



## Biomonitoring of edaphic microarthropods in broadleaf stands affected by wild fires in the Montefalcone Nature

### Biomonitoraggio dei microartropodi edafici in popolamenti di latifoglie percorsi da incendi nella Riserva Naturale di Montefalcone

Chiara Lisa

Accademia Italiana di Scienze Forestali - Piazza T.A. Edison 11, 50133 - Firenze, Italia; chiara.lisa@aisf.it

**Abstract:** The aim of this study is to assess the impact of fire on edaphic microarthropod communities in stands of broadleaf trees with a prevalence of *Quercus* species affected by several fires: in 2001, in 2009, and in some areas in both years, within the Montefalcone Nature Reserve (Pisa). Soil sampling was carried out seasonally between autumn 2011 and autumn 2012 for a total of 120 samples including a nearby area where non fire has occurred since at least 40 years (control). Monitoring was carried out using the soil biological quality index (QBS-ar) and the abundances of microarthropods, which did not show clear differences between areas burned, once or twice, and the control area. Although no significant differences emerged, the study shows that some ecomorphological groups are more sensitive to the passage of fire than others. In our case, the density of microarthropods and the biological quality of the soil did not show any particular reductions, confirming that the recovery of edaphic communities, generally, takes place within a couple of years. This highlights the important role of monitoring over time in order to provide information on the impact of fire on a forest stand and therefore on its stability after a disturbance.

**Key words:** broadleaf forests; wild fires; soil; edaphic microarthropods; environmental monitoring.

**Citation:** Lisa C., 2023 - *Biomonitoraggio dei microartropodi edafici in popolamenti di latifoglie percorsi da incendi nella Riserva Naturale di Montefalcone*. *L'Italia Forestale e Montana*, 78 (5): 173-188; <https://dx.doi.org/10.36253/ifm-1122>

**Received:** 15/12/2023 **Revised version:** 29/01/2024 **Published online:** 14/02/2024

#### 1. INTRODUZIONE

Gli incendi rappresentano una minaccia per la salvaguardia delle foreste europee e, in particolar modo, per quelle mediterranee. Gli ecosistemi forestali del bacino del Mediterraneo sono spesso caratterizzati dalla ricorrenza di incendi, per la maggior parte delle volte cau-

sati da volontarietà o da negligenza dell'uomo (WWF, 2021). Essi, oltre ad essere ritenuti tra le principali cause della distruzione della massa legnosa di un bosco più di una qualsiasi altra calamità naturale (Hadjibiros, 2001), sono in grado di condizionare la sostenibilità dell'intero ecosistema (Neary *et al.*, 1999). Il fuoco, infatti, è in grado di influire notevolmente oltre

che sulla composizione e sulle dinamiche della vegetazione anche sul ciclo dei nutrienti e sulle proprietà chimiche del terreno e può causare, dal punto di vista biologico, una perdita di microartropodi e microorganismi con riduzione della biodiversità edafica.

La maggior parte degli studi che hanno indagato l'impatto degli incendi sulle superfici boschive hanno interessato prevalentemente la componente vegetale e la sua evoluzione, ma molto interesse è stato rivolto anche all'impatto del fuoco sul suolo (Agbeshie *et al.*, 2022) sia dal punto di vista chimico, fisico, ma anche biologico. Meno noti però sono gli studi riguardanti gli effetti del fuoco sulle comunità dei microartropodi edafici (Lisa *et al.*, 2015) anche se essi si stanno dimostrando validi indicatori biologici sia in agricoltura, sia in ambienti forestali (Solascasas *et al.*, 2022).

In ambito forestale uno strumento indispensabile per il controllo dello stato e delle dinamiche di un ecosistema percorso da incendio è il monitoraggio o biomonitoraggio che può rappresentare un valido aiuto per ampliare le conoscenze sulla complessità del sistema, finalizzate a una sua gestione sostenibile. In particolare il biomonitoraggio di un suolo percorso da incendio può utilizzare differenti organismi viventi, ma i più utilizzati sono generalmente invertebrati e possono essere rappresentati sia dalla macrofauna, sia dalla meso- o microfauna edafica. La maggior parte dei bioindicatori appartengono però al *phylum* degli artropodi, sebbene anche i nematodi (Matlack, 2001) e gli anellidi (Bhadauria *et al.*, 2000) siano stati utilizzati per indagare i cambiamenti subiti dai suoli sottoposti a stress termici.

Lo scopo principale di questo studio è quello di monitorare e valutare il grado di disturbo (diretto ed indiretto) degli incendi sulla matrice biologica del suolo in popolamenti di latifoglie nell'area mediterranea in differenti periodi di tempo successivi al passaggio del fuoco. L'im-

patto del fuoco sulla biodiversità delle comunità di microartropodi edafici è stato valutato sia dal punto di vista qualitativo, applicando un indice biologico sintetico quale il QBS-ar (Indice di Qualità Biologica del Suolo) (Parisi, 2001; Parisi *et al.*, 2005), sia quantitativo valutando la numerosità degli individui. I risultati ottenuti sono stati poi discussi per confrontare l'impatto del fuoco sulle comunità di microartropodi edafici in boschi a prevalenza di specie quercine rispetto alla qualità biologica del suolo in popolamenti di pini mediterranei analizzati in uno studio precedente condotto nella stessa zona, nello stesso intervallo di tempo e con lo stessa metodologia (Lisa *et al.*, 2022).

## 2. MATERIALE E METODI

### 2.1 Area studio

L'area scelta per questo studio si trova nella Regione Toscana nel comprensorio collinare delle Cerbaie, situato a 50 km a est di Pisa e che comprende al suo interno la Riserva Naturale Statale di Montefalcone. Il territorio è inserito nel Sito di Interesse Comunitario delle Cerbaie (SIC: IT5170003) e ricade nella Zona di Protezione Speciale di Montefalcone (ZPS: IT517004).

Il clima delle Cerbaie è di tipo temperato umido con temperature medie annue comprese tra i 14 °C e i 15 °C e precipitazioni annue che variano dai 1000 mm ai 1150 mm. Secondo la classificazione fitoclimatica di Pavari le Cerbaie ricadono nella zona del Lauretum sottozona media con siccità estiva (Travaglini *et al.*, 2011). I venti dominanti che interessano l'area sono: la tramontana (N) che soffia soprattutto in inverno, e il libeccio (S-O) che è invece presente durante tutto l'arco dell'anno. Le alture presentano profili dolci ed arrotondati che vanno da 45 a 114 m s.l.m. Dal punto di vista idrografico le Cerbaie ricadono nel bacino del fiume Arno

e sono attraversate da un reticolo di torrenti, rii, fossi di origine naturale ed anche da canali di origine artificiale risalenti al XVI secolo. Per quel che riguarda l'aspetto pedologico i suoli delle Cerbaie sono orientati verso un processo pedogenetico di tipo climatico, caratteristico delle regioni a clima temperato atlantico o semi-continentale, dove la vegetazione è rappresentata da foreste di latifoglie o foreste miste di latifoglie e conifere. Dal momento che l'area non presenta eccessi termici e mancanza di umidità atmosferica, i suoli delle Cerbaie tendenzialmente subiscono processi pedogenetici di brunificazione (Olivari, 2004).

