

Microplastiche: classificazione, identificazione e rimozione all'interno degli impianti di trattamento delle acque reflue

Ciro Dario Petrone¹

¹Affiliation not available

Abstract

Negli ultimi decenni, l'interesse nel documentare le microplastiche nell'ambiente è notevolmente aumentato. La persistenza delle materie plastiche nell'ambiente è il principale motivo per cui sono state identificate come una grave minaccia. Il decadimento naturale degli oggetti di plastica nell'ambiente richiede un tempo estremamente lungo, inoltre queste micro particelle possono trasportare altri prodotti chimici, usati come additivi nella loro fabbricazione, o assorbirli attraverso la forte capacità di adsorbimento. Questo articolo si prefigge di dare un contributo alle informazioni sul campionamento, l'identificazione, l'analisi e la rimozione delle microplastiche, identificate come contaminanti emergenti, all'interno degli impianti di trattamento delle acque reflue che sono considerati una fonte importante per l'immissione delle microplastiche nei corpi idrici e nel suolo.

Microplastiche

Sebbene i detriti macroplastici siano da tempo al centro delle preoccupazioni ambientali, è solo da alcuni decenni che minuscoli frammenti di plastica, fibre e granuli, denominati "microplastiche", sono stati considerati inquinanti a pieno titolo¹². Le Microplastiche comprendono una serie molto eterogenea di particelle che variano in dimensioni, forma, colore, composizione chimica e

densità. Esse possono essere suddivise in base all'utilizzo e alla sorgente da cui provengono in: Microplastiche “Primarie” e “Secondarie”³.

Le microplastiche primarie sono prodotte sia per uso indiretto come precursori (nurdles o pellet in resina vergine) per la produzione di prodotti di consumo di polimeri, o per uso diretto, come ad esempio nell'industria di cosmetici³. Il loro impiego in detergenti esfolianti e scrub viso, hanno sostituito gli ingredienti naturali utilizzati tradizionalmente⁴⁵. I pellet di resina vergine, sferiche o cilindriche, sono ampiamente utilizzate durante la produzione e il trasporto di materiale plastico della resina base come “materia prima” alla produzione di vari tipi di prodotti di plastica. I pellet di resina possono essere involontariamente rilasciate nell'ambiente, sia durante la produzione che durante il trasporto.

Le microplastiche “secondarie”, sono il risultato dalla frammentazione di materiale plastico più grande in frammenti più piccoli. La non corretta gestione dei rifiuti e la conseguente dispersione di questi nell'ambiente fa sì che nel corso del tempo, i processi fisici, chimici e biologici possono ridurre l'integrità strutturale dei detriti di plastica, con conseguente frammentazione. I detriti di plastica nell'ambiente hanno un'elevata disponibilità di ossigeno e l'esposizione diretta alla luce del sole fa sì che si degradino rapidamente, trasformandoli con il tempo in frammenti sempre più fragili e di dimensioni microplastiche^{6 78}.

Al di là delle microplastiche presenti in molti prodotti per la cura del corpo molti studi si stanno concentrando sulle microfibre rilasciate dal lavaggio sia domestico che industriale dei tessuti sintetici; è stato stimato infatti che attraverso un normale ciclo di lavaggio di tessuti sintetici è in grado di rilasciare una notevole quantità di microfibre.

Un'altra fonte di microplastiche che sta ricevendo una crescente attenzione è quella derivata dall'abrasione degli pneumatici sull'asfalto. Il moto degli autoveicoli, come noto, genera polveri sottili, in conseguenza della abrasione degli pneumatici, fenomeno che produce anche frammenti di dimensioni più grosse. Rispetto al passato, nella fabbricazione di pneumatici, l'uso di gomma

naturale è stato sempre più sostituito da polimeri plastici mescolati a gomme naturali ed altri additivi. Vista la loro composizione, recenti studi fanno rientrare tali frammenti nella definizione di microplastiche.

Campionamento delle microplastiche all'interno delle acque reflue

Le microplastiche possono entrare nel sistema acquatico attraverso diverse vie. Le microplastiche primarie o secondarie convogliate agli impianti di trattamento acque si ripartiscono principalmente in due flussi: effluente e fanghi che apportano le microplastiche ai corpi idrici o al comparto terrestre, quando i fanghi vengono utilizzati in agricoltura o deposti in discarica.

