

Microinquinanti emergenti: valutazione e riduzione del rischio residuo nell'effluente e nei fanghi di depurazione

Agostina Chiavola*, Camilla Di Marcantonio*

* Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Sapienza Università di Roma

Sommario

Il presente articolo riporta una sintesi del documento prodotto nell'ambito del Contratto per Attività di Ricerca stipulato in data 21 settembre 2021 fra Fondazione AMGA e Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale della Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale della Sapienza Università di Roma, avente come titolo "Valutazione del rischio residuo nell'effluente e nei fanghi di depurazione per la presenza dei microinquinanti emergenti ed individuazione delle migliori tecnologie da adottare per ridurre il rischio a valori accettabili". Tale documento si propone di fornire un quadro aggiornato delle informazioni e dati disponibili in campo scientifico, tecnico e legislativo sul tema dei Microinquinanti Emergenti (ME) negli impianti di depurazione e loro effetti sull'ecosistema e la salute dell'uomo. Il documento può essere di supporto ai gestori del servizio idrico integrato, ai fini dell'individuazione delle migliori strategie di gestione, controllo ed intervento da adottare nella depurazione per ridurre il rischio da ME.

Parole chiave:

acque reflue, fanghi, impianti di depurazione, microinquinanti emergenti, rischio.

Abstract

The present paper represents a summary of the final report of the "Contratto per Attività di Ricerca", stipulated on September 21st, 2021, between Fondazione AMGA and the Department of Civil, Building and Environmental Engineering of the Faculty of Civil and Industrial Engineering of Sapienza University of Rome, titled "Valutazione del rischio residuo nell'effluente e nei fanghi di depurazione per la presenza dei microinquinanti emergenti ed individuazione delle migliori tecnologie da adottare per ridurre il rischio a valori accettabili". The report intends to provide an updated overview of the more recent technical, scientific and regulatory information and data on the presence of Emerging Micropollutants (EM) in the wastewater treatment plants (WWTPs). This report can be a useful tool for the utilities to better manage, control and reduce the risk in the plants associated to EM.

I. Introduzione

I Microinquinanti Emergenti (ME) sono un gruppo di sostanze chimiche di origine principalmente antropica, che si ritrovano molto diffusamente nelle acque reflue. Anche se presenti in concentrazioni dell'ordine del $\mu\text{g/L}$ o ng/L , da cui l'appellativo di "microinquinanti", questi inquinanti possono determinare effetti negativi sull'ecosistema e la salute umana. Vengono anche definiti "emergenti" in quanto le conoscenze a riguardo rimangono ancora incomplete.

Gli impianti di depurazione sono considerati una delle principali fonti di immissione dei ME nell'ambiente. Infatti, non essendo specificatamente progettati per questa classe di contaminanti, le rimozioni conseguite dalle loro unità di trattamento sono spesso incomplete; concentrazioni residue di ME o dei loro metaboliti o dei prodotti di trasformazione permangono quindi nell'effluente depurato o si ritrovano per adsorbimento sul fango biologico di supero.

Il gruppo di Ingegneria Sanitaria Ambientale (ISA) della Sapienza Università di Roma si occupa da diversi anni di questo tema, anche in collaborazione con i gestori del servizio idrico integrato, con l'obiettivo di contribuire a definire un quadro più esaustivo delle conoscenze sulla presenza e destino dei ME negli impianti di depurazione per reflui civili.

Fra i prodotti delle ricerche condotte sul tema, vi sono numerose pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali ed il documento avente titolo "Proposte di intervento per la rimozione degli inquinanti emergenti e microinquinanti negli impianti di trattamento delle acque. Processi convenzionali ed innovativi" redatto nell'ambito del Bando 2019 Project 4.0 promosso dalla Fondazione AMGA, di cui il gruppo di ISA è risultato vincitore.