I boschi delle Cerbaie sono rappresentati per lo più da formazioni di pino marittimo (*Pinus pinaster* Aiton), di età compresa tra 80-85 anni, distribuite soprattutto nei pianori sommitali dei rilievi collinari e da boschi misti di specie quercine a prevalenza di cerro (*Quercus cerris* L.) e rovere (*Quercus petraea* Liebl.) distribuiti soprattutto nei vallini e nelle aree pianeggianti. Castagno (*Castanea sativa* Mill.), sorbo domestico (*Cormus domestica* L.), ciavardello (*Sorbus torminalis* (L.) Crantz), agrifoglio (*Ilex aquifolium* L.), carpino bianco (*Carpinus betulus* L.) e carpino nero (*Ostrya carpinifolia* Scop) sono presenti in modo sporadico.

Le Cerbaie sono una zona caratterizzata da un'elevata frequenza di incendi, basti pensare che nell'arco di tempo che ha interessato questo studio, tra il 2000 e il 2010, si sono verificati un totale di 80 incendi che hanno percorso una superficie complessiva di 533 ettari.

Gli anni in cui si sono registrate le maggiori superfici percorse dal fuoco sono stati il 2001 e il 2009. L'incendio dell'agosto 2001 ha percorso una superficie di circa 70 ettari ed è durato, prima della sua estinzione, 47 ore. Sono stati distrutti e/o danneggiati dal fuoco 16200 m<sup>3</sup> di massa legnosa. L'incendio dell'agosto 2009 ha interessato invece una superficie di circa 130 ettari ed ha avuto una durata di

circa 53 ore. L'incendio del 2009 ha ripercorso anche alcune aree già interessate dal fuoco nel 2001. La gravità degli incendi è stata stimata al momento dell'incendio dai responsabili delle operazioni di spegnimento basandosi su osservazioni dirette sul campo ed è stata valutata da "bruciatura superficiale moderata o grave" a "bruciatura profonda" (Keeley, 2009) che ha interessato la lettiera, lo strato organico del suolo, arbusti, tronchi e chioma degli alberi.

## 2.2 Area di campionamento

Le aree individuate per il campionamento del suolo sono state così suddivise:

1. Aree controllo 1 e 2 (non percorsa da incendio da almeno 40 anni) (AC1 e AC2) (Figg. 1 e 2);
2. Area incendiata nel 2001 (Fig. 3) (AI 2001);
3. Area incendiata nel 2009 (Fig. 4) (AI 2009);
4. Area incendiata sia nel 2001 sia nel 2009 (Figure 5 e 6) (AI 2001/09).

L'area controllo 1 ha caratteristiche più simili alle aree percorse dal fuoco nel 2001 e nel 2001/2009 (esposizione, pendenza, specie arboree ecc.) mentre l'area controllo 2 ha caratteristiche maggiormente affini all'area percorsa dal fuoco solamente nel 2009.

La descrizione del soprassuolo forestale delle aree esaminate in questo studio è riportata in tabella 1.

## 2.3 Campionamento del suolo

Per ciascuna area di campionamento sono stati scelti 2 punti rappresentativi e per ciascuno di essi è stato seguito un protocollo di campionamento del suolo che ha previsto il prelievo di tre zolle quadrate di terreno (10 cm di lato x 10 cm di profondità) lungo un transetto di circa 10 metri a 5 metri di distanza l'uno dall'altro. La posizione di ciascun punto è stata acquisita tramite GPS (*Trimble*) e le coordinate geografiche dei due punti più esterni di tutti i transetti sono riportate in tabella 2.

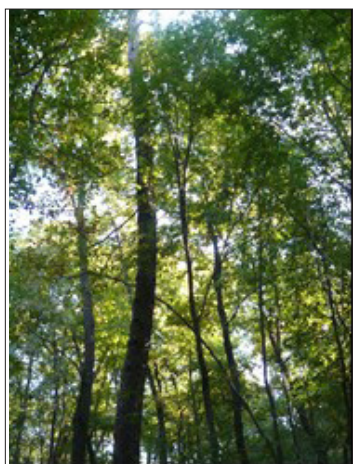


Figura 1 - Area Controllo AC1.



Figura 2 - Area Controllo AC2.



Figura 3 - Area AI 2001.



Figura 4 - Area AI 2009.



Figura 5 - Area AI 2001/2009.



Figura 6 - Area AI 2001/2009.

Il disegno di campionamento ha previsto di effettuare i prelievi del suolo sia nella stagione primaverile sia nella stagione autunnale. La fase di campionamento è iniziata nell'autunno del 2011 e si è conclusa nell'autunno 2012 per un totale di 120 campioni di suolo analizzati.

#### 2.4 Qualità biologica del suolo e biodiversità

I campioni di suolo prelevati sono stati sistemati nel selettore Berlese-Tüllgren per 10 giorni e i microartropodi edafici che sono stati estratti sono stati contati e identificati a livello di ordine e classe attraverso uno stereomicroscopio con ingrandimenti tra i 20 X e i 40 X (Fig. 7).

La qualità biologica del suolo è stata valutata utilizzando l'indice QBS-ar (Parisi *et al.*, 2005).

Tale indice si basa sul concetto di ecomorfologia che suddivide gli organismi edafici in gruppi contraddistinti dall'aver la stessa serie di caratteri ecomorfologici (Forme Biologiche) evolutivamente convergenti (Sacchi e Testard, 1971; Parisi, 1974) e finalizzati all'adattamento alla vita ipogea.

A ciascuna Forma Biologica è associato un valore numerico, detto Indice Ecomorfologico (EMI), che va da un minimo di 1 ad un massimo di 20. Come regola generale, le forme eu-edafiche, ricevono un punteggio EMI = 20,

Tabella 1 - Descrizione delle aree prese in esame per il campionamento del suolo.

<i>Aree</i>	<i>Vegetazione</i>
Area Controllo 1 (AC1)	Soprasuolo transitorio a prevalenza di cerro di età compresa tra 40 e 60 anni con un piano dominato composto da carpino bianco, orniello, sorbo e ciavardello, mentre quello dominante è costituito da specie quercine a prevalenza di cerro di età compresa tra i 40 e i 60 anni, avviati a fustaia. Il sottobosco è composto da pungitopo, agrifoglio, felce e rovo con una sporadica presenza di ginestra, erica e rinnovazione di cerro.
Area Controllo 2 (AC2)	Vegetazione simile all'area controllo 1 con presenza di eriche e corbezzolo nello strato arbustivo.
Area incendio 2001 (AI 2001)	Presenza di cerro, rovere e castagno sopravvissuti all'incendio con rinnovazione di pino marittimo e giovani polloni di cerro e orniello. Nel sottobosco presenza di ginestre, eriche, corbezzolo, rovo, cisto e felce.
Area incendio 2009 (AI 2009)	Presenza di cerro, rovere, orniello e ontano nero di circa 60 anni di età con presenza di alberi morti in piedi e a terra ed esemplari parzialmente danneggiati dal fuoco. Sottobosco composto da ginestre, erica e cisto, felci, rovi e leguminose con una sporadica presenza di muschio ( <i>fire moss</i> ).
Area incendio 2001/2009 (AI 2001/2009)	Presenza di cerro, rovere e sporadici esemplari di pino marittimo, con rinnovazione sporadica a prevalenza di carpino bianco e specie quercine in stadio di plantule. Le latifoglie presenti si trovano in un precario stato vegetativo e forniscono un grado di copertura scarso. Numerosi sono sia gli alberi morti in piedi sia quelli a terra. Sottobosco composto da eriche, ginestra, pungitopo, cisti, felci, rovi e muschio ( <i>fire moss</i> ).

