



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI E AMBIENTALI

**MICROPLASTICHE E AMBIENTE:
DINAMICHE, INTERAZIONI ED EFFETTI IN
SISTEMI FORESTALI E AGRARI**

**MICROPLASTICS AND THE ENVIRONMENT: DYNAMICS, INTERACTIONS,
AND EFFECTS IN FORESTRY AND AGRICULTURAL SYSTEMS**

TIPO TESI: compilativa

**Studente:
GIULIA CANCELLIERI**

**Relatore:
PROF. CRISTIANO CASUCCI**

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

A chi mi ha sempre
supportato
e non ha smesso di
crederci

INDICE GENERALE

➤ INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI.....	pag.6
➤ CAPITOLO 1: INTERAZIONE MICROPLASTICHE SUI SUOLI FORESTALI.....	pag.8
1.1 <i>Il suolo e l'interfaccia tra le sfere terrestri</i>	pag.8
1.2 <i>Architettura del suolo e orizzonti pedologici</i>	pag.12
1.2.1 <i>Migrazione ed estrazione delle microplastiche nel suolo</i>	pag.14
1.3 <i>Effetti ecotossicologici sugli ecosistemi forestali</i>	pag.16
1.4 <i>Effetti di polipropilene e stirene sulla nutrizione, morfologia e attività enzimatica di Fagus Sylvatica L.</i>	pag.16
1.4.1 <i>Analisi di laboratorio</i>	pag.18
➤ CAPITOLO 2: INTERAZIONI MICROPLASTICHE E SUOLI AGRICOLI.....	pag.21
2.1 <i>Origine microplastiche nei suoli agricoli</i>	pag.21
2.2 <i>Microplastiche nei biofertilizzanti liquidi</i>	pag.23
2.3 <i>Ferite radicali</i>	pag.24
➤ CAPITOLO 3: MICROPLASTICHE LUNGO LA CATENA ALIMENTARE.....	pag.28
3.1 <i>Microplastiche nei bovini</i>	pag.29
3.2 <i>Alterazioni biomolecolari, tossicità sistemica e qualità della carne</i>	pag.31
➤ CAPITOLO 4: IMPLICAZIONI PATOLOGICHE SULLA SALUTE UMANA.....	pag.36
4.1 <i>Esposizione cutanea e assorbimento intestinale</i>	pag.36
4.2 <i>Ruolo mediatore dell'asse intestino-pelle e le risposte sistemiche</i>	pag.39
➤ CONCLUSIONI.....	pag.42
➤ BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	pag.46

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1.1: Illustrazione orizzonti pedogenetici.....	14
Figura 2.1: Sezioni trasversali della base della radice e dello stelo del mais dopo un mese di esposizione.....	25
Figura 2.2: Analisi microscopica della base radicale in sezione trasversale.....	26
Figura 2.3 Micro(nano) plastiche negli alimenti di origine vegetale.....	27
Figura 4.1: Microplastiche e alterazione della barriera: vie di esposizione e penetrazione.....	38
Figura 4.2: Particelle plastiche negli alimenti.....	41

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

DDT	Dicloro-Difenil-Tricloroetano, pesticida persistente
PFAS.	Sostanze perfluoroalchiliche, composti chimici artificiali
IPA.	Idrocarburi Policiclici Aromatici
MP.	Microplastiche
ISPRA.	Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale
C.	Carbonio
N.	Azoto
CO ₂ .	Anidride carbonica
ROS.	Specie reattiva dell'ossigeno

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Le foreste e i suoli agrari rappresentano ecosistemi fondamentali per la regolazione del clima, nel ciclo dei nutrienti, nel favorire la biodiversità, produrre ossigeno ed assorbire anidride carbonica attraverso la fotosintesi e la protezione del suolo. Tuttavia, negli ultimi decenni tali ecosistemi sono stati esposti a nuove minacce di contaminazione ambientale, tra cui l'inquinamento da microplastiche.

Le materie plastiche sono polimeri sintetici ad alto peso molecolare, utilizzati per la loro economicità, leggerezza e durabilità, impiegati in numerosi settori produttivi.

La degradazione di grandi prodotti plastici (macroplastiche) attraverso agenti atmosferici, fotodegradazione UV e abrasione meccanica, porta la formazione di microplastiche (MP), particelle con dimensioni inferiori a 5 millimetri; sono inquinanti persistenti che possono rimanere nell'ambiente per 450 anni.

Le microplastiche sono tutte quelle particelle di materiale plastico che si possono suddividere in due tipologie a seconda della fonte di inquinamento:

- Microplastiche primarie: Particelle di origine plastica che vengono rilasciate. Tra le principali fonti di microplastiche primarie, il lavaggio di indumenti prodotti con fibre sintetiche, incidendo per il 35%, ne consegue poi l'usura degli pneumatici responsabili del 28%, mentre a quota minore si hanno i prodotti cosmetici.
- Microplastiche secondarie: frammenti di materiale plastico derivanti dalla disgregazione progressiva di rifiuti di dimensioni maggiori.

Negli ultimi sette decenni la produzione di tali materiali è aumentata in maniera drastica, poiché sono state rilasciate nell'ambiente in qualsiasi luogo e in qualsiasi fase della catena di valore del prodotto. I principali processi di rilascio includono: dispersione di rifiuti, smaltimento di quest'ultimi, utilizzazione della plastica nei materiali da costruzione e nelle vernici, plastiche agricole e fertilizzanti.

Le particelle delle microplastiche si trovano ormai a livello globale la loro concentrazione in ambienti marini variano da 0,002 a 62,50 particelle, mentre nei sistemi terrestri il livello di contaminazione va da 4 a 23 volte superiore.

L'impatto delle microplastiche nei suoli forestali e agrari altera le proprietà fisiche, chimiche e microbiologiche del terreno, interferendo con i cicli biogeochimici e con la salute delle colture. I contaminanti si possono trasferire lungo la catena alimentare, raggiungendo gli animali allevati, come i bovini, attraverso i mangimi contaminati e attività agricole che utilizzano materiale plastico per le varie tecniche e lavorazioni del terreno.

Lo scopo della tesi è quello di presentare il ruolo delle microplastiche, andando ad approfondire le fonti di contaminazione, gli effetti e il trasferimento lungo la catena alimentare.

Capitolo 1

INTERAZIONI MICROPLASTICHE SUI SUOLI FORESTALI

1.1 Il suolo e l'interfaccia tra le sfere terrestri

Per suolo si intende lo strato superiore della superficie terrestre costituito da vari componenti minerali, organici, acqua, aria e organismi viventi. Secondo gli orientamenti dell'ISPRA, il suolo va ad agire come un motore dei servizi ecosistemici. Le sue funzioni principali sono:

- Regolazione del ciclo idrogeologico: filtra e purifica l'acqua piovana, immagazzinandola per renderla disponibile per la vegetazione.
- Stoccaggio del carbonio: in particolare, i suoli forestali, che sono i più grandi serbatoi di carbonio organico del pianeta, vanno a contribuire la mitigazione dei cambiamenti climatici.
- Habitat per la biodiversità: va ad ospitare una grandissima comunità di organismi (batteri, funghi, micro e macro-fauna) che conducono ai processi di decomposizione e al riciclo dei nutrienti.
- Filtro ambientale: ha la capacità di trasformare e trattenere le sostanze inquinanti. Funzione che ad oggi è messa a dura prova dalla presenza di contaminanti come le microplastiche.

Il suolo è quell'ambiente che mette in comunicazione atmosfera, biosfera, litosfera e idrosfera, affinché possano interagire simultaneamente. Le sostanze chimiche si muovono in maniera ciclica negli ecosistemi passando da un ambiente biotico, ad uno abiotico. Atmosfera, litosfera e biosfera interagiscono per formare un sistema di componenti che si basano su equilibri chimico-fisico-biologici. Il ciclo biogeochimico è un percorso eseguito da un elemento chimico all'interno della biosfera, e si distinguono in:

- Ciclo dell'acqua
- Ciclo dell'azoto
- Ciclo del carbonio
- Ciclo del fosforo

- Ciclo dello zolfo

La litosfera è principalmente costituita da minerali e rocce, i componenti dell'idrosfera e dell'atmosfera operano in maniera continua per il modellamento superficiale della litosfera. L'idrosfera è l'insieme delle acque superficiali (oceani, laghi, fiumi, ghiacciai) e delle acque sotterranee, ne fa parte anche la criosfera parte dell'acqua allo stato solido. L'atmosfera è l'involucro aeriforme, e la biosfera comprende tutti gli organismi che vivono sulle terre emerse nelle acque e nell'atmosfera.

Il risultato è un equilibrio dinamico che comprende continui scambi fra interno del pianeta e superficie terrestre.

I suoli sono i principali serbatoi (sink) per le microplastiche, che ad elevate concentrazioni arrivano nei terreni di tutto il mondo, influenzando le proprietà chimico-fisiche del terreno, i processi biogeochimici, i microrganismi e di conseguenza la resa delle piante e i processi di trasformazione chimica come il ciclo del carbonio o il ciclo dell'azoto.

La deposizione atmosferica è definita come la principale fonte di microplastiche per gli ecosistemi forestali. A differenza dei suoli agricoli e urbani dove l'ingresso delle particelle plastiche è prettamente legato a effetti antropici diretti.

Le foreste applicano un effetto filtro e intrappolano particolato atmosferico come metalli in tracce e i composti organici (DDT, PFAS, IPA), le chiome hanno la capacità di intercettare le particelle delle microplastiche, le frazioni più fini, che aderiscono alla superficie della foglia. Il trasferimento dei polimeri sintetici dall'atmosfera al suolo avviene tramite due meccanismi principali:

- Il percolamento (throughfall): l'acqua piovana, attraverso la chioma va a lisciviare le microplastiche accumulate sulle foglie trasportandole verso il basso.
- La caduta della lettiera(litterfall): Il rilascio stagionale di biomassa fogliare, va a depositare il contaminante direttamente sulla superficie del suolo.

Ciclo del carbonio

Il carbonio (C) circola sotto forma di anidride carbonica (CO₂) attraverso tutti i principali serbatoi presenti sulla terra, atmosfera, terraferma, oceani, acque dolci, rocce e i sedimenti nonché la biomassa. Tutti i cicli dei nutrienti sono collegati al ciclo del carbonio; tuttavia, il collegamento tra il ciclo del carbonio e dell'azoto è più rilevante poiché C e N costituiscono la porzione preponderante degli organismi viventi.

Il ciclo del carbonio è suddiviso:

- Ciclo biologico: riguarda il trasferimento del carbonio tra organismi viventi e ambiente attraverso processi quali, fotosintesi, respirazione e decomposizione.
- Ciclo geochimico: coinvolge scambi di carbonio tra litosfera, atmosfera, idrosfera e biosfera.

Il ruolo fondamentale viene svolto dall'anidride carbonica (CO_2), principale forma ossidata del carbonio presente nell'atmosfera.

Negli organismi viventi il carbonio organico si trova prevalentemente in forma ridotta, attraverso i processi respiratori, viene nuovamente ossidato, ritornando nell'atmosfera sotto forma di anidride carbonica.

Il ciclo del carbonio è pertanto associato a numerose reazioni di ossidoriduzione (redox), nelle quali avvengono trasferimenti di elettroni e trasformazioni di energia chimica.

Dal punto di vista metabolico, la degradazione dei composti organici avviene attraverso differenti processi cellulari.

In condizioni anaerobiche, la produzione di energia è legata alla glicolisi, mentre in condizioni aerobiche il metabolismo prosegue attraversando il ciclo di Krebs e la catena di trasporto degli elettroni, consentendo una produzione energetica molto più efficiente.