Partendo da questa base, attraverso l'analisi della letteratura di settore pubblicata più di recente, il presente documento intende fornire un quadro aggiornato delle informazioni e dati disponibili in campo scientifico, tecnico e legislativo.

II. Attività

Il documento affronta diversi aspetti, suddivisi in 8 fasi. Nel capitolo successivo, per ognuna di queste si riportano i principali risultati ottenuti in ciascuna di queste.

Le fasi del lavoro sono state sviluppate attraverso un'approfondita analisi della letteratura scientifica di settore, utilizzando diversi siti web specialistici, fra cui Scopus e Web of Science, selezionando gli articoli pubblicati più di recente attraverso alcune parole chiave come: "micropollutants", "emerging contaminants", "effluents", "risk", "reuse", "wastewater".

Si è fatto poi riferimento a banche dati riconosciute a livello internazionale, come quella del Norman network (*Network of Reference laboratories and related organizations for Monitoring and bio-monitoring of emerging environmental substances*), di cui fa parte anche il gruppo di ISA.

Sono stati infine utilizzati i dati ottenuti da precedenti studi condotti dal gruppo di ricerca, e pubblicati su riviste scientifiche internazionali.

III. Risultati e ricadute

1) Analisi delle metodologie, riconosciute a livello scientifico internazionale, per la valutazione dei rischi per l'ambiente e per la salute umana associati alla presenza dei ME negli effluenti degli impianti di depurazione e nei fanghi di supero.

I Microinquinanti Emergenti (ME) ed i loro prodotti di trasformazione presentano caratteristiche tali da poter causare effetti dannosi sull'ecosistema e la salute umana. È necessario, quindi, effettuare l'Analisi di Rischio Ambientale (*Environmental Risk Assessment, ERA*), per valutare la probabilità di accadimento di tali effetti, a seguito dell'esposizione degli organismi presenti nell'ambiente ad una

determinata concentrazione di sostanza inquinante.

La Figura 1 rappresenta il legame causa-effetto dovuto all'emissione di una sostanza chimica nell'ambiente.

Fra le varie metodologie proposte per condurre l'analisi di rischio ambientale, le linee guida emanate dall'Agenzia Europea del Farmaco (*European Medicines Agency Guidelines, EMA Guidelines*) per ottenere l'autorizzazione all'immissione sul mercato di nuovi prodotti farmaceutici ad uso umano, rappresentano un valido riferimento anche nel caso dei ME (EMA 2006, 2018).

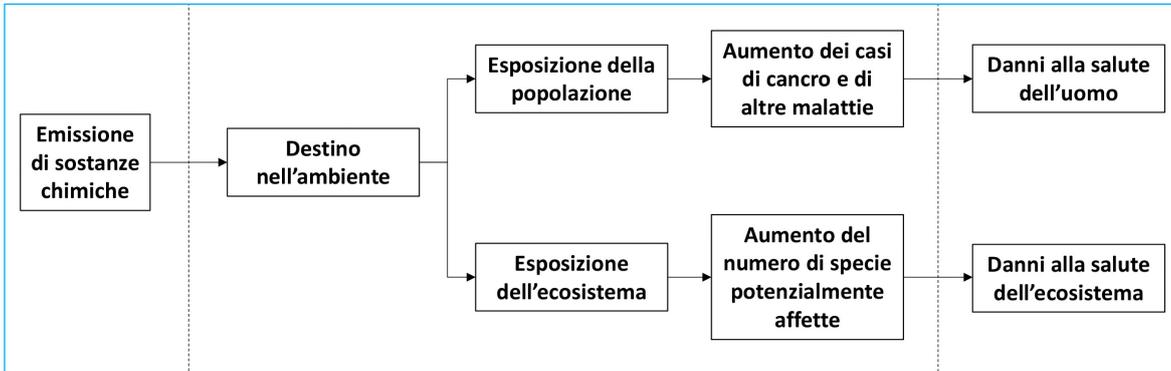


Figura 1: catena causa-effetto per i danni alla salute dell'uomo e dell'ecosistema causati dall'emissione nell'ambiente dei ME

Per alcuni inquinanti viene condotta un'ulteriore analisi specifica del potenziale pericolo, in quanto caratterizzati da persistenza, bioaccumulabilità e tossicità (*Persistent, Bioaccumulative, Toxic, PBT*) o da elevata persistenza e bioaccumulabilità negli organismi (*very Persistent and very Bioaccumulative, vPvB*) (ECHA, 2017).

