



Dipartimento di Scienze Agrarie Alimentari e
Ambientali

Corso di Laurea in: Scienze Forestali ed Ambientali

EFFETTO DELLE MICROPLASTICHE
SULLA FERTILITÀ FISICA DEL SUOLO

MICROPLASTIC EFFECTS ON SOIL
PHYSICAL FERTILITY

Tipo Tesi: Sperimentale

Studente:

SIMONE SORGINI

Relatore:

PROF. STEFANIA COCCO

Correlatore:

DOTT. VALERIA CARDELLI

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

SOMMARIO

SOMMARIO	2
ELENCO DELLE TABELLE.....	3
ELENCO DELLE FIGURE	4
CAPITOLO 1 INTRODUZIONE	6
1.1 La struttura del suolo	6
1.2 Plastiche e microplastiche	8
1.3 Microplastiche e suolo	12
CAPITOLO 2 SCOPO DELLA TESI.....	17
CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI.....	18
3.1 Descrizione campioni.....	18
3.2 Metodo di analisi.....	19
3.2.1 Scheletro e terra fine	19
3.2.2 Tessitura.....	21
3.2.3 Analisi al microscopio elettronico	24
3.2.4 Analisi dei dati	26
CAPITOLO 4 RISULTATI E DISCUSSIONI	27
4.1 Tessiture in acqua e ipoclorito	27
4.2 SEM, visualizzazione e riflessioni	31
CAPITOLO 5 CONCLUSIONI	38
BIBLIOGRAFIA	39

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1. Concentrazioni di microplastiche nei diversi trattamenti divise per tipologia di microplastica. 19

Tabella 2. Risultati relativi alle varie frazioni di suolo delle tessiture in acqua e ipoclorito. 30

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1. Tipologie di struttura del suolo (Shoeneberger et al., 2012).	8
Figura 2. Diffusione delle microplastiche nell’ambiente tramite diversi processi (Surendran et al., 2023).....	10
Figura 3. Adesione di microplastiche a lombrichi (Matthias C.Riling et al.,2017).	12
Figura 4. Vaglio per la separazione di scheletro e terra fine.	20
Figura 5. Campione di suolo con presenza di filamenti plastici, lavorato con mortaio. ...	21
Figura 6. Becher con campione di suolo e acqua distillata (A), vagli per la separazione delle varie frazioni di terra fine (B).	22
Figura 7. Cilindri contenenti limo ed acqua distillata, il primo a sinistra appena agitato.	23
Figura 8. Microscopio elettronico ZEISS Supra 40 (A), postazione di lavoro (B)	25
Figura 9. Campioni sui dischetti di carbonio (A), apposto sistema per l’inserimento dei campioni nel microscopio (B).	25
Figura 10. Possibili plastiche distinguibili per spessore e dimensioni.	26
Figura 11. Triangolo USDA utilizzato per il calcolo delle tessiture.	27
Figura 12. Differenza tra tessitura in acqua e in ipoclorito nella frazione argillosa. Lettere diverse indicano differenze significative.	31
Figura 13. Frammento intero di microplastica quadrata (A), mostrata a vari ingrandimenti (B, C, D).	33
Figura 14. Microplastica filamentosa a contatto con suolo.	33
Figura 15. Microplastica filamentosa (A) in vari ingrandimenti (B, C, D).	34
Figura 16. Campione di limo senza microplastiche.	34
Figura 17. Fibra plastica interagente con particelle presenti nel suolo (A), visualizzata in più ingrandimenti (B, C, D).	35
Figura 18. Microplastica (A) che interagisce con la particella dell’immagine B.	35
Figura 19. Frammento plastico della figura 17A interagente con la particella della figura 17B.	36
Figura 20. Probabili frammenti plastici nel suolo di cui non si è riusciti ad accertarne la natura elementare.	36

Figura 21. Possibile frammento plastico (B) e fibra di diversa natura, probabilmente fibra di vetro o quarzo (B).	37
---	----

Capitolo 1

INTRODUZIONE

1.1 La struttura del suolo

Il suolo può essere considerato un complesso sistema alla base dello sviluppo di organismi viventi come piante, animali, e una vasta gamma di microrganismi. Infatti, in esso avvengono importanti processi di stabilizzazione del carbonio organico, con meccanismi chimici e fisici che favoriscono l'accumulo di sostanza organica, e che portano allo sviluppo della vita. Il carbonio organico deriva dalla decomposizione di piante e animali, ed è fondamentale per la fertilità del suolo, perché influenza le proprietà fisiche, chimiche, biologiche e la conseguente disponibilità dei nutrienti; inoltre, il suolo riesce a trattenere nella sua frazione humificata una parte di CO₂ precedentemente organicata nei tessuti vegetali e successivamente stabilizzata nelle sostanze humiche, limitandone la diffusione nell'atmosfera (Camponi et al., 2023). Il suolo riveste un ruolo centrale in molti ecosistemi, compresi quelli acquatici. Inoltre esiste una stretta correlazione tra l'acqua e i processi pedogenetici che sono condizionati anche dai regimi idrici e dall'evapotraspirazione. Tutte queste funzionalità sono influenzate dalla struttura, che può essere definita come la disposizione spaziale ed il risultato dell'aggregazione dei costituenti del suolo, con presenza di agenti biologici (quali batteri, funghi, alghe e licheni) che supportano le funzioni fisiche, chimiche e biologiche nel suolo (Dani Or., et al 2021).

Per struttura, più precisamente, si intende l'aggregazione delle particelle del suolo in raggruppamenti denominati aggregati, questi possono essere più o meno complessi e vanno ad interagire con la porosità del sistema (Yudina & Kuzyakov, 2023).

Si possono distinguere micro-aggregati se le dimensioni sono inferiori ai 250 µm, mentre se superiori si parla di macro-aggregati. La dimensione degli aggregati dipende poi dal livello di complessità del suolo. La formazione di macro-aggregati può essere infatti favorita dall'attività di fauna (micro-, meso-, e macro-), e dall'attività radicale della vegetazione, oltre che dall'intervento umano e da variazioni di temperatura e umidità nell'ambiente (Lucas et al., 2019; Pires et al., 2017, 2019). Gli aggregati essendo eterogenei presentano internamente porosità di dimensioni variabili dove vi si possono instaurare condizioni favorevoli alla

creazione di habitat per microrganismi, e può essere favorito il passaggio di sostanze tramite l'acqua.

La porosità è definita dagli spazi vuoti che possono essere occupati da aria o acqua in base alla grandezza. Può essere suddivisa in micro-porosità e macro-porosità, con dimensioni rispettivamente inferiori o superiori ai 75 μm .

I pori assumono un'elevata rilevanza a livello di struttura in base alla dimensione e localizzazione che hanno, essendo di fondamentale importanza per il trasporto, la permeabilità, e la conservazione della struttura. L'architettura di aggregati e pori influisce in modo inevitabile sulla struttura.

Possiamo distinguere suoli con struttura granulare, angolare a blocchi, sub-angolare, lenticolare, lamellare, a cuneo, colonnare o prismatica. Le maggiormente rappresentate sono la granulare formata da piccoli poliedri irregolari, l'angolare a blocchi con poliedri che presentano facce ad angoli acuti, e sub-angolare se i poliedri sono più o meno arrotondati e le facce sono prive di angoli acuti.

Generalmente i processi biologici favoriscono una struttura caratterizzata da unità arrotondate, a differenza dei processi fisici maggiormente responsabili della formazione di spigoli vivi. Partendo dalla parte più superficiale del suolo, dove si hanno attività biologiche di maggiore intensità, avremo macro-aggregati prevalentemente di forma arrotondata, con struttura granulare. In genere, aumentando con la profondità avremo invece macro-aggregati di forma prismatica, poliedrica, colonnare o a blocchi (Figura 1).

La struttura può in alcuni casi anche essere assente se si hanno suoli con condizioni particolari, ed in questo caso possiamo distinguere una forma massiva se il suolo è coeso, ha massa uniforme e struttura continua, o a granuli singoli se invece non sono presenti unità strutturali coerenti, con minerali o rocce sfuse come unità singole (Schoeneberger et al., 2012).

I suoli possono poi essere coesi, se tramite azione meccanica non si riescono a ridurre facilmente i frammenti presenti in dimensioni inferiori ai 2 mm, o in-coesi se invece i frammenti si disgregano facilmente.

Andrebbero poi considerati aspetti di natura chimica, che influenzano inevitabilmente lo sviluppo della struttura. Esistono infatti processi di ossidazione e idrolisi che generano carica sulle superfici, influenzando sui legami (di natura fisica e chimica) tra particelle minerali e di origine organica, comportando una certa stabilità degli aggregati. Nel processo di formazione della struttura del suolo hanno un ruolo considerevole anche cationi come calcio, ferro e alluminio, o ossidi (ferro in particolare) e carbonati. I cationi in particolare avendo carica

positiva possono legarsi alle particelle cariche negativamente (es. acidi fulvici, colloidali argillosi) favorendo la formazione di strutture stabili.

I processi chimici nel suolo possono essere innescate dalle precipitazioni atmosferiche (pioggia in particolare), e ne deriva che anche queste possano determinare formazione e modificazione di aggregati e porosità (Rowley et al., 2018).

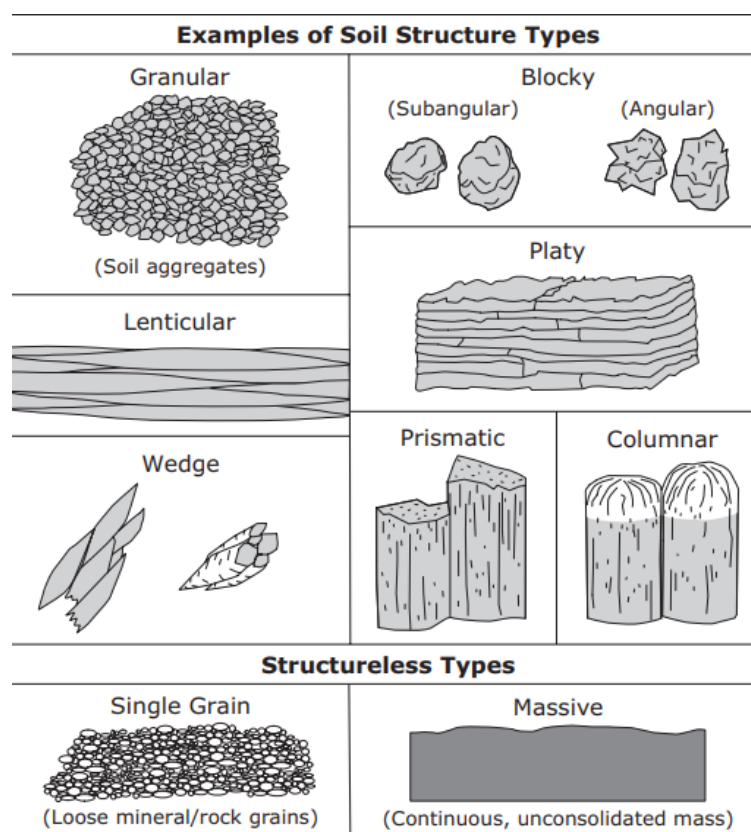


Figura 1. Tipologie di struttura del suolo (Shoeneberger et al., 2012).

1.2 Plastiche e microplastiche

Negli ultimi anni tra i temi più discussi vi è sicuramente quello dell'inquinamento, che sappiamo racchiudere un enorme numero di trattazioni. All'interno di questo grande assunto è presente una sezione che interessa in particolare il suolo, e di conseguenza chi si occupa di studiarlo. Si parla infatti della possibile dispersione della plastica, che essendo un composto organico di origine antropica e complessa composizione, comporta innumerevoli difficoltà nella fase di smaltimento. Le materie plastiche, da quando sono entrate nel mercato, sono divenute difficilmente sostituibili, e l'elasticità d'utilizzo a bassi costi ne ha sempre incentivato il consumo. Si stima che ogni anno vengano prodotti circa 400 milioni di tonnellate di plastica

(Monkul et al., 2021), e di conseguenza, le maggiori quantità richieste dal mercato ne hanno favorito l'accumulo e la dispersione nell'ambiente (Figura 2).