Altre fonti di microplastiche al sistema acquatico sono derivate dall'immissione diretta di scarichi non trattati o di sfiori di acque da sistemi fognari di tipo misto nel corso di eventi meteorici e, sempre nel corso di eventi meteorici, dal dilavamento ed erosione di manufatti plastici, accumuli non controllati di rifiuti e residui plastici presenti nel comparto terrestre, derivanti dalle diverse attività umane.

Per il corretto campionamento all'interno delle acque reflue devono essere seguite diverse strategie di raccolta dei campioni, che consentano un corretto e rappresentativo monitoraggio delle microplastiche in matrici complesse e ricche di materiale interferente. È opportuno riferirsi ad alcune precauzioni generali, utili ad eliminare o ridurre il più possibile la contaminazione del campione; innanzitutto, è assolutamente necessario l'impiego di materiali plastic-free in tutte le attrezzature utilizzate nel campionamento, trasporto e conservazione del campione, la vestizione degli operatori con tessuti e materiali di origine naturale e, infine, prevedere anche un campione di controllo costituito, ad esempio, da un filtro che accompagni sempre l'operatore in tutte le fasi di prelievo

e di preparazione del campione. Le microplastiche, inoltre, in base alla densità del polimero che le compone, possono galleggiare in acqua o depositarsi, oppure rimanere per lungo tempo in sospensione, quando la loro densità è prossima a quella dell'acqua. Potranno, quindi, essere rinvenute sia nella frazione acquosa che in quella solida, rendendo indispensabile un campionamento specifico ed integrato per entrambe le matrici. La selezione dei siti di campionamento è il primo passo per assicurare il successo dell'intera procedura di analisi; gran parte della raccolta dei campioni viene effettuata all'inizio dell'impianto, quindi prima e dopo la grigliatura, dopo il processo di sedimentazione primaria e secondaria e dopo la disinfezione. Per i fanghi la raccolta in genere viene effettuata da fanghi primari, fanghi secondari e fanghi trattati compresi i fanghi essiccati. Un altro aspetto fondamentale è il tempo di campionamento in quanto raccogliere campioni durante varie fasi della giornata e per più giorni, con condizioni meteorologiche favorevoli e costanti ci consente di evitare un'errata valutazione delle microplastiche. Il metodo più comune per prelevare campioni dalle acque reflue negli impianti di depurazione è la raccolta tramite pompa o secchio in acciaio. Le pompe permettono di prelevare un volume elevato di acqua, ma a causa dell'enorme quantità di particolato sospeso e materiale grossolano presente, specialmente nelle acque in ingresso a un impianto di depurazione, il loro uso risulta essere più idoneo in matrici con poco particolato sospeso, come gli effluenti, d'altro canto, l'utilizzo di secchi metallici potrebbe essere il giusto compromesso per la raccolta di queste matrici con un metodo omogeneo lungo tutta la filiera di depurazione, dal refluo grezzo all'effluente, sebbene consentano il prelievo solamente di alcune decine di litri di acqua. È poi opportuno processare tempestivamente i campioni, normalmente conservati al buio a 4 °C, al fine di ridurre il rischio di contaminazione che ne potrebbe modificare la composizione polimerica.

La matrice acquosa deve essere successivamente filtrata. Questa azione può essere effettuata utilizzando una batteria di setacci, in maniera tale da distribuire, su base dimensionale, il carico organico e il materiale più grossolano sulla superficie delle griglie dei setacci, evitandone un rapido intasamento. Le maglie dei setacci più utilizzate in questa fase di filtrazione hanno una dimensione