Il calcolo del valore del rischio deve essere aggiornato se intervengono modifiche di qualunque tipo, ad esempio nelle modalità di utilizzo del prodotto o del tempo di esposizione.

Secondo le linee guida EMA, l'analisi consiste nel calcolo, attraverso una procedura a due fasi successive, del valore del Quoziente di Rischio (Risk Quotient, RQ) applicando la seguente equazione:

$$RQ = \frac{PEC}{EQS \text{ o } PNEC} \quad \text{oppure} \quad RQ = \frac{MEC}{EQS \text{ o } PNEC}$$

dove:

PEC=Predicted Environmental Concentration, concentrazione prevista nell'ambiente

PNEC= Predicted No Effect Concentration, concentrazione che non determina effetti

MEC=Measured Environmental Concentration, concentrazione misurata nell'ambiente

EQS=Environmental Quality Standard, standard di qualità ambientale

Se il Quoziente di Rischio risulta maggiore di 1, la sostanza rappresenta una fonte di rischio, in quanto la concentrazione prevista o misurata è superiore al valore che non produce effetti negativi. Conseguentemente, vanno assunti provvedimenti per la riduzione del rischio. Se invece il valore di RQ risulta < 1, la sostanza non si considera responsabile di rischio nelle condizioni considerate ai fini dell'analisi.

La procedura delle EMA, sebbene ampiamente utilizzata, presenta alcune criticità, in particolare relativamente alla determinazione dei valori delle PEC, MEC e PNEC. Ad esempio, per alcuni ME, la quantificazione della MEC, sia per la sostanza originaria che per i sottoprodotti del metabolismo, risulta ancora difficile e non tutti i laboratori hanno a disposizione dotazioni analitiche e di personale in grado di effettuare queste misurazioni con l'attendibilità richiesta. Inoltre, molto spesso mancano dati in grado di fornire informazioni sulla biodisponibilità, l'attività biologica e gli effetti di miscele di più sostanze presenti simultaneamente nella stessa matrice. Invece, in natura gli organismi acquatici

sono esposti continuamente a miscele complesse di contaminanti (Aemig et al., 2021; Di Poi et al., 2018). Per superare questo limite sono stati proposti diversi approcci. Uno di questi considera la tossicità della miscela nel suo complesso (*whole-mixture*), con il vantaggio di includere gli effetti di tutte le sostanze chimiche, a fronte però del limite di fornire informazioni specifiche solo per la miscela investigata, e quindi non estrapolabili a scenari di esposizione diversi (Riva et al., 2019).

Allo stato attuale, non è stato ancora definito un protocollo univoco per la determinazione del rischio associato ad una miscela di ME.

Un altro metodo per studiare l'effetto dei microinquinanti sulla salute dell'uomo e l'ecosistema acquatico si basa sul *Life Cycle Assessment* (LCA) (Muñoz et al., 2008). Le linee guida per l'esecuzione dell'LCA sono state stabilite dalla serie di ISO 14040, e più specificatamente dalle ISO 14040:2006 and 14044:2006 (ISO, 2006).