Quando la plastica depositata inizia a degradarsi tende a dividersi in frammenti più piccoli (Crawford & Quinn; 2016). Questo processo fisico può avere una durata variabile, anche in base alle dimensioni e l'origine della plastica di partenza, e porta alla genesi di strutture di varia complessità.

Sono dette primarie le microplastiche che presentano dimensioni ridotte già alla produzione, riuscendo ad infiltrarsi direttamente nel suolo. Tra le primarie in particolare possiamo ritrovare le microsfele, abbondantemente utilizzate nei prodotti cosmetici, e facilmente disperdibili nel sistema fognario in seguito agli scarichi dei cittadini.

Le secondarie presentano taglie maggiori alla produzione in cui rientrano le plastiche rilasciate volutamente nell'ambiente dai cittadini, in discariche e durante il trasporto, che in seguito ad abbandono tendono lentamente a cedere le proprie proprietà fisiche (flessibilità in particolare) scomponendosi progressivamente (Horton et al., 2017). La fase di degradazione si innesca sotto l'azione dei raggi UV e con la presenza di ozono nell'aria, che nonostante le basse quantità riesce ad accelerare il processo.

Le plastiche, in seguito a processi di disgregazione, possono essere classificate in macroplastiche con dimensioni inferiori ai 2 cm, meso-plastiche da 2 cm a 5 mm, e micro-plastiche quando minori di 5 mm. Quando quest'ultime subiscono un'ulteriore semplificazione originano la nano-plastiche di dimensioni inferiori a 1 micrometro (Surendran et al., 2023). La presenza di microplastiche (MPs) nei suoli deriva maggiormente da polimeri come propilene (PP) e polietilene (PE) (rispettivamente circa il 29,3% e il 19,2 %). Possono poi essere presenti in quantità minori polivinilcloruro (PVC), polistirene (PS) e polietilentereftalato (PET). Si hanno poi i polimeri biodegradabili come acido polilattico (PLA) e poliidrossialcanoato (PHA), progettati per essere più sostenibili, ma comunque inquinanti in fase di produzione (Tabone et al., 2010).

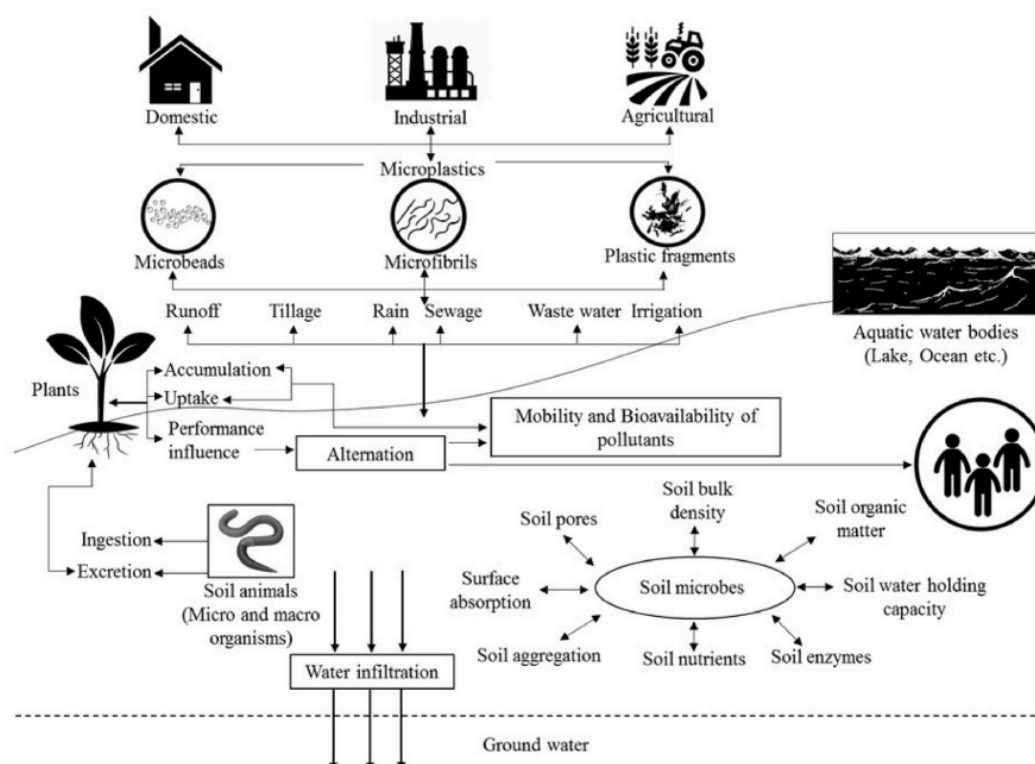


Figura 2. Diffusione delle microplastiche nell'ambiente tramite diversi processi (Surendran et al., 2023).

Le microplastiche rappresentano una enorme minaccia per alcuni ecosistemi, in particolare per gli oceani e i mari, per la facilità con cui entrano in natura. Allo stesso modo, l'aspetto inquinante delle MPs nel suolo è in gran parte noto. La presenza di MPs nel suolo, si stima attestarsi tra le 4 e 23 volte superiore rispetto a mari e oceani (Horton et al., 2017; Machado et al., 2018). Le fonti di inquinamento di MPs al suolo possono essere molteplici e sono legate all'uso del suolo stesso. Nelle zone di discarica la presenza di rifiuti solidi urbani, in mancanza di sistemi alternativi di conservazione dei rifiuti, degradano e i prodotti della degradazione entrano nel sistema suolo.

Dai risultati di uno studio che confronta la contaminazione in suoli in diverse aree di una città, è emerso che le microplastiche sono maggiormente presenti nei suoli di aree ricreative (7956 oggetti/Kg), rispetto alle zone industriali (4488 oggetti/Kg), con concentrazioni minime nelle aree residenziali (3378/Kg) (Tunali et al., 2022). Anche l'agricoltura, essendo strettamente legata al suolo, causa la dispersione di grandi quantità di MPs, in seguito all'utilizzo di fertilizzanti a rilascio controllato, imballaggi e coperture plastiche. Le coperture sono spesso necessarie perché riducono l'evaporazione del suolo, favoriscono temperature più

alte e sfavoriscono le infestanti (Kasirajan & Ngouajio, 2012). Essendo però di difficile riutilizzo, spesso rimangono troppo a lungo nell'appezzamento, dividendosi progressivamente in parti più piccole che si disperdono nel suolo. Sta inoltre aumentando l'utilizzo di concimi derivanti da sottoprodotti organici con lo scopo di sfavorire l'inquinamento e l'impatto ambientale, in cui spesso vi possono finire anche plastiche.

Nella zona superficiale del suolo (fino a un metro di profondità) l'incidenza esercitata dalle microplastiche è superiore, potendo contribuire in alcuni casi anche fino al 56% nella struttura (Steinmetz et al., 2016). Scendendo di profondità la percentuale in genere si riduce, ma comunque l'influenza rimane importante, in quanto le minori temperature e la ridotta attività microbica, aumentano le tempistiche richieste per la frammentazione (Duis and Coors, 2016).

La diffusione in profondità nel suolo di MPs può essere facilitata da alcuni organismi come anellidi ed animali come talpe e tassi. Sebbene questo tema sia spesso ignorato, i lombrichi influiscono sulla presenza di microplastiche nel suolo (Figura 3). Infatti, si riscontrano valori maggiori di MPs dove l'attività esercitata dai lombrichi è più intensa e la popolazione è più ricca (quindi negli orizzonti più profondi). Le particelle più piccole vengono poi trasportate con maggiore impatto perché facilmente assorbite, e successivamente ne risulta facilitata anche la dispersione (Matthias C. Riling et al., 2017). L'ingresso e l'accumulo di MPs sembrerebbe essere favorito in presenza di crepe e fessure nel suolo, dove si riportano valori tra 1,3 e 17,8 volte superiori rispetto ad altre aree alla stessa profondità (Zeyu Zhao et al., 2022).

Si hanno invece ridotte informazioni sull'impatto che queste possano avere nello specifico sulle proprietà fisiche del suolo.

La scarsa conoscenza sul possibile impatto sulla struttura del suolo deriva da difficoltà e tempistiche richieste nella raccolta dei campioni, in quanto bisogna recarsi in campo e solo dopo aver ottenuto un numero sufficiente di elementi, si può procedere con la vera e propria analisi. Quest'ultima è suddivisa su due fasi: i) raccolta dei campioni e utilizzo di appositi sistemi per la separazione principalmente per densità, e; ii) identificazione delle particelle plastiche utilizzando tecniche come la spettroscopia (Surendran et al., 2023). Si stanno per questo cercando di sviluppare nuove tecniche che dovrebbero rendere più rapido e preciso il processo di analisi, con lo scopo di rendere più efficace lo studio.

Studiare l'incidenza delle MPs nel suolo è un tema chiave in quanto queste potrebbero incidere sulla struttura e la fertilità del suolo, ma potrebbero anche entrare nella catena alimentare attraverso l'assorbimento da parte delle piante (Dai et al., 2022; Kim et al., 2022; Walker et al., 2022).



Figura 3. Adesione di microplastiche a lombrichi (Matthias C.Riling et al.,2017).

1.3 Microplastiche e suolo

Avendo precedentemente descritto quelle che risultano essere le principali vie d'ingresso delle microplastiche nell'ambiente, possiamo ora approfondirne nello specifico l'effetto che queste hanno sul suolo.

La grandezza delle particelle plastiche può influire sulle funzionalità del suolo e sullo sviluppo, per esempio, delle comunità biotiche nel sistema (Jing Ma et al.,2023). La tossicità delle MPs per i microorganismi aumenta all'aumentare delle dimensioni delle MPs. Inoltre, è stato dimostrato come particelle con dimensioni tra 300 e 600 μm di PE MPs, riescano ad interagire maggiormente con la sostanza organica, avendo anche capacità di scambio cationico ridotta, determinando una contaminazione superiore.

Sono stati condotti degli studi sulla possibile relazione tra microplastiche e roxarsone (Jie-wen Ma et al., 2023). Per ROX (per l'appunto roxarsone) si intendono un insieme di sostanze di natura acida, in passato utilizzate come additivi nella produzione di mangimi per gli allevamenti, che possono arrivare al suolo tramite l'apporto di letame, in cui si degradano in arsenico (fortemente tossico). I risultati dei sopra menzionati studi, mostrano come le MPs possano potenzialmente inibire l'azione tossica dei ROX nei suoli, in quanto tendono lentamente ad abbassare il pH sfavorendone la degradazione.

Altri studi hanno rilevato una correlazione positiva tra presenza di microplastiche e densità apparente (Machado et al. 2018). La stessa densità sembrerebbe essere invece, inversamente proporzionale alla capacità di radicazione della vegetazione presente. Ne potrebbero derivare difficoltà maggiori per lo sviluppo delle radici in suoli con abbondante presenza di MPs, anche se da questo punto di vista è molto importante la natura della fibra plastica. Le plastiche meno pesanti (ad esempio poliestere), sono infatti più leggere del suolo stesso, e possono favorire una riduzione della densità apparente.

Oggi si stanno infatti studiando l'impiego di varie microplastiche per differenti scopi. Un esempio riguarda l'utilizzo di chip ottenuti dalla degradazione degli pneumatici, questi possono essere utilizzati in suoli argillosi rendendoli più resistenti al taglio, o in suoli sabbiosi dove si è registrato inoltre un incremento dell'attrito interno. Ne deriva potenzialmente un carico sostenibile maggiore per il suolo, fino a 1,6 volte in più per una percentuale aggiunta di chip dell'8% (Al-Neami, 2018). Un'altra applicazione riguarda invece l'utilizzo di fibre a base di polimeri, questi possono rinforzare la struttura in suoli argillosi e sabbiosi, migliorando la capacità di compressione. Queste caratteristiche rendono le fibre a base di polimeri applicabili in suoli utilizzati come base per sottofondi stradali o per le discariche.

L'ultimo modello plastico molto utilizzato è il polistirene, in particolare applicato come materiale di riempimento nel suolo e per la produzione di tubature.

