



UNIVERSITÀ DI PARMA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE MEDICOVETERINARIE

CORSO DI LAUREA IN
PRODUZIONI ANIMALI INNOVATIVE E SOSTENIBILI

APPROCCIO ONE HEALTH ALLE NANOPLASTICHE
ONE HEALTH APPROACH TO NANOPLASTIC

RELATORE

Prof.ssa Maria Cristina Ossiprandi

LAUREANDO

Soncini Riccardo

Matricola: 369864

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

Sommario

1.	Introduzione.....	5
1.1	Microplastiche e nanoplastiche.....	7
1.2	Approccio <i>One Health</i>	9
1.3	Rilevanza del problema attuale.....	12
2.	Nanoplastiche nell'ambiente	17
2.1	Distribuzione nanoplastiche nel suolo	18
2.2	Micro e nanoplastiche anche nell'aria.....	22
2.3	Micro e nano plastiche nell'acqua.....	26
3.	Inquinamento in zootecnia.....	33
3.1	Tossicità.....	35
3.2.	Animali acquatici	40
3.3	Apicoltura	44
4.	Inquinamento nell'uomo	47
4.1	Vie di esposizione	49
4.2	Tossicità	58
5.	Approccio <i>One Health</i> e mitigazione del problema	65
5.1	Legislazioni e normative	65
5.2	Prospettive future e cooperazione	68
6.	Bibliografia.....	76

ABSTRACT

Negli ultimi anni sempre più si è cominciato a parlare di sostenibilità e approcci sostenibili alla produzione e in special modo al settore industriale e zootecnico.

Uno dei principali fattori allarmanti di inquinamento ambientale è l'inquinamento da plastica, in special modo da micro e nanoplastiche, preoccupazione emersa come una delle principali problematiche ambientali globali.

Ogni anno circa 11 milioni di tonnellate di rifiuti plastici finiscono negli oceani, mentre considerando anche acque interne, la stima raggiunge i 19–23 milioni di tonnellate, con un possibile incremento entro il 2040 (L'inquinamento della plastica, l'ambiente e l'Italia in cinque numeri, Luca Tremolada, 10 giugno 2023, Il Sole 24 Ore).

Una volta immessa nell'ambiente, la plastica subisce trasformazioni strutturali, chimiche e funzionali che portano alla formazione di micro- e nanoplastiche con gravi conseguenze dirette e indirette sia sugli equilibri ecosistemici come pure sulla salute. L'Autorità europea per la sicurezza alimentare definisce le microplastiche come particelle delle dimensioni comprese tra 0,1 e 5000 μm , mentre le nanoplastiche presentano dimensioni variabili tra 1 e 100 nm, ossia da 1 a 100 nanometri (Peter Hollman, 23/06/2016, www.efsa.eu).

Per contrastare il problema sempre più emergente dei micro-polimeri, l'unica possibilità che ci viene in aiuto, è un approccio *One-Health*. Questo approccio viene definito sempre da EFSA come un approccio integrato e unificante che mira ad equilibrare e ottimizzare in modo sostenibile la salute delle persone, degli animali e degli ecosistemi.

Il concetto è emerso negli anni 2000 atto a sottolineare proprio lo stretto legame esistente tra la salute umana, quella degli animali e quella del nostro ecosistema.

Si sottolinea, infine, l'importanza di una collaborazione tra comunità scientifica, settore industriale e decisori politici per la progettazione, gestione e riduzione dell'impatto delle plastiche nell'ambiente, in un'ottica di sostenibilità e tutela della salute globale.

ABSTRACT IN INGLESE

In recent years, there has been increasing discussion of sustainability and sustainable approaches to production, particularly in the industrial and livestock sectors.

One of the most alarming factors contributing to environmental pollution is plastic pollution, especially from micro- and nano plastics, a concern that has emerged as one of the major global environmental issues.

Every year, approximately 11 million tons of plastic waste end up in the oceans, while when inland waters are also considered, the estimate reaches 19–23 million tons, with a possible increase by 2040 (Plastic Pollution, the Environment, and Italy in Five Figures, Luca Tremolada, June 10, 2023, *Il Sole 24 Ore*).

Once released into the environment, plastic undergoes structural, chemical, and functional transformations that lead to the formation of micro- and nanoplastics, with serious direct and indirect consequences for both ecosystem balance and human health. The European Food Safety Authority defines microplastics as particles ranging in size from 0.1 to 5,000 μm , while nanoplastics range in size from 1 to 100 nm, or 1 to 100 nanometers (Peter Hollman, June 23, 2016, www.efsa.eu).

To address the increasingly pressing issue of micro-polymers, the only viable solution is a One-Health approach. This approach is defined by EFSA as an integrated and unifying strategy aimed at sustainably balancing and optimizing the health of people, animals, and ecosystems.

The concept emerged in the 2000s to highlight the close link between human health, animal health, and the health of our ecosystem.

Finally, the importance of collaboration between the scientific community, industry, and policymakers is emphasized for the design, management, and reduction of the impact of plastics on the environment, with a view toward sustainability and the protection of global health.

1. Introduzione

La produzione su larga scala della plastica è iniziata negli anni 50', seguita da una crescita esponenziale che ha portato alla sua diffusione dominante a livello planetario.

Con il boom economico e con il fenomeno dell'usa e getta la plastica ha trovato il suo habitat ideale, ogni confezione alimentare, contenitore portatile, radio, stereo fino ad utensili comuni hanno cominciato ad essere prodotti con l'uso della plastica.

La plastica è uno dei materiali simbolo dell'età moderna nota per le sue multiple caratteristiche e versatilità: è leggera, resistente ed economica, per questo motivo viene proprio impiegata in svariati e differenti settori.

Tuttavia, proprio queste stesse proprietà – in particolare la resistenza alla degradazione – la rendono anche uno dei principali problemi ambientali del nostro tempo.

Dal 1950 ad oggi si stima che l'umanità abbia prodotto oltre 9 miliardi di tonnellate di plastica, di cui circa 7 miliardi sono già diventate rifiuti.

Le principali aree di produzione corrispondono a paesi in via di sviluppo come Cina, e Asia orientale; tuttavia, l'Europa, seppure in calo, produce da sola ben 54 milioni di tonnellate annue, vale a dire circa il 12% della produzione mondiale. Questa viene prodotta, in special modo, dal settore del packaging, seguito dal settore edile e automobilistico.

Globalmente solo il 9-11% della plastica prodotta e utilizzata viene effettivamente riciclata, mentre il 19% è incenerito e il 49% smaltito in discariche controllate. Il restante 21%, ovvero 85 milioni di tonnellate/anno globali circa, viene disperso nell'ambiente o bruciato illegalmente.

Ma di tipi di plastica ve ne è più di uno.

Nell'ambiente sono state riscontrate microplastiche di diversa natura, in linea con la grande varietà di polimeri plastici impiegati nelle attività quotidiane frutto della continua evoluzione tecnologica.

Secondo il WWF, tra le plastiche più diffuse nell'ambiente vi sono il polietilene (PE), ampiamente utilizzato nel packaging; il polipropilene (PP), comune nei contenitori per alimenti; il cloruro di

polivinile (PVC), presente soprattutto nelle tubature e nel settore edilizio; il polietilene tereftalato (PET), tipico delle bottiglie; il polistirene (PS), impiegato nei prodotti monouso; il poliuretano (PU), usato nelle schiume espanse per l'isolamento; e le poliammidi (PA), diffuse nei tessuti sintetici come il nylon.

(Report_Oltre-la-plastica, 06/2025; https://www.wwf.it/uploads/Report_Oltre-la-plastica_5giu25-1.pdf)

Accanto a queste tipologie di plastica, è importante considerare anche i PFAS (*Per- and polyfluoroalkyl Substances* **ovvero** sostanze perfluoroalchiliche e polifluoroalchiliche), un gruppo di composti chimici assai stabili e persistenti in ambiente (per questo motivo noti anche come *forever chemicals*) ampiamente utilizzati in ambito industriale e in svariati prodotti di consumo. Oggi risultano sempre più rilevati nell'ambiente per la loro elevata resistenza alla degradazione come teflon e materiali antiaderenti utilizzati in cucina.

Il largo impiego di questi materiali, unito alla loro elevata resistenza alla degradazione, ha portato a una diffusione ubiquitaria delle microplastiche nell'ambiente, rendendo di fatto inevitabile l'esposizione sia all'ambiente ma anche all'uomo stesso.

Pertanto, vi è un bisogno assoluto di ricorrere ad approccio unificato nei confronti dei vari pattern di produzione di ogni bene, senza escludere il consumatore finale, per poter riuscire a mitigare questo problema sempre più emergente nel mondo in cui viviamo e che comporta ripercussioni sulla salute dell'ambiente, dell'animale e dell'uomo stesso, proprio per questo motivo si parla di un approccio *One Health*, di una unica salute interconnessa.

1.1 Microplastiche e nanoplastiche

Nel linguaggio comune spesso si parla di micro e nano plastiche in maniera assolutamente univoca, ma la loro differenza è ben evidenziata dall'EFSA e da vari articoli scientifici.

Le microplastiche sono le particelle di plastica di dimensioni comprese tra 0,1 e 5000 μm mentre le nanoplastiche, ancora più piccole e insidiose, sono di dimensioni comprese tra 1 e 100 nm o tra 1 e 1000 nm. (J. Gigault et al., Current opinion: what is a nanoplastic? Environ. Pollut. 235 (2018) 1030–1034)

Le particelle di micro e nano plastiche vengono rilasciate nell'ambiente che ci circonda grazie a svariate e differenti modalità.

La responsabilità principale potrebbe inizialmente essere attribuita alle industrie e al loro ciclo di smaltimento, ma la verità è che la questione riguarda proprio ciascuno di noi.

Innanzitutto, le microplastiche si distinguono in primarie e secondarie.

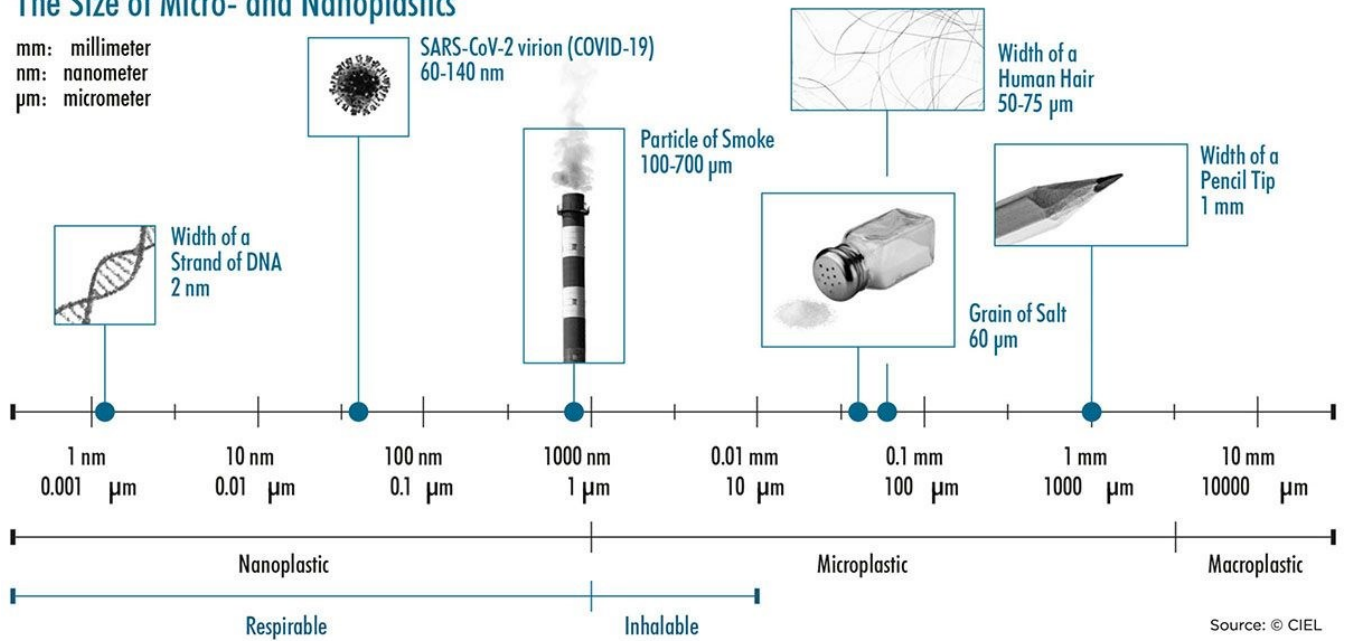
Le prime sono intenzionalmente prodotte e aggiunte a numerosi prodotti industriali e di consumo (tra cui cosmetici, detersivi, fertilizzanti, dispositivi medici e vernici) per conferire proprietà specifiche, quali capacità abrasive, esfolianti o stabilizzanti. Le microplastiche secondarie, invece, derivano dalla frammentazione di oggetti plastici di dimensioni maggiori (ad esempio bottiglie, imballaggi e utensili monouso) a seguito di processi di degradazione fisica, chimica e foto-ossidativa indotti da fattori ambientali quali radiazione solare, vento e azione meccanica dell'acqua.

Ed è proprio a questo livello della catena di sostenibilità ambientale che tutti i cittadini svolgono un ruolo cruciale in termini di inquinamento ambientale.

Le nanoplastiche derivano invece direttamente da ulteriori processi di degradazione delle microplastiche, ed essendo di dimensioni così inferiori, esse hanno un aumento significativo del rapporto superficie/volume, determinando una maggiore reattività chimica e una più elevata capacità di interazione con i diversi sistemi biologici.

The Size of Micro- and Nanoplastics

mm: millimeter
nm: nanometer
µm: micrometer



Dimensioni delle microplastiche e nanoplastiche (fonte: CIEL)

Tratto da: <https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/microplastiche-nanoplastiche-diffusione-esalute-ambiente/>

Ne consegue quindi che, per le loro dimensioni e origini secondarie, le nanoplastiche si ritrovano nell'ambiente in un ordine di grandezza altamente superiore alle microplastiche.

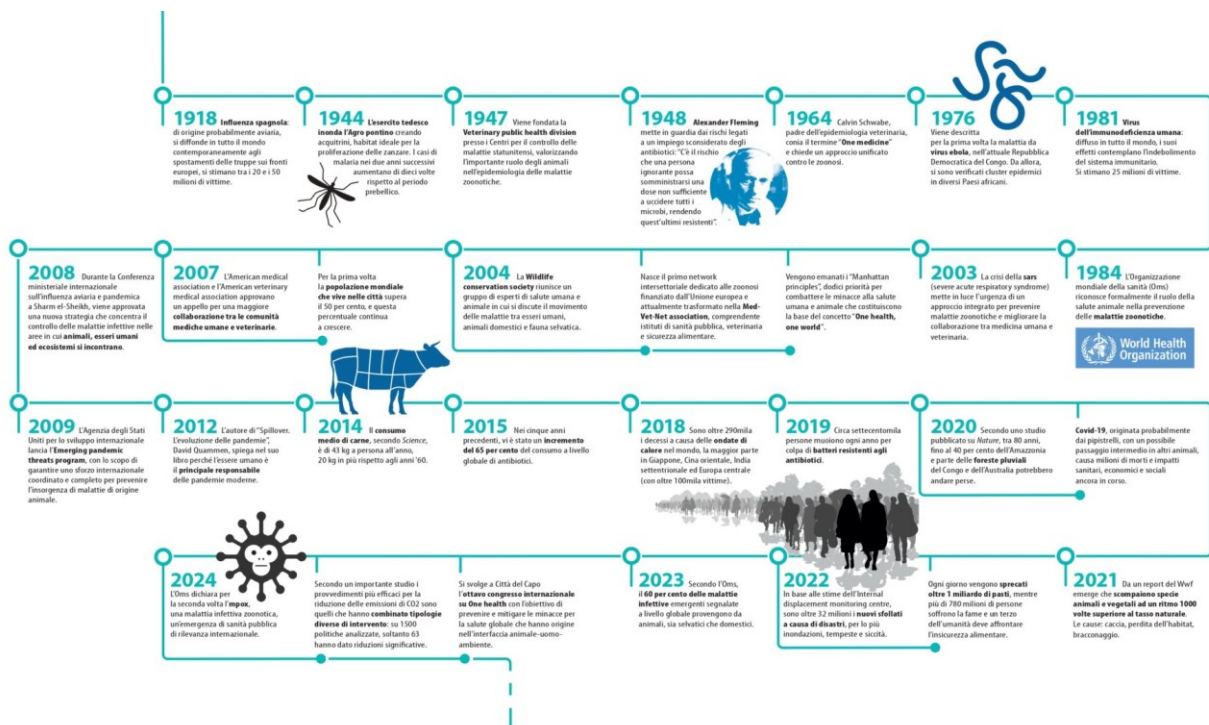
Per di più le nanoplastiche avrebbero effetti ancora più dannosi, in quanto capaci di attraversare la barriera intestinale traferendosi nei tessuti secondari dopo la loro ingestione.

1.2 Approccio One Health

Il concetto di *One Health* si riferisce a un approccio integrato e multidisciplinare che riconosce l'interconnessione tra la salute umana, la salute animale e l'equilibrio ambientale, evidenziando come tali ambiti siano strettamente interdipendenti e debbano essere affrontati in modo coordinato per garantire il benessere globale.

Sebbene il concetto sia entrato a far parte del dibattito internazionale solo negli ultimi decenni, è fin dai tempi di Rudolf Virchow e William Osler, pionieri della medicina moderna di fine '800, che la somiglianza nei processi di malattia tra animali ed esseri umani viene approfondita.

Tuttavia, la medicina umana, quella animale e la tutela dell'ambiente sono state a lungo praticate separatamente. Finché le crisi sanitarie hanno dimostrato che quando gli esseri umani alterano o distruggono gli ecosistemi si scatenano e diffondono nuovi virus.



Tratto da: <https://forward.recentiprogressi.it/it/rivista/numero-35-one-health/timeline/timeline-one-health/>

L'immagine riportata mostra come negli anni ci sia stata una insorgenza di malattie di origine animale, sottolineando quanto la salute dell'ambiente, la salute degli animali e la nostra siano interconnesse.

Basti pensare a malattie come l'avaria, l'influenza spagnola, la sindrome della mucca pazza o perfino alcuni ceppi di *Coronavirus*, tutte patologie trasmesse all'uomo dagli animali per mancanza di ambiente salubre o opportune norme di biosicurezza.

Dobbiamo risalire al 1964 per la prima affermazione del concetto di *One Medicine*, grazie al veterinario Clavin Schwabe, il quale chiedeva a gran voce un approccio unificato nei confronti delle zoonosi.

E soltanto nel 2003, a seguito della crisi mondiale di SARS (*sever acute respiratory syndrome*), verranno emanati dall'organizzazione mondiale della sanità i cosiddetti "*Manhattan principles*", ovvero dodici priorità per fronteggiare le minacce alla salute umana e animale, base del concetto stesso di *one health* e *one world*.

Nel 2011 si tiene a Melbourne, in Australia, il primo vero e proprio congresso internazionale dedicato all'approccio "*One Health*" consolidando la volontà politica e soprattutto scientifica di affrontare le sfide sanitarie globali in modo sistematico e transdisciplinare.

Nel 2023 OMS dichiara che il 60% delle malattie infettive emergenti segnalate a livello globale sono di origine zoonosica, e nel 2024 si svolge a Città del Capo l'ottavo fondamentale incontro *One Health* con l'obiettivo di prevenire le minacce per la salute globale che hanno origine nella triade uomo-animale-ambiente.

Attualmente, la rimozione delle barriere interdisciplinari che ancora persistono distinguendo salute ambientale e umana, rappresenta la sfida principale della politica della *One Health*.

Una delle barriere principali è la mancanza di comunicazione tra i diversi campi della filiera alimentare, quindi dal produttore di materie prime al laboratorio di trasformazione, al packaging e smaltimento rifiuti fino ad arrivare al consumatore finale. Si necessita di misure più severe ed "emergenziali" su ciascun ambito che contraddistingue i diversi stakeholder di produzione di un determinato bene, per non parlare di opportune leggi che vadano a focalizzarsi sui singoli cittadini in relazione allo smaltimento dei rifiuti (decoro cittadino).

Alla luce della frammentazione e della limitata comunicazione tra i diversi stakeholder emerge la necessità di un approccio sistemico.

Per questi motivi, l'approccio *One Health* viene promosso dall'Organizzazione Mondiale della Sanità, dalla FAO e dall'Organizzazione Mondiale per la Salute Animale, offrendo un modello efficace per affrontare sfide complesse come quelle riconducibili alle micro- e nanoplastiche.

1.3 Rilevanza del problema attuale

Come già evidenziato, la diffusione della plastica negli ecosistemi marini, terrestri e negli ambienti urbani rappresenta una criticità crescente, strettamente legata al suo utilizzo estensivo, soprattutto nel packaging.

Basti pensare a qualche dato allarmante e, per giunta, in costante aumento.

Nel 2021, ogni persona residente nell'UE ha generato una media di 36,1 chili di rifiuti di imballaggio di origine plastico. Il volume dei rifiuti di imballaggio in plastica generati per abitante è aumentato di circa 8 chili a persona nell'arco temporale compreso tra il 2012 e il 2022.

Ogni anno tra i 19 e i 23 milioni di tonnellate di plastica finiscono nel suolo, nei fiumi e negli oceani. Questo ha un impatto negativo sugli ecosistemi e influisce direttamente sui mezzi di sussistenza delle persone, sulla capacità di produzione alimentare e sul benessere sociale. (<https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20181212STO21610/rifiuti-di-plastica-e-riciclaggio-nell-ue-i-numeri-e-i-fatti>).

Tuttavia, solo una piccola frazione di questa “valanga” di rifiuti di plastica viene riciclata (9-11%), e il restante (19%) viene incenerito mentre quasi il 50% finisce nelle discariche legali. Un'altra ingente porzione (22%) si accumula nelle discariche non controllate a cielo aperto, o viene bruciato in roghi che avvelenano di miasmi tossici l'ambiente circostante.

Per comprendere l'entità del fenomeno, nel 2019, 22 milioni di tonnellate di plastica sono state disperse nell'ambiente.

Questa plastica “senza meta” si accumula in laghi, fiumi e oceani: nel 2019 6,1 milioni di tonnellate sono finite negli ecosistemi acquatici, ormai talmente ostruiti che ci vorrebbero decenni a liberarli (Intini Elisabetta, 2022, Focus- Ecologia Solo il 9% della plastica nel mondo è correttamente riciclato).

Per non parlare poi della mancanza di senso civico; sempre più frequentemente insorgono fenomeni riconducibili a rifiuti di plastica abbandonati lungo fossi, strade o edifici.

Neppure le associazioni di volontario come “*Plastic free*” riescono, purtroppo, a colmare il disagio che creano questi atti vandalici all’ambiente e a noi stessi come civiltà.

Infine, con la pandemia da *Coronavirus* che ha interessato tutto il mondo per circa 3 anni, la produzione di mascherine e guanti in lattice monouso è aumentata esponenzialmente.

Si stima che a livello globale siano stati prodotti oltre 8 milioni di tonnellate di rifiuti plastici ricollegabili al periodo pandemico. In Italia, all'inizio dell'emergenza, si calcolava l'utilizzo giornaliero di circa 37,5 milioni di mascherine e di 80 milioni di guanti, con circa 1.240 tonnellate al giorno di rifiuti aggiuntivi.

(<https://achabgroup.it/approfondimenti/impatti-di-covid-19-sullambiente-in-europa/#cnt>).

