., Outeiro L., 2009. Physical and chemical effects of fire on soil. In: Cerdà A., Robichaud P.R. (Eds.), *Fire Effects On Soil And Restoration Strategies*. Science Publishers, Enfield, NH, 105–132.

Úbeda, X., Pereira, P., Outeiro, L., Martin, D.A., 2009. Effects of fire temperature on the physical and chemical characteristics of the ash from two plots of cork oak (*Quercus suber*). *Land Degradation and Development*, 20: 589–608.

Ulery A.L., Graham R.C., 1993. Forest fire effects on soil color and texture. *Soil Science Society of America Journal*, 57(1): 135–140.

Ulery A.L., Graham R.C., Chadwick O.A., Wood H.B., 1995. Decade-scale changes of soil carbon, nitrogen, and exchangeable cations under chaparral and pine. *Geoderma*, 65: 121–134.

Van Wagner C.E., 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research*, 7(1): 23–34.

Verma S., Jayakumar S., 2012. Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: A review. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 2(3): 168–176.

Vieira D.C.S., Fernández C., Vega J.A., Keizer J.J., 2015. Does soil burn severity affect the post-fire runoff and inter-rill erosion response. A review based on meta-analysis of field rainfall simulation data. *Journal of Hydrology*, 523: 452–464.

Violante A., Adamo P., 2000. Il pH del suolo. In M.I.P.A.F. *Metodi di analisi chimica dei suoli*. Ed. Franco Angeli, Milano.

Vollmer J.L., 2005. New Technology for Fuel Breaks and Green Strips in Urban Interface and Wildland Areas. In: Butler B. W., Alexander M. E. (Eds.); *Eighth International Wildland Firefighter Safety Summit- Human Factors - 10 Years Later*. The International Association of Wildland Fire, Hot Springs, SD, 1–7.

---

Simona Tidu - Effetti degli incendi in suoli su substrati calcarei in area Mediterranea- Tesi di Dottorato in Scienze Agrarie- Curriculum "Monitoraggio e controllo degli ecosistemi agrari e forestali in ambiente mediterraneo" "Ciclo XXIX". Università degli Studi di Sassari.

Wagtendonk J.W.V., 1996. Use of a deterministic fire growth model to test fuel treatments Sierra Nevada Ecosystem. California: University of California, Centers for Water and Wildland Resources, 13.

Wells C.G., Campbell R.E., DeBano L.F., Lewis C.E., Fedriksen R.L., Franklin E.C., Froelich, R.C., Dunn, P.H., 1979. Effects of fire on soil: A state of knowledge review. United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report –WO-7.

Wells G., 2008. The Rothermel Fire-Spread Model: still running like a champ. *Fire Science Digest*, 2: 1–12.

White B.L.A., 2010. Incêndios florestais no Parque Nacional Serra de Itabaiana Sergipe. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

White B.L.A., Ribeiro G.T., Souza R.M., 2013. O uso do BehavePlus como ferramenta para modelagem do comportamento e efeito do fogo. *Brazilian Journal of Forestry Research*, 33: 73–84.

Wilson C.J., 1999. Effects of logging and fire on runoff and erosion on highly erodible granitic soils in Tasmania. *Water resources research*, 35: 3531–3546.

Wittenberg L., Kutiel H., Greenbaum N., Inbar M., 2007a. Short-term changes in the magnitude, frequency and temporal distribution of floods in the Eastern Mediterranean region during the last 45 years – Nahal Oren, Mt. Carmel, Israel. *Geomorphology*, 84: 181–191.

Wright B.R., Clarke P.J., 2008. Relationships between soil temperatures and properties of fire in feathertop spinifex (*Triodia schinzii* (Henrard) Lazarides) sandridge desert in central Australia. *Rangeland Journal*, 30: 317–325.

Xue L., Qiuqing L., Hongyue C., 2014. Effects of a Wildfire on Selected Physical, Chemical and Biochemical Soil Properties in a *Pinus massoniana* Forest in South China. *Forests*, 5: 2947–2966.