Nelle piante, la fissazione del carbonio atmosferico avviene mediante la fotosintesi clorofilliana, un processo endoergonico, in quanto richiede energia luminosa per trasformare composti inorganici in sostanza organica.

La fotosintesi viene svolta all'interno dei cloroplasti e comprende una fase luminosa e una fase oscura, rappresentata dal ciclo di Calvin.

Nella fase luminosa, l'energia della radiazione solare viene convertita in energia chimica sotto forma di ATP e potere riducente ($\text{NADPH} + \text{H}^+$), indispensabili per la sintesi di composti organici nel ciclo di Calvin. In questa fase avviene anche la fotolisi dell'acqua, durante la quale le molecole di acqua vengono ossidate con liberazione di ossigeno molecolare (O_2), protoni ed elettroni.

Il trasferimento dell'energia luminosa in energia chimica avviene mediante il flusso degli elettroni attraverso la membrana tilacoidale. Questo processo consente la formazione di un gradiente protonico necessario alla sintesi di ATP.

I fotosistemi, fondamentali nella fase luminosa della fotosintesi, sono dei complessi proteici, costituiti da clorofilla a e b associate a catene polipeptidiche. La capacità della clorofilla di assorbire la luce dipende dalla presenza di un sistema di doppi legami coniugati, i cui elettroni possono essere eccitati dalla radiazione elettromagnetica.

L'energia e il potere riducente prodotti durante la fase luminosa sono essenziali per sostenere il ciclo di Calvin, responsabile della fissazione dell'anidride carbonica atmosferica e della sintesi dei carboidrati necessari al metabolismo vegetale.

Ciclo dell'azoto

Il ciclo dell'azoto comprende i processi attraverso cui l'azoto viene trasformato nel suolo in forme assimilabili dagli organismi vegetali e microbici. La degradazione della sostanza organica proveniente dai residui vegetali e animali prende il nome di mineralizzazione ed è operata da batteri e funghi del suolo, con la produzione di anidride carbonica (CO_2) e acqua. Quando la sostanza organica contiene azoto, il processo viene definito ammonificazione, poiché comporta la formazione di ammoniaca (NH_3).

La prima fase dell'ammonificazione è rappresentata dalla proteolisi, durante la quale le proteine vengono idrolizzate in amminoacidi grazie all'azione di enzimi proteolitici secreti dai microrganismi del suolo. Gli amminoacidi vengono successivamente coinvolti in reazioni di transaminazione e deaminazione, con produzione di ammoniaca e formazione di composti intermedi che possono entrare nel ciclo di Krebs.

L'ammoniaca e lo ione ammonio possono essere successivamente trasformati tramite nitrificazione, processo microbiologico che consiste nell'ossidazione dell'azoto ammoniacale prima a nitrito (NO_2^-) e poi a nitrato (NO_3^-).

La nitrificazione avviene in due fasi:

- 1) Nitrosazione: svolta dai batteri *Nitrosomonas*
- 2) Nitratazione: mediata dai batteri *Nitrobacter*

Questi microrganismi hanno una maggiore efficienza in suoli neutri o alcalini ricchi di carbonati, mentre nei suoli forestali generalmente più acidi, parte del processo può essere sostenuta da funghi del suolo con efficienze inferiori.

Le piante possono assimilare l'azoto sia sotto forma di NH_4^+ sia di NO_3^- . Dal punto di vista metabolico viene utilizzato più rapidamente l'ammonio.

Un ulteriore processo del ciclo è la denitrificazione, che consiste nella riduzione del nitrato fino all'azoto molecolare gassoso (N_2), passando attraverso forme intermedie come nitrito (NO_2) e protossido di azoto (N_2O). Questo processo viene svolto da batteri in condizione di scarsa ossigenazione del suolo, determinando il ritorno dell'azoto all'atmosfera, chiudendo il ciclo biogeochimico dell'elemento.

1.2 Architettura del suolo e orizzonti pedologici

Il suolo è organizzato in orizzonti, strati subparalleli che si differenziano dal materiale parentale dal quale si è originato. Il profilo del suolo ci consente di identificare una stratificazione più o meno omogenea. Il singolo strato prende il nome di orizzonte, porzione data da omogeneità morfologica, la sequenza non è casuale ma segue uno schema evolutivo ben preciso, identificati con lettera maiuscola.

Orizzonte O: è un orizzonte organico costituito da residui vegetali come foglie, parti legnose, aghi, radici, e animali freschi o degradati. È uno strato molto attivo a livello di meso e microfauna. In questo orizzonte avvengono processi di decomposizione della sostanza organica che portano alla formazione dell'humus.

L'humus ha la capacità di influire sulla densità apparente del suolo e contribuire alla sua ritenzione di umidità e sostanza nutritive, è costituito prevalentemente da carbonio, ossigeno, idrogeno e azoto. La struttura dell'humus comprende componenti alifatiche e aromatiche, ricche in particolare di polifenoli condensati, oltre che a differenti forme di azoto, presenti come amminoacidi e composti eterociclici.

Gli orizzonti superficiali sono quelli organici e si dividono in:

- OL: costituito da residui vegetali, la cui forma originaria è ancora riconoscibile. Le microplastiche sono appena depositate e presentano concentrazioni iniziale medie.
- OF: si forma per opera di artropodi che vanno a sminuzzare il materiale vegetale in piccoli frammenti ancora riconoscibili, forma la sostanza organica fine.
- OH: avanzato stadio di decomposizione della sostanza organica. Massima concentrazione di microplastiche che si integrano nella matrice organica durante i processi di turnover biogeochimico e umificazione.

L'orizzonte OH è caratterizzato da un contenuto di sostanza organica superiore al 70%, costituito da materiale fortemente umificato. Gli orizzonti superficiali hanno la possibilità di identificare differenti tipologie di humus, associate a specifiche condizioni chimico-fisiche del suolo. Nelle forme più evolute appartiene il MULL, caratterizzato da una rapida degradazione della sostanza organica e dall'assenza o ridotta presenza dell'orizzonte OH, indice di intensità microbica e di elevata fertilità del suolo. Nell'EUMULL, il processo di decomposizione è particolarmente rapido, il pH è prossimo alla neutralità e la saturazione in basi si mantiene

elevata. Nel MESOMULL, il pH assume valori leggermente acidi, e sono frequenti le muffe bianche, responsabili della scheletrizzazione delle foglie. Nell'OLIGOMULL, la decomposizione della sostanza organica risulta rallentata, con valori di pH compresi tra 5-6 e un improvviso impoverimento della fertilità. Infine, nel DYSMULL, gli orizzonti superficiali risultano continui e differenziati, con un rallentamento dei processi di degradazione.

Una forma intermedia è rappresentata dal MODER, caratterizzato dalla giustapposizione tra componente organica e frazione minerale, che rimangono distinguibili.

Dopo gli orizzonti superficiali, il suolo è caratterizzato da differenti orizzonti minerali, ciascuno con proprie proprietà fisiche, chimiche e biologiche che influenzano la dinamica della sostanza organica e dei contaminanti ambientali, incluse le microplastiche

- Orizzonte A: costituito principalmente da frazione minerale ma arricchito di sostanza organica. Viene definito come orizzonte organo-minerale.
- Orizzonte E: eluviale, poiché ne conseguono processi di eluviazione (lisciviazione argille e ossidi di ferro)
- Orizzonte B: illuviale, accumulo di argilla, ossidi di ferro, alluminio e carbonati di calcio. C'è una consistente presenza di radici.
- Orizzonte C: risulta un orizzonte molto debole può anche essere considerato materiale parentale e non è coinvolto nei processi biologici.
- Orizzonte r: roccia madre su cui si è sviluppato il suolo soprastante.

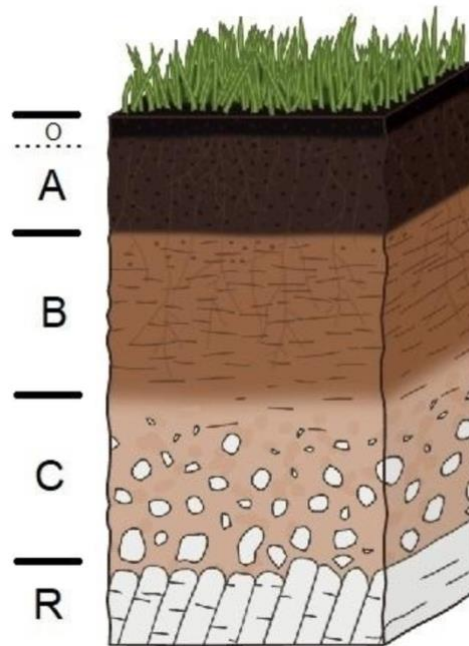


Figura 1.1: Illustrazione degli orizzonti pedogenetici. *Modificato da darapri.it*

1.2.1 Migrazione ed estrazione delle microplastiche nel suolo

Il passaggio delle microplastiche attraverso gli orizzonti è regolato da:

1. Decomposizione della sostanza organica: la degradazione della lettiera rilascia le plastiche che sono intrappolate.
2. Bioturbazione: l'attività della fauna del suolo va a mescolare meccanicamente gli strati, trasportano le particelle dalla superficie agli orizzonti minerali.
3. Lisciviazione e porosità: Gravità e movimento dell'acqua attraverso i macro-pori del suolo consente alle particelle più piccole di migrare più profondamente nel suolo.

Esiste un protocollo specifico di estrazione delle microplastiche per separarlo dalla matrice organica (foglie e lettiera decomposta)

1. Pre- trattamento: Soluzione di pirofosfato tetrasodico, agente disperdente, che consente di distaccare le microplastiche dalle superfici fogliari.
2. Separazione densimetrica (suoli minerali): Bromuro di sodio per consentire il galleggiamento delle plastiche.
3. Estrazione a solvente binario: per campioni organici, si utilizza una miscela di etanolo (80%) e acqua (20%) per superare idrofobicità della materia organica e liberare le microplastiche.
4. Purificazione chimica: trattamento a base di soda, urea e tiourea e congelamento a -16°C per degradare la cellulosa e modificare la chitina. Reazione di Fenton attraverso la digestione della materia organica residua in un bagno di ghiaccio e in fine la filtrazione finale per analisi successivi.

È stato appurato che le foreste di conifere catturano più microplastiche atmosferiche rispetto alle latifoglie, ciò è dovuto dalla maggiore rugosità superficiale e gli effetti adesivi mediati dalle cere. Con l'esposizione ad additivi lisciviati come il D-ftalato, avviene un aumento di molecole instabili come, per esempio, il ROS (specie reattive dell'ossigeno), che danneggiano le cellule; tutto questo avviene a livello delle radici della pianta dove i mitocondri vengono danneggiati bloccando la crescita delle conifere. Le zone di cuscinetto forestale nonché aree di barriera naturale sono influenzati dalle microplastiche provenienti da sistemi antropogeni adiacenti. A ciò contribuiscono le matrici agricole che ogni anno, attraverso il degrado di film pacciamanti in polietilene a bassa densità, fertilizzanti arricchiti con biosolidi e con l'irrigazione delle acque reflue, inducono alterazioni pedologiche, compresa la riduzione della conducibilità idraulica satura e la diminuzione del pH negli orizzonti superficiali del suolo.