Oltre al consumo legato alla produzione di questi beni, come estrazione delle risorse primarie, ma anche produzione e trasporto, si evidenzia come vi sia stata una mal gestione da parte dei cittadini sulla gestione dei rifiuti (con fenomeni di abbandono di mascherine e guanti monouso nell’ambiente circostante).

Questo fenomeno, oltre a causare la possibile morte da ingestione di pesci e uccelli, ha causato una ulteriore creazione di micro e nano plastiche in seguito all’azione combinata di agenti atmosferici, raggi ultravioletti e sbalzi termici naturali.

Queste particelle possono essere rilasciate dalla degradazione dei tessuti dello strato interno (polipropilene) e dallo strato esterno delle mascherine chirurgiche facciali (polietilene).



Tratto da: <https://www.infodata.ilsole24ore.com/2023/06/10/linquinamento-della-plastica-lambiente-e-litalia-in-cinque-numeri>

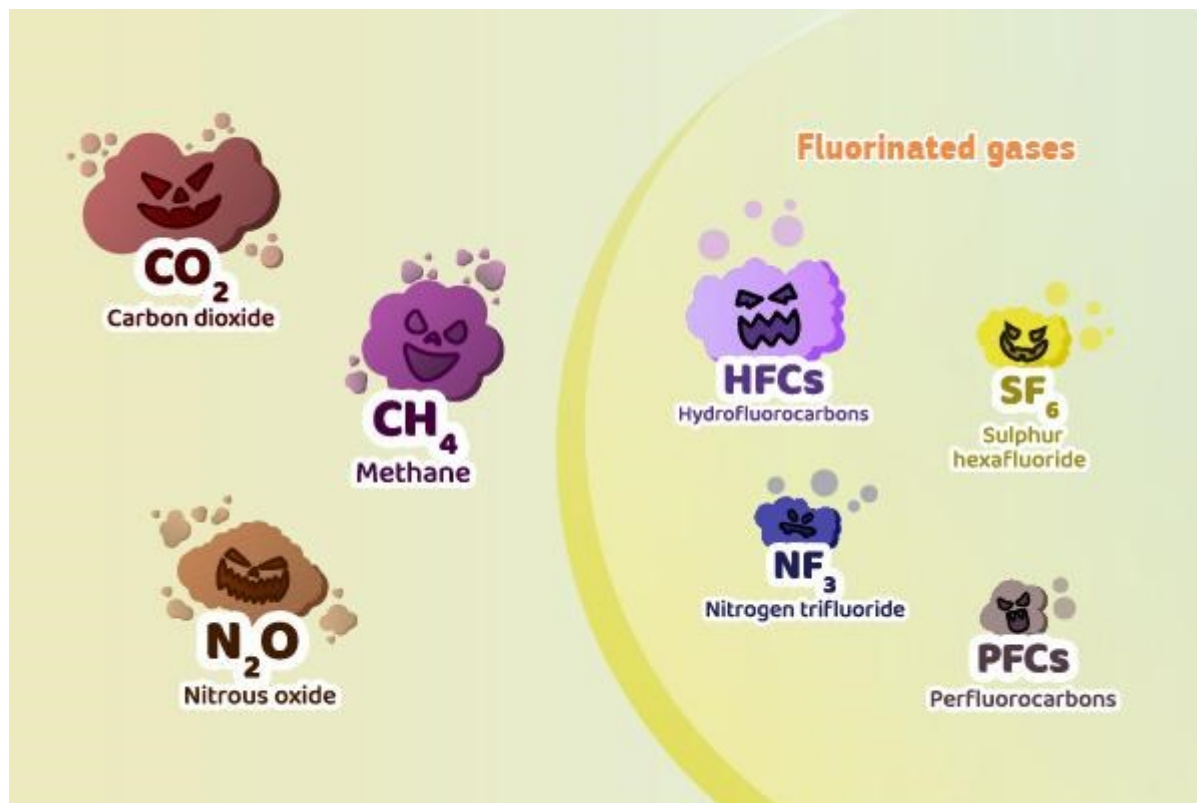
L'immagine schematica e riassuntiva mostrata dal Sole 24 ore, ci fornisce alcuni dati allarmanti sulla ripercussione della plastica sulla salute del pianeta, inclusa quella dell'uomo.

La plastica rilasciata in un ambiente non idoneo e non condotta a smaltimento, impiega più di 1000 anni a scomparire completamente e non prima di aver rilasciato miliardi di micro e nano particelle attorno a sé. Pensiamo inoltre che sono ben 110 mila le microplastiche al giorno che l'uomo può ingerire attraverso l'aria, il cibo e l'acqua. Si intuisce, pertanto, quanto la problematica trovi riscontri in tutti i vertici della vita stessa.

Inoltre, un ultimo fattore, ma non per importanza, che allarma parecchio la comunità scientifica sulla rilevanza del problema delle micro e nano plastiche è il suo fondamentale ruolo nella dinamica del cambiamento climatico.

Il cambiamento climatico rappresenta una delle principali sfide ambientali globali ed è ormai inequivocabilmente attribuito alle attività antropiche, in particolare all'uso intensivo di combustibili fossili. Secondo l'Organizzazione Meteorologica Mondiale, le concentrazioni atmosferiche di gas serra hanno raggiunto livelli record: l'anidride carbonica ha superato del 150% i livelli preindustriali,

il metano del 262% e il protossido di azoto del 123%. (<https://www.wwf.it/cosa-facciamo/clima/cambiamenti-climatici>)



Tratto da: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_it

Negli ultimi decenni si osserva un aumento significativo della frequenza e dell'intensità degli eventi climatici estremi, tra cui ondate di calore, siccità e precipitazioni intense. Un esempio emblematico è rappresentato dall'estate del 2022, la più calda mai registrata in Europa, con anomalie termiche superiori ai 2 °C rispetto alla media storica.

Questi cambiamenti stanno già influenzando profondamente gli ecosistemi, alterando fenologia, distribuzione geografica e dinamiche riproduttive e produttive di numerose specie.

E, a questo punto, entra in gioco anche il grave problema dei micro-polimeri di plastica, che già individualmente rappresentano problematiche ingenti. Le due emergenze sono infatti profondamente interconnesse.

Da un lato il cambiamento climatico, infatti, aumenta la degradazione e la scomposizione dei polimeri plastici soggetti ad erosione in ambiente esterno attraverso il riscaldamento globale, l'aumento dell'umidità e l'intensificazione della radiazione UV.

Dall'altro lato poi la liberazione di polimeri così sottili di plastica incide in atmosfera contribuendo in parte al cambiamento climatico attraverso una serie di meccanismi indiretti. In particolare, la degradazione dei materiali plastici può portare al rilascio di gas serra quali metano (CH_4) ed etilene (C_2H_4), mentre la loro interazione con il fitoplancton e con le comunità microbiche può compromettere i processi di sequestro del carbonio dall'ambiente circostante.

2. Nanoplastiche nell'ambiente

Considerata la produzione su larga scala e l'utilizzo diffuso della plastica prodotta a livello planetario ed il loro abuso è facilmente prevedere che si possa registrare un notevole spreco nell'ambiente.

Si stima che circa 4,8 – 12,7 milioni di tonnellate di rifiuti finiscano nell'oceano dalla terraferma ogni anno (Jambeck et al., 2015)

L'elevata produzione di rifiuti plastici, unita alla notevole resistenza alla degradazione delle materie plastiche, determina un impatto ambientale significativo, configurandosi oggi come una vera e propria minaccia globale.

Le plastiche, infatti, persistono nell'ambiente per tempi estremamente lunghi e, attraverso processi di frammentazione fisica e fotodegradazione, si trasformano progressivamente in microplastiche e nanoplastiche.

Tali particelle contribuiscono non solo all'inquinamento diffuso degli ecosistemi, ma sono anche associate a problematiche ambientali su ampia scala che prevedono: cambiamenti climatici, acidificazione degli oceani e, indirettamente, alterazioni degli equilibri atmosferici.

Una volta rilasciate nell'ambiente, le microplastiche diventano facilmente biodisponibili per un'ampia gamma di organismi viventi.

La loro ridotta dimensione ne facilita infatti l'ingestione da parte di numerosi organismi marini, inclusi invertebrati come echinodermi e molluschi, pesci, uccelli marini e vertebrati di dimensioni maggiori (come tartarughe marine, sardine e perfino mammiferi marini).

Questo fenomeno solleva preoccupazioni rilevanti in quanto tali particelle possono accumularsi lungo la catena trofica, dando origine a processi di bioaccumulo con potenziali effetti particolarmente tossici sugli organismi e conseguenze negative sull'intero equilibrio degli ecosistemi marini.

Inoltre, le microplastiche possono agire come vettori per contaminanti chimici e microrganismi patogeni, aumentando ulteriormente i rischi eco-tossicologici.

La loro presenza ubiquitaria negli ambienti acquatici e terrestri rende questo tipo di inquinamento particolarmente insidioso, sia per la difficoltà di rimozione sia per la complessità delle interazioni con i sistemi biologici e chimico-fisici dell'ambiente (Alimba & Faggio, 2019; Wright & Kelly, 2017).

Distinguiamo quindi l'inquinamento delle micro e nano plastiche nei tre distinti ambienti terrestri, vale a dire nel suolo o terraferma, nell'acqua, quindi in laghi, fiumi e oceani e nell'aria.

2.1 Distribuzione nanoplastiche nel suolo

La presenza di micro e nanoplastiche nel suolo, in particolare negli agroecosistemi, induce alterazioni che coinvolgono la crescita delle piante, il processo fotosintetico, i processi biochimici e il ciclo dell'azoto nel suolo; questo secondo i dati di una ricerca condotta dall'Università Cattolica (campus di Piacenza). (<https://www.liberamidallaplastica.it/micro-e-nanoplastiche-la-loro-presenza-nei-terreni-agricoli-altera-radici-e-foglie>)

La contaminazione da micro- e nanoplastiche nei suoli agricoli rappresenta una problematica emergente, la cui rilevanza è stata riconosciuta solo recentemente rispetto a quanto fa riferimento agli ambienti acquatici. Ogni anno, infatti, quantità significative di particelle plastiche si accumulano nei terreni agrari, principalmente attraverso l'utilizzo di acque irrigue contaminate, compost, fanghi di depurazione, materiali plastici impiegati in agricoltura e deposizioni di origine atmosferica. A causa della loro elevata resistenza ai processi di degradazione, le plastiche tendono a persistere nell'ambiente e a frammentarsi progressivamente in particelle di dimensioni sempre più ridotte, con potenziali implicazioni di tipo tossicologico ed ecosistemico.

In questo contesto, studi recenti hanno evidenziato come la presenza di micro- e nanoplastiche possa influenzare non solo le proprietà fisiche, chimiche e microbiologiche del suolo, ma anche i processi fisiologici e biochimici delle piante coltivate. In particolare, uno studio condotto presso Università

Cattolica del Sacro Cuore e coordinato da Luigi Lucini e Marco Trevisan, pubblicato sulla rivista *Plant Physiology and Biochemistry*, ha analizzato gli effetti di particelle di polietilene di diverse dimensioni sulla crescita della lattuga, *Lactuca sativa L.* (Lucini L. et Trevisan M.,2024)

I risultati hanno mostrato che la dimensione delle particelle plastiche rappresenta un fattore determinante nel modulare la risposta della pianta.

In particolare, le particelle di dimensioni minori tendono a influenzare maggiormente i tessuti fogliari, alterando parametri quali l'attività fotosintetica e il contenuto di pigmenti, quindi riducendo la biomassa totale dell'insalata e la sua area fogliare.

Mentre le particelle di dimensioni maggiori esercitano un impatto più marcato sul metabolismo radicale con un'alterazione dell'assorbimento di nutrienti ed conseguente accumulo anomalo di composti azotati e crescita non ottimale.

Un aspetto particolarmente rilevante emerso dallo studio riguarda la possibilità che micro- e nanoplastiche vengano assorbite dalle radici e traslocate verso le parti aeree della pianta. Tale evidenza solleva importanti interrogativi in merito alla sicurezza alimentare, oltre che alle potenziali implicazioni per la sostenibilità dei sistemi agricoli.

Per di più, l'alterazione del ciclo dell'azoto, indotta dalla presenza di microplastiche nel suolo, può compromettere anche i processi di trasformazione e disponibilità dei nutrienti, riducendo l'efficienza dei fertilizzanti azotati. Ciò può tradursi in un ridotto assorbimento dell'azoto da parte delle colture e in un aumento delle perdite nell'ambiente, con conseguenti implicazioni sia economiche sia ambientali. In tale contesto, queste alterazioni rappresentano una potenziale criticità rispetto agli obiettivi di riduzione degli input chimici promossi dalle politiche agricole europee.

(Lucini, L., et al.,2024).

Va sottolineato, inoltre, l'impiego smodato di materiale plastico proprio nell'agricoltura stessa.

Oltre, infatti, alle fibre sintetiche provenienti dagli scarichi domestici, che possono essere veicolate nei suoli agricoli attraverso fanghi di depurazione con micro e nanoplastiche e acque di irrigazione su suoli coltivabili, vi sono esempi diretti di usi di materiali plastici da parte del sistema agricolo sul suolo.

Basti pensare ai teli pacciamanti, coperture per serre, reti antigrandine, ai sistemi di irrigazione e contenitori per prodotti fitosanitari. A questi si aggiungono numerosi dispositivi di piccole dimensioni, come legacci, supporti e diffusori, nonché particelle ancora più minute, come le microcapsule impiegate per il rilascio controllato di fertilizzanti e agrofarmaci. In assenza di un corretto smaltimento, tali materiali tendono ad accumularsi nell'ambiente e, a seguito di processi di degradazione fisica, chimica e biologica, si frammentano in micro- e nanoplastiche. Queste particelle, spesso invisibili ad occhio nudo, persistono nel suolo e possono modificarne in modo significativo le proprietà del suolo.

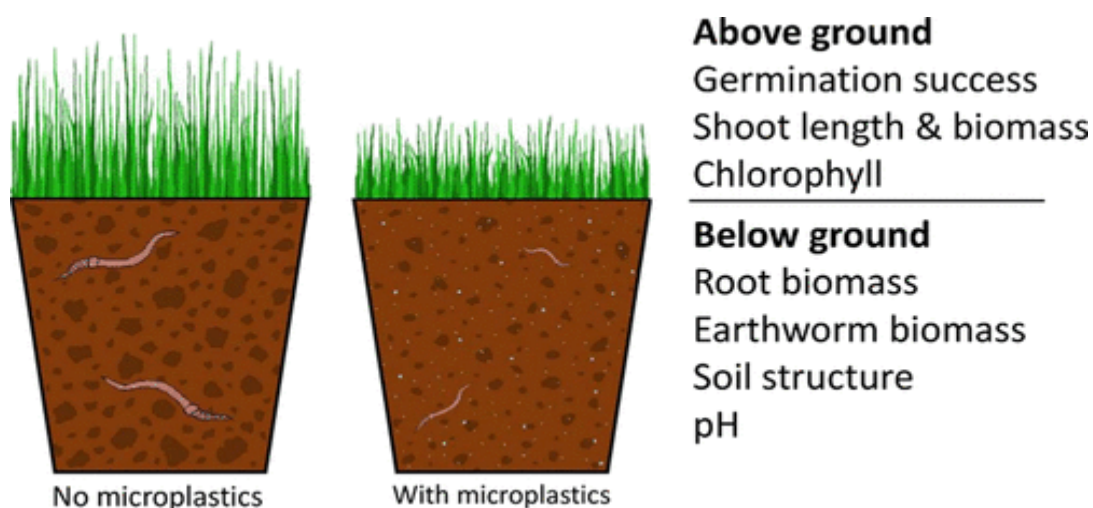
Secondo il progetto europeo “Papillons Project” — un’iniziativa di ricerca finanziata dall’Unione Europea nell’ambito del programma Horizon 2020 e dedicata allo studio della presenza e degli effetti delle microplastiche nei suoli agricoli — nei terreni agricoli europei la concentrazione di plastica può arrivare fino allo 0,1% della sostanza secca, indicando un livello di contaminazione significativo.

Dal punto di vista chimico, le plastiche sono costituite da polimeri sintetici o semisintetici, generalmente derivati da fonti fossili, caratterizzati da elevata resistenza alla degradazione e conseguente persistenza ambientale, il che rende questo materiale apparentemente molto duttile e vantaggioso per l’uso esterno.

Tra i materiali più comunemente utilizzati in agricoltura figurano il polietilene (PE), il polipropilene (PP) e il polietilene tereftalato (PET), i quali, pur offrendo vantaggi tecnici rilevanti, sono soggetti a frammentazione nel tempo con formazione di microplastiche.

Accanto a questi, si stanno diffondendo le cosiddette bioplastiche, che possono essere di origine biologica, biodegradabili o entrambe; tuttavia, non tutte garantiscono una completa degradazione in ambiente naturale, rendendo necessaria una valutazione attenta delle loro caratteristiche e certificazioni, come previsto dalla norma EN 17033, standard europeo che definisce i requisiti e i metodi di prova per i film di pacciamatura biodegradabili nel suolo utilizzati in agricoltura e orticoltura.

L'accumulo di micro- e nanoplastiche nel suolo viene associato a numerose alterazioni delle sue proprietà fisiche, chimiche e biologiche. In particolare, è stato osservato un aumento della densità apparente del suolo, con conseguente riduzione della porosità e limitazione dello sviluppo radicale, oltre a una diminuzione della capacità di ritenzione idrica. Sono state inoltre documentate variazioni del pH, con effetti sulla disponibilità dei nutrienti, e modificazioni nella composizione delle comunità microbiche e parassitarie come nematodi, lombrichi e protozoi del suolo, con diminuzione della microfauna e conseguente ripercussione sulla fertilità del suolo e sul funzionamento degli ecosistemi stessi (Cinquemani, T., 2024 Inquinamento da plastiche nei suoli agricoli. AgroNotizie.).



<https://www.greenme.it/ambiente/microplastiche-fertilita-terreni/>

Un ulteriore aspetto di crescente interesse riguarda la capacità delle microplastiche di essere assorbite dai tessuti vegetali e di accumularsi nelle parti edibili delle colture, come visto precedentemente.

Studi condotti, tra gli altri, dall'Università degli Studi di Catania, suggeriscono la possibile presenza di queste particelle in prodotti destinati al consumo umano come patate, carote e broccoli, sollevando interrogativi rilevanti in termini di sicurezza alimentare e potenziali effetti sulla salute.

Per salvaguardare quindi l'agricoltura e il terreno coltivabile, poi destinato all'alimentazione dell'uomo, sarebbe corretto usare sempre materiale biodegradabile certificato laddove si può; in alternativa riciclare in modo corretto e attento ogni materiale plastico adoperato come teli frangivento o tubi di irrigazione, come quelli interrati usati nella coltivazione del pomodoro, andando a sostituirli stagionalmente e in ogni eventuale caso di usura progressiva.

2.2 Micro e nanoplastiche anche nell'aria

La presenza di microplastiche non è limitata agli ambienti acquatici e terrestri, ma interessa anche la componente atmosferica.

Evidenze recenti dimostrano come le particelle microplastiche siano state rilevate persino in aree remote e considerate relativamente incontaminate, come ad esempio regioni montane e artiche.

Uno studio pubblicato su "Nature Geoscience", rivista scientifica mensile pubblicata dal Nature Publishing Group, ha ampiamente dimostrato come le microplastiche possano essere trasportate nell'atmosfera su lunghe distanze per poi depositarsi attraverso precipitazioni e deposizione secca. In particolare, una ricerca condotta nei Pirenei (al confine naturale tra Francia e Spagna), area caratterizzata da bassa densità abitativa e limitata attività industriale, ha evidenziato un significativo fenomeno di deposizione atmosferica. (Allen et al., 2019)

I ricercatori hanno raccolto campioni per un periodo di cinque mesi, rilevando una deposizione media di circa 365 particelle per metro quadrato al giorno, suggerendo l'esistenza di una vera e propria "pioggia" di microplastiche anche in contesti remoti.

Le analisi, effettuate mediante tecniche di microscopia e spettroscopia, hanno confermato la presenza di diverse tipologie di polimeri, trasportati da vento, neve e pioggia.

Questi risultati indicano che la distribuzione delle microplastiche nell'ambiente non dipende esclusivamente dalla prossimità a fonti di emissione locali, ma è fortemente influenzata dai processi atmosferici che ne permettono la dispersione su scala regionale e globale. L'atmosfera, quindi, rappresenta un vettore chiave nella diffusione delle microplastiche tra ecosistemi differenti, inclusi suolo e acque.

Dal punto di vista ecologico, la deposizione atmosferica di microplastiche può contribuire alla contaminazione dei suoli agricoli e degli ecosistemi naturali, con possibili effetti negativi sulla vegetazione e sulla fauna.

Inoltre, la presenza di queste particelle nell'aria solleva importanti preoccupazioni per la salute umana.

Le microplastiche inalabili, in particolare quelle di dimensioni più ridotte, quindi di nanoplastiche, possono penetrare nel tratto respiratorio, accumularsi nei tessuti e indurre risposte infiammatorie o effetti tossicologici (Zhang et al., 2020).

La presenza di microplastiche nell'atmosfera è il risultato di una combinazione di emissioni primarie e processi secondari di frammentazione.

Le microplastiche possono infatti essere rilasciate direttamente nell'aria oppure derivare dalla degradazione di materiali plastici più grandi attraverso processi fisici e fotochimici, quali abrasione meccanica, esposizione alla radiazione ultravioletta e ossidazione (Dris et al., 2016; Zhang et al., 2020).

Tra le principali fonti di emissione atmosferica si annoverano l'usura degli pneumatici, l'abrasione di superfici plastiche e il rilascio di fibre da materiali tessili sintetici. In particolare, è stato dimostrato che le fibre tessili rappresentano una componente significativa delle microplastiche aerodisperse in ambienti urbani esterni. (Dris et al., 2017).

Un ulteriore contributo è rappresentato dai processi di risospensione, mediante i quali particelle precedentemente depositate su suolo e superfici vengono rimesse in atmosfera per effetto del vento e di altre perturbazioni meccaniche, contribuendo alla natura dinamica delle microplastiche nel particolato atmosferico.

Anche l'interfaccia acqua-aria gioca un ruolo rilevante: gli oceani e altri corpi idrici fungono infatti da veri e propri serbatoi di microplastiche che possono essere aerosolizzate attraverso il "*sea-spray*", ovvero il processo mediante il quale piccole goccioline d'acqua, generate dalla rottura delle onde e

dallo scoppio di bolle, vengono disperse nell'atmosfera, trasportando con sé anche microplastiche (Allen et al., 2022).