Il riutilizzo delle acque reflue trattate contenenti concentrazioni residue di ME può rappresentare una fonte di rischio. Se gli usi sono a fini irrigui in agricoltura, i ME possono essere trasferiti alle colture, e quindi all'uomo attraverso la catena alimentare. Nel caso di riutilizzo per scopi potabili, il trasferimento avviene in modo diretto all'uomo. L'analisi di rischio in questo caso risulta, evidentemente, complessa e non è disponibile un protocollo definitivo da seguire. Nel caso di riutilizzo dell'effluente depurato per scopi non potabili (diversi dagli irrigui in agricoltura), si può applicare la procedura utilizzata da Semerjian et al. (2018) e da Di Marcantonio et al. (2021). Anche in questo caso, si deve calcolare il valore del Quoziente di Rischio, utilizzando però la seguente equazione:

$$RQ = \frac{MEC}{AC}$$

dove:

MEC=concentrazione del microinquinante misurata nell'effluente depurato

AC=concentrazione accettabile calcolata (*calculated acceptable concentration*)

Il valore di AC si ottiene con riferimento all'*Acceptable Daily Intake* (ADI) che rappresenta la dose giornaliera che può essere assunta senza effetti negativi sulla salute umana, anche nel caso di persone particolarmente sensibili. I valori di ADI possono essere reperiti dalla letteratura specializzata o calcolati in funzione di altri parametri (US EPA, 2007, 2009, 2010, 2011).

Se il valore di RQ risulta ≥ 1 , allora il riutilizzo dell'effluente depurato, a causa della presenza della concentrazione residua di quel microinquinante, può determinare effetti negativi sull'individuo che ad esso viene esposto; diversamente, se $RQ < 1$, il riutilizzo non rappresenta una fonte di rischio, almeno nelle condizioni di impiego considerate.

2) Analisi ed integrazione delle strategie di prioritizzazione dei ME e di definizione delle concentrazioni massime ammissibili negli effluenti liquidi e nei fanghi degli impianti di depurazione mesi.

L'elenco dei ME è molto ampio e si arricchisce continuamente di nuove sostanze, a seguito dei progressi compiuti in campo analitico, delle maggiori conoscenze acquisite sugli effetti ecotossicologici e dei dati forniti dai monitoraggi. È evidente come sia impossibile gestire un numero così elevato di sostanze con lo stesso livello di attenzione. È necessario, quindi, individuare una lista di sostanze o composti di interesse prioritario sui quali focalizzare le attività. Questo processo viene denominato "prioritizzazione" (Brack et al., 2017).

Diversi sono i criteri che possono essere adottati allo scopo. La maggior parte delle metodologie proposte considera la disponibilità di una serie di informazioni, relative ad esempio alle proprietà chimico-fisiche, all'esposizione, agli effetti, ai quantitativi di sostanza utilizzati. Per la valutazione degli effetti negativi sugli organismi dell'ecosistema acquatico, si fa riferimento a dati ecotossicologici (Küster et al., 2014).

Rispetto ai metodi di prioritizzazione fino ad ora proposti, che generalmente utilizzano un solo criterio o obiettivo ai fini della selezione, il Norman network ha proposto una nuova metodologia nel tentativo di superare i limiti sopra evidenziati, che ha già trovato applicazione nella compilazione

della US EPA *Chemical Contaminants List* per la selezione dei contaminanti da sottoporre a regolamentazione.

Questa metodologia utilizza la disponibilità di dati come criterio di classificazione della prima fase, senza però escludere le sostanze per le quali le informazioni a disposizione sono ancora scarse. Nella seconda fase, le sostanze vengono classificate all'interno di ogni categoria, utilizzando una serie di indicatori prefissati allo scopo.

Questo sistema di classificazione è rivolto ai gestori del servizio idrico ed agli enti autorizzatori con l'obiettivo di fornire loro uno strumento per l'individuazione di una lista di inquinanti di interesse emergente a livello di bacino, nazionale o europeo, sui quali concentrare con interesse prioritario le attività di monitoraggio, controllo ed eventualmente riduzione del rischio.

La Figura 2 mostra l'articolazione nelle diverse fasi della procedura di prioritizzazione proposta dal Norman network.