1.3 Effetti Ecotossicologici sugli ecosistemi forestali

Le microplastiche compromettono i sistemi forestali causando:

- Riduzione della macro-porosità (15-30%)
- Riduzione della capacità di ritenzione idrica (18-25%)

Le microplastiche occupano i vari spazi porosi del suolo, alterandone la struttura e riducendo la connettività dei pori. La loro natura idrofobica diminuisce l'affinità del suolo per l'acqua. L'esposizione a elevate concentrazioni va a sopprimere le funzioni microbiche di batteri azotofissatori, con riduzione di processi di mineralizzazione dell'azoto. I funghi micorrizici hanno mostrato una diminuzione del numero di ife che colonizzano le radici, andando a compromettere l'assorbimento del fosforo.

Un altro effetto che comporta un aumento dei rischi è il trasferimento trofico, poiché gli uccelli, per esempio, accumulano le particelle nei ventrigli (parte dello stomaco funzionale per la triturazione del cibo) e i consumatori terziari ingeriscono le microplastiche ricche di DDT. I suoli che sono contaminati si disseccano molto più velocemente durante i periodi di siccità. Le microplastiche abbassano le temperature di accensione della lignocellulosa, rendendo le piante facilmente incendiabili, andando ad accelerare gli incendi della chioma. Durante la combustione, viene rilasciato acrilonitrile, sostanza altamente tossica.

1.4 Effetti di polipropilene e stirene sulla nutrizione, morfologia e attività enzimatica di *Fagus sylvatica* L.

Come abbiamo visto, l'accumulo di microplastiche nei suoli rappresenta una minaccia crescente per gli ecosistemi terrestri, a causa della loro resistenza alla degradazione.

Uno studio effettuato da un gruppo di ricercatori polacchi provenienti da istituzioni accademiche e forestali di Cracovia si è concentrato sulla valutazione dell'impatto di vari tipi e dosi di microplastiche sulla crescita di semenzali di faggio.

In particolare, lo studio ha valutato l'impatto a breve termine, ossia su una singola stagione vegetativa, di diverse dosi di microplastiche sullo stato nutrizionale, sulla morfologia

dell'apparato radicale e fogliare di semenzali di faggio (*Fagus sylvatica* L.), e sull'attività extracellulare del substrato di crescita organica.

La sperimentazione è stata condotta in un vivaio forestale nello stretto di Wisla, nella Polonia meridionale, monitorando lo sviluppo dei semenzali dal 15 marzo al 30 settembre.

Sono state testate differenti varianti di substrato:

- Variante di controllo (C): Costituita da un substrato standard a base di torba impiegato nei vivai forestali.
- Fattore tipologia e dose di microplastiche: Al substrato di crescita sono stati aggiunti granuli di Polipropilene (PP) o di Stirene (ST) con diametro di 4mm.

La scelta di utilizzare un diametro di 4 mm rispecchia la reale contaminazione da macro- e microplastiche riscontrabile nei substrati alternativi alla torba ottenuti dal riciclo di residui organici.

Durante questo studio non è stata applicata la fertilizzazione, ma l'irrigazione è stata uniforme per tutti i trattamenti. Terminato il ciclo vegetativo, le piante e i relativi substrati sono stati campionati per le indagini biochimiche, morfologiche e di spettroscopia infrarossa (FTIR).

L'utilizzazione dei granulati plastici ha comportato un'alterazione significativa dei tessuti vegetali.

- Effetti del tipo di polimero: La tipologia di microplastica ha modificato l'assorbimento di azoto, fosforo, calcio e magnesio modificando i rapporti molecolari di azoto e fosforo e di calcio e magnesio.
- Effetto della dose: La quantità di microplastica che è stata inserita nel terreno ha avuto un ruolo primario nell'accumulo di alluminio, e di conseguenza, nell'alterazione dei rapporti di sensibilità ecotossicologica.

Le microplastiche hanno negativamente influenzato lo sviluppo dell'apparato fotosintetico epigeo. L'area fogliare complessiva è risultata più ampia e sviluppata nei semenzali del gruppo di controllo rispetto alle altre varianti contaminate con il propilene e con stirene.

L'impatto plastico si è manifestato a livello del diametro radicale. I semenzali che sono cresciuti nel substrato di controllo, hanno sviluppato delle radici spesse e robuste rispetto alle

varianti soggette a microplastiche, inoltre, la presenza di quest'ultime ha comportato una depressione delle funzionalità biologica del suolo, compromettendo l'attività metabolica extracellulare dei microrganismi della rizosfera.

Per gli enzimi B-D-cellobiosidasi, legati alla degradazione della cellulosa e solfatasi, fondamentale per il ciclo dello zolfo, l'attività misurata nel substrato di controllo è risultata due volte superiore rispetto a quella registrata in tutte le varianti contenenti microplastiche.

Anche l'attività dell'enzima B-glucosidasi ha mostrato un calo significativo, confermando un'inibizione nel controllo rispetto ai trattamenti addizionati con i polimeri artificiali.

1.4.1 Analisi di laboratorio

Al fine di determinare la concentrazione di macro- e microelementi, i campioni di *Fagus sylvatica* L. sono stati suddivisi nei rispettivi organi: foglie, germogli e radici. Il materiale vegetale è stato sottoposto a mineralizzazione acida mediante una miscela di acido nitrico e acido perclorico per degradare la matrice organica. Successivamente, le soluzioni ottenute sono state analizzate tramite spettrometria di emissione ottica a plasma accoppiato induttivamente (ICP-OES). Questa tecnica ha permesso di valutare in quali organi si accumulino i nutrienti ed evidenziare eventuali alterazioni nell'assorbimento di elementi essenziali (quali calcio, magnesio, potassio, ferro e zinco) indotte dalla presenza di microplastiche nel substrato.

Il contenuto totale di carbonio (C) e azoto (N) è stato invece determinato tramite analizzatore elementare. A partire da tali dati, sono stati calcolati i rapporti stechiometrici carbonio/azoto (C/N), carbonio/fosforo (C/P) e azoto/fosforo (N/P), utilizzati come indicatori dello stato nutrizionale e metabolico delle piante. Eventuali deviazioni significative in questi rapporti evidenzerebbero uno stato di stress fisiologico causato dai contaminanti plastici.

Analisi dell'attività enzimatica del substrato

Per valutare gli effetti delle microplastiche sulle proprietà biologiche del suolo, è stata misurata l'attività di sei enzimi extracellulari coinvolti nei principali cicli biogeochimici (carbonio, azoto, fosforo e zolfo). L'analisi è stata condotta tramite metodo fluorimetrico, una tecnica ad elevata sensibilità che quantifica l'attività enzimatica misurando la fluorescenza emessa

durante le reazioni. Tali enzimi fungono da bioindicatori della funzionalità microbiologica del suolo, permettendo di comprendere se le microplastiche abbiano alterato le comunità microbiche e i processi di decomposizione della sostanza organica. Prima dell'analisi, tutti i campioni sono stati conservati alla temperatura di 4 °C.

Analisi statistica

L'insieme dei dati raccolti ha permesso di valutare l'impatto delle microplastiche sia sullo stato nutrizionale delle piante sia sulla funzionalità biologica del substrato. Per confrontare le risposte delle plantule cresciute sui differenti trattamenti ed evidenziare il ruolo della tipologia e della quantità di polimero, è stata impiegata un'analisi della varianza a due vie (ANOVA a due vie). Le elaborazioni statistiche e i test di significatività sono stati eseguiti in ambiente RStudio tramite il linguaggio di programmazione R.

Risultati

Risposta dello spettro nutrizionale e parametri morfologici fogliari

L'analisi fogliare ha mostrato un contenuto significativo di nutrienti in tutte le tesi, indipendentemente dal substrato di crescita. Tuttavia, la presenza di microplastiche ha influenzato l'accumulo di azoto, calcio e potassio, mentre la dose somministrata nel substrato ha inciso in modo specifico sul contenuto di alluminio.

A livello macroscopico, le foglie hanno mostrato evidenti alterazioni morfologiche legate al trattamento: le piante del gruppo di controllo presentavano un'area fogliare significativamente maggiore e lamine più ampie rispetto ai semenzali coltivati in presenza di stirene e polipropilene, i quali hanno sviluppato foglie di dimensioni ridotte.

Rapporti stechiometrici

I rapporti stechiometrici hanno evidenziato risposte differenti a seconda del parametro considerato:

- Rapporto Carbonio/Fosforo (C/P): I dati hanno mostrato un'interazione statisticamente significativa tra l'organo della plantula analizzato, la tipologia di microplastica e la sua concentrazione nel suolo.
- Rapporto Azoto/Fosforo (N/P): Si è registrato un incremento del rapporto a livello fogliare nei trattamenti ad elevate concentrazioni di microplastiche. I valori massimi assoluti sono stati tuttavia riscontrati nei campioni appartenenti alla variante di controllo, a prescindere dall'organo considerato.

- Rapporto Carbonio/Azoto (C/N): La quantità di microplastiche nel terreno non ha influenzato in modo significativo questo specifico parametro.

Sviluppo e morfologia dell'apparato radicale

L'analisi biometrica del sistema ipogeo ha evidenziato che la presenza di microplastiche non ha alterato in modo macroscopico lo sviluppo generale dell'apparato radicale durante il periodo sperimentale. Non sono state infatti rilevate differenze statisticamente significative per la maggior parte dei parametri analizzati, quali la lunghezza totale, l'area radicale, la superficie radicale specifica (SRA), la densità del tessuto radicale (RTD) e la lunghezza radicale specifica (SRL).

Tuttavia, è stata riscontrata una variazione significativa nello spessore delle radici: le piante di controllo (cresciute su substrato privo di contaminanti) mostravano radici significativamente più spesse rispetto a quelle esposte ai trattamenti con polipropilene. Tale evidenza suggerisce che, pur non compromettendo l'estensione complessiva dell'apparato, le microplastiche influenzino la morfologia fine delle radici rendendole più sottili, con potenziali ripercussioni sulla loro capacità di conduzione e di assorbimento idrico-nutrizionale.

Attività enzimatica del substrato

Gli enzimi extracellulari hanno confermato la loro efficacia come indicatori della salute microbiologica del terreno e dei processi di degradazione della sostanza organica. I campioni appartenenti alla variante di controllo hanno espresso una superiore attività enzimatica rispetto a quelli addizionati con particelle plastiche. Questo decremento suggerisce che le microplastiche esercitino un effetto di interferenza sul microbiota del suolo, rallentando l'efficienza dei processi catalitici strettamente legati ai cicli biogeochimici dei nutrienti.

Capitolo 2

INTERAZIONI MICROPLASTICHE E SUOLI AGRICOLI

I suoli agricoli sono come un vero e proprio deposito critico, con concentrazioni da 4 a 23 volte superiori a quelle marine.

La concentrazione di microplastiche nei terreni agricoli varia da meno di 1 a oltre 530,000 particelle per chilogrammo di terreno secco.

Tale contaminazione minaccia e danneggia la salute del suolo, riducendo le rese del raccolto e abbassando notevolmente la produttività agricola.

In agricoltura si utilizzano annualmente circa 12,4 milioni di tonnellate di plastica e i dati indicano che tra il 60% e l'80% della plastica agricola totale entra in contatto diretto con il suolo.

2.1 Origine microplastiche nei suoli agricoli

Esistono diverse vie di ingresso delle microplastiche negli agrosistemi tra cui:

- Film per pacciamatura: si intende un film in polietilene a bassa densità che viene utilizzato per aumentare la temperatura e l'umidità del suolo. Inoltre, contribuiscono al controllo delle infestanti, alla regolazione della temperatura e protezione dei frutti. Una rimozione incompleta può causare la frammentazione in microplastiche. Si è stimato che il 25-33% dei residui possa permanere nel terreno.
- Fanghi di depurazione (biosolidi): Gli impianti di trattamento delle acque reflue hanno la capacità di catturare grandissime quantità di microplastiche. Quando questi fanghi vengono applicati come dei fertilizzanti organici, rilasciano milioni di particelle, in quantità maggiore sotto forma di microfibre, direttamente nei campi.
- Fertilizzanti a rilascio controllato: I fertilizzanti di oggi utilizzano rivestimenti polimerici (una specie di "pellicola") per modulare il rilascio di nutrienti, una volta

che il contenuto è stato degradato, il guscio plastico si andrà a scomporre in microplastiche.