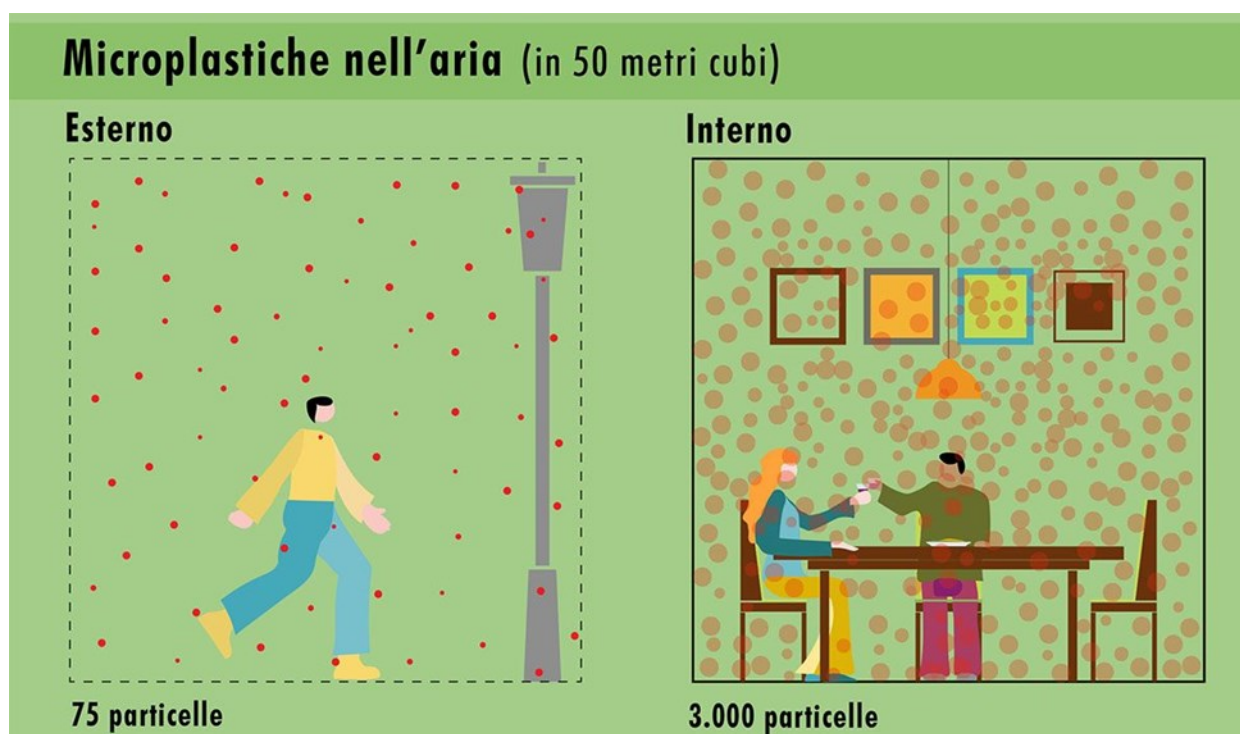
Una volta immesse nell'aria, le microplastiche possono essere trasportate passivamente su lunghe distanze dai processi atmosferici. Evidenze sperimentali hanno dimostrato la loro presenza in aree remote, incluse regioni montane e polari, nonché in precipitazioni atmosferiche come pioggia e neve, indicando una dispersione su scala regionale e globale come citato precedentemente.

Nel complesso, questi processi evidenziano come l'atmosfera rappresenti un vettore fondamentale per la diffusione delle microplastiche tra ecosistemi terrestri e acquatici e dimostra quanto tutto l'ecosistema sia interconnesso da fattori in comune, alimentando il fenomeno della diffusione di nanoplastiche.

Inoltre, da una ricerca condotta in ambito urbano si evince che l'aria interna di un edificio è generalmente più inquinata dell'ambiente esterno, a causa degli arredi, vernici, detergenti, e fumo; fattori questi che rilasciano sostanze nell'aria ad alti livelli potendo indurre "*Sick Building Syndrome*" (SBS o sindrome dell'edificio malato).

Questa sindrome si manifesta in situazioni in cui gli occupanti di un edificio cominciano ad accusare problemi di salute acuti e non specifici, come mal di testa, irritazione agli occhi e affaticamento, che sembrano collegati al tempo trascorso nell'edificio e non è possibile identificare una malattia specifica. I sintomi in genere migliorano una volta usciti dall'edificio e spesso la causa è imputabile ad una condizione di scarsa ventilazione o a difetti di condizionamento, *outgassing*, oppure alla presenza di contaminanti chimici o biologici.

E le microplastiche non fanno eccezione.



Microplastiche nell'aria dell'ambiente interno ed esterno (UNEP; 2021)

<https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/microplastiche-nanoplastiche-diffusione-esalute-ambiente/>

L'UNEP (*United Nations Environment Programme*, ovvero Programma Ambientale delle Nazioni Unite), in un report frutto dei principali studi sull'argomento, rileva concentrazioni di microplastiche nell'aria interna fino a 3.000 particelle, a fronte delle 75 rinvenibili nell'aria esterna.

E in tempi recenti, la pandemia da Covid-19 ha aggravato, per quanto possibile, il problema. L'impiego indiscriminato, su scala globale, di dispositivi di protezione monouso ha comportato un consumo mensile di circa 129 miliardi di mascherine (Prata et al., 2020), considerando una popolazione mondiale di 7,8 miliardi di persone (Worldometers.info, 2021).

Inoltre, ciò contribuisce ad aumentare l'inalazione di nanoplastiche dovuta all'uso eccessivo di mascherine chirurgiche.

2.3 Micro e nano plastiche nell'acqua

Tra i diversi comparti ambientali, vale a dire acqua, atmosfera e suolo, l'acqua rappresenta il sistema in cui l'inquinamento da micro e nanoplastiche risulta particolarmente preoccupante e allarmante, sia per la sua capacità di accumulo sia per il suo ruolo di trasporto onnipresente.

Le matrici acquatiche, infatti, agiscono come veri e propri collettori degli inquinanti plastici provenienti da fonti terrestri e atmosferiche, favorendone la dispersione su scala globale.

In questo contesto, le nanoplastiche mostrano una elevata mobilità e biodisponibilità, aumentando il potenziale di interazione con organismi acquatici, con gli animali da allevamento, con eventuali microrganismi (tal volta a carattere zoonotico) e con l'uomo stesso.

Pertanto, più che essere semplicemente una fonte di contaminazione, l'acqua costituisce un nodo centrale nella distribuzione e nell'impatto delle nanoplastiche. (Fei Yu et al., 2019)

Tra le principali vie d'ingresso alle micro e nanoplastiche negli ecosistemi acquatici vi sono le acque reflue urbane che raccolgono molteplici contaminanti derivanti dalle attività antropiche.

Uno studio condotto presso la Washington State University, guidato da Indranil Chowdhury, ricercatore e docente universitario, ha analizzato il comportamento delle nanoplastiche negli ambienti acquatici, evidenziando due principali dinamiche: da un lato, le particelle possono rimanere disperse e trasportate lungo i sistemi idrici, inclusi quelli destinati all'acqua potabile; dall'altro, possono accumularsi negli impianti di trattamento delle acque reflue, trasferendosi nei fanghi di depurazione.

Le acque reflue sono tutte quelle acque utilizzate nelle attività umane, domestiche, industriali o agricole e che, prima di tornare in natura, devono essere "bonificate" e depurate.

Successivamente queste acque possono essere restituite ai corpi idrici naturali, quindi ai fiumi, laghi, mare oppure possono essere reimpiegate ad esempio in agricoltura per irrigazione o in ambito industriale.

Il destino delle nanoplastiche in ambiente acquoso dipende in modo significativo dalla composizione chimica dell'acqua. In particolare, il pH svolge un'influenza limitata, mentre risultano determinanti la forza ionica, legata alla concentrazione di sali disciolti, e la presenza di materia organica naturale. Questi fattori ne condizionano la stabilità, la mobilità e l'aggregazione delle particelle.

In condizioni di acque superficiali dolci, le nanoparticelle di polietilene tendono a rimanere relativamente stabili e quindi possono muoversi facilmente nell'ambiente.

Al contrario, in presenza di maggiore salinità o di una composizione chimica più complessa, le particelle possono diventare instabili e tendere ad aggregarsi, cioè ad unirsi tra loro formando aggregati più grandi.

I risultati indicano che i sistemi convenzionali di trattamento delle acque potabili potrebbero non essere completamente efficaci nella rimozione delle micro e nanoplastiche, a causa delle loro dimensioni estremamente ridotte e del loro comportamento variabile in funzione delle condizioni chimiche dell'acqua.

Le problematiche risultano quindi molteplici. Da un lato vi è il tema dei fanghi di depurazione, ovvero il materiale solido separato dalle acque reflue durante i processi di trattamento, costituito da sostanza organica, microrganismi e residui di inquinanti, comprese micro e nanoplastiche.

Tali fanghi, dopo opportuni trattamenti, possono essere talvolta riutilizzati in agricoltura come fertilizzanti; tuttavia, questi processi non sono in grado di garantire la completa rimozione delle particelle plastiche, che possono in questo caso essere reimmesse nei suoli.

Dall'altro lato vi è il problema delle acque reflue depurate che, se non completamente liberate dalle micro e nanoplastiche, vengono reimmesse nei corpi idrici superficiali.

Ciò può contribuire alla contaminazione degli ecosistemi acquatici, con possibili effetti sulla flora e fauna e potenziali ripercussioni lungo la catena alimentare fino all'uomo (Shams, M., Alam, I., & Chowdhury, I. 2019).

In questo contesto, le nanoplastiche presenti nel suolo e nell'acqua possono entrare nei sistemi biologici e potenzialmente trasferirsi lungo l'intera catena alimentare.

Un recente studio pubblicato sulla rivista scientifica internazionale *Nano Today*, condotto dai ricercatori dell'Università della Finlandia, ha analizzato questo fenomeno ricostruendo sperimentalmente il destino delle nanoplastiche lungo una catena trofica.

Quest'ultima è una sequenza di organismi, composta da piante, insetti e pesci, attraverso cui energia e materia vengono trasferite all'interno di un ecosistema tramite il nutrimento.

Nello studio, particelle di polistirene di circa 250 nanometri sono state marcate con un tracciante, il gadolinio, e introdotte in un sistema che comprendeva lattuga coltivata in suolo contaminato, larve di mosca soldato nera alimentate con le piante e pesci insettivori nutriti con le larve. (Fazel Abdolapur Monikh et al., 2022).

I risultati hanno mostrato che le nanoplastiche possono essere assorbite dalle radici delle piante e trasferite ai tessuti fogliari, senza evidenze di possibili degradazioni.

Successivamente, le larve di insetto alimentate con le piante contaminate hanno accumulato le particelle principalmente nel tratto digestivo, dove sono rimaste presenti anche dopo un periodo di digiuno, indicando una scarsa eliminazione biologica di questi polimeri.

Infine, nei pesci alimentati con le larve, le nanoplastiche sono state rilevate in branchie, intestino e fegato, mentre non sono state rinvenute nel cervello.

Nel complesso, lo studio suggerisce che le nanoplastiche possono attraversare più livelli della catena alimentare senza essere degradate, accumulandosi progressivamente nei tessuti degli organismi. Questo meccanismo ci spiega la possibile traslocazione delle nanoplastiche tra flora contaminata e fauna, compreso l'uomo, sia attraverso il consumo di alimenti di origine vegetale sia animale. Sebbene siano necessari ulteriori approfondimenti per quantificare l'esposizione reale e gli effetti a lungo termine, i risultati indicano che le nanoplastiche possono comportarsi come contaminanti persistenti capaci di circolare tra suolo, acqua ed ecosistemi biologici.

Le nanoplastiche sono state trovate all'interno delle foglie di lattuga, nell'intestino delle larve e nell'apparato digerente e nelle branchie dei pesci.



<https://ilfattoalimentare.it/nanoplastiche-catena-alimentare.html>

Tra i contaminanti emergenti rilevanti per la qualità delle acque che rientrano nel discorso di micro e nanoparticelle bisogna citare anche l'inquinamento da PFAS (sostanze per- e polifluoroalchiliche ovvero composti chimici artificiali considerati inquinanti ambientali persistenti).

Sebbene differiscano per natura chimica e comportamento ambientale, entrambe le classi di contaminanti rappresentano una sfida significativa nell'ottica One Health per i potenziali effetti integrati su ecosistemi, fauna e salute umana. (Souza et al, 2026)

I PFAS rappresentano un vasto gruppo di sostanze chimiche di sintesi utilizzate per le loro proprietà di resistenza all'acqua, al grasso e alle macchie in prodotti come pentole antiaderenti, imballaggi per alimenti, indumenti idrorepellenti e schiume antincendio. Anche le sostanze attive contenute nei pesticidi possono essere costituite da PFAS.

Noti anche come "sostanze chimiche eterne", i PFAS sono estremamente persistenti e, una volta introdotti nell'ambiente, resistono alla degradazione per lunghi periodi.

Il fatto che questi composti possano permanere a lungo nell'ambiente aumenta la probabilità della loro presenza negli alimenti e solleva preoccupazioni circa il loro impatto a lungo termine sulla salute umana ma anche dell'ambiente e del bestiame che si abbevera di acqua inquinata.

Tra gli effetti avversi alla salute dell'uomo vi è una riduzione della risposta immunitaria, una riduzione degli ormoni, aumento dei tassi di colesterolo, obesità e aumento di risposta infiammatorie a malattie. (<https://www.efsa.europa.eu/it/topics/per-and-polyfluoroalkyl-substances-pfas>)

Queste sostanze a lungo usate e abusate nell'uso quotidiano e domestico delle persone sono diventate oggetto di preoccupazione dopo l'inquinamento delle acque che ha riguardato anche il nostro paese.

L'organizzazione ambientalista Greenpeace Italia, tra settembre e ottobre 2024 ha raccolto campioni in 235 città di tutte le Regioni e province autonome della nostra nazione nell'ambito dell'indagine indipendente "Acque Senza Veleni".

Grazie ai campioni raccolti, Greenpeace ha realizzato la prima mappa della contaminazione da PFAS nelle acque potabili in Italia.

Contaminazione di PFAS nei comuni italiani monitorati*

*In base al parametro SOMMA DI PFAS (D.Lgs 18/2023)



<https://www.greenpeace.org/italy/storia/26119/pfas-analisi-acqua-potabile-in-tutte-le-regioni-d-italia/>

L'analisi dei campioni dimostra una diffusa presenza di questi composti pericolosi e tossici: le molecole più diffuse sono risultate essere diverse, tra queste per il 47 % dei campioni analizzati si è trovato il cancerogeno PFOA ((acido perfluorooottanoico), composto chimico sintetico usato nella produzione di plastica, materiali plastici di uso quotidiano e antiaderenti.

Inseguito si è riscontrato un inquinamento per il 40 % di campioni analizzati dal composto a catena ultracorta TFA (*trifluoroacetic acid*), un composto chiamato anche acido trifluoroacetico che risulta

essere altamente mobile e diffuso nell'acqua potabile, piovana e in prodotti agricoli, che si forma dalla degradazione di pesticidi, refrigeranti e altri composti industriali.

Infine, si è riscontrato nel 22 % dei campioni i possibil cancerogeni PFOS (perfluorottano solfonato, in inglese *perfluorooctane sulfonate*), composti chimici sintetici persistenti, parte della famiglia dei PFAS, utilizzati dagli anni '50 come impermeabilizzanti e antimacchia in schiume antincendio, tessuti e rivestimenti. (Ungherese Giuseppe, 2025, report Greenpeace)

Livelli elevati si sono registrati in Lombardia e in numerosi comuni del Piemonte, del Veneto, dell'Emilia-Romagna, della Liguria, della Toscana, della Sardegna e Umbria.

Nonostante l'Italia ospiti alcuni dei più gravi casi di contaminazione dell'intero continente europeo, ad oggi i controlli sui PFAS nelle acque potabili sono per lo più assenti o limitati a poche aree geografiche.

Secondo le evidenze raccolte da Greenpeace Italia con la campagna “Acque senza veleni”, milioni di persone in Italia hanno ricevuto nelle loro case acqua contaminata da PFAS classificati come altamente cancerogeni, la cui presenza è invero considerata inaccettabile in molti altri stati.

«È inaccettabile che, nonostante prove schiaccianti sui gravi danni alla salute causati dai PFAS, alcuni dei quali riconosciuti come cancerogeni, e la contaminazione diffusa delle acque potabili italiane, il nostro governo continui a ignorare questa emergenza, fallendo nel proteggere adeguatamente la salute pubblica e l'ambiente», afferma Giuseppe Ungherese, responsabile campagna Inquinamento di Greenpeace Italia nel 2025.

(<https://www.greenpeace.org/italy/storia/26119/pfas-analisi-acqua-potabile-in-tutte-le-regioni-d-italia/>)

Da tempo Greenpeace Italia ha lanciato una petizione che chiede al nostro governo di mettere al bando l'uso e la produzione di tutti i PFAS, sostituendoli con alternative più sicure e già disponibili nella quasi totalità dei settori industriali, permettendo una diminuzione degli effetti avversi sulla popolazione mondiale dovuta a questi additivi ormai ubiquitari.

Anche in America vi è un gran allarmismo nei confronti dell'inquinamento delle acque potabili da PFAS.

Un caso emblematico è rappresentato dal film-inchiesta *Dark Waters*, interpretato da Mark Ruffalo, che ricostruisce lo scandalo legato alla multinazionale chimica DuPont, storicamente impegnata nella produzione di materiali come il Teflon.

L'azienda è stata accusata di aver rilasciato per decenni sostanze chimiche tossiche, in particolare acido perfluorooottanoico, PFOA o noto anche come C8, nei corsi d'acqua e nelle falde acquifere nei pressi dello stabilimento di Parkersburg, in West Virginia.

Una documentazione interna ha successivamente evidenziato come la società fosse a conoscenza, sin dagli anni Sessanta, dei potenziali effetti nocivi e cancerogeni della sostanza, senza tuttavia informare adeguatamente le autorità competenti e la popolazione.

Tale condotta ha avuto conseguenze rilevanti sulla salute pubblica, con l'insorgenza di numerose patologie tra i residenti delle aree contaminate, configurando come uno dei casi più significativi di contaminazione industriale e di mancata trasparenza aziendale nella storia odierna (Rich, N., 2016).

Un modo adeguato onde evitare contaminazioni sarebbe cercare di ridurre l'uso di tali materiali ovviamente dall'utilizzo quotidiano e imporre severe leggi nei confronti di queste molecole.

Fortunatamente, per contrastare la già inquinata acqua potabile vengono in aiuto filtri appositi.

In provincia di Vicenza, comune colpito maggiormente da inquinamento da nanoplastiche e nanoparticelle derivanti da PFAS, vi è la centrale idrica di "Acque Veronesi" che per conto di 76 comuni fornisce acqua potabile ad un bacino di 50000 persone e sono stati i primi a cercare di "ripulire" l'acqua da codeste sostanze installando filtri a carboni attivi ricavati dalle noci di cocco.

Vi sono diversi silos contenenti ognuno 13000 kg di carboni attivi indispensabili perché le acque continuino costantemente ad essere sempre più inquinate da nanoplastiche e PFAS con ripercussioni sull'ambiente, fauna ed inevitabilmente sull'uomo.

Tutto ciò è ovviamente molto costoso, basta pensare che dieci filtri a carbone attivo circa vengono cambiati all'incirca 13/14 volte in un anno.

Un tasso davvero elevato, perché per altre sostanze inquinanti i filtri hanno cicli di vita che durano anni mentre per i PFAS i filtri a carbone arrivano a saturazione in meno di un mese con i costi che ne derivano circa mezzo milione di euro all'anno, chiaramente prezzo non sostenibile nella lunga durata.

Dati sempre più allarmanti che richiedono leggi e provvedimenti immediati.

La ricerca sta attualmente esplorando soluzioni alternative, come nel caso dei laboratori del Dipartimento di Chimica e Materiali del Politecnico di Milano, dove la professoressa Silvia Franz e il suo gruppo stanno sviluppando progetti innovativi.

Tra questi, si annoverano reti di titanio trattate mediante ossidazione elettrolitica al plasma, una tecnica che consente di rivestire il materiale con uno strato di biossido di titanio.

Tale rivestimento potrebbe risultare efficace nella cattura e degradazione dei PFAS, convertendoli in acqua e ioni inorganici.

Tuttavia, queste tecnologie si trovano ancora in una fase preliminare di studio e richiederanno ulteriori anni di ricerca per ottenere validazioni sperimentali e applicazioni su scala industriale e nei sistemi di depurazione. (Rai, 2024).

3. Inquinamento in zootecnia

Soffermiamoci quindi sulle conseguenze della salute del bestiame e degli animali da reddito in generale sull'inquinamento da micro e nanoplastiche.

Come ampiamente sottolineato in precedenza la presenza di materiali plastici è ubiquitaria e i metodi attraverso cui l'animale può venire in contatto con essi sono assai diversi.

Primo tra tutti è l'inalazione di micro e nano particelle plastiche aerodisperse che provengono da inquinamento atmosferico anche attraverso inalazione di fertilizzanti chimici di sintesi.

Poi vi è l'ingestione diretta di mangime ed acqua contaminati e infine tramite contatto con la pelle dell'animale e quindi tramite materiali plastici fini che passano dalla barriera cutanea come, ad esempio, attraverso tappetini antisdrucchiolo di plastica o abbeveraggi (Susy Urli et al., 2023).

È chiaro che la maggiore preoccupazione deriva dall'ingestione diretta di alimenti o acqua contaminata, in quanto l'alimentazione del bestiame viene fornita attraverso vari passaggi, quali produzione di materia prima, irrigazione delle colture, fertilizzazione ed eventuale uso di pesticidi, poi raccolta, ed eventuale essiccazione e distribuzione.

In questa sequenza logica è lampante quanto tutta la filiera agroalimentare abbia la propria responsabilità nel fornire cibo salubre agli animali.

Ma una parte di inquinamento è invisibile e presente all'interno delle acque stesse, le microplastiche sono infatti onnipresenti nelle acque sotterranee e queste vengono poi impiegate per irrigare le colture destinate alla consumazione del bestiame, ma anche per lavorare il cibo stesso.

Nelle colture il materiale plastico viene assorbito così dall'apparato radicale e trasportato attraverso la linfa ai vari tessuti commestibili, come nel caso dell'erba medica o di altre leguminose e graminacee foraggere (Lian et al., 2020).

Un ulteriore rischio è legato al possibile trasferimento di additivi chimici e micro e nano plastiche dagli imballaggi plastici ai mangimi solidi destinati agli animali.

Tuttavia, ad oggi risultano ancora limitate le ricerche dedicate agli effetti delle particelle plastiche dopo il loro passaggio attraverso il tratto gastrointestinale degli animali destinati alla produzione alimentare.

Tra le ipotesi formulate, vi è la possibilità che tali particelle rimangano nel lume intestinale oppure attraversino l'epitelio intestinale raggiungendo altri distretti tissutali dell'organismo. Evidenze ottenute in studi condotti su pesci e topi, in laboratorio, hanno infatti mostrato diverse manifestazioni patologiche associate all'assorbimento di micro- e nanoplastiche attraverso la parete gastrointestinale.

Nei topi, le particelle ingerite sono state individuate non solo nell'intestino, ma anche nel fegato e nei reni. A livello intestinale sono state osservate specifiche alterazioni quali riduzione della secrezione mucosa, compromissione della barriera intestinale, fenomeni infiammatori e disbiosi del microbiota.

Nel fegato, invece, l'accumulo di queste particelle è stato associato a processi infiammatori e a modificazioni del profilo lipidico ematico.

Ulteriori studi hanno inoltre evidenziato che l'assorbimento e l'accumulo di microplastiche nei tessuti possono determinare diversi disturbi sistemici nei modelli animali esaminati.

Alla luce dei risultati ottenuti nei topi, appare quindi fondamentale approfondire il possibile impatto dell'ingestione di micro- e nanoplastiche anche negli animali destinati alla produzione alimentare. (Yong et al., 2020)

Una ricerca olandese ha infatti segnalato la presenza di micro e nano plastiche nella carne, nel latte e nel sangue degli animali di allevamento destinati alla grande distribuzione organizzata e alle aziende agricole.

Lo studio è stato condotto dagli scienziati della “Vrije Universiteit Amsterdam” nei Paesi Bassi e tra le probabili cause sono stati rilevati due fattori fondamentali: inquinamento di materiale plastico nei mangimi, analizzati attentamente e risultati tutti contaminati e gli imballaggi dei prodotti testati, tutti in plastica.