compresa tra 10 e 500 μm ⁹¹⁰. La corretta analisi strumentale delle microplastiche non può prescindere da un'adeguata procedura preliminare che ne consenta la separazione dalla matrice campionata, in quanto le dimensioni micrometriche delle particelle ne complicano notevolmente l'identificazione nei vari campioni, richiedendo un approccio analitico più sofisticato rispetto all'analisi delle macroplastiche¹¹. Occorre premettere che, fino ad oggi, non esiste un metodo univoco e standardizzato, ma sono disponibili diverse tecniche per il trattamento preliminare del campione. La fase che accomuna tutti i trattamenti preliminari di campioni (acqua e sedimenti) prelevati in ecosistemi naturali, è la separazione delle microplastiche dal resto del materiale prelevato. Infatti, la matrice ambientale può contenere una gran quantità di materiale (es. scaglie di legno, foglie, pietruzze, argille, sabbie, limo, piccoli organismi, macroplastiche) che può interferire notevolmente con l'identificazione delle microplastiche. Ciò rende assolutamente necessaria l'applicazione di metodi specifici per la separazione delle microplastiche dal resto del campione per rendere più semplice, veloce e precisa la successiva fase di riconoscimento strumentale. La tecnica più comunemente impiegata per separare le microplastiche dalla matrice campionata, è basata sulla separazione per densità mediante una soluzione ipersalina, che consente alle microplastiche di rimanere in superficie, mentre il resto del materiale tende a precipitare sul fondo. Nella maggior parte degli studi su campioni acquosi viene utilizzata una soluzione ipersalina di NaCl,² ma esistono applicazioni su campioni di sedimento in cui sono stati impiegati anche ioduro di sodio, cloruro di zinco e tungstato di sodio¹²¹³, che permettono di ottenere soluzioni a densità superiore. Infatti, la maggior limitazione nell'impiego della soluzione ipersatura di NaCl è rappresentata dal fatto che la densità massima raggiungibile non consente un'efficace separazione dei polimeri a maggiore densità, quali il cloruro di polivinile (PVC), il polietilene tereftalato (PET). In questi casi, si dovrebbero quindi utilizzare altre soluzioni ipersature, quali quelle di tungstato di sodio, ioduro di sodio e cloruro di zinco. L'impiego di questo tipo di soluzioni è, però, limitato sia dai maggiori costi sia da problemi legati al loro corretto smaltimento.

Nella letteratura scientifica sono descritti diversi metodi per lo studio della composizione delle

microplastiche, includendo metodi termo-analitici, spettroscopia Raman, spettroscopia infrarossa a trasformata di Fourier (FT-IR) o, più in generale, tecniche di spettroscopia vibrazionale e cromatografia liquida¹⁴¹⁵¹⁶. Parallelamente alle tecniche analitiche più avanzate, l'ispezione visiva del campione al microscopio ottico è una pratica largamente utilizzata per una rapida analisi quantitativa e un conteggio preliminare delle microplastiche presenti in un campione. È, tuttavia, chiaro come una successiva analisi sia necessaria per una corretta e completa identificazione delle microplastiche. Protocolli di colorazione attraverso, ad esempio, il colorante Nile Red possono essere applicati per aumentare l'accuratezza dell'ispezione visiva¹⁷, anche se tale tecnica non è esente da errori di riconoscimento poiché diversi polimeri, come policarbonato, poliuretano, polietilentereftalato e polivinilcloruro, danno segnali colorimetrici molto bassi¹⁷, così come anche le fibre sintetiche¹⁸, tuttavia, l'utilizzo di tali protocolli di colorazione può fornire un semplice e veloce metodo di preselezione dei campioni, da inviare successivamente alle tecniche analitiche più avanzate per la caratterizzazione chimica finale.

Nella rosa delle tecniche analitiche disponibili, le spettroscopie vibrazionali restano le tecniche maggiormente utilizzate per la caratterizzazione chimica di macro e microplastiche (Käppler et al., 2016). I metodi basati su spettroscopie vibrazionali sono non distruttivi, estremamente accurati ed applicabili anche a particelle di dimensione inferiore al millimetro. Tra le tipologie di analisi troviamo la spettroscopia FT-IR, i polimeri più facilmente identificabili per mezzo di questa tecnica sono il polipropilene (PP), il polietilene (PE) e il polistirene (PS), utilizzati comunemente nel settore degli imballaggi, sebbene i database disponibili ad oggi offrono spettri di riferimento per la maggior parte dei polimeri e monomeri presenti in commercio.