Sebbene tutti questi prodotti di origine plastica possano essere utilizzati per il miglioramento di suoli in ambiente artificiale, non ne va comunque dimenticato il rischio ambientale sul lungo periodo. Risulta fondamentale verificarne accuratamente la resistenza, e qualora si decida di utilizzarli si dovrebbero effettuare verifiche periodiche dello stato di deterioramento.

Le plastiche biodegradabili sono prodotte cercando di ridurre l'impatto e velocizzarne lo smaltimento, ma anche queste se rilasciate nel suolo hanno un impatto elevato, con effetti sul ciclo del carbonio e dell'azoto (Qin et al., 2021). L'azoto nel suolo si può trovare in forma organica o inorganica, ed ha un ruolo fondamentale per le piante e gli organismi che lo rendono disponibile tramite l'azoto fissazione. Da studi recenti è emerso come la degradazione di plastiche possa provocare un'immobilizzazione dell'azoto nel suolo rendendolo meno disponibile (Shi et al., 2023). La riduzione dell'azoto sembra essere maggiore su suoli limosi dove la disponibilità dell'azoto minerale diminuisce del 90-98% (Shi et al., 2022b), rispetto al 32% dei suoli sabbiosi e 54% degli argillosi. Essendo l'azoto meno disponibile in suoli fortemente condizionati da plastiche, ne deriva un incremento del rapporto tra carbonio/azoto. Il carbonio in proporzione diviene dominante, stimolando la proliferazione di biomassa

microbica rispetto alla mineralizzazione dei nutrienti (Elser et al.,2011; Mooshammer et al.,2014).

La maggiore presenza di carbonio organico può determinare condizioni differenti in relazione alle MPs presenti. Le plastiche non biodegradabili sono altamente idrofobiche e possono adsorbire il carbonio organico, determinando un maggiore impatto sul suolo.

Le plastiche biodegradabili possono avere un effetto maggiore nel breve periodo, perché sono in grado di degradarsi più velocemente e influenzare le condizioni nutritive del suolo. Esistono quindi degli effetti differenti tra plastiche biodegradabili e non.

Un'altra delle tematiche che si sta cercando di sviluppare è legata alla possibile variazione di ritenzione idrica, ovvero la capacità che il suolo ha di limitare le perdite di acqua. Le Mps (PE-MPs in particolare) interagendo col sistema poro-aggregato possono infatti determinare una variazione nel contenuto di acqua del suolo, ed ovviamente le discriminanti principali sono la grandezza delle particelle plastiche, il loro quantitativo, e la tessitura del suolo. In particolare, la concentrazione maggiore di microplastiche tende inevitabilmente ad incidere sulla capacità di ritenzione idrica di un suolo (Zhichao Wang et al.,2023). Studiando le tessiture possiamo invece comprendere come diverse concentrazioni di MPs riescano a modificare la capacità di ritenzione su suoli di diversa natura. Nel caso di suoli limosi con presenza maggiore di particelle plastiche si possono verificare aumenti della capillarità e di conseguenza un incremento della risalita d'acqua. Viceversa, su suoli sabbiosi si possono verificare modifiche della struttura iniziale dei pori, con conseguente riduzione della capillarità.

Queste differenze, per quanto riguarda l'aspetto ambientale, rappresentano chiaramente un aspetto negativo perché evidenziano una maggiore presenza di MPs, ma potrebbero essere diversamente intese valutandone le caratteristiche fisiche che ne derivano. Infatti, spesso in suoli limosi e sabbiosi le problematiche maggiori sono individuabili rispettivamente nel ristagno idrico (con eccessivo accumulo di acqua) e nell'eccessiva velocità di dispersione dell'acqua. Nella seconda tipologia di suoli bisogna però sempre considerare l'aspetto dimensionale delle plastiche, in quanto dimensioni elevate accentuerebbero le caratteristiche tipiche dei suoli sabbiosi e di conseguenza la dispersione di acqua.

Gli effetti su suoli argillosi sembrano invece essere maggiormente legati alla loro concentrazione. Si è infatti notato come la presenza di minori quantità di microplastiche non determini particolari variazioni nel comportamento del suolo. Risultati più rilevanti sono stati ottenuti in aree trattate con plastiche di dimensioni ridotte e presenti con concentrazioni maggiori, dove si è saggiata una importante riduzione della capacità di ritenzione idrica.

Questo risultato è probabilmente dovuto alle minori dimensioni dei pori argillosi che determinano un effetto maggiore delle MPs, lo stesso discorso è poi adottabile anche per suoli limosi dove si riscontra una tendenza simile.

Bisognerebbe però considerare che, essendo le microplastiche di natura idrofobica, se presenti in quantità superiori ad un certo limite potrebbero avere effetti opposti negli stessi suoli portando ad un'ulteriore riduzione di capillarità in suoli limosi e argillosi. In particolare, a parità di concentrazione nel suolo, si sono riscontrati risultati diversi in base alle dimensioni, confrontando MPs minori (150 micrometri) e MPs maggiori (950 micrometri). Analizzando diverse tipologie di suoli, le prime hanno portato un aumento complessivo di porosità e volume dei pori su suoli limosi, mentre con le seconde si è verificata una riduzione degli stessi valori su suoli sabbiosi, oltre che ad un incremento della frammentazione.

Le microplastiche nel suolo dovrebbero inoltre influenzare le forze di legame che agiscono a livello della struttura, riducendo anche la stabilità degli aggregati. Al contrario la sostanza organica tende invece a favorire la stabilità degli aggregati, e per questo è di notevole interesse comprendere come si possa comportare un suolo di natura organica che presenti fibre plastiche nella struttura.

Si pensa quindi che le microplastiche, sebbene non determinino necessariamente una modifica nell'aggregazione, potrebbero influenzare il processo in base alla diversa natura del suolo (Yun liang et al., 2021).

E' importante considerare anche il possibile effetto dell'alternanza di periodi siccitosi e piovosi, con risultati diversi per l'evaporazione di acqua dal suolo, e per la capacità di ritenzione. Da studi precedenti si è visto come cicli di bagnatura ed essiccazione in presenza di fibre plastiche favoriscano la formazione di aggregati ma di minore stabilità, questo per la minore attività dei microorganismi (Lehman et al., 2019). L'attività della microflora (batteri e funghi) è molto importante, in quanto suoli con minor attività microbica, presentano una minore aggregazione nella struttura.

Un aspetto di notevole interesse riguarda lo studio della stabilità degli aggregati in acqua. Questo parametro ha una notevole valenza se si vuole comprendere il comportamento di un ambiente anche sotto l'effetto delle precipitazioni. La stabilità in acqua tende generalmente ad aumentare con la maggiore presenza di sostanza organica, avendo quindi un'incidenza positiva sulla struttura. Allo stesso modo effettuando studi su suoli caratterizzati dalla presenza di microplastiche, si è notato come queste avessero un riscontro negativo portando ad una riduzione della stabilità, in particolare in suoli arricchiti di S.O (Liang et al., 2021).

Importante è anche l'analisi delle attività degli enzimi nel suolo, e, specularmente, a quanto descritto in precedenza, la contemporanea presenza di microplastiche e S.O. porta ad effetti negativi, con inibizione degli enzimi. In particolare, sono molto importanti le glucosidasi (α , β) e le galattosidasi (α , β), perché idrolizzano la sostanza organica, liberano glucosio e galattosio, e favoriscono lo sviluppo della comunità microbiche. Le MPs sfavorendo l'attività enzimatica, ostacolano lo sviluppo delle varie comunità; quindi, in suoli inquinati queste saranno sempre meno diversificate e più specializzate, in particolare dove il carbonio organico assume un ruolo maggiore (Shi et al., 2023). La diversità delle popolazioni è fondamentale per mediare gli effetti delle microplastiche sulla stabilità degli aggregati del suolo, e con comunità meno sviluppate si avranno quindi minori fenomeni di aggregazione (su suoli sabbiosi e limosi in particolare) (Forster 1990; Lehmann et al., 2017). Su suoli argillosi i risultati possono essere diversi, perché le particelle essendo più piccole favoriscono l'integrazione delle fibre plastiche, che in questo caso determinano un aumento della stabilità dei macroaggregati (Zhang et al., 2019).

Questi risultati sono però maggiormente veritieri se si analizzano suoli agrari, dove si formano facilmente crepe e cambiamenti delle condizioni generali attribuibili ad un'intensa attività umana. Per suoli di natura diversa sono stati effettuati un numero di studi ridotti, e ci risulta quindi difficile definire precisamente un andamento. Le MPs persistendo nel suolo possono poi degradarsi con tempistiche elevate, e provocare danni prolungati negli ecosistemi, specialmente nel suolo. Spesso le analisi sono infatti condotte su un periodo di tempo limitato, in genere non superiore ai 90 giorni, mentre bisognerebbe verificare l'impatto sul medio-lungo termine, e approfondire meglio ruolo e possibili danni derivanti dalla penetrazione di nanoplastiche (in particolare) nei tessuti animali e vegetali (Yifei Qui et al., 2022).

Capitolo 2

SCOPO DELLA TESI

Lo scopo della presente tesi è stato quello di valutare l'effetto di microplastiche sulla fertilità fisica del suolo. In particolare, si è andata a studiare l'influenza di diverse tipologie di microplastiche in termini di dimensione, forma, e concentrazione, sulla stabilità della struttura del suolo.

Capitolo 3

MATERIALI E METODI

3.1 Descrizione campioni

La tesi è inserita in un progetto di ricerca più ampio con lo scopo di studiare l'influenza e il ruolo delle microplastiche nel suolo. Nello specifico, ha previsto due sperimentazioni condotte in parallelo: i) valutare eventuali popolazioni microbiche presenti sulle superficie delle plastiche, e il possibile assorbimento delle MPs da parte delle piante, valutandone possibili effetti successivi sulla nutrizione umana; ii) studiare l'interazione tra plastiche e suolo per verificare l'impatto sulla fertilità fisica, in particolare l'influenza sulla stabilità di struttura. La presente tesi è focalizzata sullo studio dell'influenza delle microplastiche sulla stabilità di struttura. La prova è stata condotta in vaso eseguendo 3 diversi trattamenti a diverse concentrazioni di microplastiche e un suolo di controllo con 3 repliche ciascuno (Tabella 1). Nel suolo sono state aggiunte microplastiche di diverse dimensioni e forma: filamenti mediamente di 1,5 cm, quadratini tra gli 1-2 mm e particelle sferiche di 100 micron. Il suolo utilizzato per lo studio è stato prelevato presso l'azienda agricola "Poderino", nel comune di Asciano a circa 30 km (in direzione Sud-Est) da Siena. L'altitudine dell'area è di 200 m s.l.m. I campioni di suolo sono stati prelevati secondo un transetto diagonale in un appezzamento avente superficie totale di 500 m². Nello specifico sono stati eseguiti 3 prelievi ad una profondità di 0-10 cm, ad una distanza di 20 m l'uno dall'altro. Prima del campionamento nel suolo è stato applicato sovescio verde e sono state eseguite le lavorazioni necessarie alla coltivazione di grano. Utilizzando particelle plastiche di diversa natura si volevano evidenziarne possibili divergenze nella degradazione e collocazione nel suolo, considerandone anche i danni da inquinamento.

Tabella 1. Concentrazioni di microplastiche nei diversi trattamenti divise per tipologia di microplastica.

	Repliche	Microplastiche totali	Micro 100 μ	Micro 1-2 mm	Long plastic
Trattamento	g				
Controllo	3	0,00	0,000	0,000	0,000
Concentrazione 1	3	0,24	0,080	0,080	0,080
Concentrazione 2	3	0,56	0,187	0,187	0,187
Concentrazione 3	3	2,40	0,800	0,800	0,800

3.2 Metodo di analisi

L'attività di laboratorio per l'analisi dei campioni ha previsto due fasi di lavoro. In un primo momento si sono analizzate le tessiture per verificare la composizione del suolo in sabbia, limo e argilla, per poi effettuare uno studio visivo delle diverse frazioni al microscopio elettronico.