Tabella 2 - Coordinate punti campionamento.

<i>Bosco latifoglie</i>	<i>Coordinate geografiche</i>	
	<i>1</i>	<i>2</i>
AC1 Punto 1	4845437N 1637525E	4845435N 1637434E
AC1 Punto 2	4845505N 1637474E	4845505N 1637484E
AC2 Punto 1	4845285N 1638953E	4845283N 1638964E
AC2 Punto 2	4845301N 1638936E	4845310N 1638932E
AI 2001 Punto 1	4845276N 1637476E	4845267N 1637469E
AI 2001 Punto 2	4845286N 1637505E	4845279N 1637511E
AI 2009 Punto 1	4845548N 1638602E	4845550N 1638592E
AI 2009 Punto 2	4845565N 1638578E	4845569N 1638569E
AI 2001/2009 Punto 1	4845243N 1638802E	4845247N 1638794E
AI 2001/2009 Punto 2	4845252N 1638785E	4845260N 1638780E



Figura 7 - Microartropodi osservati allo stereomicroscopio.

le forme epi-edafiche ricevono un punteggio uguale a 1 e le forme emi-edafiche ricevono un punteggio intermedio proporzionale al loro grado di specializzazione al suolo.

Alcuni ordini di microartropodi (ad esempio, Chilopoda, Diplopoda, Collembola e Coleoptera) hanno punteggi multipli, mentre altri come i Protura, Symphyla e Diplura ricevono un unico punteggio, perché tutte le specie appartenenti a questi gruppi mostrano un livello di adattamento simile. Le tabelle di valutazione degli indici eco-morfologici (EMI) sono state pubblicate da Parisi nel 2001. Il valore finale dell'indice QBS-ar viene calcolato considerando tutti i gruppi ecomorfologici rilevati in almeno uno dei tre campioni di terreno. Se in un gruppo sono presenti più forme biologiche, per la sommatoria si utilizza il massimo valore EMI ottenuto che rappresenta il più alto grado di adattamento alla vita

edafica (QBS-max). Ciò consente di valutare la qualità biologica potenziale dell'area esaminata riducendo i problemi connessi all'anisotropia con cui sono distribuiti i microartropodi del suolo. La maggiore qualità biologica del suolo corrisponde a un valore più elevato di QBS-ar che va da 0 a >200.

Nonostante l'indice QBS-ar sia un indice sintetico e che quindi non prevede la valutazione del numero dei microartropodi presenti nel suolo, in questo studio si è effettuato anche il conteggio degli organismi edafici al fine di fare anche una valutazione biologica quantitativa e non solo qualitativa.

### 2.5 Analisi chimico-fisiche del suolo

Per ogni campione di suolo prelevato sono stati determinati il pH, la temperatura, l'umidità e la quantità di sostanza organica.

La temperatura e l'umidità sono state rile-

vate in campo tramite un rilevatore di umidità per il suolo (*Misture meter type HH2*) a 10 cm di profondità.

Per la determinazione del pH e la valutazione del contenuto di sostanza organica (S.O.) nel suolo si sono seguite le procedure previste dal Decreto Ministeriale del 13/09/1999 - Metodi ufficiali di analisi del suolo.

Il pH è stato determinato per via potenziometrica, dopo taratura del sistema di misura, su sospensioni di suolo-acqua e suolo potassio di cloruro (KCl) con un rapporto di estrazione di 1:5 poiché il suolo è risultato molto ricco di sostanza organica. La determinazione della sostanza organica è stata effettuata secondo il metodo dell'analisi del carbonio totale o organico e dell'azoto totale su campioni di suolo secco all'aria e setacciato a 0,5 mm, con una quantità di terreno compresa tra i 15 e i 20 mg ( $\pm 1 \mu\text{g}$ ). Per ciascun campione si è effettuata l'analisi tre volte e si è calcolata la media e la deviazione standard per ogni valore.

## 2.6 *Analisi statistiche*

Le analisi statistiche (univariate e multivariate) utilizzate in questo studio sono state effettuate con il software *PAST programme version 1.94b* (Hammer, 2001).

Le analisi univariate hanno riguardato i valori di QBS-ar ottenuti nelle differenti aree di campionamento prese in esame. Al fine di verificare se il passaggio del fuoco, una o più volte, possa aver influito in modo significativo sulla qualità biologica del suolo è stato applicato il t-test ai valori di QBS-ar riscontrati nei siti di campionamento.

Per l'analisi delle differenze presenti tra le aree percorse dal fuoco e le aree controllo per quel che riguarda la densità di individui/m<sup>2</sup> è stata invece effettuata l'analisi della varianza.

Le analisi multivariate utilizzate in questo studio sono l'Analisi delle Componenti Prin-

cipali (PCA) (Davis, 1986; Harper, 1999), la SIMPER analysis (Similarity Percentage) (Clark, 1993) e la MANOVA (Anderson, 2001).

La PCA è stata condotta sulla matrice rettangolare (siti campionati x gruppi tassonomici) dei valori EMI. La tecnica del bootstrap resampling (Efron, 1979) con 1000 repliche è stata impiegata per valutare il numero di assi informativi (Jackson, 1993) con un intervallo di confidenza del 95%. Gli assi informativi (*eigenvalues*) sono stati considerati significativi secondo l'approccio *broken stick* proposto da Jackson nel 1993.

Per verificare le variazioni della qualità biologica del suolo e della struttura delle comunità dei microartropodi edafici tra le aree controllo e le aree percorse da incendio è stata utilizzata l'analisi non parametrica MANOVA basata sulla distanza di dissimilarità di Bray Curtis. Questa tipologia di analisi, sovente utilizzata per confrontare i gruppi tassonomici, è stata scelta perché in grado di evidenziare le differenze significative esistenti tra due o più gruppi e, nello specifico, è stata applicata alla matrice rettangolare (siti campionati x gruppi tassonomici) dei dati EMI.

Le analisi multivariate riferite all'abbondanza dei microartropodi edafici sono state applicate ad una matrice rettangolare in cui nelle righe sono stati inseriti i siti di campionamento e nelle colonne le abbondanze dei gruppi ecomorfologici (ind./m<sup>2</sup>). Sono stati calcolati i seguenti indici di biodiversità: a) indice di Shannon (1948) che misura la diversità in termini di ricchezza; b) indice di Simpson (1949) che descrive la varianza nella distribuzione delle abbondanze specifiche (Magurran, 2004).

### 3. RISULTATI

#### 3.1 Monitoraggio dei suoli percorsi dal fuoco attraverso la qualità biologica del suolo tramite indice QBS-ar

Su 120 campioni di suolo analizzati sono stati individuati 26 gruppi di microartropodi appartenenti ai *subphyla* Chelicerata e Mandibolata. Tra i chelicerati sono stati identificati Araneidi, Opilionidi, Scorpioni, Pseudoscorpioni e Acari, mentre nel *Subphylum* Mandibolata sono stati distinti gli isopodi (1 *taxon*) e altri 20 *taxa*.

