

# PROFILI VERTICALI DELLA CONCENTRAZIONE DI MICROPLASTICHE LUNGO LA COLONNA D'ACQUA

Agnese Pini<sup>1</sup>, Paolo Bello<sup>1</sup>, Simone Zazzini<sup>1</sup>, Paolo Monti<sup>1</sup> & Giovanni Leuzzi<sup>1</sup>

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale, Università di Roma "La Sapienza"

## ASPETTI CHIAVE

- Simulazioni long-term dei fenomeni di trasporto e diffusione di microplastiche in un dominio tridimensionale.
- Caratterizzazione della velocità verticale, di settling o rising, delle microplastiche emesse dalle sorgenti.
- Modellazione dei fenomeni di spiaggiamento, risospensione da costa e deposizione sul fondo e parametrizzazione della diffusività turbolenta verticale.

## 1 INTRODUZIONE

La contaminazione del comparto marino da parte delle microplastiche (MP) è un problema ambientale ormai noto. La loro presenza è infatti stata rilevata in mari e oceani, in prossimità delle coste come in zone off-shore, nello strato marino superficiale così come in zone profonde e sui fondali. Nonostante siano numerosi gli studi che affrontano il problema con approccio sperimentale (Kukulka *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2020), tramite campagne di misura, o, diversamente, dal punto di vista modellistico (Onink *et al.*, 2022), attraverso simulazioni numeriche, questo rimane ad oggi questione aperta a causa delle varie forzanti in gioco e dei diversi fenomeni fisico-chimico coinvolti.

Diffusione e trasporto in un bacino reale dipendono infatti in primo luogo dalla circolazione idrodinamica dello stesso. Questa è a sua volta caratterizzata da moti con scale spaziali e temporali variabili con effetti dispersivi che tendono a sovrapporsi. Inoltre, sono determinanti natura e posizione delle sorgenti da cui il contaminante viene immesso nel bacino. Un ulteriore aspetto di cui tener conto, in particolare volendo focalizzare l'indagine sulla distribuzione delle MP lungo la colonna d'acqua, è rappresentato dalle caratteristiche fisiche delle MP. Densità, forma e dimensioni dei frammenti concorrono infatti nel determinare la velocità verticale, diretta verso il fondo o la superficie, di *settling* o *rising*, che assumono le MP e, di conseguenza, in sovrapposizione con l'effetto delle correnti verticali, il loro moto verticale. In particolare, questo aspetto risulta ad oggi problema aperto e in corso di indagine, dal punto di vista sia sperimentale che numerico. Nel primo caso risulta infatti ancora scarso il numero di campionamenti effettuati a diverse profondità e quindi potenzialmente in grado di rilevare MP caratterizzate, in ragione di diverse caratteristiche fisiche, da diverse velocità di *settling* o *rising*. Al contempo, risulta non sufficiente la disponibilità di campagne effettuate con una frequenza utile a cogliere la stagionalità dei fattori idrodinamici, quali, ad esempio, lo spessore dello strato mescolato o *mixed layer depth* (MLD). Per colmare tali lacune, è ampiamente utilizzato l'approccio modellistico. Ad oggi, sono proposti diversi approcci per stimare la velocità verticale delle MP (Waldschläger *et al.*, 2019) e realizzati studi condotti simulando singoli rilasci di particelle con diverse caratteristiche fisiche e diverse velocità verticali (Onink *et al.*, 2022). Rimane comunque oggetto di indagine una rappresentazione completa dei vari aspetti, densità e tipologia di polimero, forma e dimensioni, che caratterizzano le MP disperse nei bacini reali. La mancanza di tale informazione è legata alla difficoltà di reperire dati riguardo carichi, natura e caratteristiche delle MP emesse dalle sorgenti reali e si riflette evidentemente sulla rappresentazione di quest'ultime nei modelli numerici.