L'analisi chimica dei polimeri può essere effettuata anche per mezzo della spettroscopia Raman¹⁹, con la quale è possibile ottenere, in aggiunta, anche informazioni circa la struttura cristallina del polimero. Spettroscopia FT-IR e spettroscopia Raman sono tecniche complementari ed entrambe producono uno spettro basato sull'interazione della luce con le molecole componenti il polime-

ro, benché il principio fisico alla base delle due interazioni sia differente. Entrambe le tecniche possono essere accoppiate a microscopi in modo da raggiungere l'identificazione di particelle polimeriche fino approssimativamente alla dimensione di 10 μm ed ottenere la possibilità di mappatura ad alta risoluzione dei campioni. Le tecniche spettroscopiche sopra descritte si basano sulla trasmissione della luce a determinate lunghezze d'onda. È opportuno sottolineare come nel caso di una particella caratterizzata da dimensioni inferiori a tali lunghezze d'onda, tuttavia, non può essere raccolto nessun tipo di segnale, andando oltre il limite strumentale. Questo rappresenta una delle maggiori sfide per l'analisi e identificazione di particelle di dimensione inferiore ai 10 μm , arrivando fino alle dimensioni tipiche delle nanoplastiche.

Rimozione delle microplastiche all'interno degli impianti di trattamento delle acque reflue

Il trattamento delle acque reflue, indica il processo di rimozione dei contaminanti da un'acqua reflua di origine urbana o industriale, ovvero di un effluente che è stato contaminato da inquinanti organici e/o inorganici. Il ciclo depurativo è costituito da una combinazione di più processi:

- trattamenti meccanici: si basano sull'azione di principi puramente fisici o meccanici; fanno parte di questa tipologia le operazioni preliminari di rimozioni dei solidi non disciolti;
- trattamenti chimici: si basano sull'aggiunta di specifiche sostanze per lo svolgimento di particolari reazioni chimiche, l'aggiunta di sostanze per facilitare la precipitazione e per la disinfezione;
- trattamenti biologici: si basano su processi biologici a opera di microrganismi presenti nell'acqua; a tale categoria appartengono i trattamenti utilizzati per la separazione dei so-

lidi disciolti in acqua.

Solitamente in un impianto di trattamento delle acque reflue si distinguono due linee specifiche: la linea acque, la linea fanghi. Nella linea acque vengono trattati i liquami grezzi provenienti dalle fognature e di regola comprende tre fasi, chiamati:

- Pretrattamento e trattamenti primari: un processo di tipo fisico utilizzato per la rimozione da parte delle sostanze organiche sedimentabili contenute nel liquame. Comprende la grigliatura, la dissabbiatura, disoleatura, la sedimentazione primaria;
- Trattamento ossidativo biologico: un processo di tipo biologico utilizzato per la rimozione delle sostanze organiche sedimentabili e non sedimentabili contenute nel liquame. Comprende la vasca a fanghi attivi e la sedimentazione secondaria;
- Ulteriori trattamenti: sono tutti quei trattamenti realizzati a monte o a valle dell'ossidazione biologica, permettono di ottenere un ulteriore affinamento del grado di depurazione. Comprende trattamenti speciali per abbattere il contenuto di quelle sostanze che non vengono eliminate durante i primi due trattamenti.

Nella linea fanghi vengono trattati i fanghi (separati dal refluo chiarificato) durante le fasi di sedimentazione previste nella linea acque. Lo scopo di tale linea è quello di eliminare l'elevata quantità di acqua contenuta nei fanghi e di ridurre il volume, nonché di stabilizzare (rendere imputrescibile) il materiale organico e di distruggere gli organismi patogeni presenti, in modo tale da rendere lo smaltimento finale meno costoso e meno dannoso per l'ambiente .

Gli impianti di trattamento delle acque reflue non sono stati progettati per la rimozione di micro inquinanti, come le microplastiche, ma nonostante ciò è stata rilevata una buona percentuale di rimozione attraverso le vari fasi ed i vari processi. In particolare la maggior parte dei lavori inerenti, non distingue le prime fasi, considerando quindi la rimozione complessiva ottenuta dai pretrattamenti ed i trattamenti primari. È stata osservata che una media del 72% (range 32-93%) delle