- Acque di irrigazione: L'irrigazione con le acque reflue trattate o acque superficiali contaminate favoriscono il trasporto di microplastiche (microsfere e fibre) nel terreno.
- Deposizione atmosferica: Le particelle leggere possono essere trasportate dal vento su lunghe distanze per poi depositarsi sui suoli attraverso precipitazioni atmosferiche.

Caratteristiche e distribuzione delle microplastiche

I polimeri più frequentemente rilevati nei suoli agricoli sono:

- Polietilene (PE): Utilizzato per film plastici.
- Polipropilene (PP): utilizzato nei sacchi e contenitori e materiale per l'agricoltura.
- Polivinilcloruro (PVC): presente nei sistemi di irrigazione.
- Poliestere (PS): utilizzato negli imballaggi e materiali isolanti.

Le forme più comuni nei terreni agricoli sono fibre, frammenti, film e pellet. La maggior parte delle particelle rilevate ha una dimensione inferiore a 0,5 millimetri.

Nei terreni che sono destinati alla coltivazione del riso (suoli risicoli), caratterizzati da periodici allagamenti, sono state riscontrate concentrazioni di microplastiche comprese tra 16 a 10.300 particelle per kg di suolo secco.

Impatto sul suolo e i microrganismi

Le microplastiche alterano la densità apparente, la porosità e la ritenzione idrica del suolo, influenzando negativamente l'attività degli enzimi fosfatasi (ciclo del fosforo) e dell'ureasi (ciclo dell'azoto). La presenza di particelle di microplastiche può ridurre la biomassa microbica fino al 15 % e può inibire batteri essenziali, come gli azotofissatori, compromettendo la fissazione dell'azoto e la degradazione della sostanza organica.

Una caratteristica delle microplastiche nei suoli agricoli è che sono notevolmente idrofobiche, assorbono molto facilmente sulla loro superficie altri contaminanti come:

- Metalli pesanti: Piombo, Cadmio, Rame e Zinco
- Inquinanti organici: Pesticidi, antibiotici e idrocarburi policiclici aromatici, portando un aumento della tossicità del suolo

Le microplastiche possono ostruire i pori del suolo interferendo con lo sviluppo delle radici, causando stress ossidativo e inibendo la crescita delle piante. Le particelle sub-microscopiche si traslocano verso le foglie e i frutti, sono state rilevate nelle colture di broccoli, lattuga, melo e pere.

Ne consegue che attraverso, il consumo di prodotti agricoli contaminati, l'uomo può essere esposto a queste sostanze, che provocano infiammazioni cellulari, disturbi riproduttivi e un aumento del rischio di malattie cardiovascolari come infarti e ictus.

2.2 Microplastiche nei biofertilizzanti liquidi

Le ricerche scientifiche ad oggi si sono basate principalmente sui fanghi di depurazione come vettori di microplastiche nel suolo. Dallo studio di Bertoldi et al. (2026) è emerso che i biofertilizzanti liquidi ottenuti dai residui organici negli impianti di biogas rivelano delle minacce che ad oggi sono state sottovalutate.

In diversi impianti di biogas sono state effettuate delle analisi, dove è stato rilevato una grande concentrazione di particelle, pari a 888 elementi per milligrammo di fertilizzante.

Considerando, che la produzione di questi fertilizzanti ad oggi è in continuo aumento e punta a riciclare i nutrienti dai rifiuti alimentari e dagli scarti agricoli.

Il Punto critico di questo studio riguarda l'origine della materia prima: esiste infatti una correlazione diretta tra la quantità di rifiuti alimentari, domestici e industriali usati nei processi di digestione e l'abbondanza di microplastiche nel prodotto finale.

Tali impianti utilizzano sistemi di pretrattamento allo scopo di tritare, rimuovere plastiche, pietre e metalli, omogenizzare ed eventualmente igienizzare, e setacciare dove il digestato viene separato in una frazione liquida e una frazione solida (ammendante o compost).

Tuttavia, anche utilizzando questi sistemi le particelle più piccole riescono a superare le barriere di filtrazione.

Vengono utilizzate tecnologie molto avanzate per la caratterizzazione delle microplastiche:

- Spettroscopia O-PTIR: ha confermato la presenza di polimeri dominanti come Polietilene (PE) e il polipropilene (PP), tipici materiali utilizzati negli imballaggi alimentari;

- Morfologia SEM: l'osservazione al microscopio elettronico ha rivelato che le particelle non sono integre, ma hanno evidenti segni di degradazione superficiale. Questa alterazione comporta un aumento della superficie specifica, trasformando ogni particella in un potenziale sito di adsorbimento per metalli pesanti e pesticidi, facilitandone il trasporto nel suolo.

La presenza di tali particelle è preoccupante, in quanto essendo estremamente piccole e distribuite su una matrice liquida, si muovono nel suolo in maniera molto più elevata rispetto alle plastiche contenute nei fanghi solidi. Tale studio ha stimato 258 tonnellate di microplastiche nei suoli agricoli svedesi presi in esame.

Le costanti immissioni alterano la biologia del suolo, innescano cambiamenti nella comunità microbica e interferendo con le attività enzimatiche legate i cicli del carbonio e dell'azoto.

Il lavoro effettuato da Bertoldi ha mostrato che è un errore concentrarsi esclusivamente su particelle di dimensioni superiori poiché la frazione microscopica, come dimostrato, domina nei biofertilizzanti liquidi.

2.3 Ferite radicali

L'inquinamento da microplastiche riduce l'indice di salute del suolo, con riduzione della diversità batterica e un aumento delle emissioni di gas serra (CO₂, CH₄ e N₂O).

Le microplastiche inducono effetti avversi alle piante tra cui:

- Stress ossidativo;
- Soppressione dell'allungamento delle radici;
- Compromissione dell'assorbimento dei nutrienti;
- Riduzione della biomassa di molte specie coltivate come la lattuga, il grano, il mais e il riso.

Le microplastiche possono essere assorbite dalle radici fino ad entrare nella catena alimentare. Le piante fungono da produttori primari e fonte principale di cibo e di foraggio, rappresentando una via per l'assunzione umana di microplastiche. Le particelle possono penetrare all'interno dei tessuti radicali e fogliari attraverso meccanismi di assorbimento come l'endocitosi, il trasporto apoplastico, l'ingresso tramite fessurazioni e l'apertura stomatica.

Le radici subiscono varie lesioni meccaniche causate da attrezzi agricoli e da pratiche come la sarchiatura, il trapianto, la potatura delle radici, il diserbo e la fertilizzazione. Tali pratiche aumentano la produttività agricola, ma possono generare traumi radicali. Anche gli erbivori ed eventi meteorologici possono causare danni alle radici a causa della perdita delle barriere, le ferite radicali sono siti di infezione per molti patogeni del suolo.

Yin et al. (2026) hanno effettuato uno studio in cui sono state indotte ferite meccaniche sulle radici di quattro specie vegetali che sono: taro, mais, fagiolo mungo e grano.

Le piante sono state coltivate in substrati di vermiculite o in suoli con sistemi radicali esposti a diverse microplastiche come microsfeere di polistirene, acido polilattico, polimetilmetacrilato e miscele di frammenti di cloruro di polivinile e polietilene.

Il taro è una pianta da tubero con una porzione edibile direttamente adesa alla radice, il che la rende più suscettibile alla contaminazione.

Nel mais, le microplastiche sono state riscontrate negli steli e nelle foglie.

I risultati hanno riscontrato che:

- Radice intatta della pianta può resistere alla penetrazione delle microplastiche, nessuna è stata riscontrata nei tessuti vascolari di radici, steli o piccioli;
- Le ferite superficiali aumentano l'adsorbimento delle particelle sulla superficie, ma non consentono l'assorbimento interno poiché l'endoderma e i tessuti corticali fungono da barriera impedendo l'ingresso delle microplastiche;
- Nelle ferite profonde, le barriere protettive si rompono fornendo una via di accesso per le microplastiche che, una volta penetrate entrano nel lume dei vasi dello xilema dove si muovono passivamente verso l'alto percorrono 5 centimetri in 24 ore.

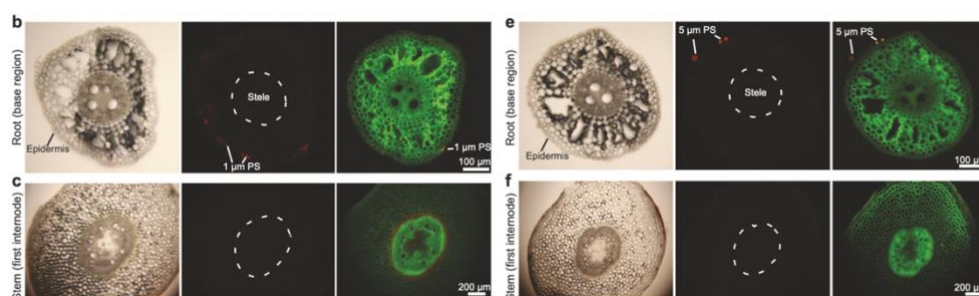


Figura 2.1: Sezioni trasversali della base della radice e dello stelo del mais dopo un mese di esposizione. Le microplastiche sono osservabili solo sulla superficie esterna. *Modificato da*

Jingjing Yin et al. 2026

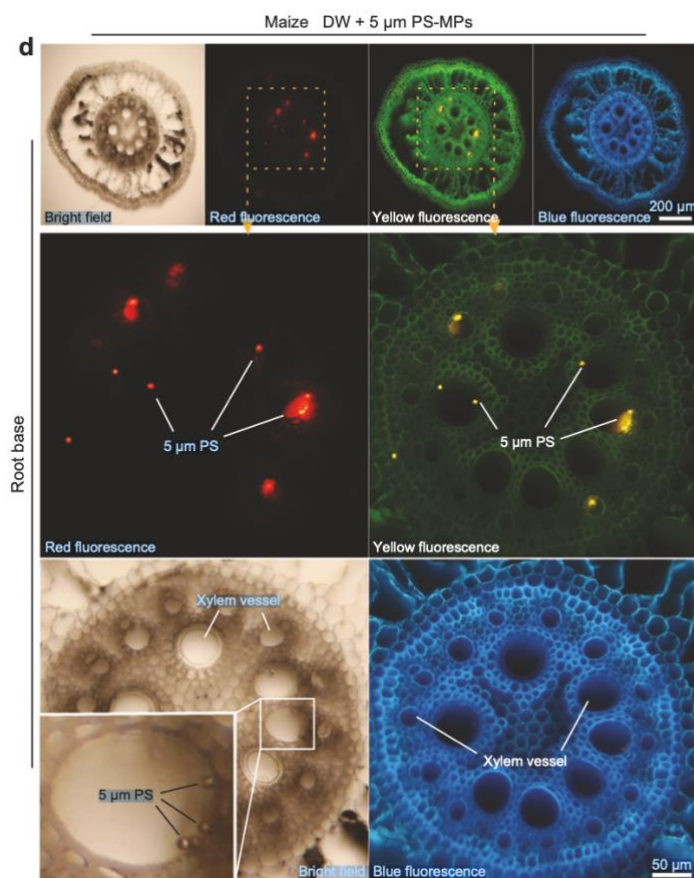


Figura 2.2: Analisi microscopica della base radicale in sezione trasversale. Microsfere di polistirene all'interno del lume e dei vasi xilematici dopo trattamento con ferita profonda.