I valori medi di QBS-ar risultano sempre maggiori di 150 sia per quel che riguarda i campioni controllo che per quel che riguarda i campioni percorsi dal fuoco in diversi intervalli e frequenze di tempo (2001, 2009, 2001/2009) con un valore massimo pari a 245 per il campione AC2 relativo all'autunno 2011, mentre il numero medio dei *taxa* varia da un minimo di 17, riscontrato nei campioni AC1 riferiti al 2012, ad un massimo di 23 identificati nel campione AC2 dell'autunno 2011 (Fig. 8).

Dal confronto effettuato con il t-Test della qualità biologica del suolo riscontrata nei campionamenti analizzati dal 2011 al 2012 non emergono significative differenze per quel che riguarda il confronto tra l'area bruciata nel 2009 rispetto alle altre aree esaminate fatta eccezione per l'Area Controllo AC2 che risulta significativamente diversa sia nella stagione autunnale che in quella primaverile del 2012.

Emergono invece significative differenze di QBS-ar tra i campioni controllo AC1 rispetto all'Area Controllo AC2 e l'area Incendiata nel 2001, esaminati entrambi nell'autunno 2011. Per quel che riguarda l'area incendiata due volte la qualità biologica del suolo risulta significativamente diversa solo rispetto all'Area Controllo AC2 e all'area incendiata nel 2001 dell'autunno 2011 (Tab. 3).

Al fine di verificare la significatività delle variazioni della qualità biologica del suolo e della struttura delle comunità di microartropodi tra il gruppo dei campioni controllo ed il gruppo dei campioni percorsi da incendio nei differenti intervalli di tempo è stata effettuata, sulla matrice dei gruppi ecomorfologici EMI, l'analisi non parametrica MANOVA basata sulla misura della distanza di dissimilarità di Bray Curtis. L'analisi non ha evidenziato differenze significative con un  $F = 1,007$  e un  $p$  pari a 0,443.

È stata inoltre effettuata una PCA al fine di identificare i gradienti ecologici delle comunità edafiche. L'analisi è stata condotta su una matrice rettangolare: siti campionati x Gruppi EMI (eco-morfologici) (Fig. 9).

Nel complesso le prime due componenti spiegano solamente il 42% della varianza, la PC1 spiega il 27% mentre la PC2 il 15%. La distribuzione spaziale dei punti rappresentativi delle aree controllo rispetto alle aree percorse dal fuoco non sembra essere influenzata dalle componenti principali infatti troviamo aree controllo sia nei semiassi positivi come in quelli negativi.

Sebbene l'analisi delle componenti principali non metta in evidenza particolari variazioni tra le aree incendiate una o più volte e le aree non percorse dal fuoco, i gruppi eco-morfologici che influenzano maggiormente la Componente Principale 1 sono gli pseudoscorpioni, i collemboli euedafici (EMI 20), i dipluri e i proturi (Figura 10), mentre la componente principale 2 risulta influenzata quasi esclusivamente dalla presenza degli pseudoscorpioni. Entrambe le componenti principali risultano influenzate da gruppi eco-morfologici altamente adattati alla vita edafica, ma esse spiegano nel loro complesso meno del 50% della varianza dei campioni esaminati.

Anche dalla SIMPER analysis condotta sulla matrice siti x gruppi EMI è emerso che



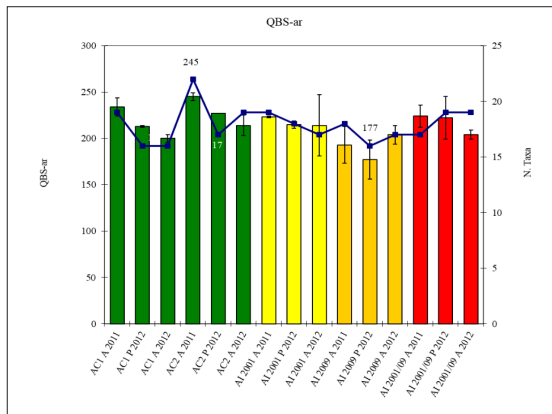


Figura 8 - Valori QBS-ar e numero taxa; (A=Autunno; P=Primavera).

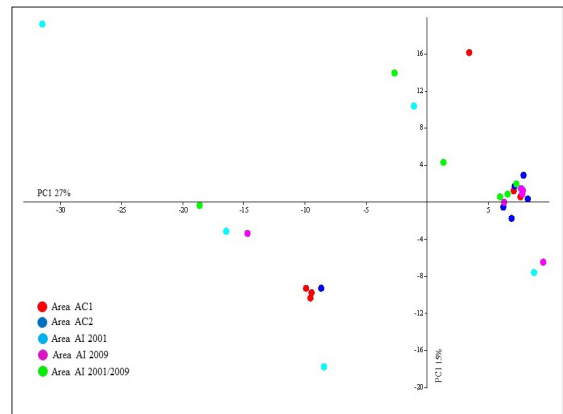


Figura 9 - Analisi delle Componenti Principali coi gruppi EMI.

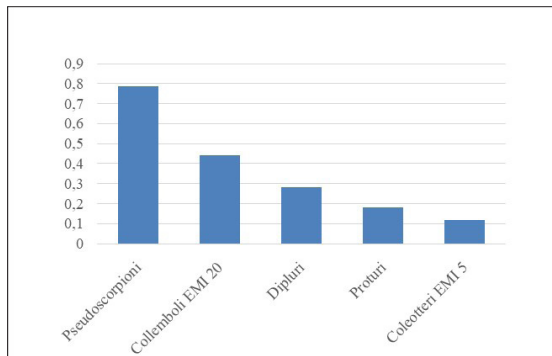


Figura 10 - Loading PC1.

la principale differenza tra i campioni prelevati nelle aree non percorse dal fuoco e i campioni prelevati nelle aree incendiate una o più volte è data dalla presenza degli pseudoscorpioni e collemboli euedafici (EMI 20) come già emerso dall'Analisi delle Componenti Principali.

### 3.2 Monitoraggio dei suoli percorsi dal fuoco attraverso l'abbondanza di microartropodi edafici

Per quel che riguarda l'abbondanza di individui riscontrata nei siti esaminati, il maggior valore lo si osserva nel campione bruciato nel 2009 (Autunno 2011) con 56351 ind./m<sup>2</sup>, mentre la minore abbondanza di microartropodi edafici è rappresentata dal campione bruciato nel 2001 (Autunno 2012) con 13361 ind./m<sup>2</sup> (Fig. 11).

Dal confronto delle densità di microartropodi attraverso l'analisi della varianza non sono emerse differenze significative tra le aree controllo e le aree incendiate con un  $F=1,036$  e un  $p$  pari a  $0,436$ .

La SIMPER analisi, basata sulle densità dei microartropodi, mostra una dissimilarità percentuale pari al 37 % tra le aree controllo e le aree incendiate e del 36 % se si paragonano le aree non bruciate con quelle percorse due volte dal fuoco. I gruppi che per densità mostrano una maggiore dissimilarità sono gli acari e i collemboli che sono anche i gruppi più abbondanti e diffusi nel suolo. Se si eliminano dall'analisi gli acari e collemboli, considerandoli come un dato ridondante, la dissimilarità tra le aree controllo e le aree bruciate aumenta sino al 58% e i gruppi che risultano maggiormente dissimili tra un suolo non bruciato e un suolo percorso dal fuoco sono i proturi e i pauropodi e, per l'area incendiata nel 2009, le formiche.