particelle di microplastica viene rimossa durante il trattamento preliminare e primario delle acque reflue, dimostrando che gran parte della rimozione di questi microinquinanti avviene proprio in queste prime fasi. Andando a suddividere i vari trattamenti che si trovano all'inizio dell'impianto è stato osservato che la più grande riduzione di microplastiche si è verificata durante la fase di trattamento di rimozione di sabbia e grasso, 45% circa, seguita dalla sedimentazione primaria, 34% circa. Si noti che questi valori sono stime, tuttavia, si può sottolineare che le particelle più grandi, sono ben rimosse dalla separazione basata sulla densità nel trattamento preliminare e primario delle acque reflue. Sono le particelle più piccole che costituiscono la maggior parte delle microplastiche che entrano nelle fasi di trattamento successive. Un fattore complicante è che le particelle più piccole sono anche più difficili da isolare e analizzare, quindi molte mancheranno durante le indagini sperimentali, anche utilizzando tecniche di analisi all'avanguardia.

Il trattamento secondario riuscirebbe a ridurre ulteriormente le microplastiche nelle acque reflue in un range percentuale che va da 0,2% -14%. Durante questo stato, è probabile che i fiocchi di fango o i polimeri extracellulari batterici nella vasca di aerazione favoriscano l'accumulo dei detriti plastici rimasti, che verrebbero poi depositati nella vasca di sedimentazione secondaria. Inoltre, sostanze chimiche o altri agenti flocculanti utilizzati durante il trattamento secondario potrebbero avere un effetto positivo sulla rimozione delle microplastiche, poiché potrebbero causare l'aggregazione delle particelle sospese formando un "flocculo"²⁰. Un altro fattore considerato importante per la rimozione delle microplastiche dagli scarichi secondari è il tempo di contatto delle microplastiche con le acque reflue all'interno del trattamento.²¹ hanno scoperto che un tempo di contatto più lungo era associato ad un maggiore potenziale di rivestimento di biofilm superficiale sulle microplastiche. Tali bio rivestimenti possono agire modificando le proprietà superficiali o le densità delle microplastiche²². Tali cambiamenti potrebbero avere un impatto misurabile sull'efficienza di rimozione delle microplastiche, poiché le particelle che galleggiano in modo neutro hanno maggiori probabilità di sfuggire dai processi. Diversamente dal pretrattamento, il trattamento secondario rimuove più particelle come frammenti rispetto alle fibre. Ciò è stato supportato

da studi che hanno dimostrato che l'abbondanza relativa di frammenti di microplastica è diminuita mentre quella delle fibre è aumentata dopo il trattamento secondario²³²⁴²⁵. Una possibile ragione è che le fibre facilmente sedimentabili erano già state in gran parte rimosse durante il pretrattamento, mentre i resti potrebbero avere caratteristiche, come la galleggibilità neutra, che era resistente per essere ulteriormente rimossi. In termini di dimensioni, le particelle di microplastiche di grandi dimensioni possono essere ulteriormente rimosse durante il trattamento secondario, determinando un'abbondanza relativamente bassa nell'effluente secondario.

Il trattamento terziario può fornire un sostanziale aiuto aggiuntivo sulla rimozione di microplastiche. L'efficienza di rimozione delle microplastiche dipende dai processi di trattamento applicati. È stato osservato che il trattamento terziario può ridurre ulteriormente la presenza di microplastiche negli effluenti fino a circa 2% . Vale la pena notare che la concentrazione di microplastiche sia nell'influenza che nell'effluente dell'unità di trattamento terziario potrebbe essere molto bassa e, di conseguenza, il volume del campione limitato potrebbe dare risultati falsi zero. Pertanto, per la valutazione affidabile dell'efficienza di rimozione delle microplastiche da parte dei processi di trattamento terziario sono necessari volumi di campionamento maggiori rispetto a quelli richiesti per la valutazione dei processi di pretrattamento, trattamento primario e di trattamento secondario. Dopo il trattamento terziario, la frazione di dimensioni più piccole è risultata la più abbondante²⁵. Un altro aspetto importante è che le microplastiche trattenute dal trattamento terziario potrebbero non essere rimosse dall'impianto, ma potrebbero essere aggiunte al carico di microplastiche dell'impianto stesso²⁶. Con l'aumentare del tempo di contatto, questa parte di microplastiche potrebbe essere rimossa mediante pretrattamento, trattamento primario o trattamento secondario. Tuttavia, il ritorno di microplastiche nel flusso delle acque reflue potrebbe anche aumentare la possibilità di fuga dai vari processi.