Modificato da Jingjing Yin et al. 2026

Lo studio ha rivelato l'importanza cruciale delle barriere radicali: Esoderma e endoderma. Per entrare nei tessuti vascolari, i contaminanti dovevano attraversare epidermide, esoderma, corteccia, endoderma e periciclo. Endoderma e esoderma producono pareti lignificate e suberizzate a bassa permeabilità fornendo una difesa efficace.

La contaminazione dei prodotti agricoli non dipende unicamente dalla quantità di microplastiche ma dall'integrità fisica delle colture, per garantire la sicurezza alimentare.

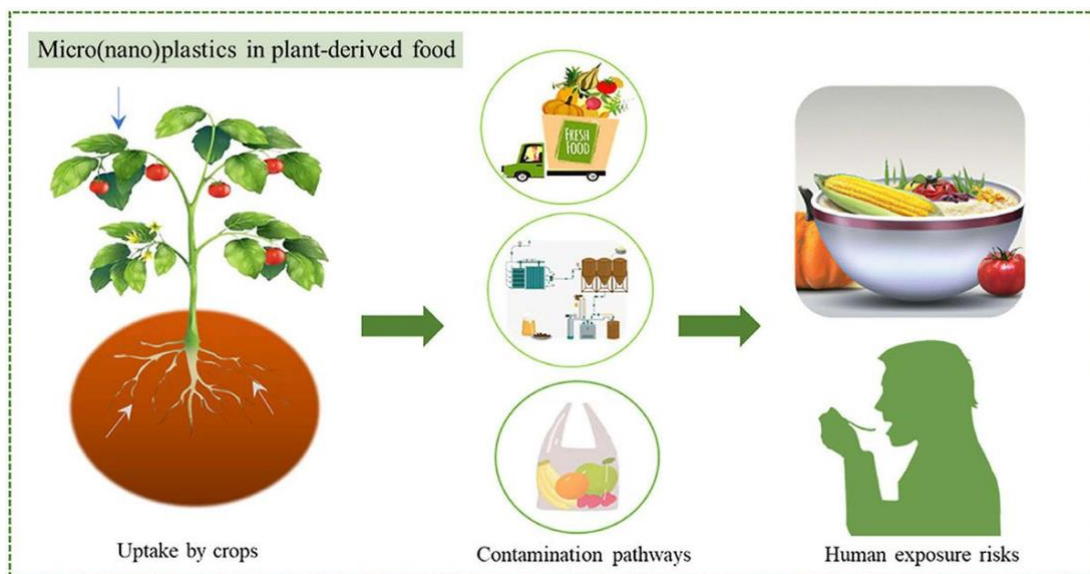


Figura 2.3 Micro(nano) plastiche negli alimenti di origine vegetale. *Modificato da Yuqing Liang et al. 2023*

In ambito agricolo le microplastiche possono entrare nella catena alimentare attraverso numerosi percorsi:

- Contaminazione del suolo e assorbimento delle colture: Le microplastiche sono molto persistenti e compromettono e influenzano la struttura e la fertilità dei terreni. L'assorbimento delle particelle plastiche può avvenire mediante le radici, poiché si accumulano nei tessuti della pianta, fino ad entrare nella catena alimentare umana, quando avviene la consumazione del prodotto.
- Acqua contaminata: Alcuni sistemi di irrigazione potrebbero utilizzare l'acqua contaminata da microplastiche, portando involontariamente le particelle nei terreni.
- Deposizione atmosferica: Le microplastiche si potrebbero depositare nelle colture direttamente dall'atmosfera, soprattutto se localizzate nelle vicinanze di aree urbane o in aree di stoccaggio di rifiuti. Il vento e le masse d'aria potrebbero trasportare le particelle su lunghe distanze.

CAPITOLO 3

MICROPLASTICHE LUNGO LA CATENA ALIMENTARE

Come abbiamo visto dai precedenti capitoli, l'inquinamento da microplastiche lo riscontriamo sia negli ambienti forestali sia in quelli agricoli, ed è emerso come una significativa preoccupazione a livello globale.

A causa delle loro ridotte dimensioni e della stabilità chimica, le microplastiche si possono accumulare sia nelle piante che negli animali, entrando nella catena alimentare e comportando rischi per la salute umana.

Le microplastiche sono state ritrovate in organismi appartenenti a quasi tutti i livelli trofici.

Un aspetto critico riguarda la crescente contaminazione nell'industria zootecnica. Durante l'alimentazione dei bovini, l'utilizzazione dei film per l'insilamento, sacchi di tessuto per mangimi e attrezzature in plastica come guanti e bacinelle dell'acqua in plastica possono rilasciare le microplastiche nei mangimi; il polietilene è una delle plastiche più utilizzate in agricoltura e diffuse nei mangimi animali.

In sostanza, la contaminazione da microplastiche dei mangimi, combinata con l'uso di prodotti in plastica, rappresenta una delle principali fonti di esposizione alle microplastiche negli allevamenti da latte.

I ruminanti come i bovini e le vacche da latte hanno dei cicli produttivi più lunghi e, a causa della dipendenza da foraggi grossolani come, per esempio, la paglia delle colture, sono particolarmente vulnerabili all'esposizione alle microplastiche.

I potenziali rischi per la salute dei bovini richiedono una maggiore attenzione poiché le microplastiche sono inquinanti persistenti la cui proliferazione è rapida e persistente, impattando significativamente sul microbiota intestinale e su una vasta gamma di specie animali.

Un altro aspetto critico riguarda la crescente contaminazione di microplastiche nell'industria zootecnica, riguardo la sicurezza dei prodotti di origine animale e alla salute umana.

3.1 Microplastiche nei bovini

I bovini possiedono un sistema digerente unico, caratterizzato dal rumine; quindi, il loro processo digestivo delle microplastiche si differisce notevolmente da quello di altri mammiferi, come topi e pesci.

La popolazione microbica nel rumine mantiene una relazione simbiotica con l'ospite e svolge un ruolo fondamentale nella regolazione del metabolismo e delle funzioni fisiologiche.

L'intestino è l'organo di difesa contro l'esposizione orale alle microplastiche, svolgendo un ruolo cruciale nella regolazione delle funzioni immunitarie, endocrine e digestive.

Obbiettivi e ipotesi dello studio

L'obiettivo dello studio è quello di valutare sistematicamente l'impatto dell'esposizione alle microplastiche di polietilene sulla crescita dei bovini, sul danno epatico e sulla sicurezza dei prodotti carnei.

Lo studio è stato condotto presso la Aux Fresh Seed Technology Co., Ltd. (Shandong, Cina) con l'utilizzo di quattordici vitelli maschi sani di razza Holstein in buono stato di salute.

Gli animali sono stati distribuiti in gabbie singole all'interno di una nuova stalla, disinfettata mediante nebulizzazione.

Il protocollo prevedeva un periodo di adattamento di sette giorni, dove i vitelli sono stati sottoposti a controlli veterinari come sverminazione e vaccini. Successivamente sono stati assegnati casualmente a due gruppi sperimentali:

- 1) Gruppo di controllo (CON): Alimentato con latte intero e pellet di svezzamento standard.
- 2) Gruppo di trattamento (MPs): Alimentati con la medesima dieta addizionale con polietilene MPs nel latte intero a una concentrazione di 75 mg/L.

I gruppi sono stati alloggiati in recinti nuovi e distinti all'interno dello stesso ambiente, mantenendoli in gabbie individuali per prevenire fenomeni di contaminazione incrociata.

Al giorno i vitelli consumavano 14 litri di latte, determinando un'esposizione pari a 17,5mg/Kg di peso corporeo al giorno.

Quotidianamente sono stati registrati i consumi di alimenti residui e, lungo l'intero arco dei 40 giorni di prova, l'andamento del peso corporeo dei vitelli.

Campionamento di tessuti e fluidi biologici

I campionamenti biologici hanno definito che:

- **Giorno 40 (Prelievi ematici):** Prima del pasto della mattina sono stati prelevati 7 ml di sangue di ciascun animale di cui 2ml è stata immediatamente congelata in ghiaccio secco per il profilo ematologico, cioè per valutare lo stato di salute generale del bovino, i restanti 5ml sono stati centrifugati a 4000 giri/min per 15 minuti a 4 C° per consentire l'isolamento del plasma e successivamente stoccato a -80C°, per analizzare enzimi, anticorpi e i marcatori dello stress ossidativo.
- **Giorno 41 (eutanasia e campionamento dei tessuti):** Digiuno di 12 ore i vitelli sono stati sottoposti a eutanasia e sono stati espianati, lavati con soluzione fisiologica gli organi di cui cuore, fegato, milza, polmoni e reni che vengono pesati per la determinazione degli indici somatici.

Poiché il fegato è l'organo centrale del metabolismo ed è uno dei bersagli primari delle microplastiche, per le analisi istologiche è stata prelevata la regione centrale del lobo destro affinché il tessuto sia uguale dalla stessa zona per tutti i vitelli.

Nel muscolo si procede con il taglio della lombata/controfiletto per valutare in seguito la qualità della carne, e poi si prelevano rumine, ileo e colon.

La raccolta del digerito serve per analizzare il microbiota e i prodotti della digestione. L'epitelio prelevato viene immerso (una parte) nella paraformaldeide al 4% per fissare e indurire il tessuto per bloccare la decomposizione, utile per verificare se le microplastiche hanno fisicamente rotto o infiammato le pareti dell'intestino del rumine.

I restanti frammenti sono stati congelati a -80C° in provette per le analisi molecolari.

3.2 Alterazioni biomolecolari, tossicità sistemica e qualità della carne

Caratteristiche Qualitative e Biochimiche della Carne

Valutazione chimico-fisica del muscolo ha previsto:

- pH post- mortem: misurato 45 minuti dopo la macellazione in 3 punti diversi del muscolo mediante pH-metro. Serve per capire se l'animale ha subito forte stress prima della macellazione, calcolando media dei valori nei punti diversi.
- Colore della carne (colorimetro CIELAB): determinazione degli indici di luminosità, rosso e giallo tramite sorgente luminosa standardizzata:
 - Luminosità: indica quanto la carne è chiara o scura su scala da 0 a 100.
 - Indice di rosso: i valori positivi indicano il rosso quelli negativi il verde. Nei bovini, valori alti di rosso è sinonimo di carne ben ossigenata
 - Indice giallo: valori positivi indicano giallo, valori negativi indicano il blu; è influenzato dall'alimentazione e dallo stato di ossidazione dei grassi.
- Calo al calore (perdita in cottura): Valuta la capacità di ritenzione idrica, ovvero la capacità della carne di trattenere acqua.

Le microplastiche nei campioni di fegato e nei mangimi sono stati analizzati mediante sistema Laser Direct Infrared Imaging, una tecnologia utilizzata per identificare, mappare e quantificare particelle microscopiche di contaminanti, attraverso un laser a cascata quantica come sorgente luminosa. Poiché i tessuti biologici, come fegato, lasciano residui organici anche dopo la digestione, grazie alla precisione del sistema LDIR consente di distinguere un frammento di plastica da un residuo proteico o un grasso non digerito.

Il laser inizialmente fa una scansione rapida del vetrino per trovare le particelle di microplastiche ad una specifica lunghezza d'onda; successivamente, per ciascuna particella identificata viene analizzato lo spettro nel medio infrarosso e ogni materiale assorbe la luce creando una vera e propria "impronta digitale".