### 3.3. Monitoraggio dei suoli percorsi dal fuoco attraverso indici di biodiversità

Per quanto riguarda lo studio della biodiversità presente nei suoli occupati da latifoglie sono stati calcolati gli indici di biodiversità basati sulla ricchezza di specie e quelli basati sul-

Tabella 3 - t-Test valori QBS-ar.

t-Test QBS-ar	AC2 A11	AC2 P12	AC2 A12
AC1 A11	0,28 n.s.	Varianza =0	0,184 n.s.
AC1 P12	0,01**	Varianza =0	0,91 n.s.
AC1 A12	0,01**	Varianza =0	0,30 n.s.
t Test QBS-ar	AI 2001 A11	AI 2001 P12	AI 2001 A12
AC1 A11	0,24 n.s.	0,13 n.s.	0,49 n.s.
AC1 P12	0,01**	0,50 n.s.	0,95 n.s.
AC1 A12	0,02**	0,08 n.s.	0,61 n.s.
t Test QBS-ar	AI 2009 A11	AI 2009 P12	AI 2009 A12
AC1 A11	0,12 n.s.	0,07 n.s.	0,09 n.s.
AC1 P12	0,30 n.s.	0,14 n.s.	0,35 n.s.
AC1 A12	0,67 n.s.	0,27 n.s.	0,65 n.s.
t Test QBS-ar	AI 2001/09 A11	AI 2001/09 P12	AI 2001/09 A12
AC1 A11	0,44 n.s.	0,56 n.s.	0,06 n.s.
AC1 P12	0,32 n.s.	0,61 n.s.	0,13 n.s.
AC1 A12	0,12 n.s.	0,31 n.s.	0,52 n.s.
t Test QBS-ar	AI 2001 A11	AI 2001 P12	AI 2001 A12
AC2 A11	0,08	0,19	0,31
AC2 P12	Varianza=0	Varianza=0	Varianza=0
AC2 A12	0,35	0,86	0,98
t Test QBS-ar	AI 2009 A11	AI 2009 P12	AI 2009 A12
AC2 A11	0,07	0,05*	0,03**
AC2 P12	Varianza=0	Varianza=0	Varianza=0
AC2 A12	0,33	0,21	0,45
t Test QBS-ar	AI 2001/09 A11	AI 2001/09 P12	AI 2001/09 A12
AC2 A11	0,14	0,29	0,01**
AC2 P12	Varianza=0	Varianza=0	Varianza=0
AC2 A12	0,47	0,68	0,35
t Test QBS-ar	AI 2001/09 A11	AI 2001/09 P12	AI 2001/09 A12
AI 2001 A11	0,91 n.s.	0,98 n.s.	0,03**
AI 2001 P12	0,45 n.s.	0,71 n.s.	0,13 n.s.
AI 2001 A12	0,70 n.s.	0,80 n.s.	0,74 n.s.
t Test QBS-ar	AI 2001 A11	AI 2001 P12	AI 2001 A12
AI 2009 A12	0,17 n.s.	0,26 n.s.	0,52 n.s.
AI 2009 A12	0,09 n.s.	0,13 n.s.	0,31 n.s.
AI 2009 A12	0,12 n.s.	0,28 n.s.	0,71 n.s.
t Test QBS-ar	AI 2001/09 A11	AI 2001/09 P12	AI 2001/09 A12
AI 2009 A11	0,20 n.s.	0,31 n.s.	0,54 n.s.
AI 2009 P12	0,11 n.s.	0,18 n.s.	0,23 n.s.
AI 2009 A12	0,22 n.s.	0,41 n.s.	0,95 n.s.

Legenda n.s.=non significativo; \* p<0,05; \*\*p<0,01

la dominanza (Figura 12). Dal calcolo degli indici di biodiversità è emerso che il maggior valore riscontrato per l'indice di Shannon è pari a 1,9 rilevato nell'autunno 2012 nell'Area Controllo 2, mentre il valore minore, pari a 0,9, è riferito all'Area Incendiata nel 2001 durante il campionamento dell'autunno 2011. Per quel che riguarda l'indice di Simpson il valore maggiore, pari a 0,7, si riscontra sia nell'Area Controllo 2 sia nell'Area Incendiata nel 2009 campionate entrambe nell'autunno 2012, mentre il valore più basso (0,3) si riscontra nel campione incendiato nel 2001 durante il campionamento dell'autunno 2011. L'andamento degli indici di biodiversità è molto simile sia per Shannon che per Simpson, con un'evidente riduzione dei valori per i campioni riferiti all'incendio del 2001 rispetto alle aree controllo. Dall'analisi della varianza risulta però che questa riduzione è significativa ( $p=0.001$ ) solo per quel che riguarda la ricchezza di specie dell'area percorsa dal fuoco nel 2001 rispetto al controllo e all'area incendiata due volte.

### 3.4. *Analisi chimico fisiche e qualità biologica del suolo*

I parametri fisici del suolo, umidità e temperatura, non risultano essere in relazione né con la qualità biologica del suolo (QBS-ar), né con l'abbondanza di microartropodi edafici. I coefficienti di determinazione risultano infatti sempre inferiori a 0,1. Anche per i parametri chimici, pH e quantità di sostanza organica, non emergono relazioni né con i valori di QBS-ar né con l'abbondanza di individui. In particolare per il pH il coefficiente di determinazione risulta inferiori a 0,01 mentre per la sostanza organica, l' $R^2$  è pari a 0,26 se messa in relazione con la qualità biologica del suolo e pari a 0,001 se messa in relazione con l'abbondanza di microartropodi.

## 4. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Questo studio, attraverso il monitoraggio della fauna edafica, ha voluto indagare se gli effetti del fuoco potessero aver influenzato le comunità di microartropodi edafici in soprassuoli costituiti in prevalenza da latifoglie in un ambiente mediterraneo altamente soggetto ad incendi. Il risultato ottenuto mostra che la fauna edafica non ha subito significative alterazioni né per quel che riguarda l'abbondanza, né per quel che riguarda la qualità biologica del suolo, sebbene l'area sia stata percorsa dal fuoco più di una volta nel corso di 10 anni.

Quando un'area forestale è percorsa da incendi si possono osservare molteplici effetti, sia diretti che indiretti, non solo sulla vegetazione, ma anche sulle diverse componenti che costituiscono l'ecosistema bosco che spesso viene colpito in modo non uniforme. Di conseguenza si avranno aree maggiormente danneggiate rispetto ad altre (effetto a mosaico) (Brockett *et al.*, 2001; Bovio *et al.*, 2011) che rendono difficile dare una valutazione complessiva dei danni causati dal fuoco all'ecosistema stesso.

Studiare l'impatto degli incendi sulle comunità edafiche non è un approccio nuovo per valutare l'impatto del fuoco sugli ecosistemi. Molti sono gli studi condotti in varie parti del mondo e su differenti tipologie di soprassuolo forestale (Athias-Binche, 1987; Broza e Izhaki, 1997; Buddle *et al.* 2006; Malmström *et al.*, 2012; Lisa *et al.*, 2015; Mantoni *et al.*, 2020; Çakır *et al.*, 2023). Mentre in alcuni casi sono stati osservati significativi cambiamenti sulla componente ipogea, in altri studi il passaggio del fuoco non ha causato differenze, evidenziando una certa resilienza agli incendi da parte di alcune comunità edafiche (Majer 1984; Moretti *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2022) rispetto ad altre che sono invece risultate più sensibili.