L'efficienza di rimozione relativamente elevata delle microplastiche da parte degli impianti di trattamento ha indicato che la maggior parte delle microplastiche viene trattenuta nei fanghi di de-

purazione. La dimensione delle microplastiche nei fanghi di depurazione è stata trovata significativamente diversa da quella nelle acque reflue²⁰. È stato osservato che la dimensione media delle microplastiche ottenute dai fanghi era relativamente più grande di quella ottenuta dalle acque reflue, inclusi gli effluenti dopo la grigliatura, la dissabbiatura, disoleatura, l'effluente dopo la sedimentazione primaria e l'effluente finale. Ciò supporta che le microplastiche più grandi sono più facili da rimuovere dagli impianti di trattamento rispetto ai quelle più piccole. In termini di forma, è stato osservato che la percentuale maggiore delle microplastiche nel fango erano fibre²⁷. In realtà, le fibre sintetiche sono state proposte anche come indicatore dell'applicazione al suolo dei fanghi²⁸. Inoltre andando a misurare la concentrazione di microplastiche nei fanghi generati durante le diverse fasi di trattamento delle acque reflue è stato scoperto che i fanghi provenienti dalle prime fasi di trattamento contenevano quantità di microplastiche superiori rispetto a quelle dei fanghi attivi, andando ulteriormente a sottolineare quanto i primi trattamenti siano efficaci sulla rimozione delle microplastiche.

Prima dello smaltimento finale, la digestione viene generalmente utilizzata ai fini del recupero di energia, riduzione del volume e stabilizzazione. Qualsiasi contaminante nei fanghi potrebbe influire sulle prestazioni della digestione; è stata riscontrata la riduzione della produzione di metano a causa della presenza delle microplastiche²⁹. È stato visto che le nano particelle potrebbero inibire la produzione di enzimi coinvolti nei vari processi di digestione e quindi interferire negativamente con la produzione di metano^{30,31}; tuttavia la causa del potenziamento o dell'inibizione della produzione di metano, non è da imputare alla presenza delle microplastiche intese come particelle, ma al rilascio da parte di queste di materiale tossico.

Conclusioni

Nel corso degli ultimi anni la letteratura e la ricerca si sono concentrati in modo sempre più assiduo sullo studio degli impianti di trattamento come fonte di rilascio di microplastiche nei corpi idrici e

nel suolo; in particolare focalizzando la loro attenzione sullo studio e la ricerca di trattamenti specifici con elevate capacità di rimozione di questi microinquinanti. Sono stati analizzati i processi di moltissimi impianti di trattamento in tutto il mondo, messi a confronto diversi trattamenti per cercare di capire quali vantaggi e criticità avessero riguardo la rimozione delle microplastiche, negli studi recenti le tecnologie a membrana (bioreattori a membrana, MBR) confrontati con gli impianti a fanghi attivi convenzionali ed altri tipi di trattamenti secondari o terziari ha mostrato le più alte percentuali di rimozione sia per quanto riguarda impianti su scala pilota sia impianti su scala reale, raggiungendo in alcuni casi percentuali di rimozione fino al 99.9%. Nonostante con questi tipi di trattamento si riescano a raggiungere alti tassi di rimozione si stima che i livelli di microplastiche scaricate giornalmente nei corpi idrici siano ancora molto elevati, andando a confermare che nonostante le tecnologie a membrana possano essere una valida alternativa, per combattere contro questi inquinanti emergenti, rispetto agli altri trattamenti, il traguardo di scarico 0 per questo tipo di particelle è ancora lontano, e quindi possiamo affermare che gli impianti di trattamento delle acque reflue sono una fonte importante di rilascio di questi microinquinanti nell'ambiente.

References

1. Ryan, P. G., Moore, C. J., Franeker, J. A. van & Moloney, C. L. Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **364**, 1999–2012 (2009).
2. Thompson, R. C. Lost at Sea: Where Is All the Plastic?. *Science* **304**, 838–838 (2004).
3. Lusher, A. Microplastics in the Marine Environment: Distribution Interactions and Effects. in *Marine Anthropogenic Litter* 245–307 (Springer International Publishing, 2015). doi:10.1007/978-3-319-16510-3_10.
4. Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine*

Pollution Bulletin **44**, 842–852 (2002).