3.2.1 *Scheletro e terra fine*

Le particelle minerali che compongono il suolo possono essere distinte in scheletro o terra fine in base alle dimensioni, rispettivamente se superiori o inferiori ai 2 mm. Lo scheletro presenta frammenti rocciosi derivati da minerali primari del substrato. In laboratorio si è proceduto alla separazione dello scheletro e della terra fine tramite un vaglio da 2 mm che consente il passaggio di sole particelle con dimensioni inferiori, e quindi appartenenti alla terra fine (Figura 4).



Figura 4. Vaglio per la separazione di scheletro e terra fine.

Il campione di suolo prima di essere vagliato è stato precedentemente preparato al mortaio dove tramite azione meccanica si è cercato di rompere gli aggregati. L'attività è stata ripetuta più volte, passando più volte il suolo nel vaglio e riutilizzando poi il mortaio fino alla lavorazione di una parte consistente di campione. Durante questa fase si sono riuscite ad osservare le prime plastiche presenti, in particolare le fibre filamentose (Figura 5). Terminata l'operazione di vagliatura dei campioni, questi sono stati riposti in sacchetti per poter essere conservati e utilizzati nella fase successiva.



Figura 5. Campione di suolo con presenza di filamenti plastici, lavorato con mortaio.

3.2.2 Tessitura

Nella terra fine possiamo distinguere sabbia con particelle di dimensioni tra i 2 e 0.05 mm, limo se comprese tra gli 0.05 e 0.002 mm, e argilla con dimensioni inferiori ai 0.002 mm. Secondo la classificazione USDA la sabbia è poi ulteriormente suddivisibile in sabbia grossa se le dimensioni sono maggiori di 0.5 mm, media se minori di 0.5 mm e maggiori di 0.25 mm, e fine se comprese tra 0.25 e 0.05 mm. Definendo i rapporti percentuali tra sabbia, limo e argilla nel suolo, possiamo definire la tessitura del suolo. Attraverso la conoscenza della tessitura di un suolo è possibile descriverne meglio le caratteristiche chimico-fisiche come drenaggio e capacità di ritenzione idrica per la risposta alle precipitazioni, capacità di scambio cationico, e stato ossidoriduttivo. L'analisi delle tessiture è stata effettuata secondo il metodo della pipetta (Day,1965), basato sulla legge di Stokes. Per ogni campione sono stati inizialmente prelevati 30 g di suolo vagliato (terra fine), poi aggiunti all'interno di un becher

a cui è stata aggiunta acqua distillata fino ad ottenere una colonna di acqua di altezza 2,5 cm sopra il campione (Figura 6A). Per ogni campione si sono dovuti attendere 30 minuti, per favorire l'inibizione del campione e la naturale rottura degli aggregati meno stabili sotto il peso della colonna d'acqua. Terminato il tempo di attesa, il suolo con acqua distillata è stato versato nel vaglio a più livelli che permette di separare sabbia grossa, sabbia media, sabbia fine dalle particelle di limo e argilla, in quanto l'ultimo livello consente solo il passaggio di particelle con spessore inferiore a 0,053 mm (Figura 6B).



Figura 6. Becher con campione di suolo e acqua distillata (A), vagli per la separazione delle varie frazioni di terra fine (B).

Per favorire la discesa della parte più fine di suolo negli strati inferiori del vaglio è stata aggiunta altra acqua distillata, poi questa raccolta insieme alla parte più fina del suolo nell'ultimo strato del vaglio. I campioni relativi alla parte di sabbia (rimasta sui vagli) sono stati posti in stufa ad una temperatura di 100 °C fino all'essiccazione. Il suolo secco è così stato raccolto per essere pesato e i vagli puliti per poter essere riutilizzati successivamente. Le pesate sono state effettuate per le varie frazioni di sabbia per ogni campione, raccogliendone così i dati relativi.

La sospensione composta da limo, argilla e acqua distillata raccolta nell'ultimo vaglio, è stata successivamente aggiunta in un cilindro da 500 ml, insieme ad altra acqua distillata fino

a raggiungere i 30 cm di altezza della colonna. In ogni cilindro la soluzione veniva agitata per favorire il mescolamento delle particelle di suolo, evitando che queste rimanessero attaccate sul fondo, per poi lasciarla a riposo per 24 ore aspettando che il limo sedimentasse (1.25 cm ora^{-1} a 20°C). (Figura 7) I cilindri venivano svuotati e puliti raccogliendo il sedimento dato dal limo presente, poi versato in un becher per essere essiccato in stufa.

Ottenendo il peso della frazione limosa, si è potuto successivamente ricavare il peso in grammi della frazione argillosa. Per ogni campione di suolo il calcolo è stato effettuato sommando le 4 pesate precedenti (relative alle varie frazioni di sabbia) al valore di limo ottenuto. Sapendo che inizialmente erano stati prelevati 30 g di suolo, e sottraendo a questo valore la somma in grammi di sabbia e limo, si è ottenuto il peso dell'argilla. Tutte le frazioni sono state espresse in g kg^{-1} sulla base del peso del campione analizzato.

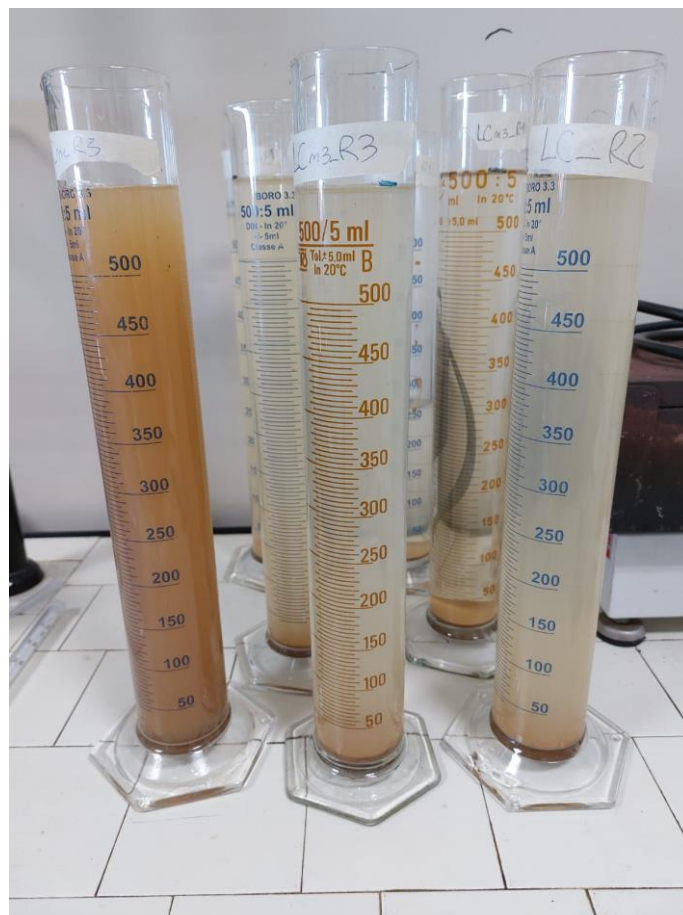


Figura 7. Cilindri contenenti limo ed acqua distillata, il primo a sinistra appena agitato.

Per valutare la stabilità di struttura dei campioni, si sono confrontati i risultati delle tessiture ricavate utilizzando ipoclorito, diverse dalle precedenti ottenute tramite l'analisi in acqua.

Si sono infatti determinate le tessiture utilizzando ipoclorito di sodio che presenta una concentrazione del 3% di cloro attivo, l'aggiunta di ipoclorito permettere la completa ossidazione del carbonio organico, provocando la rottura degli aggregati attraverso la distruzione dei cementi organici. L'ipoclorito è stato aggiunto ad un campione di suolo di 30g in un becher, fino ad un'altezza di 2,5 cm, con procedimento speculare all'analisi dei campioni in acqua, che invece ci ha permesso di ottenere la percentuale delle varie frazioni di suolo, senza averne precedentemente favorito la rottura degli aggregati.

3.2.3 *Analisi al microscopio elettronico*

Nella seconda fase di analisi si è effettuata un'osservazione di alcuni campioni rappresentativi al microscopio elettronico, cercando di notare possibili alterazioni delle plastiche a livello microscopico, e verificandone visivamente l'interazione con le particelle di suolo. Per l'osservazione è stato utilizzato un microscopio elettronico a scansione (SEM) ZEISS Supra 40 ad alta risoluzione (Figura 8A). La postazione per l'analisi microscopica (Figura 8B) era collocata in una stanza con temperatura controllata per evitare il surriscaldamento dello strumento.

Lo studio al microscopio elettronico si è applicato a sei campioni, tra cui due con plastiche a concentrazione 3 (frazione limo e sabbia grossa), due del suolo di controllo (frazione limo e sabbia grossa) (Figura 9A), e due campioni in cui si sono cercate di osservare le plastiche insieme al suolo, senza effettuarne una pulizia. Erano infatti presenti dei campioni in cui le plastiche erano state ripulite per favorirne l'osservazione della superficie, e altri in cui la microplastica era visualizzata insieme al suolo cercando di individuare possibili interazioni. Ogni campione da visualizzare è stato fissato su un disco biadesivo in carbonio poi dorato per renderlo conduttivo, prima di inserirlo nell'apposito sistema del microscopio (Figura 9B). Favorire la conducibilità del campione è importante perché lavorando a risoluzioni elevate è difficile distinguere i vari frammenti, e può essere necessaria una verifica elementare per distinguere i principali elementi che compongono la struttura. L'analisi elementare si effettua tramite una sonda EDAX che richiede un elevato voltaggio, e per questo spesso favoriva l'allontanamento del frammento visualizzato, impendendone l'accertamento chimico. Basandoci sulle dimensioni (spessore in particolare) dei frammenti visualizzati, (Figura 10) possiamo però ipotizzare che in questi casi si trattasse di frammenti plastici.

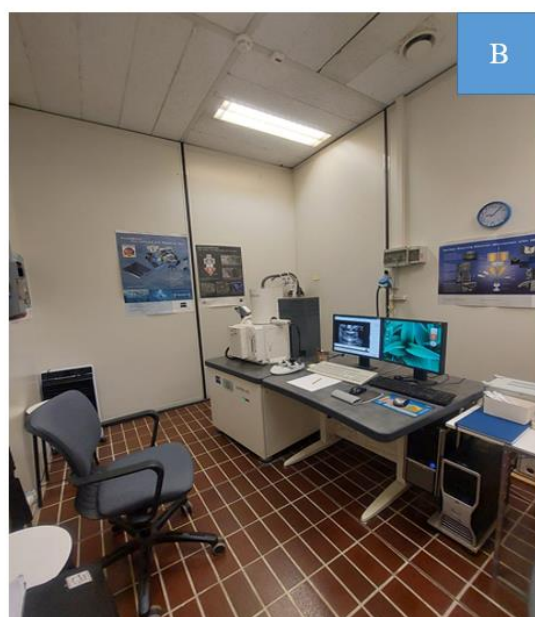


Figura 8. Microscopio elettronico ZEISS Supra 40 (A), postazione di lavoro (B)



Figura 9. Campioni sui dischetti di carbonio (A), apposto sistema per l'inserimento dei campioni nel microscopio (B).

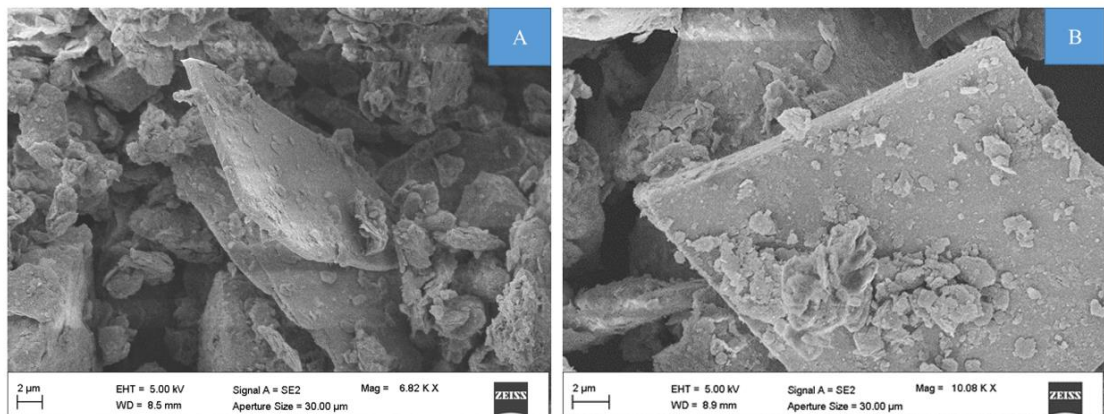


Figura 10. Possibili plastiche distinguibili per spessore e dimensioni.