Il fegato, come già evidenziato, è l'organo più associato alle microplastiche attraverso l'esposizione gastrointestinale.

Attraverso questo studio, i tre campioni di tessuto epatico del gruppo di vitelli esposti a microplastiche sono stati selezionati in maniera casuale. Da ciascun campione è stato prelevato 1 grammo di tessuto pesato e posizionato in un becher di vetro per il rilevamento delle microplastiche.

L'obiettivo è quello di fornire una valutazione esplorativa e qualitativa dell'accumulo di microplastiche nel fegato.

Affinché le microplastiche vengano identificate bisogna eliminare le molecole biologiche da cui sono avvolte come grassi, lipidi e cellulosa.

Per il fegato, I lipidi vengono eliminati con etanolo a 60 C°, dopo che quest'ultimo è evaporato è stato distribuito acido nitrico concentrato, che elimina le proteine del fegato lasciando intatte le microplastiche.

Per l'insalato, poiché il mangime è costituito da vegetali come cellulosa, emicellulosa e lignina, l'utilizzazione dell'acido non basta, si utilizza l'idrossido di sodio (base forte) a caldo per degradare la sostanza organica vegetale.

Se sono presenti particelle di grandi dimensioni si procede con una pre-filtrazione prima della filtrazione sottovuoto.

Dopo aver sciolto tutto il materiale biologico, la plastica rimane intrappolata sulla membrana del filtro, per recuperarla senza provocare danni si mette un filtro in etanolo usando gli ultrasuoni, le vibrazioni danneggiano fisicamente le microplastiche dal filtro e le disperdono nel liquido.

Il liquido viene concentrato e versato sui vetrini Kavi, con alte capacità riflettenti, agendo come uno specchio la luce laser dello strumento LDIR.

Il sistema ha individuato la posizione dei frammenti sul vetrino con una rapida scansione, selezionando solo le particelle con una dimensione compresa tra 20 e 500 micron. Successivamente lo strumento ha analizzato ogni singola particella nel medio infrarosso e ne ha riconosciuto il tipo di polimero, confrontando il risultato in una banca dati, accettando solo i riconoscimenti con una somiglianza superiore al 65%.

In seguito per capire se le particelle tendevano ad unirsi tra loro o rimanere isolate, andando ad influenzare il modo in cui penetrano nelle cellule animale, è stata misurata la loro carica elettrica superficiale all'interno di una soluzione salina KCl 1mM.

Analisi biomolecolari

Attraverso degli analizzatori automatici e speciali test immunologici (test ELISA) i ricercatori hanno analizzato il sangue e i tessuti dei vitelli al fine di analizzare:

- Salute del fegato
- Livelli di infiammazione
- Stress ossidativo, livello di danno cellulare e le difese antiossidante dei vitelli.

Segue poi l'estrazione di RNA dal fegato, rumine e intestino per verificare se le microplastiche avessero modificato l'attività dei geni dell'animale.

Hanno utilizzato la tecnica della PCR in tempo reale (qRT-PCR), misurando i cambiamenti genetici con un metodo matematico standard.

Per capire se le microplastiche avessero alterato e modificato la flora batterica dello stomaco dei vitelli, è stato estratto il DNA dal liquido del rumine. Il DNA è stato sequenziato con una tecnologia avanzata (illumina) permettendo di identificare di quali microrganismi fosse composto il microbiota e quali fossero le loro funzioni.

Utilizzando una tecnica che separa e pesa le singole molecole sono stati identificati tutti i prodotti della digestione e del metabolismo presenti nel sangue del rumine. Questo metodo serve per far capire quali funzioni chimiche e vitali sono state danneggiate a causa della presenza di microplastiche.

Risultati

Nei metodi precedentemente elencati i ricercatori hanno preso il mangime insilato dei vitelli e lo hanno successivamente digerito chimicamente, filtrandolo e mettendolo sui vetrini di Fluoruro di Calcio per poi analizzarlo attraverso i laser LDIR.

Il polietilene era la plastica più presente rappresentando il 16% di tutte le plastiche presenti nel mangime.

Questo perché, come detto dai precedenti capitoli, il mais insilato viene conservato all'interno di teloni di plastiche, che degradandosi, si rilasciano nel cibo degli animali.

L'analisi LDIR sul mangime ha dimostrato che già prima della somministrazione i vitelli mangiavano in maniera autonoma le microplastiche presenti sul mangime, tale esperimento si è basato sull'imitazione della realtà.

Quindi è stato somministrato polietilene puro con diametro tra i 20 e 200 micron, a vitelli MPs per studiarne gli effetti.

L'esposizione alle microplastiche è stata associata a un aumento dei livelli di LPS, un'endotossina, è componente della parete cellulare esterna presenti nel rumine e nell'intestino dei bovini.

Se il microbiota intestinale e l'intestino sono integri, LPS rimane confinato nel tratto digerente senza danni, ma i problemi sorgono se c'è la morte dei batteri o quando la barriera intestinale si rompe.

Le microplastiche non penetrano fisicamente all'interno del fegato o nei muscoli, ma hanno un effetto abrasivo nell'intestino, rompendo legami tra le cellule e rendendolo permeabile. A causa della permeabilità LPS attraversa la parete intestinale ed entra nel flusso sanguigno, viene poi riconosciuto dal sistema immunitario dell'animale come un segnale di pericolo attivando molecole infiammatorie.

- Nel fegato: LPS arriva tramite circolazione del sangue direttamente dall'intestino, arrivando alle cellule immunitarie del fegato, provocando la morte delle cellule epatiche.
- Nel muscolo: La presenza delle LPS altera il metabolismo degli acidi grassi.

Per chiarire i meccanismi alla base dei danni epatici indotti dalle microplastiche, sono stati esaminati le alterazioni del microbiota ruminale. Le quantità delle comunità microbiche sono rimaste la stessa, quindi non c'è stata un'alterazione quantitativa, ma c'è stato un cambiamento strutturale della comunità microbica.

Il dato che ha consentito ai ricercatori di affermare questa teoria è che c'è stato un aumento della specie *Prevotella*, un genere Gram-negativo, la sua proliferazione va ad espandere i lipopolisaccaridi (LPS).

Attraverso un'analisi condotta tramite mappatura sul database KEGG, ha confermato che l'alterazione del microbiota è sia a livello strutturale che metabolico.

Nel gruppo esposto alle microplastiche c'è stata l'attivazione di dieci pathway specifici cioè catene di montaggio biochimiche all'interno di una cellula o di un microrganismo, sono sequenze ordinate di reazioni chimiche. Quelle più importanti che sono state rilevate sono:

- Biosintesi delle LPS e del peptidoglicano, componenti strutturali pro-infiammatori della parete batterica
- Invasione batterica delle cellule epiteliali.

Si è poi confermato che l'attivazione di questi pathway genetici è stata guidata dalla specie *Prevotella*.

I risultati più significativi hanno quindi riportato che:

- 1) I danni al fegato sono indiretti poiché le microplastiche non si accumulano fisicamente dentro il fegato, ma il danno è causato da un effetto catena che inizia a partire dall'apparato digerente e viaggia attraverso il sangue

- 2) Aumento dei batteri nocivi nel rumine, le microplastiche alterano la flora batterica dello stomaco. Alcuni batteri come, *Prevotella* si difendono dalla plastica e si moltiplicano, producendo grande quantità di LPS, pericolosa per gli animali
- 3) Il passaggio delle microplastiche e l'eccesso di tossine danneggiano le pareti dell'intestino. L'intestino diventa permeabile favorendo l'entrata della tossina LPS nel sangue e raggiungere successivamente il fegato
- 4) Una volta che la tossina ha raggiunto il fegato, si ha un'inflammation che danneggia le cellule del fegato, con un calo di peso del vitello e di appetito.

Questo studio evidenzia un legame diretto tra l'esposizione alle microplastiche (MPs) e il danno al fegato nei bovini, agendo lungo l'asse microbiota ruminale-intestino-fegato.

CAPITOLO 4

IMPLICAZIONI PATOLOGICHE SULLA SALUTE UMANA

Nella società moderna la plastica è uno dei materiali più utilizzati, grazie alla sua leggerezza, alla stabilità chimica contro acidi e basi. Dalla metà del XX secolo, la produzione globale di plastica ha subito un notevole aumento da 2,3 milioni di tonnellate a 448 milioni di tonnellate, con circa 8 milioni di rifiuti plastici scaricati annualmente negli ambienti marini e terrestri.

I materiali plastici vengono introdotti negli ecosistemi, subiscono frammentazioni attraverso i processi fisici, chimici e biologici dando poi origine alle microplastiche.

A causa della loro persistenza ambientale, delle proprietà bioaccumulabili, della diffusa distribuzione e dell'elevato potenziale di distribuzione, le microplastiche hanno attirato l'attenzione in campo biomedico, in relazione al danno ai tessuti e agli organi, allo stress ossidativo, all'infiammazione sistemica e alla neurotossicità.

4.1 Esposizione cutanea e assorbimento intestinale

La pelle è un organo di barriera, e funge da punto di ingresso per le microplastiche. Il genere umano vi è esposto attraverso varie vie, tra cui l'aria ambientale, i prodotti di uso quotidiano e gli articoli per la cura personale.

Per esempio, alcuni cosmetici e prodotti per la pelle contengono particelle di micro e nano plastiche che possono penetrare nella cute ed entrare nell'organismo.

Le vie principali attraverso cui le particelle penetrano nella pelle sono l'epidermide e gli annessi cutanei:

- Via epidermica: Le particelle riescono a raggiungere il derma tramite gli spazi intercellulari o all'interno delle cellule dello strato corneo, dove successivamente vengono assorbiti nel flusso sanguigno tramite i capillari
- Annessi cutanei: i follicoli piliferi, le ghiandole sebacee e le ghiandole sudoripare e la pelle danneggiata forniscono un percorso per le microplastiche.

In media un individuo può ingerire decine di migliaia di particelle di microplastiche all'anno attraverso il cibo. Se la maggior parte di queste particelle rimane nel lume intestinale o nel tratto respiratorio e venga eliminato attraverso le feci o il muco, il 2/3% delle particelle può attraversare le barriere mucosali.

Questo attraversamento avviene per trasporto attivo o passivo da parte di macrofagi o vie trans cellulari consentendo l'ingresso nei sistemi linfatici e sanguigni.

Le dimensioni la forma e la chimica superficiale delle particelle può influenzare le loro interazioni con le barriere biologiche e i successivi effetti Eco tossicologici

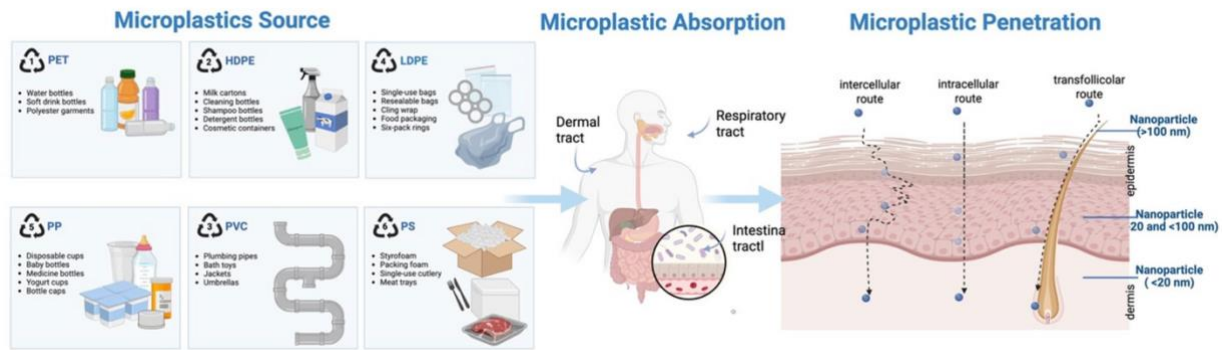
- Dimensioni: Se la particella ha dimensioni ridotte rispetto ad un'area relativamente ampia, la penetrazione attraverso la pelle è più agevolata, consentendo ampie interazioni con i componenti cellulari. Solo le nanoparticelle sono in grado di penetrare nella pelle intatta.
- Forma: Influisce sulla distribuzione e sulla tossicità. Le microplastiche fibrose o lamellari hanno maggior probabilità di incassarsi nello strato mucoso, portando dei danni alla mucosa intestinale, infiammazione e disbiosi. Al contrario, i frammenti o le sfere di microplastiche mostrano una tossicità inferiore.
- Chimica superficiale: ruolo nell'affinità biologica e nella risposta immunitaria. Le particelle con gruppi funzionali polari, come i gruppi carbossilici o amminici, si legano più facilmente alle regioni delle membrane cellulari, con cariche apposte e vengono internalizzate attraverso la fagocitosi.