Gli studi precedenti condotti sempre nella Riserva Naturale di Montefalcone (Lisa *et al.*,

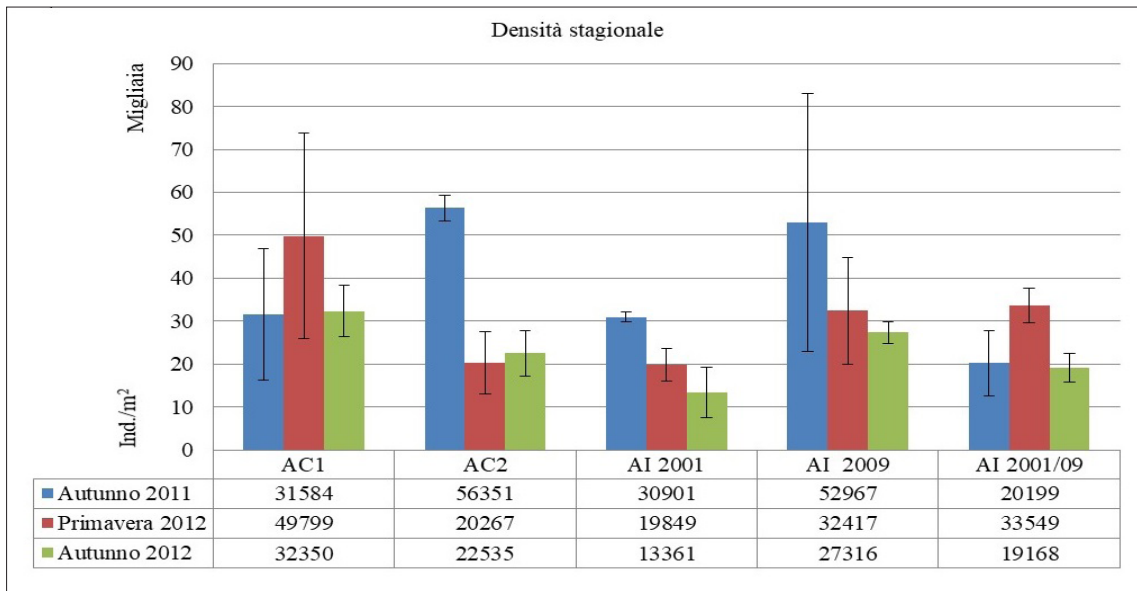


Figura 11 - Grafico della densità di microartropodi per area e per stagionalità.

2015; Lisa *et al.*, 2022), hanno interessato la fauna edafica in soprassuoli di pino domestico (*Pinus pinaster*) percorsi dagli stessi incendi (2001, 2009 e 2001/2009) ed hanno messo in evidenza come il fuoco sia risultato un importante fattore di disturbo per le comunità di microartropodi edafici al contrario di ciò che è accaduto per i soprassuoli di latifoglie dove invece il suolo ha sempre mantenuto un'elevata qualità biologica, indipendentemente dal tempo trascorso dal passaggio del fuoco e dalla sua frequenza. I valori QBS-ar ottenuti infatti vanno da un minimo di 177 ad un massimo di 245 e, anche dove il fuoco è passato due volte nel corso del tempo, il QBS-ar è risultato sempre >200 ad indicare condizioni ottimali di soprassuoli boschivi stabili (Menta *et al.*, 2018)

Se molti studi sono stati condotti sulla fauna edafica in suoli percorsi da incendio per quel che riguarda invece l'utilizzo specifico dell'indice QBS-ar gli unici studi trovati in letteratura sono quelli di Mantoni e collaboratori del 2020, Lisa e collaboratori del 2022 e Çakır *et al.* del 2023.

Mentre per Mantoni *et al.* (2020) sembra che la qualità biologica del suolo sia influenzata dal fuoco indipendentemente dall'habitat analizzato, nel nostro caso, se si considerano anche i risultati pubblicati nel 2015 da Lisa e collaboratori, si è osservato un differente comportamento della fauna edafica per i popolamenti di conifere rispetto a quelli di latifoglie percorsi dallo stesso incendio nel 2001, nel 2009 ed in entrambi gli anni. Dalle analisi svolte emerge, in accordo con lo studio svolto nel 2015, che i gruppi ecomorfologici degli pseudoscorpioni, dei collemboli euedafici e quello dei proturi, risultano quelli più sensibili al fuoco sia per quel che riguarda i soprassuoli di conifere sia per i soprassuoli a prevalenza di latifoglie sebbene la riduzione di questi gruppi ecomorfologici risulti meno significativa nei boschi misti di querce rispetto ai popolamenti di conifere.

Gli studi svolti da Çakır *et al.* nel 2023 su popolamenti di farnetto (*Quercus frainetto* Ten) mostrano invece significativi cambiamenti della fauna edafica sia per densità che per valori di QBS-ar, al contrario dei nostri risultati, ma in questo caso l'incendio analizzato era di tipo

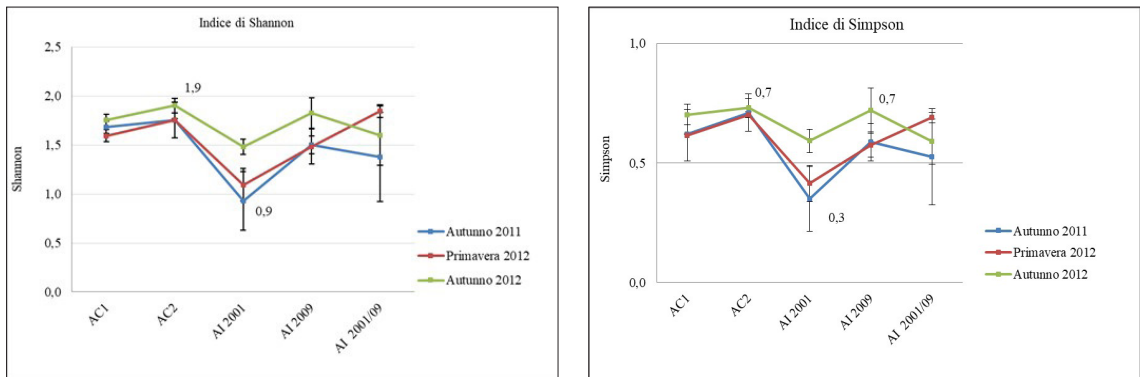


Figura 12 - Indici di biodiversità dall'Autunno 2011 all'Autunno 2012.

prescritto a bassa intensità e l'analisi è stata fatta subito dopo il passaggio del fuoco dove gli effetti diretti sugli invertebrati edafici risultano generalmente gravi (Mantoni *et al.*, 2020).