Nel presente lavoro si è inteso focalizzare l'attenzione sul ruolo della velocità verticale delle MP nel determinare la distribuzione verticale lungo la colonna d'acqua. Allo scopo sono presentati i profili verticali di concentrazione ricavati dalle simulazioni condotte con un modello di dispersione lagrangiano 3D sviluppato per indagare, a scala di bacino, la dispersione di MP con diverse caratteristiche fisiche. Il modello, in fase di continuo sviluppo, utilizza come input i campi di velocità calcolati da un modello idrodinamico euleriano ed implementa una parametrizzazione della diffusività turbolenta verticale già oggetto di precedenti lavori. Nella versione attuale, oltre a consentire la modellazione di fenomeni quali spiaggiamento e risospensione da costa e deposizione sul fondo, implementa un metodo originale di rappresentazione della velocità verticale di *settling/rising* delle MP. Questa è considerata utilizzando una PDF, *probability density function*, di tale grandezza per caratterizzare le MP emesse dalle sorgenti simulate.

## 2 MATERIALI E METODI

Il modello lagrangiano stocastico tridimensionale utilizzato per le simulazioni rappresenta un avanzamento di versioni sviluppate in precedenza (Pini et al., 2022). Il modello, attraverso la simulazione di traiettorie di particelle fittizie volte a rappresentare le MP immerse in un determinato bacino, permette di ricavare campi e profili di concentrazione. Nella versione attuale, per il calcolo delle traiettorie sono tenuti in conto i contributi agli spostamenti lungo le tre direzioni dovuti a: i) campo medio di velocità, ii) turbolenza di sottogriglia, iii) caratteristiche fisiche delle MP che concorrono a determinarne la velocità verticale di *settling* o *rising*,  $w_{s,r}$ . I primi due fattori sono considerati utilizzando uno schema di Wiener. I successivi spostamenti lungo le tre direzioni sono calcolati tramite:

$$dX = \left( \bar{u} + \frac{dK_X}{dx} \right) dt + \sqrt{2K_X} \Delta\mu_x \quad (1)$$

$$dY = \left( \bar{v} + \frac{dK_Y}{dy} \right) dt + \sqrt{2K_Y} \Delta\mu_y \quad (2)$$

$$dZ = \left( \bar{w} + \frac{dK_Z}{dz} \right) dt + \sqrt{2K_Z} \Delta\mu_z + w_{s,r} \quad (3)$$

Dove le componenti  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  e  $\bar{w}$  rappresentano la velocità media della particella,  $\Delta\mu_x$ ,  $\Delta\mu_y$  e  $\Delta\mu_z$  la forzante stocastica e  $K_X$ ,  $K_Y$  e  $K_Z$  la diffusività turbolenta, rispettivamente lungo le tre direzioni. Lungo ciascuna direzione è introdotto un termine di *drift*,  $\frac{dK_X}{dx}$ ,  $\frac{dK_Y}{dy}$  e  $\frac{dK_Z}{dz}$ , legato all'utilizzo di diffusività turbolente variabili all'interno dello schema di Wiener e necessario per evitare accumuli anomali di particelle. Le componenti medie di velocità vengono fornite in input al modello stocastico e sono rappresentate dai campi medi giornalieri di velocità, zonale e meridionale, per diversi livelli di profondità del database Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) (Escudier et al., 2020).

I termini di diffusività turbolenta orizzontale,  $K_X$  e  $K_Y$ , sono stimati attraverso lo *Smagorinsky-Lilly Subgrid Scale Model* (SGS), considerando un valore pari a 0.15 per il parametro HORCON (Mellor G.L., 2002).

La diffusività turbolenta verticale,  $K_Z$ , è parametrizzata, come descritto in (Pini et al., 2022), in funzione della lunghezza di mescolamento,  $l(z)$  e della varianza della componente turbolenta della velocità verticale,  $\sigma_w$ :

$$K_z = \gamma \sigma_w(z) l(z) \quad (4)$$

Dove  $\gamma = 0.4$ . Tale parametrizzazione è adottata all'interno dello strato mescolato, mentre una  $K_Z$  costante e pari a  $1.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  è utilizzata al di sotto di esso. I dati necessari al calcolo della  $K_Z$ , ovvero spessore giornaliero dello strato mescolato, e campi giornalieri della velocità di attrito alla superficie di interfaccia aria-acqua sono ricavati, rispettivamente, dai database CMEMS e ECMWF ERA5 (Hersbach et al., 2018).