3.2.4 Analisi dei dati

L'analisi della varianza (ANOVA) è stata eseguita con l'ausilio del software R al fine di investigare differenze tra le diverse frazioni di tessitura risultanti dai trattamenti. L'ANOVA si basa sulla distribuzione normale dei dati e l'omoschedasticità (variabili con stessa varianza). Si è effettuata una verifica di tali proprietà sui residui utilizzando il test-statistico Shapiro-Wilk (pacchetto "stats" di R studio) e il test di Levene (pacchetto "car" di R studio), entrambi con un indice di affidabilità del 95%. In alcuni casi i dati presentavano una distribuzione non normale e un'eterogeneità nella varianza; pertanto, sono stati trasformati tramite la procedura di Box e Cox (1964). Il test ANOVA è considerato significativo con $p \leq 0.05$; le differenze tra le medie sono state indagate con il test Tukey's Honest Significant Difference (HSD) con $p \leq 0.05$.

Capitolo 4

RISULTATI E DISCUSSIONI

4.1 Tessiture in acqua e ipoclorito

I risultati dell'analisi delle tessiture in acqua e ipoclorito e la loro elaborazione sono riportati in Tabella 2. Per ogni tipologia di trattamento (controllo e microplastiche a concentrazioni crescenti) sono state considerate 3 repliche, e in tabella sono state inserite media e deviazione standard, ricavate utilizzando i valori delle repliche. Calcolando il valore medio si è riassunto l'insieme dei dati in un numero rappresentativo, mentre con la deviazione standard si è verificata la distanza dei valori dalla propria media (scarto quadratico medio) per esprimere la dispersione dei dati. Effettuando l'analisi delle tessiture in acqua e in ipoclorito si sono potuti distinguere i suoli in base alla percentuale delle varie frazioni. Tramite il triangolo USDA (Figura 11) sono infatti state calcolate le varie tessiture inserendo le percentuali di sabbia, limo e argilla, ricavate dal peso in grammi relativo a ogni frazione di suolo (Schoeneberger et al. 2012).

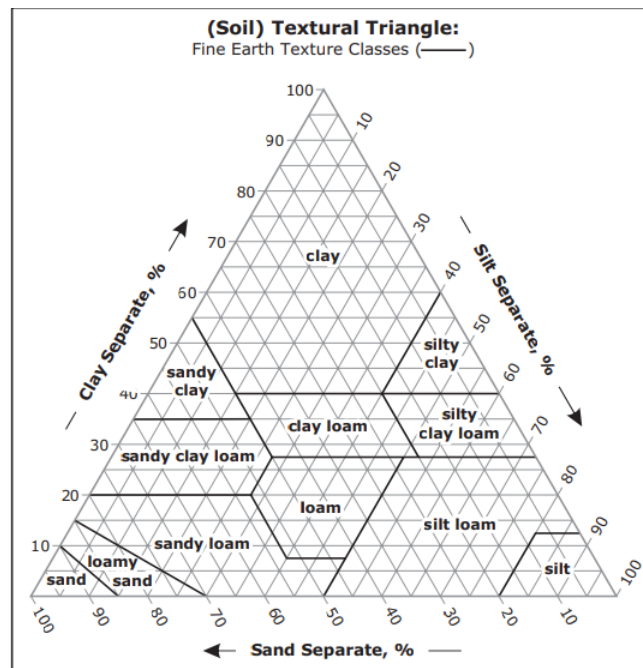


Figura 11. Triangolo USDA utilizzato per il calcolo delle tessiture.

Dai risultati delle tessiture in acqua si è evidenziato come la frazione sabbiosa sia la frazione più presente in tutti i trattamenti senza grosse differenze tra parte grossa, media, fine, e molto fine. Dalla Tabella 2 la frazione argillosa risulta invece meno presente, ma è importante capire se nelle frazioni maggiori ci possano essere particelle più fini rimaste aggregate. Si è quindi effettuato un confronto specifico determinando la tessitura in ipoclorito, in quanto favorisce la distruzione dei cementi organici attraverso la completa ossidazione del carbonio organico. Pertanto, l'aggregazione rimanente è attribuibile a cementi di diversa natura, tra cui sostanze inorganiche e ipoteticamente microplastiche. Ne risulta un aumento della frazione fine come evidenziato dalla maggiore presenza di sabbia molto fine (0,100-0.053mm) a discapito delle altre frazioni di sabbia nel trattamento in ipoclorito. Inoltre, Si notano valori crescenti di limo e argilla. Per la maggiore quantità di materia fina presente, i suoli sono passati dall'essere sabbioso franchi a franco sabbiosi. In particolare, nella frazione di argilla si evidenziano valori medi maggiori con l'incremento della concentrazione di microplastiche, mentre al contrario la deviazione standard (dispersione dei dati) tende a diminuire.

Analizzando la parte della Tabella 2 in cui sono illustrati i risultati delle tessiture in ipoclorito, si possono riscontrare delle divergenze dovute al trattamento a livello della frazione argillosa. Nella tabella sono infatti riportati i risultati dell'analisi statistica, effettuata confrontando la variazione nelle diverse frazioni tra trattamenti, considerando separatamente le tessiture in acqua ed in ipoclorito. Nell'istogramma (Figura 12) si analizza invece, il risultato statistico relativo alla differenza tra tessiture in acqua e in ipoclorito entro la stessa frazione.

Dove le lettere non sono indicate non si distinguono risultati diversi in relazione al trattamento, mentre quando le differenze sono significative si utilizzano lettere diverse. Le maggiori particolarità si sono riscontrate nella frazione argillosa, dove con il trattamento in ipoclorito si sono potuti distinguere risultati diversi tra suolo di controllo e con massima concentrazione di plastiche (concentrazione 3). Il controllo è quindi stato indicato con la lettera b, ed il trattamento con concentrazione maggiore con la a. Nelle concentrazioni 1 e 2 troviamo invece delle somiglianze con i risultati dei due trattamenti precedenti, e sono per questo stati classificati come ab.

Si sono quindi ottenuti valori di argilla, maggiori dalla tessitura in ipoclorito, dove sono poi state evidenziate delle importanti differenze tra il trattamento di controllo e con concentrazione 3. Non avendo ritrovato le stesse variazioni nell'analisi della tessitura

apparente, possiamo comprendere come parte della frazione sabbiosa misurata derivi in realtà dall'aggregazione di particelle minori. La differenza tra i risultati delle tessiture in acqua e ipoclorito è maggiore a livello del trattamento con concentrazione 3, le plastiche sono quindi risultate determinanti, sfavorendo i fenomeni di aggregazione delle particelle più piccole. La minore aggregazione delle particelle potrebbe essere dovuta all'influenza fisica delle plastiche nel suolo, o ad aspetti di natura biologica con disturbo della meso/microfauna e della microflora (funghi e batteri), la cui attività è fondamentale per l'aggregazione nella struttura (Lehman et al., 2019). Le microplastiche possono avere inoltre un elevato impatto in suoli ricchi di sostanza organica dove potrebbero favorire una riduzione della stabilità di struttura come sostenuto da Liang et al. (2021).

È poi importante considerare come la minore aggregazione si sia potuta distinguere solo con concentrazioni elevate di microplastiche, ed è quindi possibile che queste diventino determinanti oltre una certa concentrazione.

Tabella 2. Risultati relativi alle varie frazioni di suolo delle tessiture in acqua e ipoclorito.

Trattamento	Sabbia grossa (2-0,500 mm)	Sabbia media (0,500-0,250 mm)	Sabbia fine (0,250-0,1000 mm)	Sabbia molto fine (0,100-0,053 mm)	Sabbia totale	Limo (53-2 µm)	Argilla (2 µm)
g kg ⁻¹							
Tessitura in acqua							
Controllo	171 (38)	156 (13)	227 (12)	208 (9)	761 (39)	193 (38)	47 (4)
Concentrazione 1	214 (49)	150 (13)	236 (12)	194 (29)	794 (41)	160 (45)	46 (9)
Concentrazione 2	168 (46)	170 (26)	256 (25)	198 (33)	792 (32)	168 (48)	40 (21)
Concentrazione 3	189 (4)	153 (7)	221 (9)	215 (16)	778 (12)	176 (9)	46 (6)
Tessitura in ipoclorito							
Controllo	84 (12)	73 (1)	88 (7)	132 (9)	377 (22)	449 (34)	173 ^b (35)
Concentrazione 1	106 (14)	68 (3)	84 (6)	132 (10)	390 (24)	391 (25)	218 ^{ab} (34)
Concentrazione 2	113 (15)	68 (5)	88 (11)	136 (5)	405 (22)	378 (26)	218 ^{ab} (31)
Concentrazione 3	104 (28)	72 (6)	87 (7)	139 (15)	402 (16)	355 (19)	243 ^a (25)

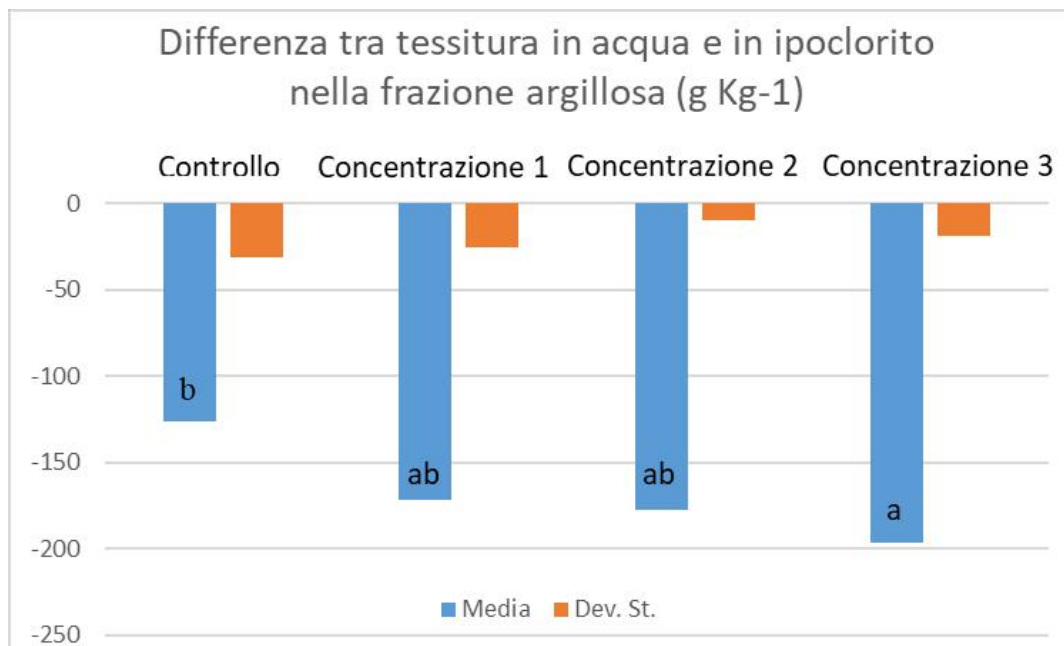


Figura 12. Differenza tra tessitura in acqua e in ipoclorito nella frazione argillosa.
Lettere diverse indicano differenze significative.