La presenza delle particelle sull'asse intestino-pelle e sul microbiota intestinale è regolata da variabili interne ed esterne.

La dieta rappresenta una delle vie principali di ingestione delle microplastiche in contemporanea è il regolare della composizione del microbiota intestinale. Il Background genetico dell'ospite mantiene l'integrità della barriera e dell'omeostasi microbica. Per esempio, se ci sono mutazioni nei geni correlati alla barriera cutanea come la filaggrina, proteina fondamentale per la struttura della pelle, provocano una maggiore perdita di acqua, poiché quest'ultima evapora più facilmente dalla pelle, i complessi proteici specializzati che sigillano lo spazio tra due cellule epiteliali adiacenti (giunzioni serrate) si allentano, le microplastiche riusciranno ad entrare molto più facilmente negli strati profondi della pelle.

In contemporanea i geni che sono correlati all'immunità intestinale possono amplificare la tossicità intestinale delle microplastiche andando ad alterare la risposta infiammatoria,

poiché invece di gestire in maniera controllata la minaccia, il sistema immunitario risponde in maniera alterata, scatenando un'inflammatione.



4.1 Microplastiche e alterazione della barriera: vie di esposizione e penetrazione.

Modificato da Zhang et al Journal of Translational Medicine et al. 2026

Le particelle di polistirene con diametri compresi tra 20 e 200nm riescono a penetrare negli strati superficiali della pelle. Le nanoplastiche con dimensioni inferiori a 100nm penetrano nello strato corneo attraverso le vie intercellulari. Le particelle fino a 200nm fanno ingresso attraverso solchi cutanei, canali lipidici e i follicoli piliferi, accumulandosi nell'epidermide e persino all'interno delle cellule stesse.

Le tre vie di penetrazione sono:

- 1) Intercellular route (via intercellulare: Le particelle attraversano le cellule attraverso il doppio strato lipidico.
- 2) Intracellular route (via intracellulare o trans cellulare): le particelle passano direttamente all'interno delle cellule.
- 3) Transfollicular route (via transfollicolare): le particelle sfruttano il canale follicolo pilifero (pelo), è una via che bypassa la barriera compatta dello strato corneo.

Sono presenti sei principali polimeri plastici responsabili della contaminazione ambientale:

- PET: Polietilene tereftalato, utilizzato per bottiglie d'acqua, bibite e indumenti.
- HDPE: Polietilene ad alta densità, tipico dei cartoni del latte, flaconi detergenti shampoo e contenitori cosmetici.

- LDPE: polietilene a bassa densità, impiegato per sacchetti monouso, pellicole trasparenti e imballaggi alimentari.
- PP: Polipropilene, utilizzato per bicchieri monouso, biberon, flaconi medicinali e tappi di bottiglia
- PVC: Polivinilcloruro, usato in tubature idrauliche, giocattoli da bagno, giacche e ombrelli
- PS: Polistirene (comunemente polistirolo), imballaggi protettivi, posate monouso e vaschette per la carne

4.2 Ruolo mediatore dell'asse intestino-pelle e le risposte sistemiche

L'impatto eco tossicologico delle microplastiche, sulla salute cutanea non si limita solo come un danno a contatto diretto, ma si sviluppa attraverso una mediazione sistematica governata dall'asse intestino-pelle.

L'esposizione ai polimeri plastici agisce alterando i rapporti ecologici microbici, tra due phyla dominanti, Firmicutes e Bacteroidetes (rapporto F/B), un biomarcatore per patologie cutanee sistemiche come l'alopecia areata, la psoriasi e il lupus eritematoso sistemico (LES).

Oltre a questo, promuove l'espansione anomala di patogeni opportunisti come Clostridium, ed elementi pro-infiammatori come Ruminococcus gnavus, la cui azione è di un super antigene per i linfociti B.

Parallelamente si ha un declino dei generi antinfiammatori come Lactobacillus, Bifidobacterium e Faecalibacterium.

La drastica riduzione numerica delle comunità batteriche eubiotiche (batteri buoni e protettivi), riduce la fermentazione dei carboidrati complessi e la conseguente sintesi di acetato, propionato e butirato (acidi grassi a catena corta), che fungono da mediatori sistemici dell'asse intestino-pelle.

Il triptofano è un amminoacido essenziale per l'organismo umano, assunto attraverso gli alimenti come legumi, carni, pesce, latticini e uova. È un amminoacido essenziale per la sintesi proteica e per la sintesi di alcune sostanze biologiche come la serotonina e la niacina.

- Serotonina: neurotrasmettitore sintetizzato a partire dall'amminoacido essenziale triptofano, attraverso una via metabolica che vede come enzima chiave la triptofano

idrossilasi. Oltre a regolare numerose funzioni fisiologiche e comportamentali, la serotonina agisce come precursore biologico della melatonina, l'ormone fondamentale per la regolazione del ciclo sonno-veglia (ritmo circadiano).

- Niacina: è conosciuta come vitamina PP, coinvolta nei metabolismi cellulari che convertono i macronutrienti in energia.

La disbiosi intestinale da microplastiche deprime le comunità batteriche capaci di metabolizzare il triptofano in derivanti indolici (indolo-3-aldeide)

La via metabolica triptofano-AHR agisce come un canale di comunicazione diretto tra intestino-pelle. I metaboliti prodotti dal microbiota intestinale (derivati indolici) viaggiano fino alla cute per attivare L'AHR, un recettore degli idrocarburi arilici presente nelle cellule cutanee che regola le difese immunitarie e la rigenerazione dei tessuti. Una volta che AHR è attivo, dà l'ordine di produrre proteine che sigillano e proteggono la barriera cutanea.

Quando le microplastiche demoliscono i batteri intestinali, il segnale si interrompe. Il recettore AHR non si attiva, bloccando la produzione delle difese della pelle. La cute, che viene privata dalla sua protezione strutturale, diventa vulnerabile agli agenti esterni andando incontro a invecchiamento e precoce caduta dei capelli.

In conclusione, l'inquinamento da microplastiche rappresenta una minaccia concreta per l'omeostasi cutanea, mediata dall'asse intestino-pelle. L'azione da microplastiche segue due vie:

- Danni locali: causati da penetrazione diretta delle microplastiche attraverso lo stato corneo.
- Danni sistemici: mediati dal microbiota intestinale.

Le microplastiche, come visto nei precedenti capitoli, sono una vera e propria minaccia per l'ambiente, ma non solo, poiché, le particelle plastiche possono essere ingerite attraverso il cibo, l'acqua e l'aria e successivamente assorbita dall'organismo.

Una delle fonti principali di ingestione delle microplastiche è l'acqua potabile, proveniente sia dal rubinetto che dalla bottiglia. L'acqua potabile contiene fino a 1769 microplastiche.

Gli alimenti che più sono contaminati da un elevato numero di microplastiche sono birra, molluschi, miele, pesce e per fino il tè.

Uno studio canadese ha scoperto che i filtri di plastica possono rilasciare dosi molto alte di particelle plastiche.



4.2 Particelle plastiche negli alimenti. *Modificato da E. Meloni. 2026*

CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha permesso di delineare un quadro organico sul destino delle microplastiche, evidenziando come tali contaminanti siano in grado di alterare gli equilibri dinamici tra atmosfera, biosfera, litosfera e idrosfera. Il suolo, fulcro fondamentale per l'erogazione dei servizi ecosistemici e interfaccia attiva dei cicli biogeochimici, emerge come il principale *sink* globale di accumulo di questi polimeri sintetici.

Sulla base degli argomenti trattati, è possibile stabilire che la deposizione atmosferica rappresenta la via d'ingresso primaria delle microplastiche negli ecosistemi forestali. Le chiome degli alberi esercitano un cruciale "effetto filtro", intercettando i polimeri sospesi; il successivo trasferimento al suolo avviene sia per dilavamento delle chiome (*throughfall*) sia attraverso la caduta stagionale della lettiera (Weber & Bigalke, 2025). Una volta raggiunta la superficie, i processi di umificazione della sostanza organica negli orizzonti organici (OL, OF, OH) regolano la traslazione verticale delle microplastiche verso gli orizzonti minerali sottostanti (A e B).

L'accumulo di tali contaminanti nel profilo pedologico comporta significative modificazioni fisiche, tra cui la riduzione della macroporosità e della capacità idrica, aumentando di conseguenza il rischio di disseccamento del suolo. Inoltre, la presenza di microplastiche compromette notevolmente le funzionalità biologiche della rizosfera, sopprimendo le comunità batteriche azotofissatrici e inibendo la colonizzazione radicale da parte dei funghi micorrizici, con conseguente alterazione dei cicli biogeochimici dell'azoto e del fosforo.

L'esperimento condotto sui semenzali di faggio ha evidenziato come l'esposizione al polipropilene e allo stirene interferisca con l'omeostasi nutrizionale della pianta, influenzando negativamente l'assorbimento di azoto, fosforo, calcio e magnesio. Sebbene l'apparato radicale non abbia mostrato alterazioni macroscopiche complessive, le microplastiche hanno indotto un assottigliamento delle radici rispetto al gruppo di controllo, compromettendone la capacità assorbente. L'effetto più marcato è stato tuttavia osservato a livello della lamina fogliare nelle tesi contaminate con i due polimeri. Infine, a livello biochimico, si è registrata una riduzione dell'attività degli enzimi β -D-cellobiosidasi e solfatasi — legati rispettivamente al ciclo del carbonio e dello zolfo — rispetto al substrato di controllo.

L'analisi delle interazioni tra microplastiche e i suoli agricoli ha evidenziato che il suolo non è solo una base protettiva, ma rappresenta uno scomparto di accumulo e di trasferimento di contaminanti persistenti.

Dai diversi studi analizzati si è rilevato come le microplastiche derivino dalla deposizione atmosferica, irrigazioni e rifiuti organici, definendo che la loro presenza nei sistemi agroalimentari è inesorabile.

Le diverse tipologie di polimeri influenzano in maniera diretta i processi chimici, fisici e biologici del suolo. Lo squilibrio ecosistemico è dato dall'alterazione della struttura del suolo, dall'inibizione degli enzimi, dalla riduzione dell'attività microbica.

Rilevante è stato lo studio effettuato da Bertoldi et al. (2026), definendo come i biofertilizzanti liquidi, derivati dalla digestione anaerobica, contribuiscano in maniera significativa alla diffusione di particelle plastiche, legate ai rifiuti organici di origine domestica e industriale.