Nel modello sono inoltre considerati fenomeni quali lo spiaggiamento e la risospensione da costa delle MP e la deposizione sul fondo. I primi due aspetti sono modellati in analogia con quanto proposto da Onink et al. (2021), definendo la probabilità del verificarsi di tali fenomeni in zone prossime alla costa. La deposizione è invece simulata consentendo l'intrappolamento sul fondo unicamente delle particelle caratterizzate da una velocità verticale di *settling* e in celle con batimetria superiore a 10 m.

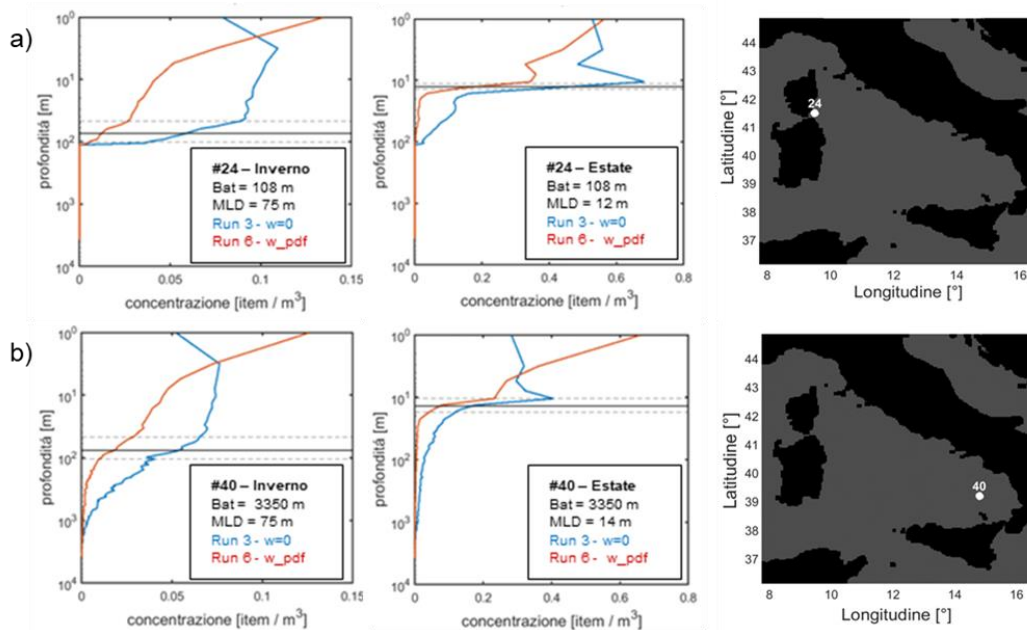
La velocità di *settling* o *rising*,  $w_{s,r}$ , presente in eq. (3) è stimata a partire dalle PDF sperimentali, proposte da Kooi & Koelmans (2019) relativamente a densità, forma e dimensioni delle MP rilevate in ambiente marino. A partire da tali dati, utilizzando la legge di Waldschläger et al. (2019) che esprime la velocità verticale assunta dalle particelle in funzione di tali parametri, è stata ottenuta una PDF multivariata della velocità di *settling/rising*, delle MP. Tale lavoro precedentemente proposto in Bello et al. (2022) è stato successivamente ampliato in analogia con Nordam et al. (2023).

Allo scopo di rappresentare la molteplicità e variabilità delle MP presenti in mare, la PDF della velocità di *settling/rising* è stata utilizzata per caratterizzare le particelle emesse dalle sorgenti. In particolare, è stato stimato un carico giornaliero pro-capite, espresso in item, di MP emesse, caratterizzate individualmente da una

specifiche velocità ricavate dalla PDF. Le sorgenti da cui le MP vengono immesse nel dominio, nella presente versione atte a rappresentare il contributo di città costiere e aste fluviali, sono individuate dal metodo di stima proposto in Pini et al. (2022). Il metodo, utilizzando congiuntamente dati relativi ai bacini idrografici principali e alla popolazione, individua sorgenti puntuali, posizionate a costa e a livello della superficie marina, a cui viene assegnato un carico giornaliero pro-capite di MP emesse.