4.2 SEM, visualizzazione e riflessioni

Nell'osservazione al microscopio elettronico si sono cercate di visualizzare le microplastiche presenti, con approccio differente per analizzare il deterioramento e la possibile interazione con il suolo. Le prime osservazioni effettuate erano relative a microplastiche pulite. Nella Figura 13 è raffigurato un frammento plastico analizzato ad ingrandimenti superiori a 5.00 K X (Figura 13 B, C e D), con cui si è riusciti a notare processi di deterioramento che potrebbero definire il rilascio di particelle di dimensioni nell'ordine dei micron, essendo l'immagine stata catturata a circa 30.00 μm . Nella terza immagine (Figura 15) si è analizzata una fibra plastica, ed osservandone la struttura nello specifico si sono distinte crepe e piccoli filamenti che ne indicano il danneggiamento. La stessa tipologia di fibra è stata ritrovata nell'analisi del campione non ripulito, e in questo caso si sono evidenziate particelle di suolo a contatto con il filamento (Figura 14). Distinguendo fenomeni di degradamento sulla superficie delle plastiche, possiamo ipotizzare come dai frammenti e dalle fibre superiori si possano staccare particelle più piccole, con rischio significativo per più organismi. In particolare, le problematiche potrebbero essere maggiori per le piante che tramite le radici potrebbero assorbirle, favorendone una successiva diffusione nella catena alimentare, comportando notevoli rischi anche per la salute umana (Li et al., 2023).

La fase successiva ha invece previsto l'osservazione della frazione limosa del suolo di controllo (Figura 16), cercando di distinguerne la struttura per confrontarla con la frazione limosa dei campioni contenenti plastiche (Figura 20-21). Nella figura 16 è infatti raffigurato un campione di limo in cui si è riscontrata una fibra plastica, composta da più unità filamentose da cui si sono distinte interazioni con le particelle presenti nel suolo (Figura 17). In particolare, nell'immagine 17B si nota un filamento che entra all'interno di una possibile particella di limo, certificando un contatto diretto con il suolo, approfondito nell'immagine D della stessa figura con un ingrandimento di 1.0 K X. Un altro frammento plastico distinto nello stesso campione è raffigurato nella figura 18A ed interagisce con un particolare materiale (Figura 18B), andando a legarsi con quest'ultimo (Figura 18). Riusciamo quindi a notare dalle immagini come le microplastiche in decadimento possano interagire direttamente con il suolo.

Nella fase conclusiva dell'analisi si sono cercate di visualizzare microplastiche con dimensioni inferiori ai 100 μm , ma questa osservazione è risultata particolarmente complessa. Infatti, le dimensioni estremamente ridotte delle plastiche da ricercare, richiedevano per la verifica l'utilizzo di voltaggi molto elevati (15 kW) che favorivano l'allontanamento delle particelle. Effettuando però l'analisi elementare di differenti unità siamo riusciti a distinguere con certezza solo particelle non plastiche come fibre di diversa origine (Figura 21B), e in ogni caso in cui si sospettasse che la natura della particella fosse plastica, questa saltava puntualmente all'aumento dell'ingrandimento, o durante l'analisi elementare. Possiamo per questo ipotizzare che tra le unità di cui non si è riusciti a verificarne la costituzione ci fossero delle microplastiche (Figura 20), di cui ne sarebbe stata accertata la presenza tramite una microanalisi distinguendo carbonio ed idrogeno. Essendo però generalmente la plastica un materiale non conduttore questa probabilmente veniva allontanata dall'aumento di voltaggio. Si è quindi accertata la presenza di microplastiche in fase di degradamento e in interazione con il suolo, inoltre se n'è verificata la presenza nella frazione limosa, ed infine è stata possibile ipotizzarne la diffusione anche a livello delle particelle colloidali.

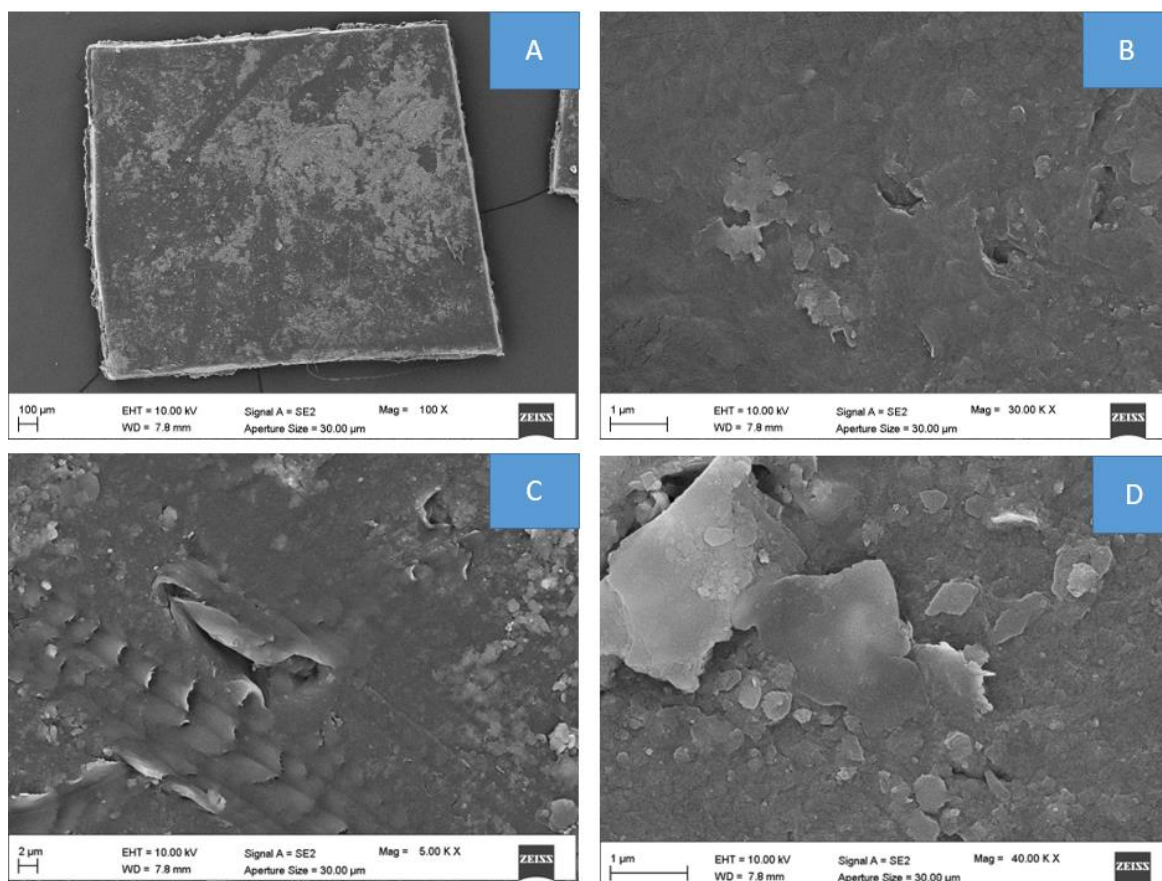


Figura 13. Frammento intero di microplastica quadrata (A), mostrata a vari ingrandimenti (B, C, D).

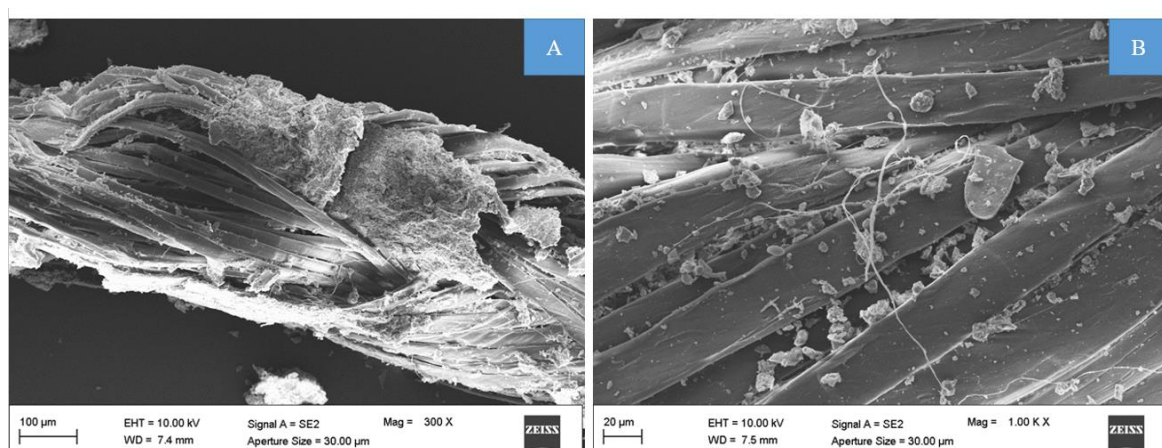


Figura 14. Microplastica filamentosa a contatto con suolo.

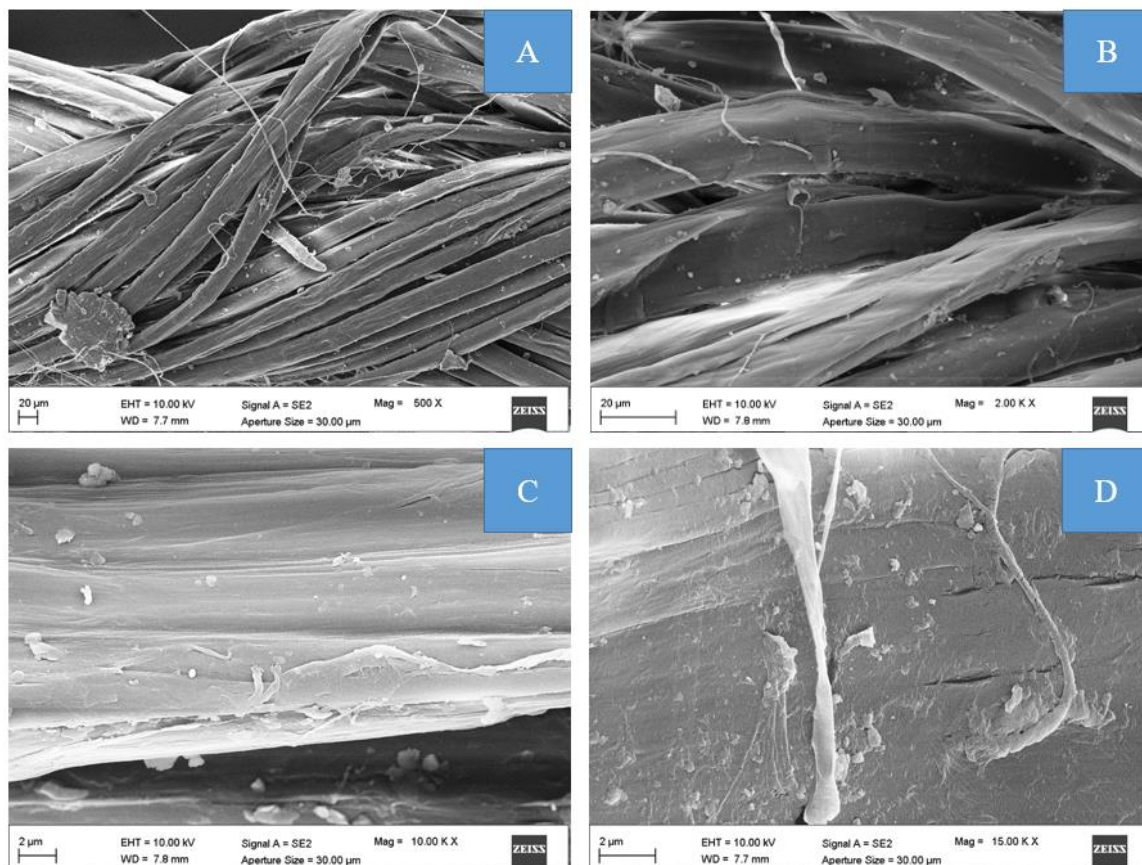


Figura 15. *Microplastica filamentosa* (A) in vari ingrandimenti (B, C, D).