La ricerca ha effettuato in particolare dei test su 12 campioni di sangue bovino e 12 campioni di sangue suino, e incredibilmente in ognuno dei campioni sono state rilevate particelle di polietilene e polistirene.

La contaminazione riguarda poi anche 18 dei 25 campioni di latte analizzati sia di latte appena munto che di latte già inscatolato e destinato alla vendita nei supermercati. Viene spontaneo chiedersi in chissà quante altre nazioni sia presente questo allarmante e subdolo inquinamento (I. van der Veen et al., 2022).

3.1 Tossicità

Il rischio legato all'inquinamento da micro e nanoplastiche negli animali e nell'uomo può essere distinto in tre principali sottogruppi: rischio fisico, rischio chimico e, infine, rischio microbiologico.

Dal punto di vista fisico, le dimensioni estremamente ridotte dei polimeri plastici consentono loro di superare diverse barriere biologiche, tra cui quelle intestinali, cutanee, placentari e testicolari, con possibili effetti dannosi diretti sui tessuti degli animali stessi.

Il rischio chimico è invece legato alla presenza di additivi e contaminanti tossici assorbiti nella plastica, mentre quello microbiologico deriva dalla colonizzazione di microrganismi (formazione di biofilm) che sono in grado di legarsi alle plastiche come batteri, virus o funghi con la possibilità di essere trasportati per via aerea e consentire di infettare nuove popolazioni animali. (Hwang et al., 2019).

Quando queste particelle penetrano nell'organismo sono di difficile eliminazione; le nanoplastiche possono, infatti, entrare nel circolo sanguigno e distribuirsi nei diversi tessuti e organi del corpo.

L'esposizione alle microplastiche è stata associata a molteplici effetti tossici negli animali, tra cui infiammazione e stress ossidativo; danni multipli alle cellule e ai tessuti; alterazioni della membrana cellulare; immunotossicità e genotossicità, tutti seri quadri patologici e conseguenze sanitarie che allarmano sempre più la comunità scientifica, gli allevatori e i consumatori stessi (Poma et al., 2019).

Vi sono poi diversi fattori che incidono nella capacità delle microplastiche di accumularsi nell'organismo dell'animale, tra questi giocano un ruolo chiave le dimensioni dei polimeri ma anche la forma, la loro carica superficiale e le loro proprietà idrofobiche.

Focalizzandosi sulla dimensione delle particelle, vari studi, hanno confermato che polimeri inferiori a 100 micrometri (μm) sono in grado di attraversare le membrane cellulari, mentre i polimeri con diametro inferiore a 20 micrometri (μm) possono raggiungere differenti organi e tessuti ed entrare nel circolo sistemico (Susy Urli et al., 2023).

Le micro e nano plastiche una volta entrate nell'organismo possono trasferirsi anche nelle gonadi femminili, come nel caso delle vacche e delle scrofe. (Wei.Z et al., 2022)

Esperimenti condotti in laboratori su cavie femmine, come pure su ratti e hanno evidenziato che le ripercussioni sull'apparato riproduttore da esposizione e ingestione di micro e nano plastiche erano ben evidenti.

Le conseguenze allarmanti sono risultate multiple: dilatazione degli ovidotti; presenza di multipli cisti ovariche formate a seguito dell'ingestione di materiali plastici; aumento di corpi lutei e diminuzione dello spessore dello strato della granulosa dei follicoli secondari; a questi quadri si aggiunge un minor numero di follicoli in crescita e una possibile apoptosi della cellula della granulosa, ovvero di quella cellula somatica fondamentale presente nell'ovaio dei mammiferi che è essenziale per la maturazione degli ovociti nei mammiferi e per la produzione di estrogeni (Ru An et al, 2021).

Anche il sistema riproduttivo maschile può subire effetti dannosi in seguito all'esposizione ai micro-polimeri plastici.

Sempre in laboratorio con test effettuati su ratti è stato evidenziato, dopo ingestione e inalazione di micro e nano polimeri, come il rilevamento di tali particelle nei testicoli sia portatore di alterazioni ben evidenti, quali atrofia testicolare o spermatogenesi incompleta e disorganizzata.

Sono state anche rilevate anomalie conformazionali degli spermatozoi che sono apparsi così senza testa o coda e senza acrosoma, fondamentale per la riproduzione dell'animale.

Il numero degli spermatozoi risultava poi ridotto rispetto ad un soggetto non esposto a polimeri, e la loro mobilità si dimostrava ben limitata se non addirittura assente. (Ru An et al., 2021)

In un ulteriore studio specifico sono stati analizzati gli effetti delle micro e nanoplastiche anche sullo sviluppo embrionale. (Yin et al., 2021).

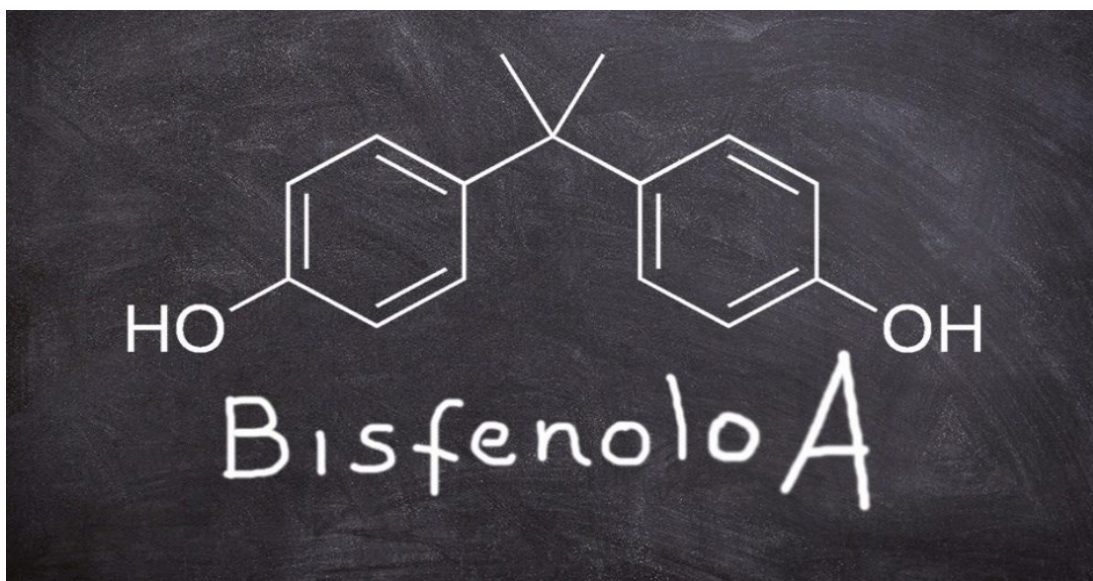
Sono stati quindi eseguiti vari test su alcuni soggetti e si è riscontrato come le microplastiche presenti nell'organismo non sembrano entrare nell'embrione; tuttavia, si è visto che sono in grado di aderire alla superficie del corion, membrana più esterna che avvolge l'embrione stesso e i suoi annessi nei mammiferi, riducendo così lo scambio di ossigeno causando seri problemi alla sopravvivenza dell'animale.

In ogni caso si è constatato come le nanoplastiche sembrerebbero invece in grado di penetrare nell'embrione e di depositarsi all'interno del sacco vitellino con alterato assorbimento dei nutrienti e del fabbisogno minimo che consenta la sopravvivenza. (Yin et al., 2021)

Altri studi effettuati sempre sui topi hanno dimostrato come i polimeri sottili di polistirene possono causare un'alterazione fisio-metabolica in fase di accoppiamento sui soggetti colpiti inducendo un minor peso della prole, interferendo quindi anche con le generazioni successive (Wei.Z et al., 2022)

Vanno poi citati e spiegati anche gli effetti, sempre sull'apparato riproduttore del bestiame, da parte di altri additivi plastici alquanto dannosi (Susy et al., 2023).

Questi additivi, largamente utilizzati nell'uso quotidiano e industriale dagli anni 50' ad oggi, sono in particolar modo il Bisfenolo A e gli ftalati.



Formula chimica del bisfenolo A (<https://www.regionieambiente.it/anses-bisfenolo-a/>)

Il Bisfenolo A è un composto chimico usato per la produzione di plastiche in policarbonato e resine, ed è uno xenoestrogeno, avendo proprietà simili agli estrogeni femminili ed agisce come antagonista di questi ormoni, venendo classificato come un pericoloso interferente endocrino. La sua struttura contiene due gruppi fenolici, che sono i due gruppi –OH legati ad anelli aromatici chiamati appunto fenoli e queste strutture sono la ragione principale della sua attività estrogenica.

Questo additivo ha quindi effetti estremamente negativi sia per la sessualità maschile che femminile, legandosi con androgeni ed estrogeni e limitandone l'effettiva biodisponibilità, (Zalmanova' et al., 2017).

Altri studi sugli agnelli hanno contrastato che se esposti al Bisfenolo A presentavano riserve ovariche follicolari ridotte con follicoli primordiali minori e conseguente probabile infertilità. (Matuszczak et al, 2019).

Le modalità attraverso cui il bestiame può venire a contatto con questo additivo sono multiple, tra cui acqua e mangimi contaminati ma anche rivestimenti interni dei contenitori, tubi del latte, imballaggi per la conservazione del mangime ma anche terreno e foraggi inquinati.

Poi vi sono gli ftalati, sostanze chimiche usate principalmente per rendere la plastica più flessibile ed elastica. Siccome queste sostanze non sono legate chimicamente alla matrice plastica di origine, possono migrare nell'ambiente e ricadere negli animali da allevamento e di conseguenza nei nostri

alimenti di origine animale. Anche gli ftalati interferiscono con la fertilità del bestiame, in special modo dei maschi.

Sono infatti capaci di eliminare l'enzima aromatasi, che è fondamentale per la conversione del testosterone in estradiolo, processo indispensabile per regolare la salute ossea ma anche la funzione cerebrale del nascituro e per portare a termine la spermatogenesi. Gli ftalati sono in grado anche di alterare la struttura delle cellule del Sertoli e del Leyding, le due cellule sinergiche dell'apparato riproduttore maschile, potendo arrivare nei casi più gravi ad atrofizzare il tubulo seminifero. (Andrade et al, 2006).

Queste sostanze però avrebbero ripercussioni anche sull'apparato femminile.

La loro esposizione, sempre in laboratorio su ratti, ha evidenziato un'influenza nell'organismo alla funzione ovarica con una riduzione di estradiolo in circolo, regolatore dell'intero ciclo riproduttivo, con conseguenti cicli estrali prolungati maggiormente rispetto al normale, e con una mancata ovulazione mensile. (Loverkamp-Swan et al, 2003).

Anche i Pfas, le sostanze per- e polifluoroalchiliche usate nei materiali plastici, hanno un'importanza sempre maggiore nella salute degli animali in quanto vengono introdotti nell'organismo attraverso l'abbeveraggio e i foraggi inquinati (Helle Katrine Knutsen, 2020).

Secondo i dati raccolti da parte di EFSA vi sarebbero vari danni anche ai tessuti animali per colpa di queste sostanze, in particolare il report riporta, dopo vari test effettuati sui ratti, i seguenti quadri clinici: aumento del peso del fegato degli animali; disturbi del metabolismo lipidico; effetti epatotossici; segni di colestasi; necrosi; infiammazione; effetto sulla ghiandola tiroidea; sviluppo alterato della ghiandola mammaria ed aumento anomalo del numero di cellule quindi con danni agli organi interni e tessuti.

3.2. Animali acquatici

I PFAS vengono trovati ogni anno anche negli animali marini.

Una ricerca condotta da “ARPAT”, l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana, ha trovato elevati livelli di PFAS nelle tartarughe; negli squali e nei delfini.

I campioni di tessuto, prelevati esclusivamente da animali ritrovati spiaggiati, sono stati analizzati con cromatografia liquida ad altissime prestazioni, HPLC, *High Performance Liquid Chromatography*, e con spettrometria di massa ad alta risoluzione, HRMS, *High-Resolution Mass Spectrometry*, e hanno evidenziato, principalmente a livello epatico accumuli di PFAS, in special modo negli animali più giovani.

In seguito, si è condotta una ricerca ancora più approfondita sul contenuto di PFAS anche nello stomaco degli animali spiaggiati e in particolar modo negli animali da loro ingeriti, per definire anche i loro livelli di contaminazione e le loro ripercussioni sugli animali stessi.

Da questa indagine, condotta su undici campioni, è emerso che il pesce azzurro — predato e consumato dagli animali analizzati — presenta concentrazioni di PFAS inferiori rispetto a crostacei e cefalopodi; in particolare, la seppia, inclusa nella dieta dei delfini, mostra una presenza significativa di sostanze perfluorate.

(<https://www.arpato.toscana.it/contaminazione-da-pfas-in-animali-marini/>)

Focalizzando le riflessioni sul mare del nostro paese, e in particolar modo del Mar Mediterraneo, dobbiamo soffermarci su alcuni aspetti che rendono questo ecosistema così ricco di fauna e flora ma purtroppo anche molto denso di polimeri e di inquinamento marino.

Il Mar Mediterraneo è infatti un bacino semi chiuso caratterizzato da una elevatissima densità di popolazione costiera e da un intensissimo turismo lungo l'intera zona costiera, il che lo rende estremamente vulnerabile a varie contaminazioni, divenendo così spesso classificato come una delle aree più colpita a livello globale (Terzi.Y et al., 2024).

Qui i micro-polimeri sono stati ritrovati in acqua e negli organismi che la abitano; infatti, i polimeri spesso frantumati di colore acceso e vivace divengono cibi desiderati dai pesci stessi che li scambiano erroneamente per alimenti salubri (Llorca et al., 2020).

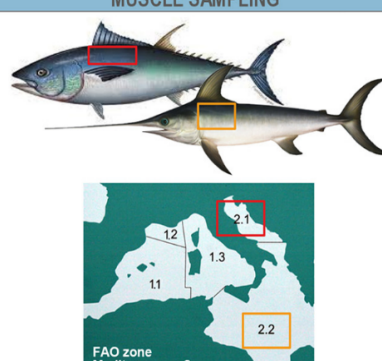
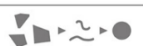
Vari studi hanno riportato proprio l'ingestione dei polimeri da parte di diverse specie di pesci ma anche di zooplancton, di bivalvi, di uccelli marini, di tartarughe e di capodogli (Farrell e Nelson., 2013).

Le microplastiche identificate nelle ricerche nei pesci del Mediterraneo, appartengono soprattutto a frammenti plastici, provenienti da ulteriori frammentazioni di altri polimeri, e da fibre tessili e tessuti sintetici.

Una volta ingeriti questi polimeri, se di dimensioni elevate, provocano la morte per soffocamento delle specie ittiche, altrimenti si accumulano nell'apparato digestivo e in seguito anche in diversi organi e tessuti adiacenti (con particolare predilezione per il tessuto muscolare) (Abbasi et al., 2018).

Inoltre, queste sostanze rilasciano nell'organismo vari additivi e composti chimici di cui sono costituite, oltre a veicolare microrganismi patogeni e metalli pesanti quali mercurio, bario e cadmio ovvero materiali altamente proinfiammatori per gli animali e per l'uomo.

Una ricerca pubblicata dal *Journal of Sea Research*, prestigiosa rivista scientifica internazionale e multidisciplinare dedicata alla ricerca marina, e portata avanti dall'Istituto Zooprofilattico Sperimentale di Teramo e dall'Università Politecnica delle Marche, ha riscontrato un alto tasso di contaminazione da microplastiche nei muscoli edibili di due specie in particolare del Mar Mediterraneo, vale a dire nel Pesce Spada e nel Tonno Rosso (Giacinto et al, 2023).

Detection of microplastics, polymers and additives in edible muscle of swordfish (<i>X. gladius</i>) and bluefin tuna (<i>T. thynnus</i>) caught in the Mediterranean Sea						
MUSCLE SAMPLING		ANALYSES	RESULTS			
		Microplastic extraction and characterization by stereomicroscopy and RAMAN microspectroscopy	Microplastics (1–10 µm)	SWORDFISH		BLUEFIN TUNA
				number	140–270 no. kg ⁻¹	160–270 no. kg ⁻¹
				shape		
				colors		
				polymers	PP, PVAc, PVC, PS, PE, PEVA, PL, PET	PP, PE, PVC, PL, PS, PVAc, PU, PET
		Quantification by LC-MS/MS	Polymers	PET	7.0–20 mg kg ⁻¹	9.7–14 mg kg ⁻¹
				PC	< 0.01–65 × 10 ⁻³ mg kg ⁻¹	< 0.01–50 × 10 ⁻³ mg kg ⁻¹
			Additives	BPA	< 0.01–43 × 10 ⁻³ mg kg ⁻¹	< 0.01–13 × 10 ⁻³ mg kg ⁻¹
				PTA	0.51–6.8 mg kg ⁻¹	2.5–5.4 mg kg ⁻¹
In conclusion, a similar level of plastic contamination was revealed in swordfish and bluefin tuna with differences in shapes, colors, pigments and polymers of microplastics.						
Di Giacinto <i>et al.</i> , 2022						

Tratto da:

<https://www.alimentinews.it/attualita/salute-nutrizione/1718-il-problema-delle-microplastiche-nel-pesce-del-mediterraneo>

Questo studio ha confermato la migrazione dei micro-polimeri ingeriti e di dimensioni inferiori a 10 nanometri, dall'apparato digerente ai tessuti circostanti con un fenomeno chiamato traslocazione.

La quantità di nanoplastica ingerita è risultata essere circa di 140-270 particelle/Kg nel Pesce Spada e di 160-270 particelle/Kg nel Tonno Rosso.

La plastica più rilevante è stata confermata essere il polipropilene (PP) ma anche Bisfenolo A (BPA), e il policarbonato (PC) con nessuna correlazione tra loro, dimostrando semplicemente come i pesci abbiano ingerito plastica proveniente da numerose matrici o additivi chimici differenti.

Dal momento che circa l'80% delle microplastiche inquinate nei mari che finiscono negli organismi ittici, per poi passare a tutta la catena alimentare, arriva da terra, cioè da attività umane terrestri, vi è un gran bisogno di severe leggi e indicazioni precise finalizzate allo smaltimento dei rifiuti plastici rigido e direttivo.

Per questo motivo si propone, per arginare l'inquinamento turistico, di ridurre drasticamente la plastica monouso e sostituendola con materiali riutilizzabili o biodegradabili.

Per quanto riguarda l'inquinamento che deriva da industrie e imbarcazioni bisogna cercare di riprogettare la produzione completamente sostituendo l'uso della plastica con materiali alternativi e incentivando, nei casi in cui non si può evitare il suo impiego, il ricorso a plastica riciclata e biodegradabile riducendo così anche alla fonte la produzione di nuovi polimeri plastici (un approccio che riporta all'economia circolare).

Per affrontare il problema servono anche controlli stringenti dei fiumi e degli affluenti prima che arrivino al mare, con un sistema di gestione dei rifiuti più efficiente ed un monitoraggio continuo dell'inquinamento plastico.

È necessaria l'adozione di normative stringenti e inderogabili, poiché, nel contesto attuale, il problema dell'inquinamento da polimeri non dipende più esclusivamente dalle modalità di pesca o di cattura.

Trattandosi di una forma di inquinamento diffusa e ubiquitaria, risulta imprescindibile l'introduzione di un approccio che garantisca tolleranza zero nei confronti della dispersione dei rifiuti plastici nell'ambiente (Sharma et al., 2021).

3.3 Apicoltura

Un caso particolare di questo fenomeno riguarda le api: anche in apicoltura sono state rinvenute microplastiche, sia negli insetti sia nel miele.

Questo dimostra che l'inquinamento da micro e nanoplastiche non colpisce solo gli allevamenti tradizionali, ma si diffonde in tutto l'ambiente agricolo, coinvolgendo anche gli impollinatori.

Le api selvatiche e domestiche impollinano il 75% delle colture agricole e il 90% delle piante selvatiche a fiore. Da loro dipende anche circa il 30% della produzione alimentare mondiale (Khalifa, S. A. M., et al., 2021).

Oggi le popolazioni di api stanno diminuendo drasticamente e ricerche di scienziati indiani confermano uno stretto legame tra l'inquinamento da micro e nano plastiche e la diminuzione delle api nel nostro ecosistema (Nikhil Reddy K S et al., 2025).

Le api sono in grado di orientarsi, oltre al colore dei fiori e delle piante e agli odori e profumi emanati da essi, anche grazie al campo elettrico del fiore stesso.

Durante il volo, infatti, il corpo dell'ape si elettrizza per attrito con l'aria ed acquisisce una carica positiva; sull'altro fronte i fiori, che sono collegati al suolo, possiedono una carica negativa. Questa differenza di cariche fa sì che si generi un campo elettrico, permettendo al polline di trasferirsi sull'ape prima ancora che si posi sul fiore (Dominic J. Clarke et al., 2013).

Il campo elettrico dei fiori, dopo la visita di un'ape, diminuisce velocemente e in questo modo gli altri impollinatori percepiscono la variazione di scarsa presenza di polline, permettendo alle api di cambiare zona o fiore di interesse.

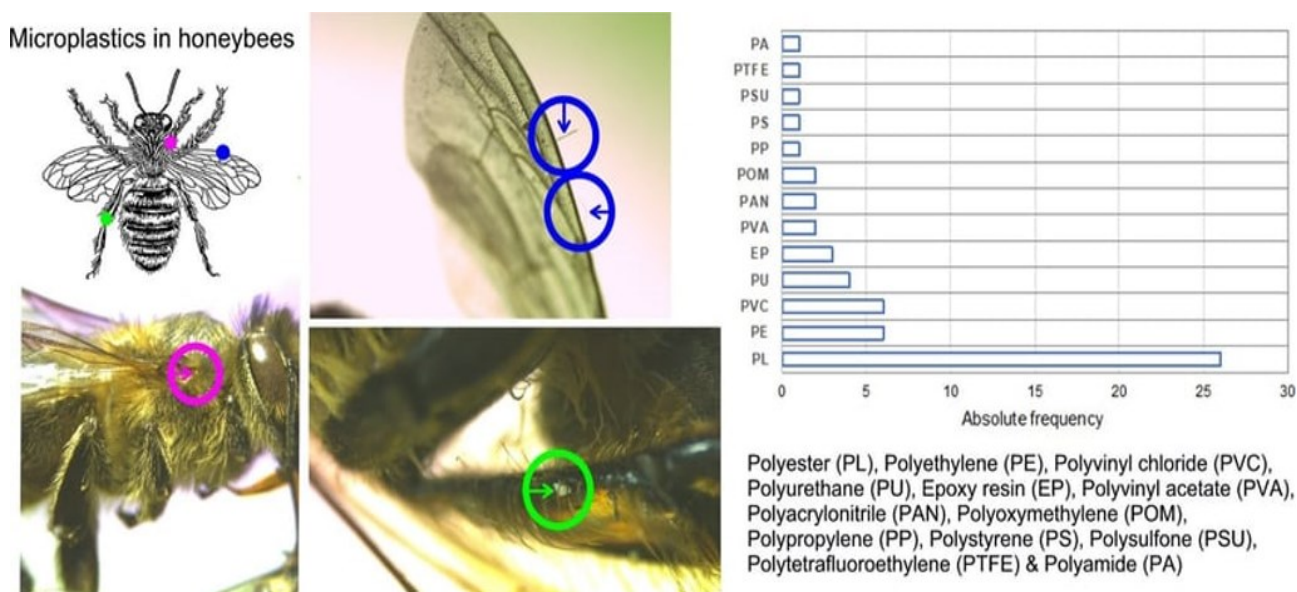
Tuttavia, questo delicato sistema di interazioni elettrostatiche può essere potenzialmente influenzato dalla presenza di micro e nanoplastiche nell'ambiente. Queste, infatti, possono accumulare cariche elettrostatiche e alterare i segnali fisici presenti nell'ecosistema. Gli effetti biologici completi di queste interferenze sono ancora oggetto di studio.