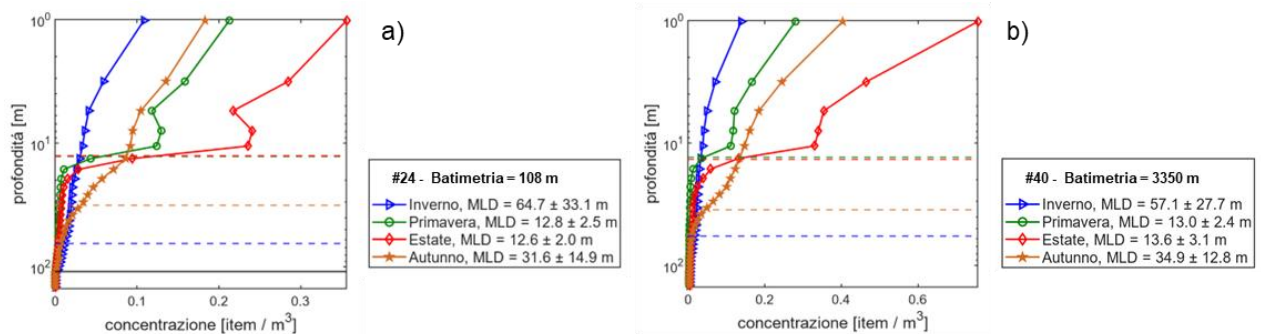
### 3 RISULTATI E DISCUSSIONE

Con l'intento di investigare il ruolo della velocità verticale di *settling* o *rising* delle MP nel determinare la distribuzione delle stesse lungo la colonna d'acqua, sono state realizzate simulazioni immettendo nel dominio, alternativamente, MP con velocità verticale nulla, assimilabili a particelle con galleggiamento neutro, (Run 3) e MP con velocità verticale variabile, sia di *settling* che di *rising*, ricavata dalla PDF descritta in precedenza (Run 6). Le simulazioni sono state condotte su un periodo di 10 anni (gennaio 2010 – dicembre 2019) considerando l'area del Mar Tirreno. La griglia di calcolo utilizzata, coincidente con quella del modello idrodinamico CMEMS, è costituita da 210x208 celle orizzontali, con risoluzione spaziale pari a  $1/24^\circ$ , e 120 livelli verticali di spessore variabile, crescente verso il fondale marino. In entrambi i casi si sono considerate 135 sorgenti di MP posizionate lungo la costa. In generale, il modello consente di ottenere mappe giornaliere della concentrazione 3D, mappe 2D relative a spiaggiamento e deposizione sul fondo e profili verticali della concentrazione in punti selezionati del dominio. In Fig. 1, allo scopo di evidenziare il ruolo della velocità verticale delle MP, sono posti a confronto, per i recettori #24, pannello (a), e #40, pannello (b), caratterizzati rispettivamente da batimetria media, pari a 108 m, e profonda, pari a 3350 m, i profili verticali stagionali (inverno e estate) ottenuti nei due casi, Run 3 e Run 6. In entrambi risulta evidente l'influenza della velocità posseduta dalle MP emesse. Nel caso del Run 3, per entrambi i recettori, la concentrazione assume all'interno dello strato mescolato valori pressoché costanti, maggiori in estate, quando lo spessore dello strato è inferiore. Questo effetto, predominante per le particelle con velocità nulla, non si osserva negli andamenti del Run 6. In questo caso la concentrazione mostra infatti un progressivo decadimento dalla superficie al limite inferiore dello strato. È interessante notare che, per entrambi i recettori, la concentrazione in superficie assume valori maggiori nel caso del Run 6. Questo a causa del rilascio di MP galleggianti, dotate cioè di velocità di *rising*, che tendono a permanere negli strati superficiali.



**Figura 1.** Profili verticali di concentrazione mediati sulle stagioni (inverno, a sinistra; estate, al centro) per i recettori #24, pannello (a), e #40, pannello (b), relativi al Run 3 (linea azzurra) e al Run 6 (linea rossa). In nero (linea continua) la profondità dello strato mescolato, MLD. A destra è riportata la posizione del recettore.