L'applicazione dell'indice QBS-ar pur non avendo messo in evidenza alcun cambiamento sulla fauna edafica dopo il passaggio del fuoco, ha tuttavia confermato che il fuoco potrebbe causare una maggior mortalità in soprassuoli di conifere (Giuntini *et al.*, 2017; Franklin *et al.*, 2006; Sibilio *et al.*, 2002), più infiammabili rispetto a boschi caratterizzati da specie quercine che sono maggiormente resistenti al fuoco (Conedera e Moretti, 2005). Inoltre, questo studio conferma che le comunità edafiche recuperano il loro status ottimale qualche anno dopo l'incendio come già osservato da Malmström (2008) e da Antunes (2009) e non nel breve termine dopo l'incendio, quando l'impatto del fuoco pare più incisivo.

Nonostante negli ultimi decenni ci sia stato un crescente interesse verso gli indici biologici ed in particolare verso l'indice QBS-ar, applicato ormai con successo in molti ambiti (Menta *et al.*, 2018), i risultati di questo tipo di indagine sono sempre soggetti a diverse fonti di incertezza a causa dell'imprevedibilità del comportamento degli incendi, dell'assenza di repliche, di dati imprecisi/mancanti o di una comprensione scientifica ancora incompleta della risposta ecologica agli incendi (Thompson e Calkin, 2011).

Ciononostante questa esperienza indica che nell'area percorsa da incendio nella Riserva Naturale di Montefalcone l'impatto del fuoco è stato molto minore sul suolo di latifoglie rispetto a quello di conifere e che i gruppi ecomorfologici più influenzati dal passaggio del fuoco sono quelli maggiormente adattati alla vita ipogea come già osservato nel 2015 da Lisa *et al.*

Il monitoraggio attraverso l'utilizzo di indicatori biologici del suolo in ecosistemi forestali percorsi da incendio consente di avere informazioni che possono essere molto difficili da ottenere da studi condotti su incendi sperimentali, dal momento che gli incendi che si verificano in natura presentano condizioni più estreme (Raymond e Peterson, 2005). Anche se in questo caso non sono stati ottenuti risultati che mostrino un significativo impatto del fuoco sulle comunità edafiche in soprassuoli di latifoglie, tuttavia il monitoraggio delle comunità di microartropodi edafici rimane un aspetto importante dal momento che può fornire fondamentali informazioni sulla stabilità del sistema bosco poiché, se si segue la teoria della complessità-stabilità, accettata dalla maggior parte degli ecologi (MacArthur, 1955; Hutchinson, 1959; Blandin, 2015) più grande è la biodiversità di una comunità di organismi maggiore sarà la sua stabilità.

## RIASSUNTO

Lo studio ha esaminato l'impatto del fuoco sulle comunità di microartropodi edafici in popolamenti di latifoglie a prevalenza di specie quercine percorsi da incendio in due diversi periodi: nel 2001, nel 2009, e in alcune zone, in entrambe le annate, all'interno della Riserva Naturale di Montefalco (Pisa). Il campionamento del suolo è stato effettuato stagionalmente tra l'autunno 2011 e l'autunno 2012 per un totale di 120 campioni analizzati nelle aree percorse dal fuoco e in un'area limitrofa non interessata da incendi da almeno 40 anni (controllo). Il monitoraggio è stato effettuato utilizzando l'indice della qualità biologica del suolo (QBS-ar) e le abbondanze dei microartropodi che non hanno mostrato evidenti differenze tra le aree percorse dal fuoco, una o più volte, e le aree controllo. Nonostante non siano emerse significative differenze lo studio ha evidenziato come alcuni gruppi ecomorfologici siano comunque più sensibili al passaggio del fuoco rispetto ad altri. La densità dei microartropodi e la qualità biologica del suolo non hanno mostrato particolari riduzioni confermando che nella situazione esaminata il recupero delle comunità edafiche avviene generalmente nel giro di un paio di anni. Si evidenzia l'importante ruolo del monitoraggio nel tempo al fine di fornire informazioni sugli effetti, per lo più indiretti, del fuoco su un soprassuolo boschivo, quindi anche sulla stabilità del sistema bosco dopo l'evento di disturbo.

## BIBLIOGRAFIA

- Agbeshie A.A., Abugar S., Atta-Darkwa, Awuah R., 2022 - *A review of the effects of forest fire on soil properties*. J. For. Res. 33: 1419-1444. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4>
- Anderson M.J., 2001 - *A new method for non-parametric multivariate analysis of variance*. Austral. Ecology., 26: 32-46. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x>
- Antunes S.C., Curado N., Castro B.B. et al., 2009 - *Short-term recovery of soil functional parameters and edaphic macro-arthropod community after a forest fire*. J Soils Sediments, 9: 267-278. <https://doi.org/10.1007/s11368-009-0076-y>
- Athias-Binche F., 1987 - *Regeneration patterns of Mediterranean ecosystems after fire: the case of some soil arthropods: uropodid mites*. Vie et Milieu, 37: 39-52.
- Bhadauria T., Ramakrishnan P.S., Srivastava K.N., 2000 - *Diversity and distribution of endemic and exotic earthworms in natural ecosystems in the central Himalayas, India*. Soil Biology and Biochemistry, 32: 2045-2054. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00106-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00106-1)
- Blandin P., 2015 - *La diversità del vivente prima e dopo la biodiversità*. Rivista di estetica, 59 (2): 63-92. <https://doi.org/10.4000/estetica.338>
- Bovio G., Ascoli D., Valsecchi C., Bottero A., 2011 - *Indagine sulle caratteristiche degli incendi boschivi e sulle dinamiche di risposta degli ecosistemi forestali. Gestione post-incendio in popolamenti di Fagus sylvatica L. del Piemonte*. Rapporto di ricerca. Regione Piemonte. Scaricabile on line: <http://www.regione.piemonte.it/montagna/pubblicazioni/pubblicazioni.htm>.
- Broza M., Izhaki I., 1997 - *Post-fire arthropod assemblages in Mediterranean forest soils in Israel*. International Journal of Wildland Fire, 7 (4): 317-325. <https://doi.org/10.1071/WF9970317>
- Brockett B.H., Biggs H.C., van Wilgen B.W., 2001 - *A patch mosaic burning system for conservation areas in southern African savannas*. International Journal of Wildland Fire, 10 (2): 169-183. <https://doi.org/10.1071/WF01024>
- Buddle C.M., Langor D.W., Pohl G.R., Spence J.R., 2006 - *Arthropod responses to harvesting and wildfire: Implications for emulation of natural disturbance in forest management*. Biological Conservation, 128 (3): 346-357. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.10.002>
- Çakır M., Akburak S., Makineci E., Bolat F., 2023 - *Recovery of soil biological quality (QBS-ar) and soil microarthropod abundance following a prescribed fire in the Quercus frainetto forest*. Applied Soil Ecology, 184: 104768. ISSN 0929-1393, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104768>
- Clark K.R., 1993 - *Non-parametric multivariate analysis of changes in community structure*. Australian Journal of Ecology, 18:117-143. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1993.tb00438.x>
- Conedera M., Moretti M., 2005 - *Gli incendi di bosco: le conseguenze sull'ecosistema*. Dati statistiche e società: trimestrale dell'Ufficio di statistica del Cantone Ticino, 1: 14-24.
- Davis J.C., 1986 - *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley and Sons, New York.
- Efron B., 1979 - *Bootstrap methods: Another look at jackknife*. Ann. Stat., 7: 1-26. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344552>