Il Prof. David Baracchi, docente di Zoologia ed Etologia presso l'Università di Firenze e responsabile di un laboratorio di cognizione animale attivo dal 2018, ha dimostrato attraverso studi sperimentali che l'esposizione delle api a micro e nanoplastiche può influenzare diversi aspetti del loro comportamento quotidiano, tra cui l'alimentazione, l'apprendimento e la memoria, con possibili effetti sulle capacità cognitive e di orientamento degli insetti (Baracchi et al., 2024).

Le api, per di più, possiedono una superficie corporea ricoperta da peli sensoriali e strutture specializzate che svolgono un ruolo fondamentale nella percezione dell'ambiente e nella raccolta del polline.

A causa di queste loro caratteristiche morfologiche, le micro e nanoplastiche presenti nell'ambiente possono aderire facilmente al corpo degli insetti e, in alcuni casi, essere ingerite o introdotte nell'organismo durante le attività di pulizia e alimentazione.

Diversi studi di recente pubblicazione suggeriscono che l'esposizione a queste particelle possa indurre effetti sub-letali, tra cui alterazioni del sistema immunitario delle api ed una possibile riduzione delle capacità di difesa nei confronti di patogeni e parassiti come la *Varroa Destructor*, rendendo le api potenzialmente più vulnerabili a stress biologici e ambientali. Effetti simili sono stati osservati anche in altri impollinatori, come i bombi, indicando un possibile rischio eco tossicologico più ampio per gli insetti impollinatori (Balzani et al., 2022)



Tratto da: <https://blog.laica.it/miele-inquinato-dalle-microplastiche-ecco-lo-studio>

Un'indagine condotta su dieci apiari localizzati in aree caratterizzate da differenti livelli di urbanizzazione nella regione Campania ha poi evidenziato la presenza di micro e nano plastiche nei prodotti dell'alveare, confermando il ruolo delle api come potenziali bioindicatori della contaminazione ambientale da polimeri sintetici.

Le analisi effettuate sui campioni di miele hanno rilevato la presenza di particelle microplastiche e microfibre di natura plastica, tra cui polietilene (PE) e policaprolattone (PCL), suggerendo una significativa capacità di trasferimento dei contaminanti dall'ambiente atmosferico fino al miele.

I risultati indicano che le api possono intercettare particelle sospese durante le attività di impollinazione e successivamente veicolarle all'interno dell'alveare, contribuendo alla loro incorporazione nei prodotti finali, come il miele.

Tale evidenza supporta l'ipotesi di una contaminazione diffusa lungo l'intera filiera apistica, che coinvolge non solo l'ambiente di raccolta ma anche le fasi di gestione dell'alveare, estrazione e vasettamento, nelle quali l'impiego di materiali plastici potrebbe ulteriormente contribuire al carico di inquinamento plastico (Schiano et al., 2024)

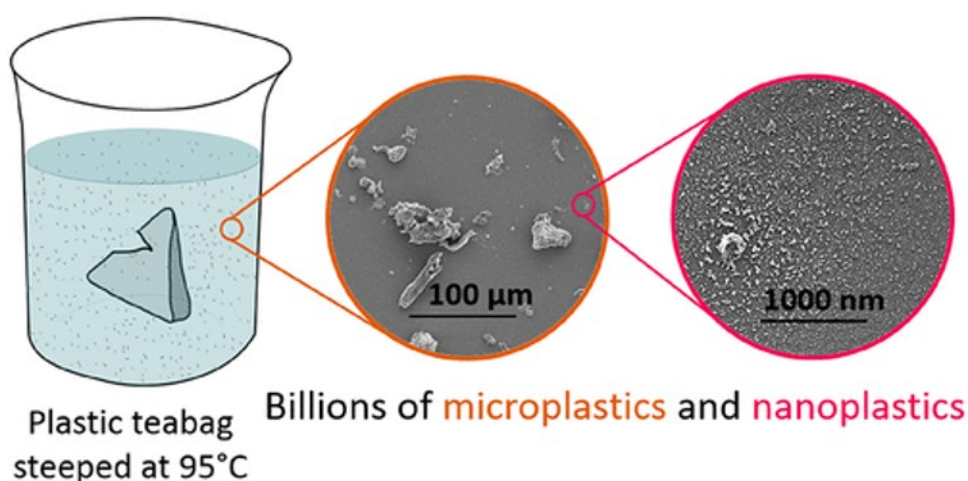
Risulta quindi indispensabile, in ambito apistico, ridurre ulteriormente e il più possibile i rischi collegati alla contaminazione plastica attraverso il miglioramento delle pratiche di gestione sostenibile degli alveari e privilegiando materiali non plastici o a bassa cessione di particolato durante le fasi di estrazione e confezionamento dei prodotti. Parallelamente, il monitoraggio ambientale mediante api e prodotti dell'alveare può essere particolarmente valido come strumento di biomonitoraggio della contaminazione diffusa, consentendo l'individuazione di aree a maggiore inquinamento di nano plastiche.

4. Inquinamento nell'uomo

Nelle conseguenze riguardanti l'inquinamento da micro e nano polimeri di plastica, l'uomo non è esente, e anzi subisce diverse ripercussioni dirette e indirette sulla propria salute e sul proprio benessere psico-fisico.

Tra gli alimenti che tutti noi consumiamo, sono tantissimi quelli che “incontrano” la plastica nel loro ciclo produttivo, finendo per assorbire nano plastiche in essi, con ripercussioni indirette sulla salute umana.

Ma vi sono anche modalità di trasmissione dirette, basti pensare alle bottiglie di plastica e alle ingenti quantità di bibite e succhi di frutta che vengono conservate in esse; oppure alle capsule di caffè; ai bicchieri e piatti di plastica, oppure ancora ai biberon per i bambini o alle bustine di tè in nylon. Si consideri, infatti, che una singola bustina di tè di nylon infusa a 95 °C rilascia circa 11,6 miliardi di microplastiche e 3,1 miliardi di nanoplastiche in una unica tazza piccola (Hernandez L.M. et al.,2019).



Una singola bustina di tè in materiale plastico rilascia miliardi di microplastiche e nanoplastiche nell'infuso

Tratto da: <https://ilfattoalimentare.it/te-microplastiche-bustine.html>

Secondo uno studio olandese riportato dall'*Environment international* del 2022, il polimero più trovato nel circolo sanguigno è il polietilene tereftalato, detto comunemente Pet, quello delle bottigliette di plastica. Sempre a livello ematico, sono state ritrovate tracce significative anche di polistirene, il classico polistirolo da imballaggio e di Pfas (Leslie.A et al., 2022).

Anche nei polmoni sono state trovate tracce di piccole particelle di plastiche, come documenta lo studio inglese effettuato nel 2022 e che, per primo, è riuscito ad individuare con certezza questo fenomeno.

La dottoressa Laura Sadosky dell'*Hull York Medical School* spiega come abbiano analizzato i tessuti polmonari di 13 pazienti, che erano stati sottoposti ad un intervento chirurgico, trovando piccole concentrazioni di microplastiche di diverso tipo, come polietilene tereftalato, polipropilene ma anche resine e nylon. L'aspetto che ha maggiormente allarmato i ricercatori è stato il rinvenimento di tali particelle negli strati più profondi dei polmoni, dimostrano la capacità delle nanoplastiche di permeare nella rete più sottile dell'apparato respiratorio (Jenner et al, 2022).

La capacità delle micro e nano plastiche di entrare nel circolo sanguigno e arrivare fino agli organi e tessuti circostanti è stato evidenziato anche da uno studio condotto in collaborazione tra l'Università di Catania e l'Università di Messina le quali hanno testato la presenza di polimeri su larve di pesci, in particolare su piccoli di *Zebrafish* (o pesce zebra). Esponendo i pesci ad un'acqua contaminata ricca di polietilene blu della grandezza di 10 micron, si è visto come i polimeri vengano assorbiti dai tessuti circostanti dislocandosi lungo anche la spina dorsale delle larve e addirittura nelle cornee degli occhi. Per approfondire ulteriormente la potenziale pericolosità dei polimeri plastici, i ricercatori hanno esposto cellule staminali, già indirizzate verso il differenziamento cartilagineo, a un ambiente ad elevata concentrazione di nano polimeri di polietilene. I risultati hanno evidenziato una marcata risposta infiammatoria cellulare: le cellule, anziché completare il processo di differenziazione in tessuto cartilagineo, hanno mostrato una deviazione verso il fenotipo adipocitario, trasformandosi quindi in adipociti, ovvero cellule deputate all'accumulo lipidico di grassi. Tale evidenza suggerisce come l'esposizione ai nano polimeri possa interferire con i normali processi di differenziazione cellulare e con l'omeostasi dei tessuti (De Marco, G et al, 2022).

4.1 Vie di esposizione

L'uomo viene a contatto con i piccoli polimeri di plastica nella vita quotidiana ormai tutti i giorni, già a partire dalla respirazione e inalazione di nano plastica, fino alla consumazione di alimenti contaminati.

Anche i suoli agricoli, infatti, risultano essere contaminati e, in particolare, possono accumulare quantità significative di nanoplastiche a causa della ripetuta concimazione con fertilizzanti organici contaminati che interagiscono con la struttura e la microfauna del suolo con conseguenze sul ciclo produttivo delle colture e con la possibilità di risalita radicale di polimeri in parti edibili dall'uomo o dal bestiame (Zhou et al., 2021)

Gli alimenti rappresentano poi una delle fonti di contaminazione più elevata per l'uomo.

Diversi studi hanno evidenziato come nei prodotti di origine agricola e animale vi siano considerevoli percentuali di micro e nanoplastiche (Rahman et al., 2026)

Uno studio italiani di pochi anni fa ha, ad esempio, individuato la contaminazione plastica all'origine del processo produttivo, andando a ricercare i polimeri nei mangimi degli animali da allevamento.

In questa ricerca si sono raccolti, in tre allevamenti di vacca da latte piemontesi, 500 grammi di sostanza secca per ogni campione dei mangimi più diffusi in codesti allevamenti, vale a dire campioni di insilato di mais, di fieno misto e di mangime ad alto contenuto proteico (come farina di soia o colza).

Stando ben attenti a non contaminare nulla in fase di raccolta, e adoperando materiale totalmente esente da plastica, i ricercatori hanno scaldato i campioni e li hanno triturati.

Dopo queste operazioni preliminari hanno esaminato il materiale ottenuto tramite reagenti e spettroscopia infrarossa in trasformata di Fourier (FTIR, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) che permette di identificare la composizione chimica di una matrice analizzando l'assorbimento della radiazione infrarossa da parte dei suoi gruppi funzionali presenti.

L'analisi dei campioni ha confermato la presenza diffusa di micro- e nanoplastiche, con l'identificazione di tre polimeri predominanti: il polietilene a bassa densità, LDPE (*Low-Density Polyethylene*); il polietilene ad alta densità, HDPE (*High-Density Polyethylene*) e la poliammide, PA (Patrucco et al, 2025)

Il mangime più contaminato è risultato essere l'insilato di mais. Questo fatto è riconducibile al metodo di conservazione degli insilati che vengono spesso protetti in silos attraverso dei teli di copertura (posizionati al di sopra di essi) in materiale di film plastico multistrato, e spesso soggetto a degradazione ambientale (Astner et al, 2019).



Coperture per insilati di mais

Tratta da: https://plasticless.crpa.it/nqcontent.cfm?a_id=23313&tt=t_bt_app1_www

Sulla base della quantità di materiale plastico rilevato, lo studio ha stimato che una vacca da latte, nell'ambito di una razione giornaliera tipica di circa 25 kg di sostanza secca, possa ingerire fino a 424.222 particelle di micro- e nanoplastiche. Tale contaminazione evidenzia un possibile percorso di

esposizione per l'uomo, che può entrare in contatto con tali particelle attraverso il consumo di prodotti di origine animale (Patrucco et al, 2025).

Il latte rappresenta quindi una fonte di contaminazione da plastica che non deve, assolutamente, essere sottovalutata.

Recenti studi hanno evidenziato la presenza di microplastiche sia nel latte crudo come pure nel latte sottoposto a processi industriali quali la pastorizzazione e il trattamento UHT (*Ultra High Temperature*). Tra le ricerche più significative emerge uno studio condotto su campioni commerciali italiani di latte UHT e pastorizzato, nel quale è stata rilevata contaminazione nel 67,5% dei campioni analizzati, con una concentrazione media di circa 3,85 particelle per 100 ml.

Tali risultati confermano che la contaminazione non costituisce un evento sporadico, bensì un fenomeno diffuso lungo l'intera filiera lattiero-casearia. La problematica assume particolare rilevanza considerando che le microplastiche possono derivare non solo dall'ambiente, ma anche dai processi industriali, dalle attrezzature di lavorazione e dai materiali di confezionamento.

Per di più, una particolare attenzione è stata posta sul latte scremato, nel quale si sono riscontrate concentrazioni maggiori di microplastiche rispetto al latte intero. Una possibile spiegazione risiede nella maggiore complessità dei processi industriali necessari alla rimozione della componente lipidica. Il latte scremato subisce infatti un numero superiore di passaggi tecnologici, aumentando il contatto con membrane filtranti, centrifughe e tubazioni, spesso composte da nylon o fibre sintetiche (A. R. De Crescenzo et al., 2025).

Nell'ambito degli alimenti maggiormente esposti alla contaminazione da microplastiche, oltre al miele, assume notevole rilevanza anche il sale, frequentemente identificato come una significativa fonte di ingestione di particelle plastiche da parte dell'uomo.

Uno dei primi studi su larga scala relativo alla contaminazione del sale da cucina è stato condotto nell'ambito di una collaborazione tra *Greenpeace* (la grande organizzazione non governativa ambientalista e pacifista nata nel 1971 a Vancouver), e l'Università di Incheon, in Corea del Sud, con una successiva pubblicazione sulla rivista *Environmental Science & Technology*.

L'indagine ha analizzato 39 campioni di sale provenienti da diversi Paesi, inclusa l'Italia, con l'obiettivo di valutare la diffusione globale delle microplastiche in una razione alimentare di consumo quotidiano.

I risultati hanno evidenziato una contaminazione estremamente diffusa di micro e nano plastiche; infatti, ben 36 campioni su 39 contenevano polimeri plastici.

Le particelle identificate erano principalmente costituite da polimeri di largo utilizzo industriale, in particolare polietilene (PE), polipropilene (PP) e polietilene tereftalato (PET).

Dal punto di vista quantitativo, lo studio ha mostrato forti differenze geografiche. I campioni asiatici presentavano i livelli più elevati, con valori estremi fino a 13.000 particelle/kg e nei campioni europei e italiani, la contaminazione risultava più contenuta ma comunque presente, con valori indicativi compresi tra circa 4 e 30 particelle/kg.

Considerando poi un consumo medio giornaliero di 10 g di sale a persona, essa può ingerire fino a circa 2000 particelle di microplastiche all'anno, solo attraverso il comune sale da cucina (Ali Karami et al., 2017)

L'inquinamento da sale è legato soprattutto all'ambiente marino di origine. Il sale proveniente dal mare non ci stupisce infatti che sia il più inquinato tra gli altri data la grandissima quantità di plastica che galleggia ogni giorno nei nostri mari provenienti da scarichi urbani e industriali ma anche da trasporti fluviali o turismo di ogni genere. Ovviamente il fenomeno è particolarmente accentuato nelle aree con elevata densità di popolazione e scarso controllo dei rifiuti (tal volta riportabile anche ad un mancato supporto legislativo).

Questi rifiuti, dispersi nell'ambiente marino, subiscono processi di degradazione fisica e chimica, portando alla formazione di particelle sempre più piccole e insidiose. Successivamente le micro e nanoplastiche formate possono essere incorporate dai cristalli di sale durante l'evaporazione dell'acqua marina, con contaminazione diffusa del sale (Evangelos Danopoulos et al., 2019).



Tratto da: <https://ecocentrica.it/microplastiche-ecocentrica/>

Uno studio comparativo sulla contaminazione ha poi analizza la presenza di microplastiche nei diversi tipi di sale destinati al consumo umano, distinguendo tra sale marino, sale di lago e sale di miniera.

In particolare, i risultati hanno evidenziato che il sale marino presenta le concentrazioni più elevate di microplastiche, con valori che possono raggiungere fino a 1674 particelle per chilogrammo in media; seguito dal sale proveniente da laghi salati che hanno mostrato livelli intermedi, con un intervallo compreso tra circa 28 e 462 particelle per chilogrammo.

Infine, il sale di miniera, detto anche salgemma, risulta essere la tipologia meno contaminata, con concentrazioni generalmente inferiori a 150 particelle per chilogrammo.

Questo studio ci rende l'idea quindi di come la contaminazione del sale alimentare sia fortemente legata al gradiente di origine del sale stesso, e ne deriva come gli ambienti acquatici superficiali corrispondano ai principali vettori di microplastiche mentre le matrici minerali sotterranee risultano relativamente protette da contaminazione diretta e non esposte direttamente da materiali plastici o additivi.

In questo senso, anche il sale da cucina, oltre ad essere un alimento a rischio contaminazione, rappresenta anche un importante indicatore ambientale dello stato di inquinamento degli ecosistemi acquatici (Ali Karami et al., 2017).

Va sottolineata, per di più, la pericolosità dei materiali plastici soggetti ad invecchiamento in un ambiente esterno, o sottoposti a degradazione o erosione meccanica che possono subire così processi di modificazione delle loro proprietà chimico-fisiche.

La fotodegradazione ad opera dei raggi UV, ad esempio, può arrivare a spezzare le catene polimeriche delle molecole plastiche, con il rilascio, “a cascata”, di additivi antiossidanti e stabilizzanti tossici e assai volatili.

Questo fenomeno di degradazione, inoltre, consente la molteplice riduzione delle microplastiche in nano polimeri, i quali possono essere adsorbiti dalle cellule in modo più immediato inducendo così fenomeni cellulari pro-ossidanti e degenerativi (Yanqi Shi et al., 2024).

Inoltre, il processo di invecchiamento della plastica induce un'altra problematica per la salute dell'uomo, cioè quella dell'aggregazione di batteri, ma anche virus e metalli pesanti al suo interno.

Ciò è imputabile al fatto che, con l'invecchiamento della plastica, la rugosità superficiale delle microparticelle che la compongono aumenta significativamente, favorendo l'attacco e la deposizione di contaminanti presenti nell'ambiente. Inoltre, le superfici plastiche degradate possono essere facilmente colonizzate da microrganismi che danno origine a biofilm in grado di trattenere ulteriormente sostanze inquinanti stabilizzandone e l'associazione con il materiale plastico nel tempo (Mao.R et al., 2020).

Un esempio di tale fenomeno può essere osservato anche in ambito zootecnico. Mangiatoie e abbeveratoi realizzati in materiale plastico, se sottoposti a prolungata esposizione agli agenti fisici, chimici e biologici, possono andare incontro a processi di deterioramento superficiale che favoriscono il rilascio di micro- e nanoplastiche nell'acqua e negli alimenti destinati agli animali. Tale rilascio rappresenta una potenziale via di esposizione per gli animali d'allevamento e desta crescente interesse nella ricerca scientifica per le possibili implicazioni sulla salute animale e sulla sicurezza delle produzioni zootecniche. Per questo motivo, l'impiego di materiali più resistenti alla degradazione e caratterizzati da una minore tendenza al rilascio di particelle plastiche potrebbe costituire una strategia efficace per ridurre tali rischi (Urli et al., 2023).

Abbiamo visto che anche le fonti di calore possono favorire il rilascio di micro- e nanoplastiche dai materiali polimerici. Un esempio rilevante in ambito alimentare quotidiano è rappresentato dall'utilizzo di contenitori plastici a contatto con fonti di riscaldamento diretto, come il forno a microonde. In tali condizioni, l'aumento della temperatura può accelerare i processi di migrazione di particelle polimeriche e additivi dal materiale plastico verso l'alimento, determinando una potenziale esposizione del consumatore a micro e nanoplastiche.

Studi sperimentali hanno, infatti, dimostrato che il riscaldamento di contenitori in polipropilene, PP, può comportare il rilascio di elevate quantità di microparticelle plastiche, pari anche a concentrazioni superiori a 10^5 o addirittura 10^6 particelle per litro nei liquidi alimentari, suggerendo che l'impiego ripetuto di tali materiali possa rappresentare una via significativa di esposizione umana.

In particolare, il trattamento in microonde risulta associato ad un incremento della migrazione rispetto ad altri metodi di riscaldamento, probabilmente a causa della combinazione tra aumento rapido della temperatura, stress termico del materiale di contenimento e interazione delle microonde con la matrice plastica stessa.

Questi risultati evidenziano come il *packaging* alimentare in plastica non debba essere considerato un sistema inerte, bensì un potenziale contributore all'esposizione umana a micro- e nanoplastiche, soprattutto in condizioni di riscaldamento (He et al., 2021).



Tratto da: https://www.ilmattino.it/primopiano/sanita/pasti_pronti_microonde_quali_evitare-9393683.html

Secondo diversi studi scientifici sul comportamento dei materiali plastici destinati al contatto alimentare, l'indicazione di idoneità all'uso in microonde garantisce principalmente la stabilità strutturale del contenitore, ma non esclude il possibile rilascio di micro- e nanoplastiche o di sostanze chimiche verso gli alimenti durante il riscaldamento.

Come già evidenziato in precedenza, infatti, tali processi di migrazione possono risultare particolarmente rilevanti in condizioni di riscaldamento, determinando un trasferimento significativo di particelle e composti derivati dal polimero stesso.

Inoltre, i materiali plastici destinati al contatto alimentare possono contenere numerose sostanze chimiche, tra cui additivi e composti non intenzionalmente aggiunti, la cui presenza non è sempre completamente regolamentata.

Alcuni di questi composti sono stati associati, in letteratura, a potenziali effetti avversi sulla salute umana, includendo alterazioni del sistema endocrino, metabolico, cardiovascolare e addirittura neurologico (Il Mattino, Pasti pronti al microonde: quali evitare, 2025).

Secondo uno studio sperimentale, inoltre, pubblicato sulla rivista *Nature Food*, i biberon sempre formati da polipropilene utilizzati per la preparazione del latte artificiale possono rilasciare anch'essi elevate quantità di micro- e nanoplastiche durante le normali procedure di utilizzo. In particolare, in condizioni di sterilizzazione con riscaldamento dell'acqua, gli autori hanno osservato che i biberon possono rilasciare valori fino a $1,62 \times 10^7$ particelle per litro, con un incremento associato all'aumento della temperatura.

La letteratura ci informa anche su evidenze tossicologiche dovute all'ingestione dei bambini di tali polimeri con il latte. Infatti, le nanoplastiche possono interagire con la barriera intestinale del bambino e, nello specifico, possono potenzialmente attraversare l'epitelio intestinale e indurre uno stress ossidativo o attivare una risposta infiammatoria del soggetto.

Questi aspetti risultano particolarmente rilevanti nei neonati, nei quali la permeabilità intestinale e la maturazione del sistema immunitario non sono ancora completamente sviluppate (Li, D., Shi, Y., Yang, L., et al., 2020).