Un altro ruolo cruciale che ha consentito di definire lo spostamento dei polimeri plastici all'interno delle colture agricole, è stato lo studio effettuato da Yin et al. (2026). Da tale studio è emerso, benché le piante possiedano barriere protettive come endoderma suberificato e lignificato ed esoderma da agenti esterni come le microplastiche, questi non offrono una totale protezione in quanto avviene stress meccanico provocato dalle pratiche agronomiche come il diserbo, sarchiatura e trapianto. In tale caso le ferite radicali sono inevitabili, e consentono aree di ingresso che favoriscono l'entrata delle microplastiche nei tessuti vascolari.

Una volta che le particelle plastiche hanno raggiunto lo xilema, sfruttano il flusso respiratorio, per muoversi verso gli organi aerei come steli, foglie e frutti, entrando lungo la catena alimentare umana attraverso il consumo di colture edibili come riso, mais, ortaggi e piante da frutto.

La diffusione delle microplastiche lungo la catena alimentare non avviene solo tramite il consumo di colture edibili, evidenziante mediante lo studio di Yin et al. , ma il trasferimento è possibile tra i diversi livelli trofici fino al raggiungimento dell'uomo con il consumo di alimenti di origine animale.

Nel settore zootecnico, l'esposizione dei bovini alle microplastiche è direttamente connessa alle pratiche di allevamento e di conservazione dei mangimi. L'utilizzazione dei film plastici per l'insilamento, attrezzature sintetiche e materiali per lo stoccaggio degli animali costituiscono una possibile via di contaminazione di polietilene. I ruminanti sono animali particolarmente vulnerabile, ciò è dovuto dalla lunga permanenza degli alimenti nel rumine e della complessità del microbiota digestivo, importante per il metabolismo e l'equilibrio fisiologico dell'animale.

Lo studio analizzato si è basato sui vitelli Holstein, evidenziando l'esposizione alle microplastiche, nel caso più specifico di polietilene. Il polietilene ha indotto effetti patologici indiretti sull'alterazione dell'ecosistema intestinale. Il meccanismo ha coinvolto l'asse del microbiota ruminale-intestino-fegato provocando la diffusione di batteri come la *Prevotella*, associata a una maggior produzione di lipopolissaccaridi (LPS), compromettendo la barriera intestinale, con attivazione di processi infiammatori. Questo studio ha mostrato come la tossicità delle microplastiche comprometta i parametri fondamentali della crescita, della salute e della qualità dei prodotti zootecnici. L'inquinamento da microplastiche negli allevamenti non rappresenta una minaccia soltanto per il genere animale, ma anche per la sicurezza alimentare.

L'ultimo capitolo ha delineato il quadro epidemiologico dell'inquinamento da micro e nanoplastiche, evidenziando i loro meccanismi d'azione sulla salute umana. Le microplastiche possono penetrare nell'organismo umano attraverso diverse vie: l'ingestione (come precedentemente descritto), l'inalazione e l'assorbimento cutaneo. Sebbene gran parte di esse venga escreta attraverso i normali meccanismi fisiologici, la frazione restante è in grado di raggiungere il sistema circolatorio, diffondendosi in vari organi e tessuti. La capacità di penetrazione di queste particelle dipende strettamente dalle loro dimensioni, dalla forma e dalle proprietà chimico-superficiali, considerando la barriera cutanea e quella intestinale i principali sistemi difensivi dell'organismo. Le particelle più piccole, denominate nanoparticelle, mostrano una maggiore attitudine a superare gli strati superficiali della cute e le membrane biologiche, incrementando così il rischio di effetti sistemici. In particolare, le particelle con dimensioni inferiori ai 200 nm sfruttano la via transfollicolare per eludere le difese cutanee e accumularsi nell'epidermide. A livello intestinale, invece, circa il 2-3% delle particelle ingerite supera la barriera mucosa tramite processi di trasporto attivo o passivo, immettendosi nei sistemi linfatico e circolatorio. Il nucleo della ricerca si concentra sul danno sistemico mediato dall'asse intestino-pelle. L'ingestione di polimeri quali PET, HDPE, LDPE, PP, PVC e PS altera l'equilibrio del microbiota intestinale, provocando una riduzione dei batteri eubiotici a favore della proliferazione di specie pro-infiammatorie. In questo contesto, la compromissione della via di segnalazione triptofano-AhR (Recettore degli Idrocarburi Arilici) dimostra come il danno indotto dalle microplastiche non sia confinato a livello locale, ma si estenda alla protezione della barriera cutanea, alla rigenerazione dei tessuti e alla modulazione dei fenomeni infiammatori cronici. Gli effetti sulla salute umana si sviluppano pertanto attraverso meccanismi sia diretti sia indiretti: da un lato, il contatto locale e la penetrazione delle particelle plastiche provocano danno cellulare, stress ossidativo e infiammazione; dall'altro, le alterazioni del microbiota intestinale stimolano l'insorgenza di

patologie croniche e immunitarie. In conclusione, emerge come l'impatto delle microplastiche sia un fenomeno diffuso e interconnesso che coinvolge gli ecosistemi forestali, i suoli agrari, gli allevamenti zootecnici e, infine, la salute umana. La presenza di tali inquinanti comporta squilibri biologici nel suolo che si trasferiscono progressivamente lungo la catena alimentare. Le microplastiche non rappresentano quindi soltanto una problematica ambientale, ma una vera e propria sfida per la sicurezza alimentare e la salute pubblica. Da questo quadro emerge la stringente necessità di implementare sistemi di prevenzione e monitoraggio volti a ridurre le fonti di contaminazione, ottimizzando le pratiche agricole e zootecniche al fine di tutelare l'integrità degli ecosistemi e il benessere umano.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., Binet, S., & Galop, D. (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*, 12(5), 339–344. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5>
- Bertoldi, C., Zanke, M., Pucetaite, M., Hansson, M. C., Troein, C., & van Praagh, M. (2026, 12 aprile). Microplastics in liquid biofertilizers: An overlooked threat to agricultural soil? *Environmental Pollution*, 345, Articolo 123456.
- Courtene-Jones, W., Quinn, B., Gary, S. F., Mogg, A. O. M., & Narayanaswamy, B. E. (2017). Microplastic pollution identified in deep-sea water and ingested by benthic invertebrates in the Rockall Trough, North Atlantic Ocean. *Environmental Pollution*, 231(1), 271-280.
- Gandelli, S. (2022, 11 aprile). *Microplastiche: cosa sono, come si formano e la loro pericolosità*. Geopop. <https://www.geopop.it/microplastiche-cosa-sono-come-si-formano-e-perche-sono-pericolose/>
- Garbounis, G., Karasali, H., & Komilis, D. (2026). Phytotoxicity of biodegradable and conventional plastics in soil: A systematic review. *Sustainability*, 18(4), Articolo 1524. <https://doi.org/10.3390/su18041524>
- Greenfield, E. (2025, 13 gennaio). *New study highlights escalating dangers of microplastics to ecosystems and human health*. Sigma Earth. <https://sigmaearth.com/new-study-highlights-escalating-dangers-of-microplastics-to-ecosystems-and-human-health/>
<https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/microplastichenanoplastiche-diffusione-esalute-ambiente/>

- ISPRA. (2025). *Il Suolo: monitoraggio, protezione e servizi ecosistemici*. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.
- Karami, A., Golieskardi, A., Choo, C. K., Larat, V., Galloway, T. S., & Salamatinia, B. (2017). The presence of microplastics in commercial salts from different countries. *Scientific Reports*, 7(1), Articolo 46173. <https://doi.org/10.1038/srep46173>
- Kelly, A., Lannuzel, D., Rodemann, T., Meiners, K. M., & Auman, H. J. J. (2020). Microplastic contamination in east Antarctic sea ice. *Marine Pollution Bulletin*, 154, Articolo 111130.
- Koelmans, A. A., Hazimah, N., Hermesen, E., Kooi, M., Mintenig, S. M., & de France, J. (2019). Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water Research*, 155, 410–422. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.054>
- Lasota, J., Błońska, E., Kempf, M., Kempf, P., & Tabor, S. (2024). Impact of various microplastics on the morphological characteristics and nutrition of the young generation of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Scientific Reports*, 14(1), Articolo 19284. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70135-2>
- Li, Z., Ge, Y., Ma, X., Jiang, S., Liang, Z., Liu, L., Luo, Y., Xia, C., Liu, H., Liu, Q., Li, J., Zhou, J., & Zhang, T. (2026). Environmental plastisphere assembly and microbial community succession in response to microplastic pollution. *Microbiome*, 14(1), Articolo 133. <https://doi.org/10.1186/s40168-026-0133x>
- Lusher, A. L., Tirelli, V., O'Connor, I., & Officer, R. (2015). Microplastics in Arctic polar waters: The first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Scientific Reports*, 5(1), Articolo 14947. <https://doi.org/10.1038/srep14947>
- Meloni, E. (2026,). Microplastiche e nanoplastiche, diffusione e rischi per la salute e l'ambiente. Infobuildenergia.
- Meng, Z., Lv, L., Xu, J., He, M., & Wei, Y. (2026). Nitrogen and phosphorus addition mitigates microplastic community impacts on coastal saline-alkaline wetland ecosystems. *Environmental Research*, 292, Articolo 123616. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.123616>

- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U., & Fürst, P. (2018). Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research*, 129, 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>
- Suaria, G., Avio, C. G., Mineo, A., Lattin, G. L., Magaldi, M. G., Belmonte, G., Moore, C. J., Regoli, F., & Aliani, S. (2016). The Mediterranean Plastic Soup: Synthetic polymers in Mediterranean surface waters. *Scientific Reports*, 6(1), Articolo 37551. <https://doi.org/10.1038/srep37551>
- Weber, C. J., & Bigalke, M. (2025). Forest soils accumulate microplastics through atmospheric deposition. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02712-4>
- Weber, C. J., Rillig, M. C., & Bigalke, M. (2023). Mind the gap: forest soils as a hidden hub for global micro- and nanoplastic pollution. *Microplastics and Nanoplastics*, 3(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s43591-023-00067-1>
- World Health Organization. (2019). *Microplastics in drinking-water*. [Licenza: CC BY-NC-SA 3.0 IGO]. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516198>
- Wu, M., Yang, C., Du, C., & Liu, H. (2020). *Microplastics in waters and soils: Occurrence, analytical methods and ecotoxicological effects*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 202, 110910. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110910>,
- Yin, J., Li, X., Cui, F., Yu, Y., Xing, B., Wang, F., & Xu, G. (2026). Root wounds facilitate the uptake of microplastics in crop plants. *Nature Communications*, 17(1), Articolo 3509. <https://doi.org/10.1038/s41467-026-3509x>
- Zammarchi, F., & Mazzocchi, C. (2010). Approfondimenti chimico-biologici. *Nuova Secondaria*, 27(10), 45–48.
- Zeri, C., Adamopoulou, A., Bojanić Varezić, D., Fortibuoni, T., Kovač Viršek, M., Kržan, A., Mandić, M., Mazziotti, C., Palatinus, A., Peterlin, M., Prvan, M., Ronchi, F., Siljic, J., Tutman, P., & Vlachogianni, Th. (2018). Floating plastics

in Adriatic waters (Mediterranean Sea): From the macro- to the micro-scale. *Marine Pollution Bulletin*, 136, 341–350.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.09.016>

- Zhang, X., Zheng, P., Yang, M., Huang, Y., Liu, E., Liu, A., Zhang, H., & Guo, J. (2026). Environmental pollutant-induced cellular stress pathways and their translational implications in human tissue. *Journal of Translational Medicine*, 24(1), Articolo 257.

<https://doi.org/10.1186/s12967-026-0257x>