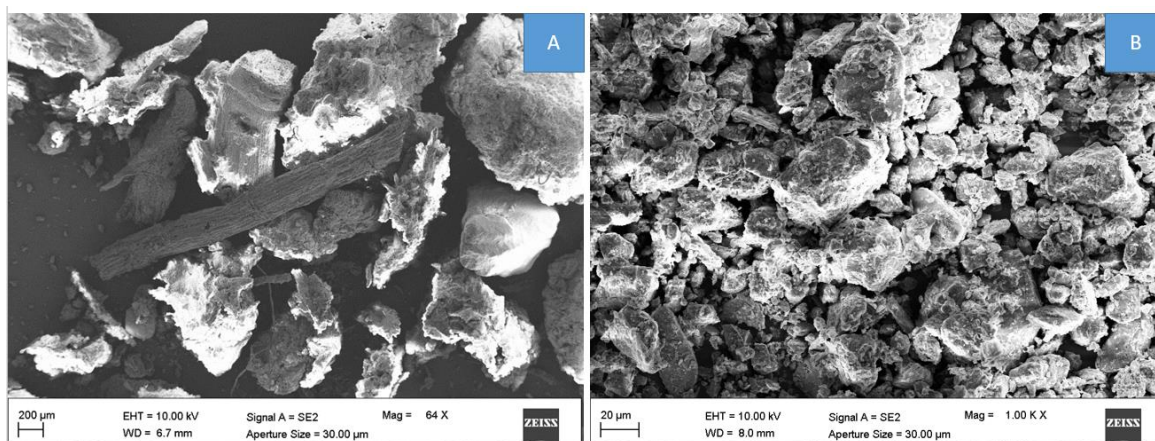


Figura 16. Campione di limo senza microplastiche.

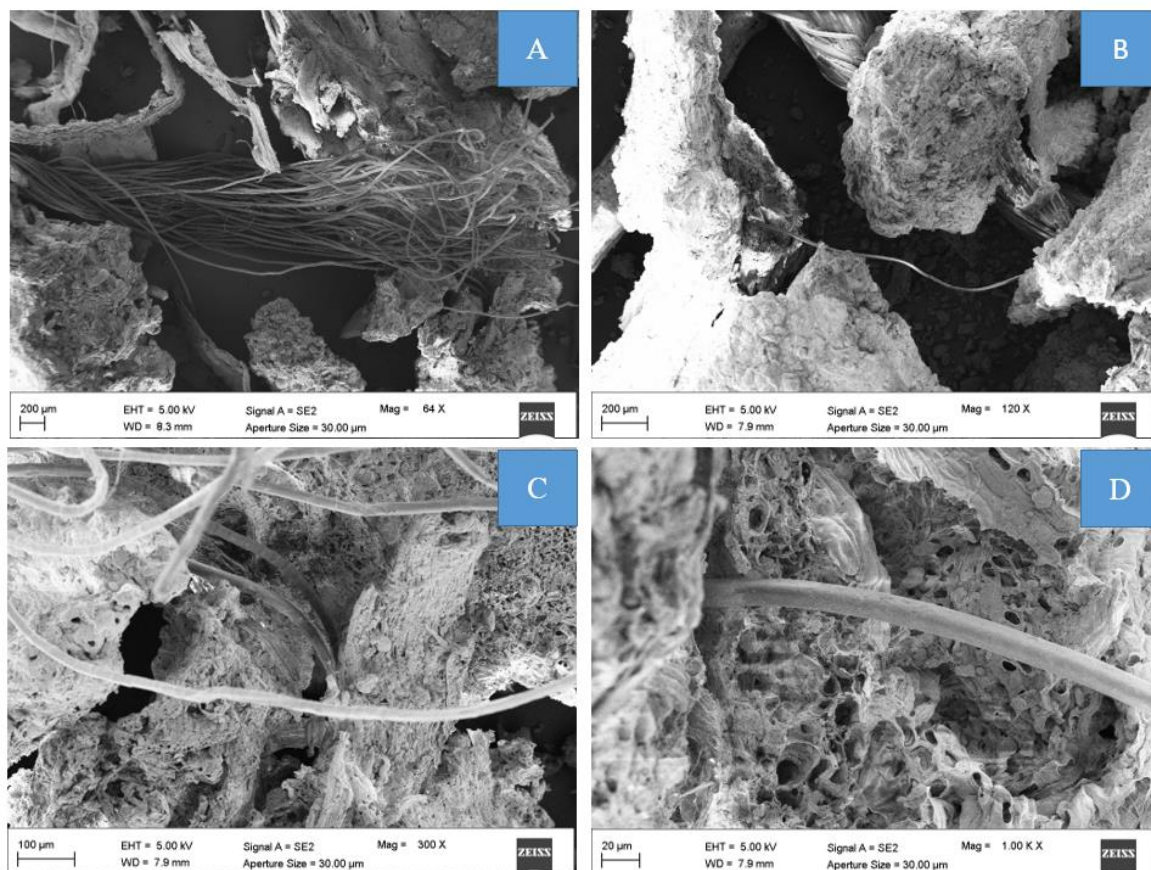


Figura 17. Fibra plastica interagente con particelle presenti nel suolo (A), visualizzata in più ingrandimenti (B, C, D).

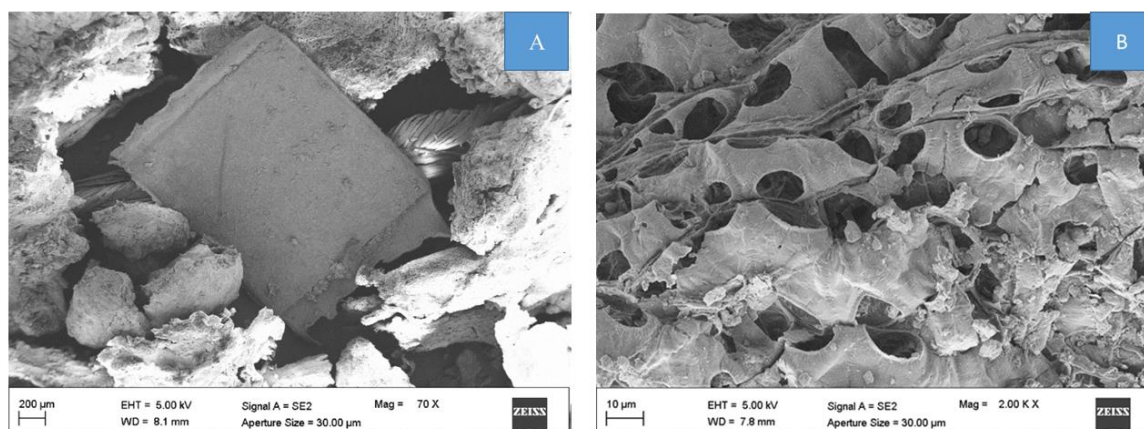


Figura 18. Microplastica (A) che interagisce con la particella dell'immagine B.

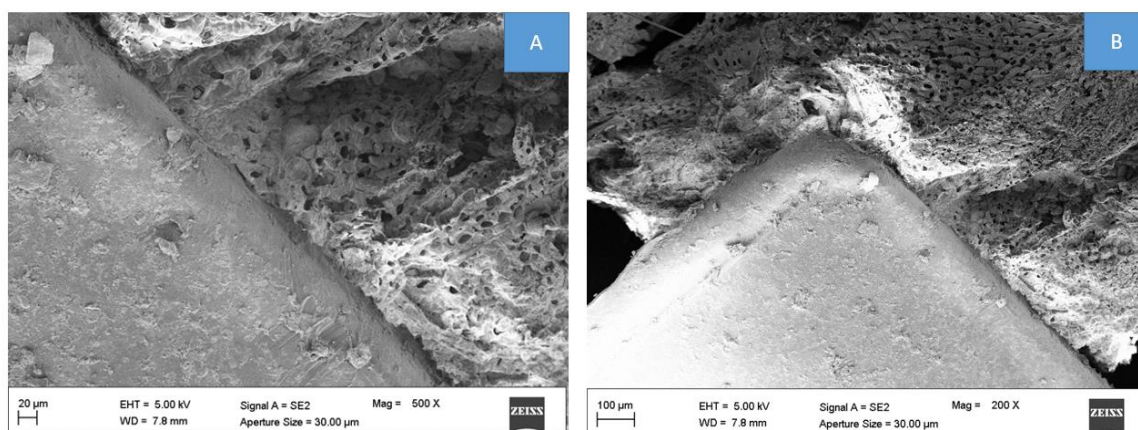


Figura 19. Frammento plastico della figura 17A interagente con la particella della figura 17B.

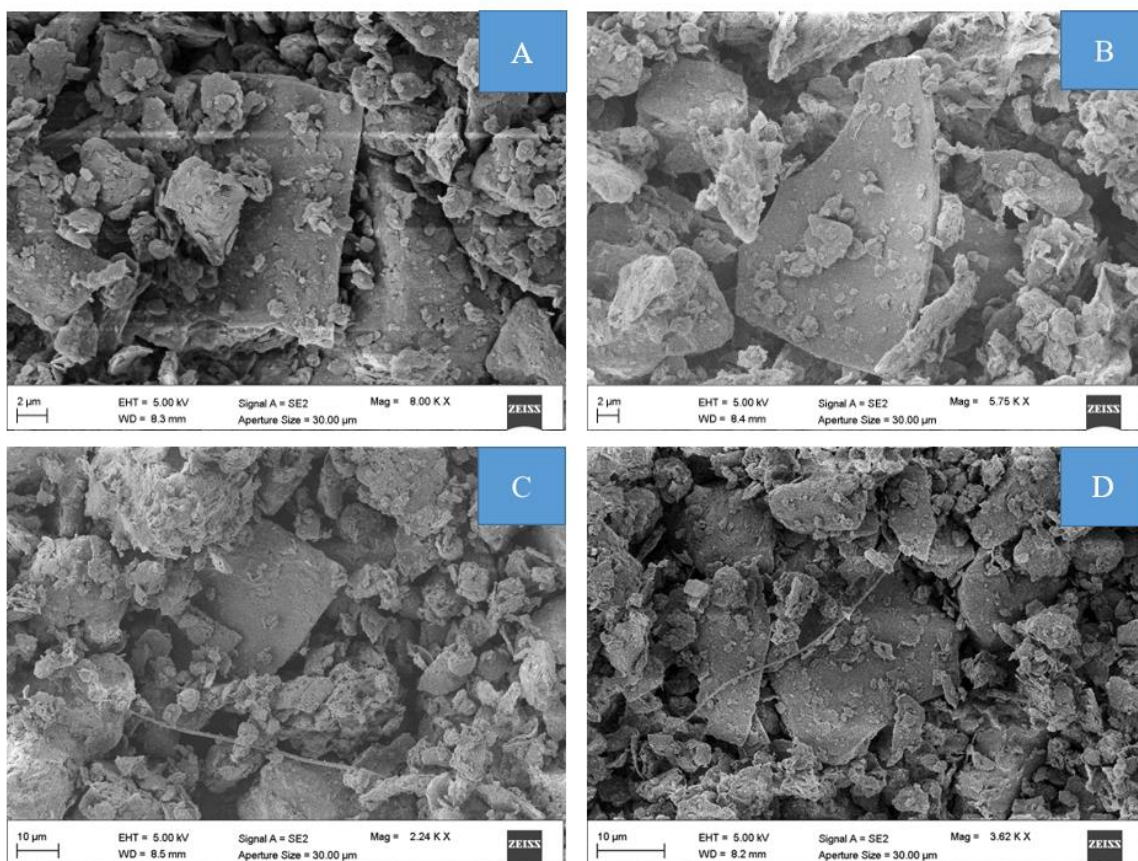


Figura 20. Probabili frammenti plastici nel suolo di cui non si è riusciti ad accertarne la natura elementare.

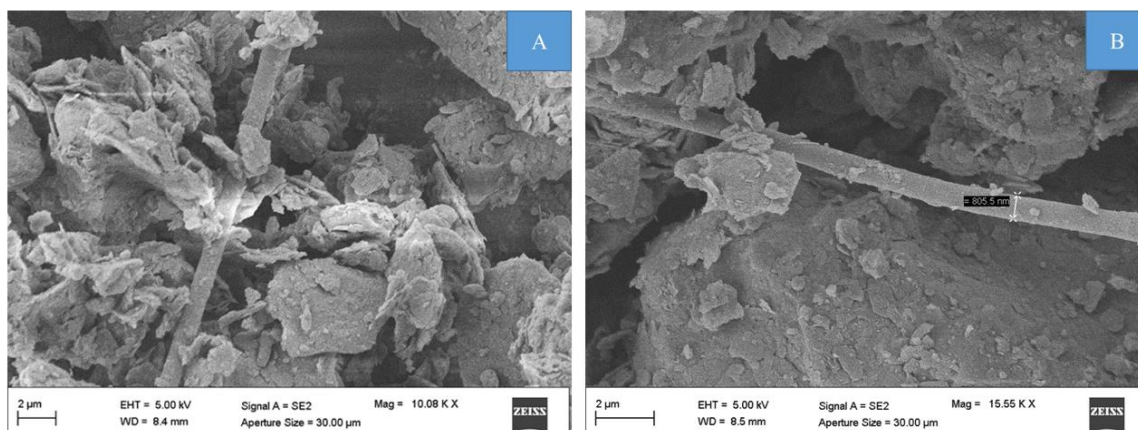


Figura 21. Possibile frammento plastico (B) e fibra di diversa natura, probabilmente fibra di vetro o quarzo (B).