- Franklin J., Spears-Lebrun L.A., Deutschman D.H., Marsden K., 2006 - *Impact of a high-intensity fire on mixed evergreen and mixed conifer forests in the Peninsular Ranges of southern California, USA*. Forest Ecology and Management, 235: 18-29. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.07.023>
- Giuntini F., De Meo I., Graziani A., Cantiani, P., Palletto, A., 2017 - *Stima del volume di legno morto in rimboschimenti di pino nero (Pinus nigra JF Arnold) in Toscana: confronto tra casi studio*. Dendronatura, 1: 19-28.
- Hadjibiros K., 2001 - *Setting priorities for wildfire suppression policy in Greece using a relation between yearly burned areas and recovery time*. Global NEST Journal, 3 (1): 37-43. <https://doi.org/10.30955/gnj.000141>
- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D., 2001 - *PAST: Palaeontological Statistics software package for education and data analysis*. Palaeontologia Electronica, 4 (1): 9.
- Harper D.A.T., 1999 - *Numerical Palaeobiology*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Hutchinson G.E., 1959 - *Homage to a Rosalia or why are there so many kinds of animals?* Am. Natur., 93: 145-158. <https://doi.org/10.1086/282070>
- Jackson D.A., 1993 - *Stopping rules in principal components analysis: a comparison of heuristic and statistical approaches*. Ecology, 74: 2204-2214. <https://doi.org/10.2307/1939574>
- Keeley J.E., 2009 - *Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage*. International Journal of Wildland Fire, 1: 116-126. <https://doi.org/10.1071/WF07049>
- Lisa C., Paffetti D., Marchi E., Nocentini S., Travaglini D., 2022 - *Use of an Eaphic Microarthropod Index for Monitoring Wildfire Impact on Soil in Mediterranean Pine Forests*. Frontiers in Forests and Global Change, Vol. 5: 900247. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.900247>
- Lisa, C., Paffetti, D., Nocentini, S., Marchi, E., Bottalico, F., Fiorentini, S., Travaffini D., 2015 - *Impact of wildfire on the edaphic microarthropod community in a Pinus pinaster forest in central Italy*. iForest. Biogeosci. For., 8: 874- 883. <https://doi.org/10.3832/ifer1404-008>
- MacArthur R.H. 1955 - *Fluctuations of animal populations and a measure of community stability*. Ecology, 36: 533-536. <https://doi.org/10.2307/1929601>
- Magurran A.E., 2004 - *Measuring biological diversity*. Blackwell Publishing, Oxford. ISBN 0-632-05633-9.
- Malmström A., 2012 - *Life-history traits predict recovery patterns in Collembola species after fire: a 10 years study*. Applied Soil Ecology, 56: 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.02.007>
- Malmström A., 2008 - *Temperature tolerance in soil microarthropods: simulation of forest fire heating in the laboratory*. Pedobiologia, 51: 419-426. ISSN 0031-4056. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2008.01.001>.
- Mantoni C, Di Musciano M, Fattorini S., 2020 - *Use of microarthropods to evaluate the impact of fire on soil biological quality*. J. Environ Manage., 266:110624. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110624>.
- Matlack G.R., 2001 - *Factors determining the distribution of soil nematodes in a commercial forest landscape*. Forest Ecology and Management, 146: 129-143. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00454-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00454-0)
- Majer J.D., 1984 - *Short term responses of soil and litter invertebrates to a cool autumn burn in Jarrah (Eucalyptus marginata) forest in Western Australia*. Pedobiologia, 26: 229-247. [https://doi.org/10.1016/S0031-4056\(23\)05977-2](https://doi.org/10.1016/S0031-4056(23)05977-2)
- Menta C., Conti F.D., Pinto S., Antonio Bodini A., 2018 - *Soil Biological Quality index (QBS-ar): 15 years of application at global scale*. Ecological Indicators, 85: 773-780 ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.030>.
- Moretti M, Duelli P, Obrist M.K., 2006 - *Biodiversity and resilience of arthropods communities after fire disturbance in temperate forests*. Oecologia, 149 (2): 312-327. <https://doi.org/10.1007/s00442-006-0450-z>
- Neary D.G., Klopatek C.C., DeBano L.F, Ffolliott P.F., 1999 - *Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis*. Forest Ecology and Management, 122: 51-71. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00032-8)
- Olivari S., 2004 - *Morfologia, geologia e pedologia*. In: La Riserva Naturale di Montefalcone: storia, ambiente e territorio (Cappelli F., Cappelli V., Fabbrizzi F., Olivari S., Piussi P., Sbragia M., Stiavelli S.). Tipografia La Grafica Pisana - Bientina (PI), p. 21-30.
- Parisi V., 1974 - *Biologia ed ecologia del suolo*. Bringheri, Torino.
- Parisi V., 2001 - *The biological soil quality, a method based on microarthropods*. Acta Naturalia, Ateneo Parmense, 37: 97-106.
- Parisi V., Menta C., Gardi C., Jacomini C., Mozzanica E., 2005 - *Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: a new approach*

- in Italy*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 105 (1-2): 323-333. ISSN 0167-8809. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.02.002>
- Raymond C.L., Peterson D.L., 2005 - *Fuel treatments alter the effects of wildfire in a mixed-evergreen forest, Oregon, USA*. Canadian Journal of Forest Research, 35 (12): 2981-2995. <https://doi.org/10.1139/x05-206>
- Sacchi C.F., Testard P., 1971 - *Ecologie animale*. Doin, Paris.
- Shannon C.E., 1948 - *A Mathematical Theory of Communication*. The Bell System Technical Journal, 27: 379-423; 623-656. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x>
- Sibilio G., Cascone C., Taddei A., Taddei R., 2002 - *Distribuzione degli incendi in Campania e loro relazioni con le infrastrutture antropiche e le coperture forestali*. In: Proceedings of the XII Congresso Nazionale della Società Italiana di Ecologia - S.It.E - Urbino, Atti n. 26, 16-18 settembre 2002, La Complessità in Ecologia, p. 95-113.
- Simpson E.H., 1949 - *Measurement of Diversity*. Nature, 163: 688. <https://doi.org/10.1038/163688a0>
- Solascasas P., Azcárate F.M., Hevia V., 2022 - *Edaphic arthropods as indicators of the ecological condition of temperate grassland ecosystems: A systematic review*. Ecological Indicators, Volume 142, 109277. ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2022.109277>.
- Thompson M.P., Calkin D.E., 2011 - *Uncertainty and risk in wildland fire management: A review*. Journal of Environmental Management, 92 (8): 1895-1909, ISSN 0301-4797. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.03.015>
- Travaglini D., Bottalico F., Fiorentini S., Lisa C., Marchi E., Mottola S., Neri F., Nocentini S., Puletti N., 2011 - *I boschi delle Cerbaie - Gestione, conservazione e uso sostenibile*. Pacini Editore, Pisa. ISBN978-88-6315-297-5.
- Yang X., Liu R.T., Shao M.A., Wei X.R., Li T.C., Chen M.Y., Li Z.Y., Dai Y.C., Gan M., 2022 - *Short-term effects of wildfire on soil arthropods in a semi-arid grassland on the Loess Plateau*. Front Microbiol., 21: 13:989351. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.989351>.
- WWF, 2021 - *Mediterraneo in Fiamme Report sul problema degli incendi nell'area mediterranea*. <https://www.wwf.it/cosa-facciamo/pubblicazioni/mediterraneo-in-fiamme/>