Un'ulteriore fonte di esposizione diretta alle micro- e nanoplastiche è rappresentata dagli additivi impiegati nella produzione dei polimeri plastici. Tra questi, come già visto precedentemente, rivestono particolare interesse i PFAS (*Per- and Polyfluoroalkyl Substances*), ovvero le sostanze per- e polifluoroalchiliche, una vasta classe di composti chimici sintetici ampiamente utilizzati in numerosi prodotti e manufatti di uso quotidiano che destano crescente preoccupazione per la salute umana e ambientale a causa della loro elevata persistenza e della loro capacità di "bioaccumularsi" negli organismi (Brunn, H et al., 2023).

Queste sostanze, infatti, dal momento che possiedono proprietà molto vantaggiose grazie alle loro caratteristiche idrorepellenti, oleorepellenti e termoresistenti, si trovano in svariati utensili di uso quotidiano: sono rinvenibili, infatti, nelle padelle antiaderenti; nella carta da forno; nelle confezioni di fast food; negli involucri per hamburger e panini; nei sacchetti per prodotti da forno o ancora in contenitori per cibi da asporto particolarmente grassi (come pizze o focacce).

La preoccupazione nei confronti dei PFAS avviene, in special modo, quando un materiale contenente questi additivi si dovesse scheggiare o danneggiare. Ad esempio, i ricercatori della *Newcastle University* in Australia, hanno rilevato che solo un piccolo graffio in una padella antiaderente può rilasciare fino a circa 9100 particelle di microplastiche; mentre un rivestimento rotto può rilasciare fino a 2,3 miliardi di nanoplastiche nel cibo o nell'ambiente (Fang et al., 2022).

Oltre ai PFAS, numerosi prodotti plastici e materiali destinati al contatto alimentare possono contenere additivi chimici utilizzati per migliorarne le proprietà meccaniche, la flessibilità o la durabilità. Tra questi figurano i ftalati, impiegati come plastificanti in pellicole e imballaggi in PVC per alimenti o in tovaglie e rivestimenti plastici.

Poi vi è il Bisfenolo A (BPA), un composto chimico utilizzato nella produzione di alcune resine e plastiche, impiegato ad esempio nella fabbricazione di bottiglie e contenitori rigidi in policarbonato, contenitori per la conservazione degli alimenti, distributori d'acqua e borracce riutilizzabili. In passato, il Bisfenolo A era ampiamente utilizzato anche nelle resine plastiche destinate ai rivestimenti interni di lattine e contenitori metallici per alimenti e bevande, con la funzione di prevenire la corrosione e prolungare la conservabilità dei prodotti in essi (Rochester, 2013).

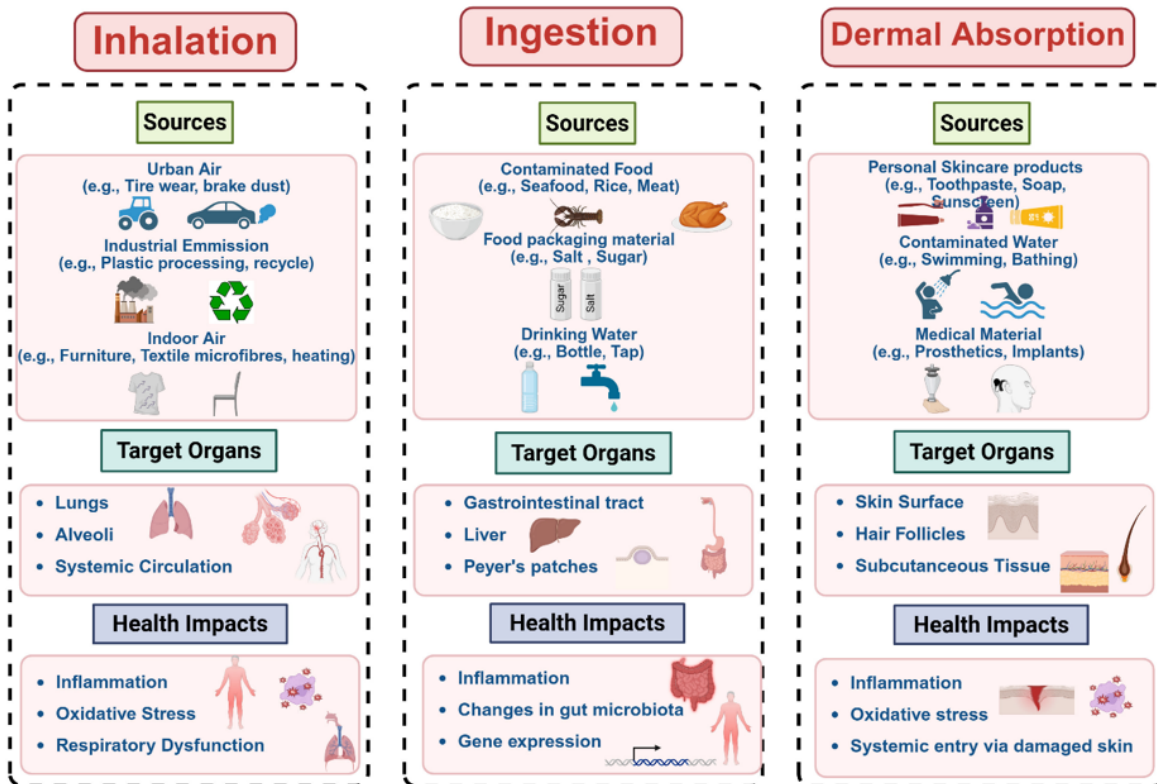
Tuttavia, a causa delle crescenti evidenze scientifiche relative ai suoi potenziali effetti nocivi sulla salute umana, in particolare per la sua attività di interferente endocrino, l'Unione Europea ne ha vietato l'impiego nei materiali destinati al contatto con gli alimenti a partire dal 20 gennaio 2025 (Commissione Europea, 2024, Regolamento (UE) 2024/3190).

Infine, oltre all'alimentazione e all'acqua inquinata e a fonti indirette di contatto con materiali plastici, anche l'aria rappresenta una fonte di inquinamento per l'uomo, come visto nel capitolo relativo all'inquinamento ecosistemico, a motivo di materiale plastico degradato e trasportato dall'aria; ma anche in relazione all'utilizzo di determinate vernici o materiali con additivi plastici e per un abuso di utilizzo di mascherine durante gli anni della pandemia (Bhangare et al., 2022).

Il nostro corpo, a questo proposito, mette in atto rimedi contro l'inalazione da polimeri plastici più grossolani, attraverso meccanismi come la tosse; lo starnuto o tramite eliminazione da fagocitosi dei macrofagi alveolari, cellule del sistema immunitario che si trovano a livello polmonare e che eliminano gran parte del materiale estraneo inalato (Bhardwaj et al., 2025).

Ma molto spesso le nanoplastiche non vengono captate, specie se presenti in grandi quantità, e possono quindi penetrare nell'organismo.

Le particelle inferiori a 5 nanometri sono in grado di attraversare la barriera epiteliale, penetrando quindi nel circolo sanguigno e nel sistema linfatico e da qui possono essere trasportate e distribuite a diversi tessuti e organi attraverso la circolazione ematica (Luo et al., 2024).



Tratto da: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/16/8813>

4.2 Tossicità

Abbiamo visto, quindi, come le microplastiche spesso vengano fermate da barriere naturali di difesa dell'uomo.

Le nanoplastiche, invece, riescono ad entrare più velocemente all'interno delle cellule attraverso una penetrazione diretta della membrana plasmatica, cioè dell'involucro a doppio strato fosfolipidico che circonda tutta la cellula e che la separa dall'esterno.

Un altro modo per entrare all'interno della cellula è tramite il processo chiamato endocitosi.

In questo processo, la membrana cellulare si piega verso l'interno e forma una piccola vescicola che ingloba al suo interno i nano polimeri plastici nel citoplasma cellulare (Foroozandeh & Aziz, 2018).

Una volta penetrate le nanoplastiche possiedono la capacità di spostarsi anche verso tessuti distanti, destando forti preoccupazioni tra l'opinione scientifica e pubblica.

Questi polimeri possono inoltre penetrare nei tessuti umani per periodi prolungati, accumulandosi al loro interno, poiché le nanoplastiche sono altamente resistenti alla degradazione enzimatica e presentano affinità con le molecole biologiche.

Per quest'ultimo motivo, le nanoplastiche possono interagire rapidamente con le proteine presenti nei fluidi biologici, formando una cosiddetta "corona proteica", ovvero uno strato di proteine che si forma spontaneamente sulla superficie di nanoparticelle quando entrano in contatto con fluidi biologici.

Questa corona è costituita da proteine che si legano con diverse affinità, distinguibili in una frazione più instabile e facilmente scambiabile, e una frazione più aderente e durevole nel tempo. La formazione della corona modifica profondamente le proprietà superficiali delle nanoplastiche, influenzandone la stabilità, la distribuzione nell'organismo e il riconoscimento passivo e subdolo da parte delle cellule dell'uomo.

Di conseguenza, questa struttura può determinare il modo in cui le nanoplastiche interagiscono con i sistemi biologici, facilitandone l'assorbimento cellulare tramite endocitosi e alterando le risposte fisiologiche delle cellule e delle proteine stesse. In diversi studi è stato osservato come tali interazioni possano indurre un aumento della produzione di specie reattive dell'ossigeno (ROS: *Reactive Oxygen Species*), contribuendo quindi allo stress ossidativo e attivando risposte infiammatorie del sistema immunitario (Monopoli, M. P. et al., 2012).

Alcune ricerche scientifiche effettuate in vivo su topi, hanno evidenziato invece che i polimeri inalati alterano la complessa composizione del microbiota nasale e polmonare, danneggiando così anche il sistema respiratorio. Si è poi osservato che, con il danno arrecato alle cellule epiteliali polmonari, si instaura una conseguente risposta allo stress ossidativo, ovvero un'eccessiva produzione di radicali liberi, senza che le cellule riescano più a neutralizzarli, portando a danni e ossidazioni delle principali molecole biologiche, quali lipidi e proteine con disfunzioni mitocondriali (Zhang et al., 2022).

Per quanto riguarda gli effetti dei PFAS sulla salute umana, la letteratura scientifica riporta numerosi studi ed evidenze che documentano le potenziali conseguenze dell'esposizione a queste sostanze chimiche persistenti, tra cui alterazioni del sistema endocrino, immunitario e riproduttivo.

In particolare, uno studio pubblicato sulla rivista "*Toxics*", da ricercatori delle Università di Bologna e Università di Padova, ha dimostrato che i PFAS possono modificare il funzionamento delle cellule in modo del tutto simile in diversi organi e in specie animali differenti.

Questo significa che gli effetti biologici causati da tali sostanze non sono limitati a un singolo organismo o tessuto, ma possono manifestarsi in diverse specie, compreso l'uomo, interessando processi fondamentali per la salute e lo sviluppo dell'organismo.

Federico Manuel Giorgi, professore al Dipartimento di Farmacia e Biotecnologie dell'Università di Bologna, che ha condotto una ricerca a riguardo, assieme ad altri colleghi, ha dichiarato, grazie ai risultati ottenuti, come le molecole di PFAS influenzino le vie ormonali e le vie metaboliche dell'uomo, aumentando ad esempio il bio accumulo degli acidi grassi e indebolendo il sistema immunitario.

Tracce di queste sostanze sono state ritrovate, attraverso analisi e test, anche nel latte materno, nella placenta di animali e dell'uomo come pure nel siero e perfino nel liquido seminale.

Gli studiosi hanno analizzato 2.144 campioni esposti a PFAS, provenienti da studi precedenti e da sette specie differenti, tra cui uomo, topo, pesce zebra, merluzzo atlantico ed altre specie acquatiche, con l'obiettivo di valutare come l'esposizione ai PFAS influenzi il funzionamento delle cellule e la loro espressione genica.

I risultati hanno evidenziato alterazioni biologiche simili tra le varie specie diverse, suggerendo l'esistenza di meccanismi tossici comuni.

Attraverso il confronto dell'attività dei geni nei soggetti esposti ai PFAS, gli autori hanno individuato alterazioni negative ricorrenti di importanti processi biologici e cellulari, tra cui il metabolismo e il trasporto dei lipidi, la produzione di estrogeni, l'ovulazione e il corretto funzionamento del sistema riproduttivo sia femminile che maschile. Tali alterazioni possono compromettere la fertilità e interferire con il normale sviluppo fetale, con potenziali ripercussioni sulla salute riproduttiva.

I risultati dell'analisi hanno, per di più, evidenziato un aumento dell'espressione del gene ID1, *Inhibitor of DNA Binding 1*, in seguito all'esposizione ai PFAS.

Tale gene, responsabile della produzione di una proteina coinvolta nella regolazione della crescita e nella differenziazione e proliferazione cellulare, è noto per essere coinvolto anche nei processi di sviluppo e progressione di diverse forme tumorali, tra cui leucemia e forme tumorali a carico della mammella e del pancreas, confermando ulteriormente le preoccupazioni riguardanti l'esposizione a queste nano particelle (Beccacece et al., 2023).

Le nanoplastiche in generale poi anche loro, proprio come gli additivi usati in materiali plastici come PFAS o ftalati, causano danni all'apparato riproduttore ed endocrino.

L'apparato riproduttore, ad esempio, è estremamente sensibile ad ogni contaminante o inquinante, a causa della sua complessa regolazione e funzione biologica, comprese le micro e nanoplastiche.

Nell'uomo è stato ritrovato materiale plastico anche nel liquido seminale e in tessuti testicolari, evidenziando come questi sottili polimeri plastici siano in grado di attraversare la barriera emato-testicolare, ovvero quella struttura di protezione presente nei testicoli che separa il sangue dalle cellule che producono gli spermatozoi e che ha il compito di proteggere le cellule germinali e il liquido seminale stesso (Montano et al., 2023).

Le conseguenze di questi nano polimeri a livello di apparato riproduttore sono correlate a stress ossidativo degli organi maschili, con disfunzione mitocondriale, infiammazione dei tessuti e delle cellule e danni strutturali all'interno dei tessuti testicolari, oltre ad una riduzione della motilità e vitalità degli stessi spermatozoi (Xiao, M et al., 2023).

Anche l'apparato riproduttore femminile è colpito dall'accumulo di nanoplastiche.

In particolare, sono stati individuati polimeri, utilizzando la spettroscopia infrarossa a laser, nel fluido follicolare ovarico, il liquido che circonda e nutre l'ovocita durante la sua maturazione svolgendo un ruolo cruciale nelle fertilità del soggetto; nell'endometrio, la mucosa interna dell'utero, e nei tessuti placentari. Gli autori di questa indagine scientifica suggeriscono poi come la presenza di tali particelle in un tessuto altamente vascolarizzato come l'endometrio potrebbe essere associata a processi di stress ossidativo e infiammazione locale, con potenziali effetti sulla funzione endometriale e sulla capacità di impianto embrionale (Sun J. et al., 2024).

Altri effetti negativi all'apparato riproduttore femminile sono stati dimostrati con un apposito screening messo in atto, in vivo, del 2023 ed effettuato su cavie di topi femmina. I ricercatori hanno esposto topi femmina a micro e nanoplastiche, in particolare a polietilene, per poi analizzare il loro apparato riproduttore e gli embrioni se in loro presenti.

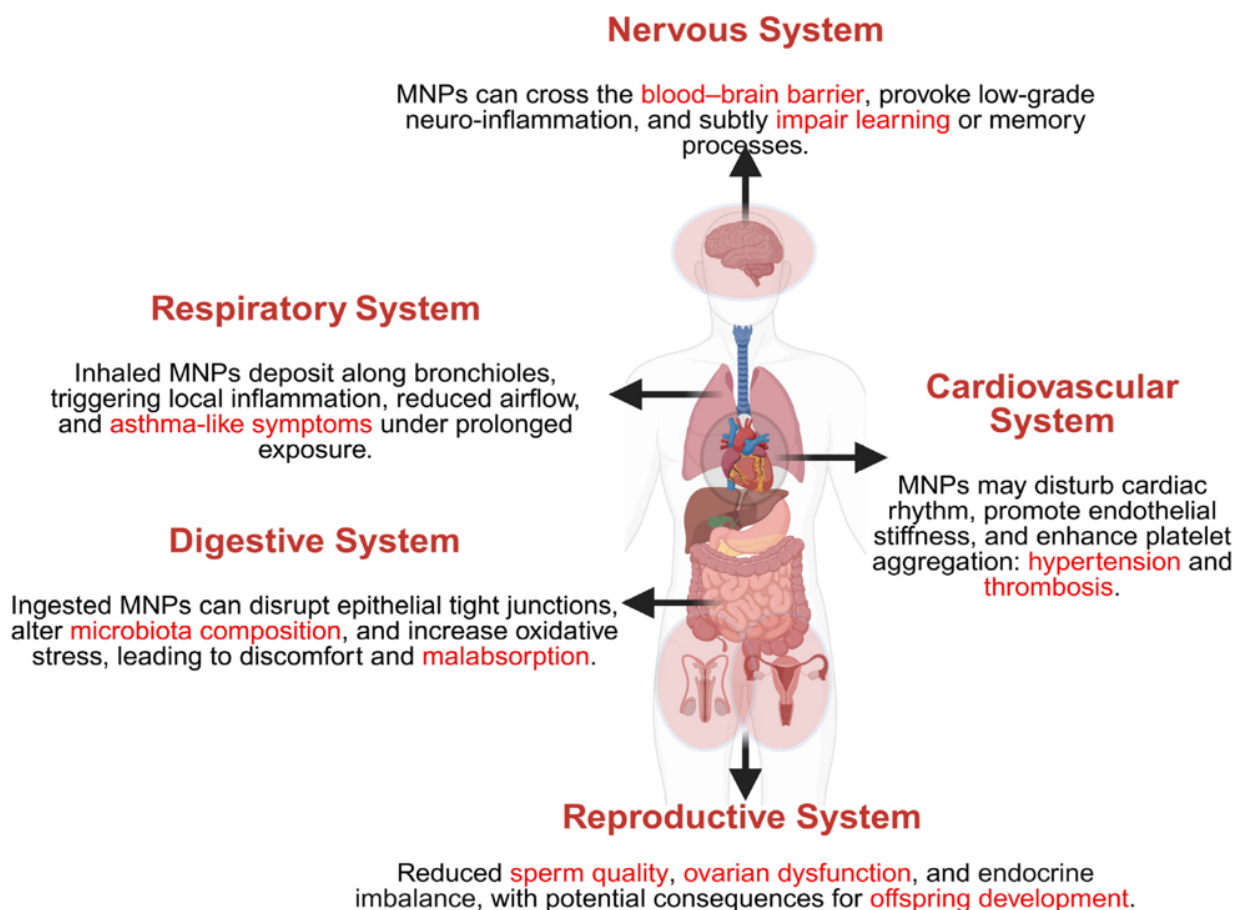
La ricerca ha evidenziato, così, una compromissione della funzione ovarica nelle femmine di topo, con alterazioni del loro ciclo estrale, con una riduzione della qualità degli ovociti e peggioramento dello sviluppo embrionale.

Nel complesso, tali effetti indicano un danno significativo alla funzione riproduttiva femminile, caratterizzato da una ridotta capacità di maturazione dei gameti e da un'alterata efficienza dei processi di fecondazione e di sviluppo precoce dell'embrione.

Queste alterazioni sono state principalmente associate all'induzione di stress ossidativo, con conseguente aumento delle specie reattive dell'ossigeno, disfunzione mitocondriale e attivazione di processi di morte nelle cellule germinali ovariche (Zhang et al., 2023).

Inoltre, come già osservato, additivi della plastica, come Bisfenolo A o ftalati, possono esercitare un ruolo che aggrava in modo sinergico le conseguenze da nanoplastiche nei vari apparati del corpo animale e umano.

Sebbene i risultati derivino da un modello animale, essi suggeriscono un potenziale rischio anche per la fertilità umana, poiché i meccanismi biologici coinvolti nella riproduzione sono in larga parte conservati tra gran parte dei mammiferi.



Tratto da: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/16/8813>

Quindi, oltre all'apparato respiratorio, endocrino e riproduttore, anche gli apparati nervoso, gastrointestinale e circolatorio sono interessati dagli effetti tossicologici associati all'esposizione e alla distribuzione sistemica con il possibile accumulo di micro- e nanoplastiche nei tessuti biologici.

Sono diverse le indagini scientifiche che hanno dimostrato, infatti, l'effetto delle micro e nanoplastiche anche sul sistema nervoso. La ricerca è stata condotta in modo sperimentale in vitro senza ricorrere direttamente ad esseri umani o animali vivi. In questo tipo di ricerca sono state utilizzate cellule umane coltivate artificialmente per ricreare modelli semplificati di tessuti biologici e studiare come essi rispondono all'esposizione diretta di nanoplastiche. In particolare, gli autori hanno utilizzato cellule staminali pluripotenti umane, che sono cellule "primitive" con la capacità di trasformarsi in diversi tipi di cellule del corpo, tra cui i neuroni stessi. A partire da queste cellule, i ricercatori hanno generato degli "sferoidi corticali", ovvero degli aggregati tridimensionali di cellule che si organizzano spontaneamente formando una struttura che imita, in modo semplificato, lo sviluppo della corteccia cerebrale umana, per poi sottoporre questi sferoidi ad un'esposizione appunto di micro e nanoplastiche di polietilene.

I risultati ottenuti hanno così dimostrato che, in caso di esposizioni prolungate, le micro e nanoplastiche riducono la vitalità delle cellule e interferiscono con i processi di differenziazione neuronale, cioè con la trasformazione delle cellule immature in neuroni funzionali definitivi. Inoltre, è stata osservata un'alterazione nell'espressione dei geni coinvolti nella maturazione del sistema nervoso, indicando che lo sviluppo neuronale del soggetto può essere disturbato a livello molecolare intrinseco (Hua T. et al., 2022).

Per quanto riguarda l'apparato digerente, sappiamo che rappresenta una via di esposizione primaria alle micro e nanoplastiche tramite l'ingestione di alimenti e acqua contaminati.

Vari studi hanno evidenziato una forte correlazione tra disturbi infiammatori gastrointestinali e una presenza di micro/ nano polimeri plastici.

Le evidenze scientifiche più consistenti, trovate tramite vari test su ratti o pesci *Zebrafish*, indicano, infatti, quattro possibili meccanismi che si possono verificare nell'apparato digerente, a seguito di contaminazione da micro e nanoplastica. Primo tra tutti vi è la disbiosi, ovvero l'alterazione del microbiota intestinale, con una drastica riduzione della benefica microflora intestinale. Poi vi può essere un danno alla barriera intestinale con un aumento della permeabilità e maggior passaggio di sostanze infiammatorie dal lume intestinale al sangue. Infine, si è evidenziata una possibile pro-infiammazione dell'intestino, con produzione eccessiva di radicali liberi, ed un probabile veicolo di

additivi chimici che vengono rilasciati dalle nanoplastiche assorbite dall'apparato (Hirt & Body-Malapel, 2020).

Questi additivi che possono venire rilasciati, composti per lo più da sostanze come PFAS o ftalati, possono aggravare le conseguenze, agendo da “coadiuvanti” alle nanoplastiche e riducendo ulteriormente le attività metaboliche dei macrofagi intestinali (Yan et al., 2022).

Nel sistema cardiovascolare, infine, l'esposizione alle micro e nanoplastiche causa diverse alterazioni patologiche, tra cui processi infiammatori cronici; disfunzione endoteliale e aumento del rischio cardiovascolare.

Una volta penetrate nell'organismo, le particelle più piccole possono attraversare le barriere biologiche, raggiungendo il sistema linfatico e successivamente il circolo sanguigno, distribuendosi così in diversi organi e tessuti.