In Fig. 2 sono mostrati i profili medi stagionali relativi ai recettori #24, pannello (a) e #40, pannello (b), nel caso del Run 6 e per i primi 150 m di profondità. Dai grafici è possibile evincere l'influenza sulla distribuzione verticale di concentrazione dello strato mescolato. Il suo spessore, riportato nei grafici per ciascuna stagione, varia in maniera indipendente dalla batimetria, con andamento stagionale, e contribuisce a determinare la distribuzione nello strato stesso e i valori di concentrazione osservati. In particolare il valor medio nello strato e quello superficiale. In estate, quando lo spessore dello strato diminuisce, i fenomeni di mescolamento sono inibiti dalla stratificazione e si rilevano concentrazioni maggiori, in particolare in superficie. Al contrario in inverno, aumentando lo spessore dello strato, le MP riescono a diffondersi fino a maggiori profondità e i valori di concentrazione media e superficiale diminuiscono di conseguenza. Durante le stagioni intermedie, primavera e autunno, come rilevato anche per ulteriori recettori esaminati, le concentrazioni assumono valori simili sia all'interno dello strato mescolato che in superficie.



**Figura 2.** Profili verticali di concentrazione mediati sulle stagioni per il recettore #24, pannello (a), e #40, pannello (b), relativi al Run 6. Per ciascuna stagione è indicato la profondità dello strato mescolato, MLD (linea tratteggiata).

Le analisi condotte confermano la necessità di indagare la diffusione delle MP sull'intera colonna d'acqua focalizzando l'attenzione sulla modellazione dei fenomeni turbolenti che si sviluppano nello strato mescolato. Al contempo è evidente la necessità di rappresentare adeguatamente le caratteristiche fisiche delle MP, in particolare quelle che concorrono a determinarne la velocità verticale. Tale aspetto è infatti emerso quale fattore determinante per la stima della distribuzione di concentrazione delle MP lungo la colonna d'acqua.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Kukulka, T., Proskurowski, G., Morét-Ferguson, S., Meyer, D. W. & Law, J. H. The effect of wind mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris, *Geophys. Res. Lett.*, 2012, 39, L07601.
- Song, Y., Hong, S. H., Eo, S., Jang, M., Han, G. M., Isobe, A. & Shim, W. J. Horizontal and Vertical Distribution of Microplastics in Korean Coastal Waters, *Environ. Sci. Technol.*, 2018, 52, 12188–12197.
- Li, D. et al. Profiling the Vertical Transport of Microplastics in the West Pacific Ocean and the East Indian Ocean with a Novel in Situ Filtration Technique, *Environ. Sci. Technol.*, 2020, 54, 12979–12988.
- Onink, V., Kaandorp, M. L. A., van Sebille, E. & Laufkötter, C. Influence of Particle Size and Fragmentation on Large-Scale Microplastic Transport in the Mediterranean Sea, *Environ. Sci. Technol.*, 2022, 56, 22, 15528–15540.
- Waldschläger, K. & Schüttrumpf, H. Effects of particle properties on the settling and rise velocities of microplastics in freshwater under laboratory conditions, *Environ. Sci. Technol.*, 2019, 53, 1958–1966.
- Pini, A., Zazzini, S., Bello, P., Monti, P. & Leuzzi, G. Numerical investigation of microplastic dispersion in the water column, *IEEE International Workshop on Metrology for the Sea*, 2022, 587-591.
- Escudier, R., Clementi, E., Omar, M., Cipollone, A., Pistoia, J., Aydogdu, A., Drudi, M., Grandi, A., Lyubartsev, V., Lecci, R., Cretí, S., Masina, S., Coppini, G. & Pinardi, N. Mediterranean Sea physical reanalysis, 2020.
- Mellor, G. L. Users Guide For A Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model, Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University: Princeton, NJ, USA, 2002.
- Hersbach, H. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2018.
- Onink, V., Jongedijk, C. E., Hoffman, M. J., van Sebille, E. & Laufkötter, C. Global simulations of marine plastic transport show plastic trapping in coastal zones. *Environmental Research Letters*, 2021, 16 (6), 064053.
- Kooi, M. & Koelmans, A. A. Simplifying microplastic via continuous probability distributions for size, shape, and density, *Environ. Sci. Tech. Lett.*, 2019, 6, 551–557.
- Bello, P., Pini, A., Zazzini, S., Monti, P. & Leuzzi, G. Discrete multivariate probability distributions of microplastic settling/rising velocity in the marine environment, *IEEE International Workshop on Metrology for the Sea*, 2022, 358-362.
- Nordam, T., Kristiansen, R., Nepstad, R., van Sebille, E. & Booth, A. M. A comparison of Eulerian and Lagrangian methods for vertical particle transport in the water column, *Geosci. Model Dev.*, 2023, 16, 5339–5363.