5.Fendall, L. S. & Sewell, M. A. Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers. *Marine Pollution Bulletin* **58**, 1225–1228 (2009).

6.Andrady, A. L. Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* **62**, 1596–1605 (2011).

7.Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **364**, 1985–1998 (2009).

8.Moore, C. J. Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing long-term threat. *Environmental Research* **108**, 131–139 (2008).

9.Lares, M., Ncibi, M. C., Sillanpää, M. & Sillanpää, M. Occurrence identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology. *Water Research* **133**, 236–246 (2018).

10.Sun, J., Dai, X., Wang, Q., Loosdrecht, M. C. M. van & Ni, B.-J. Microplastics in wastewater treatment plants: Detection occurrence and removal. *Water Research* **152**, 21–37 (2019).

11.Klein, S., Dimzon, I. K., Eubeler, J. & Knepper, T. P. Analysis Occurrence, and Degradation of Microplastics in the Aqueous Environment. in *The Handbook of Environmental Chemistry* 51–67 (Springer International Publishing, 2017). doi:10.1007/978-3-319-61615-5₃.

12.Vianello, A. *et al.*. Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice Italy: First observations on occurrence, spatial patterns and identification. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **130**, 54–61 (2013).

13.Nuelle, M.-T., Dekiff, J. H., Remy, D. & Fries, E. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments. *Environmental Pollution* **184**, 161–169 (2014).

14. Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C. & Thiel, M. Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environmental Science & Technology* **46**, 3060–3075 (2012).
15. Li, J., Liu, H. & Chen, J. P. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Research* **137**, 362–374 (2018).
16. Prata, J. C., Costa, J. P. da, Duarte, A. C. & Rocha-Santos, T. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* **110**, 150–159 (2019).
17. Erni-Cassola, G., Gibson, M. I., Thompson, R. C. & Christie-Oleza, J. A. Lost but Found with Nile Red: A Novel Method for Detecting and Quantifying Small Microplastics (1 mm to 20 µm) in Environmental Samples. *Environmental Science & Technology* **51**, 13641–13648 (2017).
18. and, M. T. Nile Red Staining as a Subsidiary Method for Microplastic Quantification: A Comparison of Three Solvents and Factors Influencing Application Reliability. *SDRP Journal of Earth Sciences & Environmental Studies* **2**, (2017).
19. Araujo, C. F., Nolasco, M. M., Ribeiro, A. M. P. & Ribeiro-Claro, P. J. A. Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects. *Water Research* **142**, 426–440 (2018).
20. Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F. & Quinn, B. Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment. *Environmental Science & Technology* **50**, 5800–5808 (2016).
21. Carr, S. A., Liu, J. & Tesoro, A. G. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research* **91**, 174–182 (2016).

22. Rummel, C. D., Jahnke, A., Gorokhova, E., Kühnel, D. & Schmitt-Jansen, M. Impacts of Biofilm Formation on the Fate and Potential Effects of Microplastic in the Aquatic Environment. *Environmental Science & Technology Letters* **4**, 258–267 (2017).
23. Talvitie, J. *et al.*. Do wastewater treatment plants act as a potential point source of microplastics? Preliminary study in the coastal Gulf of Finland Baltic Sea. *Water Science and Technology* **72**, 1495–1504 (2015).
24. Talvitie, J., Mikola, A., Setälä, O., Heinonen, M. & Koistinen, A. How well is microlitter purified from wastewater? – A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant. *Water Research* **109**, 164–172 (2017).
25. Ziajahromi, S., Neale, P. A., Rintoul, L. & Leusch, F. D. L. Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics. *Water Research* **112**, 93–99 (2017).
26. Michielssen, M. R., Michielssen, E. R., Ni, J. & Duhaime, M. B. Fate of microplastics and other small anthropogenic litter (SAL) in wastewater treatment plants depends on unit processes employed. *Environmental Science: Water Research & Technology* **2**, 1064–1073 (2016).
27. Li, X. *et al.*. Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China. *Water Research* **142**, 75–85 (2018).
28. Zubris, K. A. V. & Richards, B. K. Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge. *Environmental Pollution* **138**, 201–211 (2005).
29. Fu, S.-F. *et al.*. Exposure to polystyrene nanoplastic leads to inhibition of anaerobic digestion system. *Science of The Total Environment* **625**, 64–70 (2018).
30. Bueno-López, J. I. *et al.*. Graphene oxide triggers mass transfer limitations on the methanogenic activity of an anaerobic consortium with a particulate substrate. *Chemosphere* **211**, 709–716

(2018).