Numerosi studi hanno infatti documentato la presenza di micro e nanoplastiche nel sangue circolante e nei tessuti cardiovascolari. In particolare, alcuni ricercatori hanno prelevato da alcuni pazienti delle placche aterosclerotiche, (accumuli di materiale che si formano all'interno delle pareti delle arterie durante il processo chiamato aterosclerosi) e, analizzandole, hanno evidenziando un significativo accumulo di micro e nano polimeri all'interno delle lesioni vascolari.

Le placche aterosclerotiche che contenevano micro e nanoplastiche mostravano segni di infiammazione più marcati ed una maggiore tendenza alla rottura rispetto a quelle prive di tali particelle. Poiché la rottura di una placca può favorire la formazione di coaguli che ostacolano il flusso sanguigno, i pazienti presentavano un rischio più elevato di sviluppare eventi cardiovascolari gravi, come infarto e ictus (Marfella et al., 2024).

5. Approccio *One Health* e mitigazione del problema

Le analisi degli effetti delle micro e nanoplastiche nei comparti ecosistemici, zootecnici e sulla salute dell'uomo, evidenziano come questi inquinanti rappresentino un problema complesso e assolutamente interdisciplinare.

La loro diffusione in tutti i livelli ecosistemici, la loro capacità di penetrare nelle catene alimentari e i potenziali effetti che questi polimeri plastici hanno sulla salute degli organismi viventi, rendono insufficiente e incoerente un approccio unicamente settoriale.

In quest'ottica ci viene d'aiuto la visione dell'approccio *One Health*, di un'unica salute condivisa tra uomo, animale e ambiente.

L'approccio *One Health*, sviluppato soprattutto dal XX secolo dal veterinario epidemiologo Calvin W. Schwabe, promuove infatti la collaborazione tra diverse discipline scientifiche e tra le varie istituzioni e stakeholder, al fine di comprendere e affrontare in maniera integrata le sfide sanitarie e ambientali contemporanee. Nel caso delle micro- e nanoplastiche, tale prospettiva consente di valutare in modo sistemico le fonti di contaminazione, i percorsi di esposizione, gli effetti biologici e chimici e le possibili strategie di mitigazione lungo l'intera filiera, dall'ambiente agli animali fino all'uomo (Schwabe, C.W., 1984).

5.1 Legislazioni e normative

Abbiamo quindi potuto constatare come le micro e nanoplastiche siano ormai contaminanti ubiquitari nell'ecosistema, presenti in ogni settore con impatti negativi verificati sulla salute umana, e di tutta la filiera agrozootecnica.

In ragione di ciò, non vi sono ancora metodologie o protocolli standardizzati che permettono ai vari stakeholders di aziende e di realtà produttive di verificare e quantificare le nanoplastiche effettivamente presenti in una certa realtà. Mancano anche livelli di soglia minimi, oltre i quali i polimeri plastici possono diventare pericolosi per l'intero ecosistema, compreso l'uomo (Bhardwaj et al, 2025).

A livello legislativo, oltre alle già presenti politiche di riduzione della plastica e di raccolta indifferenziata, si dovrebbero adottare modelli di individuazione e valutazione dei rischi legati ai vari

tipi di plastica usata in commercio, considerando le loro proprietà fisico-chimiche con relativi effetti nocivi e con soglie di utilizzo e divieti nei casi più gravi.

Vi sono, tuttavia, alcuni esempi di quadri normativi impiegati negli ultimi anni per studiare maggiormente a fondo la delicata situazione delle micro e nanoplastiche nel mondo.

L'Unione Europea ha finanziato infatti diversi progetti a questo proposito. In particolare, ha investito parecchie energie e fondi sul progetto “POLYRISK”, ovvero un’iniziativa di ricerca finalizzata ad indagare sulle micro e nanoplastiche, ponendo un’enfasi particolare sui loro potenziali effetti avversi sul sistema immunitario. Il progetto, coordinato dall’Università di Utrecht nei Paesi Bassi, è stato finanziato nell’ambito del programma Horizon 2020, lo strumento di finanziamento alla ricerca scientifica e all’innovazione della Commissione europea del decennio scorso, e si è svolto dal 1° aprile 2021 al 30 settembre 2025.

Questo progetto ha coinvolto ben 14 *partner* provenienti da diversi Paesi europei e ha avuto come obiettivo principale la comprensione dell’esposizione umana alle micro e nanoplastiche e la valutazione dei loro possibili effetti tossicologici associati alla presenza nell’organismo.

Durante il periodo di attività, i ricercatori hanno sviluppato e applicato metodologie avanzate per il campionamento, il rilevamento e la quantificazione delle micro e nanoplastiche in matrici ambientali e biologiche. Particolare attenzione è stata posta allo studio dell’esposizione per inalazione e ingestione e alla valutazione degli effetti pro-infiammatori che tali particelle potrebbero esercitare sull’organismo umano. Inoltre, il progetto ha contribuito allo sviluppo di un primo quadro di valutazione del rischio per la salute umana, finalizzato a fornire solide basi scientifiche per l’elaborazione di future politiche europee e internazionali, in materia di inquinamento da plastica. I risultati ottenuti hanno inoltre portato alla realizzazione di prime banche dati riguardanti l’esposizione, i meccanismi tossicologici e gli approcci di valutazione del rischio associati a questi polimeri (Bhardwaj et al., 2025).

Un altro programma, sempre finanziato dall’Unione Europea è stato il progetto “Aurora”, *Actionable eUropean ROadmap for early-life health Risk Assessment of micro- and nanoplastics*, ovvero “tabella di marcia europea operativa per la valutazione dei rischi per la salute nella prima infanzia legati alle micro- e nanoplastiche.

Questo progetto è stato avviato nel 2021 ed ha coinvolto diverse università, istituti di ricerca e centri di eccellenza europei, sempre coordinato dall’Università di Utrecht.

L'idea alla base deriva dal fatto che, nonostante la presenza di microplastiche nell'ambiente sia ormai ampiamente riconosciuta, persistono ancora numerose incertezze riguardo alle modalità di esposizione umana e alla capacità di queste particelle di attraversare barriere biologiche, come la placenta e la barriera intestinale.

Questo progetto si è occupato infatti di studiare l'esposizione alle micro e nanoplastiche durante la gravidanza e nei primi mesi di vita di un organismo, con l'obiettivo di capire come queste particelle possano influenzare lo sviluppo del feto e la vita del neonato. Uno dei risultati più importanti del progetto è stata la creazione di una linea guida europea, chiamata "*Roadmap*", utile per studiare e valutare il rischio delle micro e nanoplastiche, in modo tale che tutti i ricercatori utilizzino metodi simili e per poter confrontare così i dati ottenuti da paesi anche molto diversi tra loro (Christopher et al., 2024).

Per quanto riguarda il quadro normativo, una delle misure più significative adottate dall'Unione Europea è rappresentata dalla Direttiva (UE) 2019/904 sulla plastica monouso, chiamata *Single-Use Plastics Directive*, ovvero direttiva sulla plastica monouso.

Tale direttiva, entrata in vigore nel 2019 e applicata dagli Stati membri a partire dal 2021, ha introdotto il divieto di commercializzazione di diversi prodotti in plastica monouso per i quali sono disponibili alternative più sostenibili, tra cui posate, piatti, cannucce, agitatori per bevande e contenitori in polistirene espanso destinati al settore alimentare (*European Commission*, 2024).

Per quanto riguarda le sostanze chimiche impiegate nella produzione dei materiali plastici destinati al contatto con gli alimenti, invece, c'è ancora tanto lavoro da svolgere e puntualizzare, dato che gli ftalati e i PFAS vengono tutt'oggi commercializzati e usati in grandi quantità in prodotti anche ad uso alimentare.

Un primo segnale positivo si è evidenziato, per lo meno, con la normativa entrata in vigore il 20 gennaio 2025, attraverso il Regolamento (UE) 2024/3190 della Commissione europea che vieta l'uso del bisfenolo A, BPA e di altri bisfenoli pericolosi nei materiali e oggetti destinati al contatto con gli alimenti.

Tuttavia, questo regolamento prevede periodi transitori per consentire all'industria di adeguarsi e per molti prodotti è previsto un periodo di eliminazione graduale di 18 mesi e, in alcune applicazioni specifiche, possono essere previsti periodi più lunghi con deroghe limitate fino al 2027 (Regolamento UE 2024/3190).

Anche in Canada il Bisfenolo A è stato vietato nei biberon ad uso alimentare per neonati e bambini già da diversi anni e il governo continua a monitorarne l'uso. La legge è entrata in vigore fin dal 2008 attraverso il *Chemicals Management Plan* (CMP) o piano di gestione delle sostanze chimiche, un programma nazionale per la valutazione e la gestione delle sostanze chimiche potenzialmente pericolose (Regolamento canadese SOR/2010-53 sui biberon in policarbonato).

In conclusione, nonostante i progressi normativi compiuti in alcuni ordinamenti, a livello nazionale e internazionale manca ancora una regolamentazione uniforme che stabilisca divieti generali o limiti di sicurezza per molti additivi chimici e per l'impiego di materiali plastici a contatto con gli alimenti. Le attuali conoscenze scientifiche evidenziano la necessità di sviluppare politiche di prevenzione e strumenti normativi più efficaci, finalizzati alla tutela della salute pubblica e dell'ambiente.

5.2 Prospettive future e cooperazione

Il significato più intrinseco del concetto di *One Health*, inteso come visione di un'unica salute condivisa, risiede infatti nella consapevolezza che la salute umana, quella animale e l'integrità di tutti gli ecosistemi, costituiscono elementi di un insieme strettamente interconnesso e interdipendente.

In tale prospettiva, nessun comparto della società può considerarsi estraneo alla problematica dell'inquinamento da micro e nanoplastiche, poiché ogni attività antropica, dalle produzioni industriali alle pratiche agricole e zootecniche, fino alla gestione quotidiana dei singoli cittadini, contribuisce direttamente o indirettamente al ciclo di vita della plastica e alla sua dispersione nell'ambiente.

Le conseguenze di una gestione scorretta e sbagliata di tali materiali non rimangono confinate al settore che le ha generate, ma si espandono lungo l'intera catena ecologica e alimentare, secondo un effetto a cascata che coinvolge suolo, acqua, aria, allevamenti e, infine, l'uomo stesso. La contaminazione ambientale diventa così il simbolo di una responsabilità collettiva, nella quale ogni scelta individuale e ogni decisione politica ha un peso notevole sulla contaminazione ecosistemica e sulla qualità della vita stessa.

In questa prospettiva, il principio di *One Health* non rappresenta soltanto un modello operativo sostenibile per le politiche ambientali, ma assume una dimensione culturale di fondamentale importanza, richiamando la necessità di superare una visione frammentata del rapporto tra uomo e

natura e tra industria o politica e cittadino, poiché la salute è da considerarsi una fonte in comune con l'intera società collettiva.

Proprio a questo proposito, per arginare il problema da inquinamento da micro e nanoplastiche e per unire maggiormente in modo consapevole gli ecologi marini, i veterinari, i medici e i tossicologi, che ancora troppo spesso lavorano separatamente, nasce il consorzio TORPP, *Turtles, One Health Research & Plastic Pollution*, ovvero “Tartarughe, Ricerca One Health e Inquinamento da Plastica”, che riunisce 16 discipline scientifiche differenti con l'obiettivo di studiare gli effetti delle micro e nanoplastiche attraverso un approccio integrato.

Il progetto nasce in Francia nel 2020 ed è coordinato dal Centro Ospedaliero Universitario di Nantes, ma è stato concepito come una rete internazionale, coinvolgendo istituzioni di diversi Paesi per favorire il trasferimento di competenze, tecnologie e metodologie tra discipline e realtà assai diverse, rappresentando uno dei più significativi esempi di applicazione del concetto *One Health* allo studio dell'inquinamento da plastica (Blanchilain et al., 2024).

Così dal 2020, il consorzio si occupa di progettare e studiare sperimentalmente la tossicità e gli effetti avversi, anche a livello neuro cognitivo, relativi all'esposizione di micro e nanoplastiche nell'uomo e nelle tartarughe marine.

Queste ultime vengono scelte, infatti, proprio perché sono considerate degli importanti bioindicatori per monitorare l'impatto della plastica nell'ecosistema, in quanto il loro stato di salute riflette quello dell'ambiente in cui vivono. Le tartarughe marine sono quindi specie sentinella perché scambiano spesso rifiuti plastici o sedimenti come cibo, e possono ingerire anche grandi quantità di microplastiche presenti nell'acqua e, per di più, vivono per vari decenni accumulando al loro interno polimeri plastici direttamente o indirettamente tramite l'ingestione di meduse o altri organismi contaminati a loro volta (Duncan E.M. et al., 2019).

Il primo progetto finanziato dal consorzio è stato il CAOUA, dal francese *caouanne*, che indica la tartaruga marina *Caretta caretta*, ed è stato avviato nel 2021, ponendo attenzione allo studio del microbiota e degli effetti avversi delle micro e nanoplastiche nelle tartarughe marine del Mediterraneo. Sono state, quindi, biomonitorate 114 tartarughe marine *Caretta caretta* provenienti dal Golfo del Leone, nel Mediterraneo nord-occidentale, in quanto questa zona rappresenta uno dei principali habitat e corridoi migratori delle tartarughe marine mediterranee ed è anche un'area interessata da un'importante pressione urbana (pressione antropica) e dall'inquinamento da plastica.

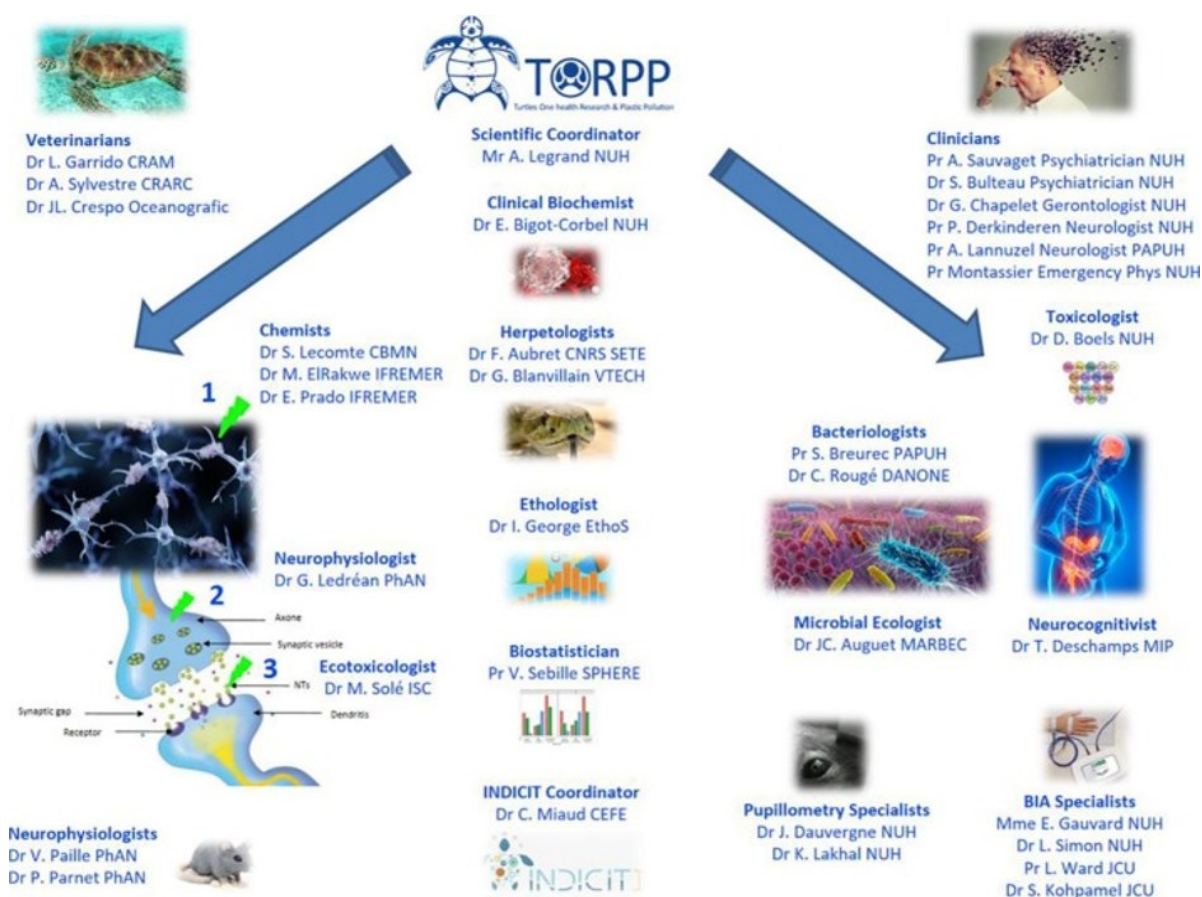
Ciascuna tartaruga è stata poi sottoposta ad una serie di analisi su loro campioni biologici, spesso feci, per valutare il grado di esposizione all'inquinamento plastico dell'animale, e per comprendere anche la tipologia e la provenienza di tale materiale ingerito.

Successivamente è stata analizzata anche la loro flora batterica intestinale (microbiota) e sono state eseguite analisi approfondite dei loro parametri ematologici (con particolare riferimento allo stress ossidativo e ad indicatori di infiammazione).

Un'altra iniziativa del consorzio TORPP è rappresentata dal progetto MIGUD, *Microplastics Gut-brain-axis and Depression* ovvero “microplastiche, asse intestino-cervello e depressione”, in cui i ricercatori hanno cercato di comprendere se l'esposizione a micro e nanoplastiche possa alterare il microbiota intestinale e influenzare di conseguenza il sistema nervoso.

L'aspetto innovativo di questo studio è proprio l'approccio *One Health* adottato che collega salute umana, animale e ambientale. Lo studio definito clinico-pilota, che è stato condotto su 62 pazienti umani, si basa, infatti, sull'ipotesi che le micro e nanoplastiche possano alterare il microbiota intestinale e compromettere il normale funzionamento dell'asse intestino-cervello, un sistema di comunicazione che collega il tratto gastrointestinale al sistema nervoso centrale e permette loro di comunicare a vicenda. Tra le principali vie di comunicazione di questo asse vi è il nervo vago, che trasmette segnali dall'intestino al cervello e viceversa.

Le alterazioni del microbiota e dei processi infiammatori indotti da tali contaminanti potrebbero quindi, secondo i ricercatori, influenzare i meccanismi neurobiologici coinvolti nello sviluppo dei disturbi depressivi nell'uomo. In un'ottica *One Health*, tale studio è stato affiancato da una ricerca condotta sulle tartarughe marine, al fine di verificare se l'esposizione ai medesimi inquinanti ambientali possa determinare alterazioni biologiche e neurologiche analoghe, suggerendo l'esistenza di meccanismi patogenetici condivisi tra uomo e fauna selvatica (Blanchilain et al., 2024).



Tratto da: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235277142400199X>

Al fine di promuovere un maggiore senso di responsabilità collettiva ed educare le nuove generazioni a una gestione più consapevole della plastica, nel 2019 è nata l'associazione *Plastic Free ODV ONLUS*.

Questa organizzazione, fondata a Termoli da Luca De Gaetano che è anche l'attuale presidente, nasce inizialmente come un piccolo progetto di sensibilizzazione digitale per poi trasformarsi in una associazione nazionale impegnata nella promozione della cultura della sostenibilità e della responsabilità collettiva nei confronti dell'ambiente.

L'associazione opera con l'obiettivo di educare i giovani ad un uso più consapevole della plastica e di contrastare il crescente fenomeno dell'inquinamento ambientale, attraverso attività di informazione e percorsi formativi nelle scuole.

Parallelamente, organizza iniziative di volontariato, tra cui giornate di raccolta dei rifiuti plastici in città, parchi, spiagge, fiumi e torrenti, affiancate da progetti di carattere sociale e solidale volti a rafforzare il senso di appartenenza e di responsabilità verso il bene comune.

Inoltre, in Sicilia, sono state promosse diverse iniziative finalizzate alla tutela delle tartarughe marine e alla riduzione dell'inquinamento da plastica, riconoscendo anche il ruolo di questi animali come indicatori dello stato di salute degli ecosistemi marini. (Ruben Manco, volontario di Parma di Plastic Free).



Tratto da: <https://quicosenza.it/news/calabria-plastic-free-2026-7-comuni-premiati/>

Come ampiamente dimostrato, stanno nascendo sempre più iniziative volte a contrastare l'inquinamento causato dai rifiuti plastici nel nostro ecosistema. Tuttavia, un adeguato senso civico è ancora carente in molti cittadini, come dimostra la presenza di rifiuti e materiali plastici abbandonati lungo le strade, nei fossi; nelle campagne e nei mari e torrenti.

Anche una scelta da parte dei cittadini di acquisto più consapevole può contribuire in modo significativo alla riduzione dell'inquinamento da plastica, privilegiando prodotti con imballaggi ecosostenibili o privi di plastica, rifornendosi presso aziende e rivenditori attenti all'impatto ambientale e adottando comportamenti responsabili nella gestione dei rifiuti, attraverso una corretta raccolta differenziata, mettendo quindi in pratica piccoli gesti che ognuno può fare per aiutare ad arginare il problema.

Se si considera, inoltre, che, come abbiamo visto in precedenza, la plastica può contribuire all'insorgenza di problemi di salute anche nell'uomo, l'urgenza di adottare piccoli ma fondamentali cambiamenti nelle abitudini quotidiane diventa ancora più evidente e necessaria.

Si dovrebbe quindi evitare la comodità di certi atteggiamenti o utilizzi, preferendo la qualità sopra ogni cosa.

È il caso, ad esempio, di alcuni utensili da cucina realizzati con materiali plastici o rivestimenti contenenti additivi chimici, come PFAS e ftalati, impiegati in determinati processi produttivi. Un esempio particolarmente diffuso è rappresentato dalle padelle antiaderenti, apprezzate per la loro praticità d'uso, ma che, in presenza di graffi o evidenti segni di usura, possono rilasciare milioni di particelle del rivestimento negli alimenti.

Per ridurre questo rischio, è consigliabile sostituire gli utensili danneggiati e, quando possibile, preferire materiali più durevoli, come l'acciaio inossidabile o la ghisa, generalmente considerati alternative più stabili e sicure per l'uso alimentare (Schiavone e Portesi, 2023).

Un'ulteriore misura preventiva consiste nel privilegiare l'uso di borracce in acciaio inossidabile o contenitori in vetro rispetto alle bottiglie in PET monouso, risultate da diverse ricerche scientifiche come inquinanti da rilascio di micro e nano polimeri plastici.

Alcune realtà produttive, da diversi mesi, stanno anche sperimentando metodi alternativi all'uso della plastica in contesti differenti. Ad esempio, alcune piccole aziende o produttori locali hanno progettato pellicole ad uso alimentare ecologiche, interamente costruite in cere d'api. Vengono realizzate in cotone certificato bagnato in una miscela di cere d'api e olio di cocco biologico il che rende il materiale antibatterico e modellabile ad ogni contenitore.

Queste iniziative nascono dall'esigenza di ridurre al minimo lo spreco dei materiali avanzati del processo produttivo di un determinato bene, senza rilasciare nell'ambiente scarti di materiale plastico o additivi chimici relativi alla sua fabbricazione.

Ma anche in campo zootecnico queste esigenze permangono, al fine di evitare contaminazioni all'inizio della filiera alimentare e per non arrecare quindi danno all'uomo e all'animale stesso.

Proprio in questo ambito, infatti, la plastica viene ampiamente utilizzata grazie alle sue numerose proprietà vantaggiose, tra cui leggerezza, resistenza e flessibilità.