Capitolo 5

CONCLUSIONI

L'inquinamento è da molti anni una delle problematiche maggiormente discusse e trattate a livello globale, e una delle cause di cui spesso si parla riguarda il rilascio di plastica nell'ambiente. Questo aspetto è di fondamentale importanza, e spesso non si considerano i possibili effetti che le plastiche potrebbero avere nel suolo, elemento centrale degli ecosistemi. Il suolo infatti rappresenta uno dei principali mezzi di diffusione delle plastiche, e queste tramite processi di diversa natura possono degradarsi e andare a costituire unità più piccole, con conseguenze sul suolo stesso e sugli organismi da esso dipendenti.

Le microplastiche possono avere un interesse notevole nel suolo, e bisogna comprenderne quelli che possono essere i possibili sviluppi in suoli dove si registra un inquinamento rilevante. Si è per questo effettuato un lavoro con l'obiettivo di verificare come le microplastiche incidano sulla struttura del suolo, analizzandone stato di degradazione, interazione, presenza ed effetti. Sono state valutate più repliche di uno stesso suolo con diverse concentrazioni di plastiche, e considerando le varie frazioni si sono potuti distinguere delle differenze significative tra il suolo di controllo e con elevate concentrazioni di microplastiche. Dai risultati è emersa una minore tendenza all'aggregazione delle particelle argillose, nel trattamento dove la quantità di microplastiche era massima, mentre con concentrazioni intermedie non si sono registrati risultati statisticamente simili. La presenza di un'elevata concentrazione di microplastiche è quindi risultata determinante a livello di struttura. Nel suolo analizzato tramite la microscopia elettronica si sono distinti processi di degradazione che favoriscono il rilascio di particelle plastiche più piccole, probabilmente già presenti nel suolo nell'ordine dei μm . Raggiungendo questo livello dimensionale le particelle sarebbero potenzialmente assorbibili da parte delle piante, e ne deriverebbe il conseguente ingresso nel ciclo vitale di altri organismi.

Per l'insieme delle motivazioni elencate, risulta fondamentale proseguire gli studi relativi all'argomentazione trattata, e nello stesso modo bisognerebbe ridurre la diffusione delle materie plastiche negli ecosistemi.

BIBLIOGRAFIA

Al-Neami, M.A., 2018. Stabilization of sandy soil using recycle waste tire chips. *Int. J.* 2018, 15, 175–180.

Camponi, L., Cardelli, V., Cocco, S., Serrani, D., Salvucci, A., Cutini, A., Agnelli, A., Fabbio, G., Bertini, G., Roggero, P.P., David C., Weindorf., Corti, G., 2023. Holm oak (*Quercus ilex* L.) cover: A key soil-forming force in controlling C and nutrient stocks in long-time coppice-managed forests, *Journal of Environmental Management*, Volume 330, 117181, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117181>.

Crawford, C.B., Quinn, B., 2016. Microplastic pollutants. *Microplastic Pollut* 1–315. <https://doi.org/10.1016/c2015-0-04315-5>.

Dai, H., Gao, J., Li, D., Wang, Z., Zhao, Y., Cui, Y., 2022. Polyvinyl chloride microplastics changed risks of antibiotic resistance genes propagation by enhancing the removal of triclosan in partial denitrification systems with different carbon source. *Chem. Eng. J.* 429, 132465.

Duis, K., Coors, A., 2016. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environ. Sci. Eur.* 28, 1–25. <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0069-y>.

Elser, J.J., Acquisti, C., Kumar, S., 2011. Stoichiogenomics: the evolutionary ecology of macromolecular elemental composition. *Trends Ecol. Evol.* 26, 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.10.006>.

Forster, S. M., 1990. The role of microorganisms in aggregate formation and soil stabilization: Types of aggregation. *Arid Soil Res. Rehabil.* 4, 85–98. doi: 10.1080/15324989009381236.

Horton, A.A., Walton, A., Spurgeon, D.J., Lahive, E., Svendsen, C., 2017. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Sci. Total Environ.* 586, 127–141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>.

Inhibitory effect of polyethylene microplastics on roxarsone degradation in soils, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 454, 131483, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131483>.

Kasirajan, S., Ngouajio, M., 2012. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 501–529. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0068-3>.

Kim, D., An, S., Kim, L., Byeon, Y.M., Lee, J., Choi, M.J., An, Y.J., 2022. Translocation and chronic effects of microplastics on Pea Plants (*Pisum sativum*) in coppercontaminated soil. *J. Hazard Mater.* 436, 129194.

Kim, S.W., Liang, Y., Zhao, T., and Rillig MC., 2021. Indirect Effects of Microplastic Contaminated Soils on Adjacent Soil Layers: Vertical Changes in Soil Physical Structure and Water Flow. *Front. Environ. Sci.* 9:681934. doi: 10.3389/fenvs.2021.681934

Lehmann, A., Fitschen, H., and Rillig M.C., MAR 2019, 2019-03-01, Abiotic and Biotic Factors Influencing the Effect of Microplastic on Soil Aggregation, *Soil System*, Volume 3 10.3390/soilsystems3010021, Article.

Lehmann, A., Zheng, W., and Rillig, M. C., (2017). Soil biota contributions to soil aggregation. *Nat. Ecol. Evol.* 1, 1828–1835. doi: 10.1038/s41559-017-0344-y

Li, Z., Yang, Y., Chen, X., He, Y., Bolan, N., Rinklebe, J., Lam, S.S., Peng, W., Sonne, C., 2023. A discussion of microplastics in soil and risks for ecosystems and food chains, *Chemosphere*, Volume 313, 137637, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137637>.

Liang Y, Lehmann A, Yang G, Leifheit EF and Rillig MC., 2021. Effects of Microplastic Fibers on Soil Aggregation and Enzyme Activities Are Organic Matter Dependent. *Front. Environ. Sci.* 9:650155. doi: 10.3389/fenvs.2021.650155

Ma, J., Wu, Y., Xu, C.L., Luo, Z., Yu, R., Hu, G., Yan, Y., 2023.

Ma, J., Xu, M., Wu, J., Yang, G., Zhang, X., Song, C., Long, L., Chen, C., Xu, C., Wang, Y., 2023. Effects of variable-sized polyethylene microplastics on soil chemical properties and functions and microbial communities in purple soil, *Science of The Total Environment*, Volume 868, 161642, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161642>.

Machado, A.A.D., Werner, K., Christiane, Z., Stefan, H., C, R.M., 2018. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biol.* 24, 1405.

MacHado, d. S., A.A.; Lau, C.W.; Till, J.; Kloas, W.; Lehmann, A.; Becker, R.; Rillig, M.C, 2018. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. *Environ. Sci. Technol.* 52, 9656–9665.

Monkul, M.M.; Özhan, H.O., 2021. Microplastic Contamination in Soils: A Review from Geotechnical Engineering View. *Polymers*, 13, 4129. <https://doi.org/10.3390/polym1323412>

Mooshammer, M., Wanek, W., Hämmerle, I., Fuchslueger, L., Hofhansl, F., Knoltsch, A., Schnecker, J., Takriti, M., Watzka, M., Wild, B., Keiblinger, K.M., Zechmeister, Boltensstern, S., Richter, A., 2014. Adjustment of microbial nitrogen use efficiency to carbon:nitrogen imbalances regulates soil nitrogen cycling. *Nat. Commun.* 5. <https://doi.org/10.1038/ncomms4694>.

Or, D., Keller, T., William H. Schlesinger., 2021. Natural and managed soil structure: On the fragile scaffolding for soil functioning, *Soil and Tillage Research*, Volume 208, 104912, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104912>.

Pires, L.F., Borges, J.A.R., Rosa, J.A., Cooper, M., Heck, R.J., Passoni, S., Roque, W.L., 2017. Soil structure changes induced by tillage systems. *Soil Tillage Res.* 165, 66–79. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.010>.

Qin, M., Chen, C., Song, B., Shen, M., Cao, W., Yang, H., Zeng, G., Gong, J., 2021. A review of biodegradable plastics to biodegradable microplastics: another ecological threat to soil environments? *J. Clean. Prod.* 312, 127816. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127816>.

Qiu, Y., Zhou, S., Zhang, C., Zhou, Y., Qin, W., 2022. Soil microplastic characteristics and the effects on soil properties and biota: A systematic review and meta-analysis, *Environmental Pollution*, Volume 313, 120183, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120183>.

Rillig, M.C., Ziersch, L. & Hempel, S. Microplastic transport in soil by earthworms. *Sci Rep* 7, 1362., 2017. <https://doi-org.ezproxy.cad.univpm.it/10.1038/s41598-017-01594-7>

Rowley, M.C., Grand, S., Verrecchia, E.P., 2018. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. *Biogeochemistry* 137 (1–2), 27–49.

Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., and Soil Survey Staff., 2012. Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.

Shah, T., Ali, A., Haider, G., Asad, M., Munsif, F., 2023. Microplastics alter soil enzyme activities and microbial community structure without negatively affecting plant growth in an agroecosystem, *Chemosphere*, Volume 322, 138188, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138188>.

Shi, J., Sun, Y., Wang, X., Wang, J., 2022b. Microplastics reduce soil microbial network complexity and ecological deterministic selection. *Environ. Microbiol.* 24, 2157–2169. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15955>.

Shi, J., Wang., Peng, Y., Zhang, Z., Fan, Z., Wang, J., Wang, X., 2023. Microbes drive metabolism, community diversity, and interactions in response to microplastic-induced nutrient imbalance, *Science of The Total Environment*, Volume 877,2023,162885, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.162885>

Steinmetz, Z., Wollmann, C., Schaefer, M., Buchmann, C., David, J., Troger, J., Munoz, K., Fror, O., Schaumann, G.E., 2016. Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Sci. Total Environ.* 550, 690–705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.153>.

Surendran, U., Jayakumar, M., Raja, P., Gopinath, G., Chellam, P.V., 2023. Microplastics in terrestrial ecosystem: Sources and migration in soil environment, *Chemosphere*, Volume 318, 137946, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137946>.

Tabone, M.D.; Cregg, J.J.; Beckman, E.J.; Landis, A.E., 2010. Sustainability Metrics: Life Cycle Assessment and Green Design in Polymers. *Environ. Sci. Technol.* 45, 8264–8269.

Tunali, M.M., Myronyuk, O., Tunali, M. *et al.*, 2022. Microplastic Abundance in Human-Influenced Soils in Recreational, Residential, and Industrial Areas. *Water Air Soil Pollut* **233**, 433. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05901-5>

Walker, D.I., Baker-Austin, C., Smith, A., Thorpe, K., Bakir, A., Galloway, T., Ganther, S., Gaze, W., Lewis, C., Quill, E., Russel, J., 2022. A critical review of microbiological colonisation of nano-and microplastics (NMP) and their significance to the food chain 1–184.

Wang, Z., Li, W., Li, W., Yang, W., Jing, S., 2023. Effects of microplastics on the water characteristic curve of soils with different textures, *Chemosphere*, Volume 317, 137762, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137762>.

Yudina, A., Kuzyakov, Y., 2023. Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores, *Geoderma*, Volume 434, 116478, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116478>.

Zhao, Z., Zhao, K., Zhang, T., Xu, Y., Chen, R., Xue, S., Liu, M., Tang, D., Yang, X., Giessen, V., 2022. Irrigation-facilitated low-density polyethylene microplastic vertical transport along soil profile: An empirical model developed by column experiment, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 247, 114232, ISSN 0147-6513, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114232>.