31.Dong, B. *et al.*. The inhibitory impacts of nano-graphene oxide on methane production from waste activated sludge in anaerobic digestion. *Science of The Total Environment* **646**, 1376–1384

(2019).

Figure Captions

Figure 1. Rifiuti di plastica. (Unsplash)

Figure 2. Impianto di trattamento acque reflue (unsplash)

Figures



Figure 1: Rifiuti di plastica. (Unsplash)

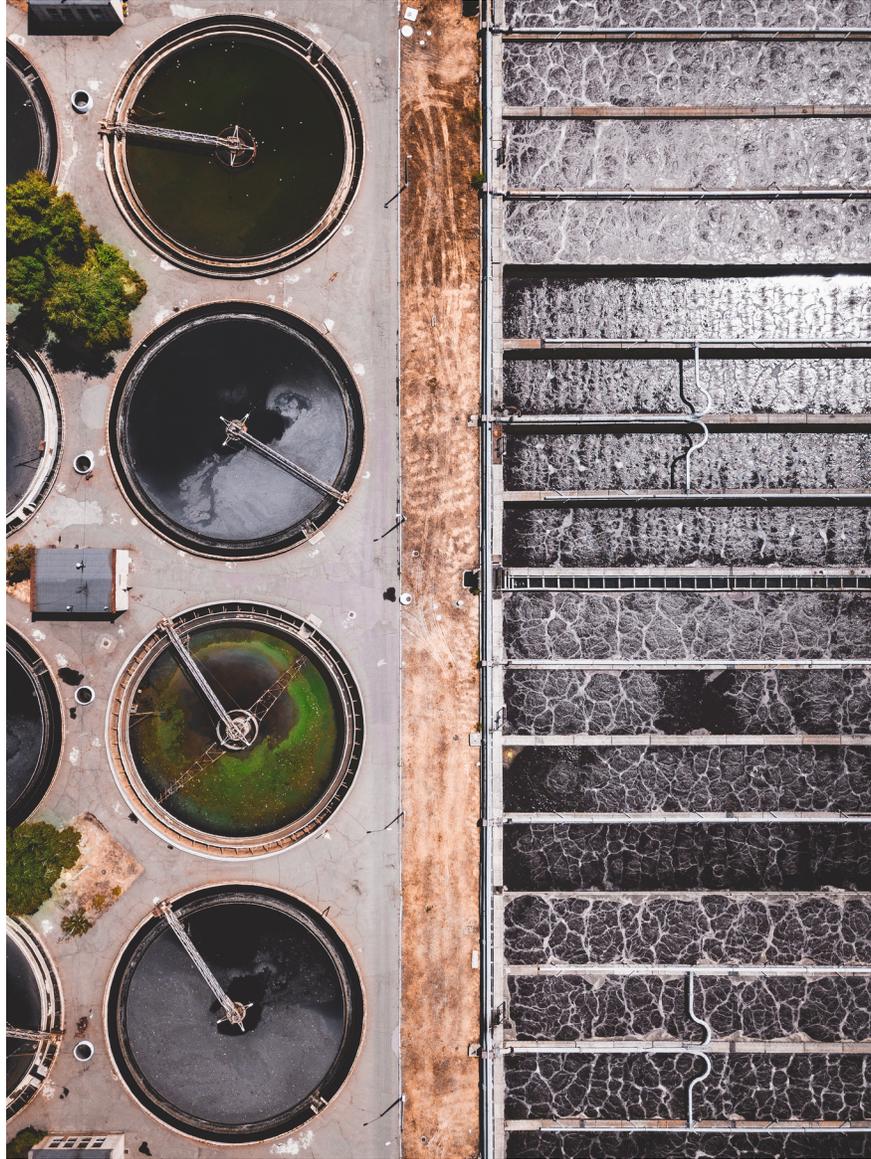


Figure 2: Impianto di trattamento acque reflue (unsplash)