Secondo il rapporto della FAO, ogni anno le filiere agroalimentari utilizzano circa 12,5 milioni di tonnellate di prodotti plastici nella produzione vegetale e animale, evidenziando il ruolo significativo dell'agricoltura nel consumo globale di materiale plastico (Gilbert et al., 2021).

In questo settore, per mitigare il problema da micro e nanoplastiche, è di fondamentale aiuto il concetto di economia circolare, in cui un rifiuto può essere considerato realmente recuperato solo se il materiale ottenuto trova un mercato in cui essere riutilizzato e reimmesso nel ciclo produttivo, prendendo il nome di “materia prima seconda”. Ma uno dei problemi principali della plastica riguarda appunto la degradazione dei materiali plastici impiegati nei campi, che, anche se riciclati correttamente, continuano il loro processo di degradazione, specie se esposti ad agenti atmosferici o raggi ultravioletti come in agricoltura. Basti pensare allo srotolamento dei fili delle balle di fieno ogni tal volta che vanno adoperate, o ai teli da pacciamare le viti e agli irrigatori di plastica per pomodori, che degradandosi anche leggermente possono rilasciare ingenti quantità di microplastiche nel suolo.

Per sostituire, quindi, i materiali plastici in alcuni casi è possibile introdurre soluzioni sostenibili di carattere agronomico. Al posto dei teli di plastica da pacciamare si possono, ad esempio, utilizzare coperture vegetali di materiali inerti come cippati di legno e paglia o coltivazioni erbacee di copertura per proteggere il terreno dall'erosione, migliorandone al contempo la struttura e la fertilità. Vi sono inoltre molti studi al riguardo di plastiche biodegradabili che possano sostituire la plastica nelle corde per le balle di fieno. Si stanno testando quindi materiali alternativi prodotti utilizzando biopolimeri biodegradabili per ridurre l'impatto ambientale rispetto al polietilene convenzionale delle classiche corde in plastica.

Queste devono però poter resistere alla trazione meccanica ed essere impermeabili all'ossigeno per durare sufficientemente durante tutta la fase dello stoccaggio, per questo gli studi su questi materiali sono assai lunghi e difficoltosi (Borreani G & Tabacco E, 2015).

Per quanto riguarda poi le attrezzature usate negli allevamenti, quali mangiatoie e abbeveratoi destinati a bovini, suini e avicoli, l'impiego di materiali alternativi più durevoli e stabili, come acciaio inox, ghisa e cemento, può rappresentare una valida soluzione, in grado di contribuire alla riduzione del consumo di plastica e della produzione di rifiuti che ne derivano.

Uno strumento utile sul fronte zootecnico per monitorare il livello di utilizzo di plastica in una certa realtà di allevamento è rappresentato dal *plastic footprint* o impronta plastica.

Questo indicatore di sostenibilità aziendale misura, attraverso parametri e un calcolo specifico, la quantità di plastica che un individuo, un'azienda o un paese consuma e successivamente disperde

nell'ambiente adiacente, ed include gli imballaggi, e perfino i vestiti sintetici e gli oggetti d'uso quotidiano. Questo calcolo, effettuabile anche da ogni cittadino attraverso strumenti disponibili online, come il “*Plastic Footprint Calculator*”, può rappresentare un elemento di fondamentale importanza nell'autogestione di un'azienda agricola o di un'industria. Inoltre, potrebbe costituire un utile parametro di riferimento per l'elaborazione di future normative finalizzate a definire livelli soglia massimi di utilizzo e produzione di rifiuti plastici, oltre i quali prevedere specifici interventi di riduzione, compensazione o adeguamento. L'introduzione di indicatori di questo tipo favorirebbe una gestione più sostenibile delle attività produttive, promuovendo, così, i principi dell'economia circolare e dell'approccio *One Health* stesso (United Nations Environment Programme, UNEP, 2023).

Detto questo, per trovare soluzioni alternative all'utilizzo della plastica in ogni settore e realtà, è necessario sempre agire in un'ottica di sostenibilità, adoperando costantemente il concetto di *One Health*, in quanto, come si è citato precedentemente, tramite esempi e studi scientifici, ogni decisione sbagliata di aziende o strutture ma anche di ogni singolo individuo può contribuire all'inquinamento da micro-polimeri plastici nell'ambiente circostante.

La definizione di “**Unica Salute**” sottolinea infatti l'importanza di un impegno collettivo, poiché la qualità dell'ambiente in cui viviamo costituisce la fonte più diretta del nostro benessere e della nostra salute.

Per il futuro sarà quindi necessario rafforzare le politiche di tutela ambientale e incentivare la ricerca di alternative sostenibili, favorendo una stretta collaborazione tra le diverse discipline scientifiche. Solo unendo le competenze della medicina umana, della veterinaria, delle scienze agrarie e ambientali sarà possibile costruire un modello di sviluppo sostenibile capace di coniugare innovazione e rispetto per tutte le forme di vita, secondo i principi dell'approccio *One Health*.

6. Bibliografia

ARTICOLI SCIENTIFICI:

1. A.De Crescenzo et al., Study of fibrous microplastic and natural microfiber levels in branded milk samples from Italy, 2025, Food Chemistry, 14(2):13523
2. Abbasi et al, 2018, Microplastics in different tissues of fish and prawn from the Musa Estuary, Persian Gulf, Chemosphere, Vol. 205, pp 80-87
3. Ali Karami et al., Microplastics in commercial salt from different countries, 2017, Scientific Reports, vol 7
4. Alimba & Faggio, 2019; Micro(nano)-plastics in the environment and risk of carcinogenesis: Insight into possible mechanisms, Journal of Hazardous Materials, Vol. 416
5. Allen et al, 2019, Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment, Nature Geoscience volume 12, pages 339–344
6. Allen et al, 2020, Micro(nano)plastics sources, fate, and effects: What we know after ten years of research, Journal of Hazardous Materials Advances Vol. 6
7. Andrade et al, 2006, A dose–response study following in utero and lactational exposure to di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP): reproductive effects on offspring rats, Toxicological Sciences, pp: 247–254
8. Astner et al., Mechanical formation of micro- and nano-plastic materials for environmental studies in agricultural ecosystems, Science of the Total Environment, 685, 1097–1106, 2019
9. Balzani et al., Acute and chronic ingestion of polyethylene (PE) microplastics has mild effects on honeybee health and cognition, 2022, Environmental Pollution, Vol: 30, articolo: 119318
10. Baracchi et al., Microplastics reach the brain and interfere with honeybee cognition, 2024, Science of the Total Environment, vol. 912
11. Beccacece, L. et al., Cross-Species Transcriptomics Analysis Highlights Conserved Molecular Responses to Per- and Polyfluoroalkyl Substances. 2023, Toxics, 11(7)
12. Bhangare, R. C. et al., Exudation of microplastics from commonly used face masks in COVID-19 pandemic, 2022, Environmental Science and Pollution Research
13. Bhardwaj et al., Exposure Pathways, Systemic Distribution, and Health Implications of Micro- and Nanoplastics in Humans, 2025, Applied Sciences, 15

14. Blanchilain et al., TORPP - Turtles, One Health Research & Plastic Pollution: A multidisciplinary consortium to evaluate the environmental and health impact of Micro/NanoPlastics (MNPs) pollution, 2024, One Helath, vol.19
15. Borreani G & Tabacco E, Bio-based biodegradable film to replace the standard polyethylene cover for silage conservation, 2015, Journal of Dairy Science, Vol 98, pp 386-394
16. Brahney, J. et al. (2020). Plastic rain in protected areas of the United States. Science, 368(6496), 1257–1260.
17. Brunn Hubertus et al., PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites. 2023, Environmental Sciences Europe, 35, 20.
18. Christopher et al., Impacts of micro- and nanoplastics on early-life health: a roadmap towards risk assessment, 2024, Microplastics and Nanoplastics vol.4, Article 13, pp 1–28
19. Cinquemani, T., 2024 Inquinamento da plastiche nei suoli agricoli. AgroNotizie
20. De Marco, G et al, Embryotoxicity of polystyrene microplastics in zebrafish *Danio rerio*. Environmental Research, 208, 2022
21. Dominic J. Clarke et al., Detection and Learning of Floral Electric Fields by Bumblebees, 2013, Science (American Association for the Advancement of Science – AAAS), volume 340, pp 66-69
22. Dris et al, 2017, A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments, Environmental Pollution Volume 221, pages 453-458
23. Dris et al., 2016; Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? Marine pollution bulletin, 104(1-2):290-3
24. Duncan E.M. et al., Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles, 2019, Global Change Biology, Vol. 2, Article 25, pp 744–752
25. Evangelos Danopoulos et al., Microplastic pollution in commercial salt for human consumption: a review, 2019, Stuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 219, pp 161-168
26. Fang et al., Raman imaging for the identification of Teflon microplastics and nanoplastics released from non-stick cookware, 2022, Science of the Total Environment, 842, 156833
27. Farrell e Nelson, 2013, Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.), Environmental Pollution, Vol. 177, pp 1-3
28. Fazel Abdolapur Monikh et al, 2022, Quantifying the trophic transfer of sub-micron plastics in an assembled food chain, Nano Today

29. Fei Yu et al, 2019, Adsorption behavior of organic pollutants and metals on micro/nanoplastics in the aquatic environment, *Science of the Total Environment*
30. Foroozandeh, P., & Aziz, A. A. Insight into Cellular Uptake and Intracellular Trafficking of Nanoparticles. 2018, *Nanoscale Research Letters*, 13
31. Giacinto et al, 2023, Detection of microplastics, polymers and additives in edible muscle of swordfish and bluefin tuna, caught in the Mediterranean Sea, *Journal of Sea Research*, Volume 192
32. Gilbert et al., Assessment of agricultural plastics and their sustainability: A call for action, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).2021
33. He et al., Migration of (non-) intentionally added substances and microplastics from microwavable plastic food containers, 2021, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 417
34. Helle Katrine Knutsen, 2020, PFAS animal toxicity, mode of action and mixture approach
35. Hernandez L.M. et al., “Plastic Teabags Release Billions of Microparticles and Nanoparticles into Tea”, in *Environmental Science & Technology*, Vol. 53, n. 21, 2019, pp. 12300–12310.
36. Hirt & Body-Malapel, Immunotoxicity and intestinal effects of nano- and microplastics: a review of the literature. 2020, *Particle and Fibre Toxicology*, Vol.17, Article 17
37. Hua T. et al., Microplastics exposure affects neural development of human pluripotent stem cell-derived cortical spheroids, Vol. 435, Article 128884
38. Hwang et al, 2019 An assessment of the toxicity of polypropylene microplastics in human derived cells
- I. van der Veen et al, 2020, Plastic Particles in Livestock Feed, Milk, Meat and Blood
39. J. Gigault et al., Current opinion: what is nano plastic? *Environ. Pollut.* 235 (2018) 1030–1034
40. Jambeck et al, 2015, Plastic waste inputs from land into the ocean, *Science*, Vol. 347, No. 6223
41. Jenner et al, Detection of microplastics in human lung tissue using Mftir spectroscopy, *Science of the Total Environment*, volume 831, articolo 154907, 2022
42. Khalifa, S. A. M., et al., Overview of Bee Pollination and Its Economic Value for Crop Production. *Insects*, 12(8), 688, 2021
43. Leslie. A et al, Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood, *Environemnt international*, 2022
44. Li, D., Shi, Y., Yang, L., et al., Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation, 2020, *Nature Food*, Vol. 1, pp. 746–754

45. Lian et al., 2020, Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.), *Journal of Hazardous Materials*
46. Llorca et al., 2020, Adsorption and Desorption Behaviour of Polychlorinated Biphenyls onto Microplastics' Surfaces in Water/Sediment Systems, *Toxics*, 8(3); 59
47. Loverkamp-Swan et al., 2003, Mechanisms of phthalate ester toxicity in the female reproductive system, Volume: 111, Page: 139–145
48. Lucini, L., et al. (2024). Effects of micro- and nano plastics on *Lactuca sativa*: physiological and metabolic responses. *Plant Physiology and Biochemistry*
49. Luo, D et al., Micro- and nano-plastics in the atmosphere: A review of occurrence, properties and human health risks, 2024, *Journal of Hazardous Materials*, 465
50. Mao, R et al., A review of the ecological effects of microplastics on aquatic ecosystems, 2020, *Chemosphere*, Vol. 253
51. Marfella et al., Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events, 2024, *New England Journal of Medicine*, Vol. 390, pp 900-910
52. Matuszczak et al., 2019, The Impact of Bisphenol A on Fertility, Reproductive System, and Development: A Review of the Literature, *International Journal of Endocrinology*
53. Monopoli, M. P. et al., Physical–chemical aspects of protein corona: relevance to in vitro and in vivo biological impacts of nanoparticles, 2012, *Nature Nanotechnology*, vol. 7, pp. 779–786
54. Montano et al., Raman Microspectroscopy evidence of microplastics in human semen, *Science of the Total Environment*, 2023, Vol. 901, Article 165922
55. Nikhil Reddy K. S. et al., Microplastic Pollution and Its Effects on Insects: A Hidden Crisis in Our Ecosystems, 2025, *Indian Farmer*, Vol. 12(03), pp. 116–120
56. Nizzetto, L. et al., Pollution: Do agricultural soils represent a new global sink for microplastics? 2016, *Science of the Total Environment*, Vol 566-567
57. Patrucco et al., Microplastics contamination in ruminant feeds of Northwestern Italy: a preliminary assessment, *Science of the Total Environment* 1001, 2025
58. Poma et al., 2019, In vitro genotoxicity of polystyrene nanoparticles on the human fibroblast hs27 cell line
59. Prata et al., 2020, Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects, *the science of the total environmental*
60. Rahman et al., From farm to fork: Microplastic contamination in the meat and dairy supply chain, *Current Research in Food Science*, 2026

61. Rich, N. (2016). The Lawyer Who Became DuPont's Worst Nightmare. New York Times Magazine
62. Rochester, J. R. Bisphenol A and human health: A review of the literature, 2023, Reproductive Toxicology, 42, 132–155.
63. Ru An et al, 2021, Polystyrene microplastics cause granulosa cells apoptosis and fibrosis in ovary through oxidative stress in rats, Toxicology
64. Schiano et al., Microplastic contamination in the agri-food chain: The case of honeybees and beehive products, 2024, Science of the Total Environment Vol. 948, articolo: 174698
65. Schiavone, C., & Portesi, C, PFAS: A Review of the State of the Art, from Legislation to Analytical Approaches and Toxicological Aspects for Assessing Contamination in Food and Environment and Related Risks, 2023, Applied Sciences, Vol. 13
66. Schwabe, C. W. Veterinary medicine and human health (3rd ed.). 1984, Williams & Wilkins.
67. Shams, M., Alam, I., & Chowdhury, I. 2019, Aggregation and stability of nanoscale plastics in aquatic environment. Water Research, Water Research, Vol. 171
68. Sharma et al, 2021, Microplastics in the Mediterranean Sea: Sources, Pollution Intensity, Sea Health, and Regulatory Policies, Sec. Marine Pollution, Volume 8
69. Souza et al, 2026, PFAS and One Health: integrating human, animal, and environmental perspectives, Archives of Toxicology
70. Sun J. et al., Detection and quantification of various microplastics in human endometrium based on laser direct infrared spectroscopy, 2024, Science of the Total Environment, Vol. 906, Article 167760
71. Susy Urli et al, 2023 Impact of Microplastics and Nanoplastics on Livestock Health: An Emerging Risk for Reproductive Efficiency
72. Terzi, Y et al, 2024, How much do we know about the microplastic distribution in the Mediterranean Sea: A comprehensive review, Marine Pollution Bulletin, 208
73. Urli et al., Impact of Microplastics and Nanoplastics on Livestock Health: An Emerging Risk for Reproductive Efficiency, 2023, animals, Vol.13, article 1132
74. Wei.Z et al.2022, Comparing the effects of polystyrene microplastics exposure on reproduction and fertility in male and female mice
75. Wright & Kelly, 2017, Plastic and Human Health: A Micro Issue? Environmental Science & Technology, 6634-6647
76. Xiao, M et al., Assessment of cancer-related signaling pathways in responses to polystyrene nanoplastics via a kidney-testis microfluidic platform, 2023, Vol. 857 (Part 1), Article 159306

77. Yan Z. et al., Phthalates released from microplastics inhibit microbial metabolic activity and induce different effects on intestinal luminal and mucosal microbiota, 2022, Environmental Pollution, Vol. 310
78. Yanqi Shi et al., Analysis of aged microplastics: a review, 2024, Environmental Chemistry Letters, Vol.22, pp. 1861–1888
79. Yin et al, 2021, A comparative review of microplastics and nanoplastics: Toxicity hazards on digestive, reproductive and nervous system, Science of the Total Environment, Volume: 774
80. Yong et al. 2020, Toxicity of Microplastics and Nanoplastics in Mammalian Systems, International Journal of Environmental Research and Public Health (IJERPH), 17(5), 1509
81. Zalmanova' et al, 2017, Bisphenol S impairs porcine oocyte meiotic maturation via oxidative stress and apoptosis, Chemosphere, Vol. 190, Pagine: 109–116
82. Zhang et al., 2020, A Review of Microplastics in Table Salt, Drinking Water, and Air: Direct Human Exposure, Environmental Science & Technology, Vol. 54/Issue 7
83. Zhang et al., Reproductive toxicity of microplastics in female mice and their offspring from induction of oxidative stress, 2023, Environmental Pollution, Vol. 327, Article 121482
84. Zhang T. et al., Polystyrene Nanoplastics Induce Lung Injury via Activating Oxidative Stress: Molecular Insights from Bioinformatics Analysis.2022, Nanomaterials, 12
85. Zhou et al, Microplastics as an emerging threat to plant and soil health in agroecosystems. Science of the Total Environment, 787, 147444, 2021

SITOGRAFIA:

1. <https://www.youtube.com/watch?v=zQfaXZ0-NKI>
2. <https://achabgroup.it/approfondimenti/impatti-di-covid-19-sullambiente-in-europa/#cnt>
3. https://cordis.europa.eu/project/id/964766?utm_source=chatgpt.com
4. https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/single-use-plastics_en
5. <https://ilfattoalimentare.it/nanoplastiche-catena-alimentare.html>
6. <https://link.springer.com/article/10.1186/s12989-020-00387-7>
7. <https://resoilfoundation.org/ambiente/microplastiche-contaminazione-foglie-radici/>
8. <https://rivistanatura.com/la-contaminazione-da-pfas-delle-acque-potabili-italiane/>
9. <https://www.aogoi.it/notiziario/effetti-pfas-salute/>
10. <https://www.arpat.toscana.it/contaminazione-da-pfas-in-animale-marini/>

11. https://www.canada.ca/en/health-canada/services/home-garden-safety/bisphenol-bpa.html?utm_source=chatgpt.com
12. <https://www.efsa.europa.eu/it/topics/microplastics-and-nanoplastics-food>
13. <https://www.efsa.europa.eu/it/topics/per-and-polyfluoroalkyl-substances-pfas>
14. https://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/event/2020/2-PFAS%20Stakeholder%20meeting%2012032020-Toxicity_MoA_Mixture-HK%20Knutsen.pdf
15. <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20181212STO21610/rifiuti-di-plastica-e-riciclaggio-nell-ue-i-numeri-e-i-fatti>
16. <https://www.greenpeace.org/italy/comunicato-stampa/3819/la-microplastica-nel-sale-da-cucina-greenpeace-piu-del-90-per-cento-dei-campioni-contaminato/>
17. https://www.greenpeace.org/italy/rapporto/26152/la-prima-mappa-della-contaminazione-da-pfas-in-italia/?utm_source=chatgpt.com
18. https://www.ilmattino.it/primopiano/sanita/pasti_pronti_microonde_quali_evitare-9393683.html
19. <https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/microplastiche-nanoplastiche-diffusione-esalute-ambiente/>
20. <https://www.liberamidallaplastica.it/micro-e-nanoplastiche-la-loro-presenza-nei-terreni-agricoli-altera-radici-e-foglie>
21. <https://www.nutrientiesupplementi.it/norme-sicurezza/item/3601-nanoplastiche-cosi-passano-dal-cibo-ai-tessuti>
22. <https://www.radarmagazine.net/ci-sono-alternative-alla-plastica-in-agricoltura/>
23. <https://www.rinnovabili.it/clima-e-ambiente/inquinamento/contaminazione-da-microplastiche-sangue-degli-animali/>
24. <https://www.wwf.it/cosa-facciamo/clima/cambiamenti-climatici>
25. https://www.wwf.it/uploads/Report_Oltre-la-plastica_5giu25-1.pdf
26. <https://www.youtube.com/watch?v=S1qq3ePQxaA>

RINGRAZIAMENTI

Se sono alla fine di questo percorso di laurea magistrale è perché ho cercato di inseguire un obiettivo ben solido nella mia mente, che mi auguro davvero di portare a termine nel mio percorso post-università, passo dopo passo come alla fine si fa sempre.

Come mi ha insegnato mio nonno Beppe, a cui dedico questo traguardo, nella vita bisogna avere il coraggio di seguire ciò per cui ci sentiamo portati. "Forza e grinta, Richino", mi diceva sempre, ed è una voce che sentirò sempre dentro di me.

Ringrazio poi i miei genitori, Paolo e Daniela, persone belle e di immenso valore che stimo tantissimo; il loro supporto nelle mie decisioni e scelte di vita è, e sarà sempre, fondamentale.

Gli amici di famiglia che considero parenti Gianni e Stefi, che fin da piccolo mi supportano e mi aiutano.

Mia nonna Elda, che da sempre mi stima, mio zio Michele e mia nonna Antonia, che mi supportano nel mio percorso formativo, e i miei parenti e conoscenti più stretti che sanno apprezzare la mia persona.

Grazie alla mia ragazza, Elisabetta, senza la quale non avrei sicuramente avuto la stessa caparbietà nello studio, è grazie a lei che sono riuscito a capire di più la mia strada, lei che mi sa cogliere e leggere dentro senza parlare.

Ringrazio poi i miei amici, presenze costanti di grande aiuto e supporto, a partire da un amico che considero un fratello, Stefano, la sua amicizia è fatta di confidenze, aiuti e profonda stima reciproca, c'è da dieci anni e so che ci sarà sempre.

Grazie di cuore agli amici Luca e Miccel, conosciuti da meno tempo ma con un legame speciale che sembra di conoscersi da sempre.

Grazie poi agli amici di varie uscite e divertimento che sono anche spalle solide su cui poter sempre contare come Davide, Ruben, Isotta, Matteo, Daffo, Micky e Jaco.

Un ringraziamento va agli amici con cui condivido passioni e musica, quelli che sono una presenza costante alle mie serate piano bar; a quelli che conosco da sempre e a quelli arrivati da poco ma che già me li sento vicini. E, più in generale, a tutte le persone che mi vogliono bene, mi rispettano e mi

comprendono per quello che sono: non è scontato incontrare persone così al giorno d'oggi, e mi ritengo fortunato ad averle nella mia vita.

Un grazie lo rivolgo sempre anche alle mie passioni – la musica, i fumetti, il disegno e la natura – che negli anni, quelli belli e quelli più difficili, sono sempre stati un rifugio sicuro e un luogo dove potermi esprimere, un posto in cui potermi ritrovare e sentirmi al riparo. E so che continueranno ad esserlo.

Infine, un ringraziamento speciale va alla mia relatrice di tesi, la prof.ssa Maria Cristina Ossiprandi, che ha saputo accompagnarmi e aiutarmi nel mio percorso finale di Università. Conservo con particolare affetto le sue parole ascoltate durante gli open day di questo corso di laurea magistrale, che hanno acceso in me il desiderio di proseguire gli studi e di intraprendere questo percorso.