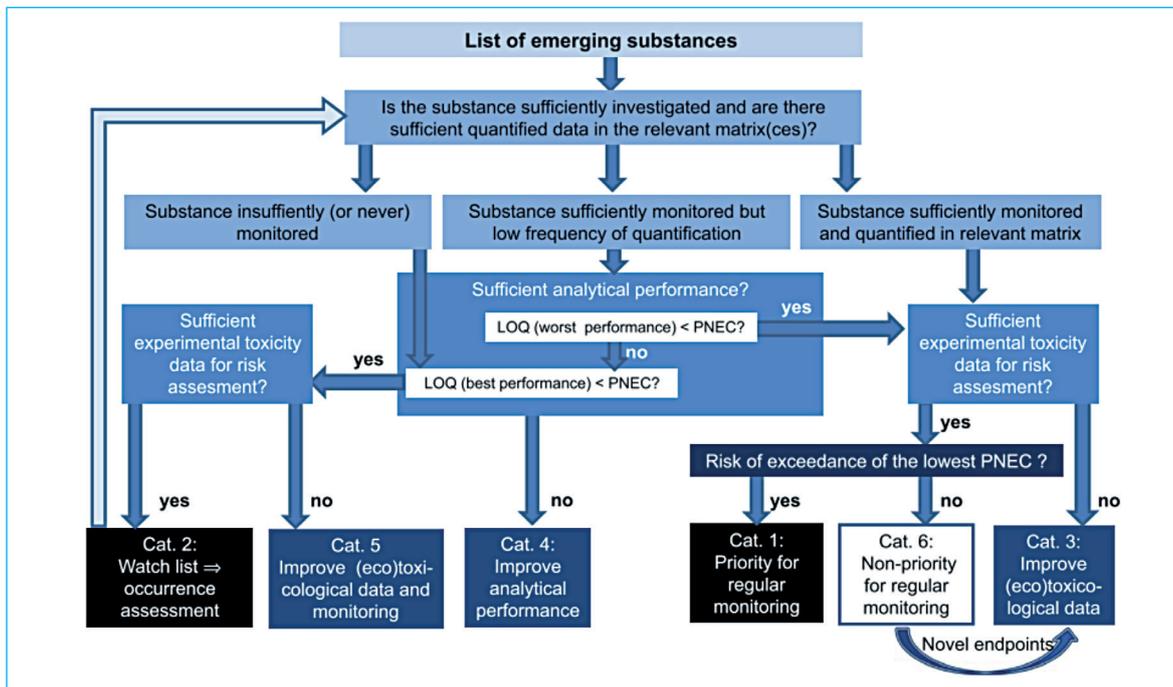


Figura 1: metodologia di prioritizzazione dei ME proposta dal NORMAN network (Dulio and von der Ohe, 2013; Dulio et al., 2018)

Dai vari studi condotti sulla prioritizzazione risulta che, fra i composti farmaceutici per uso umano, possono essere considerati prioritari: gli ormoni, gli antibiotici, gli psicotropi, gli antinfiammatori, le sostanze citostatiche ed i β bloccanti. Nel campo dei prodotti farmaceutici per uso veterinario, le sostanze classificate come prioritarie sono: gli antibiotici, gli ormoni e gli antiparassitari. A queste classi di contaminanti vanno aggiunti i prodotti per la cura e l'igiene personale (*Personal Care Products*, PCPs, es. creme solari, disinfettanti), i composti perfluorurati (tra i più noti e diffusi il PFOS e PFOA), i pesticidi, i ritardanti di fiamma, i nanomateriali (fullerene, biossido di titanio) ed anche le tossine prodotte naturalmente da alcune specie algali.

Questa selezione di ME si correla bene con i risultati dell'applicazione dell'ERA, e pertanto potrebbe essere presa a riferimento per l'introduzione di regolamentazioni e/o limiti sulle concentrazioni massime ammissibili nel comparto acquatico (Küster et al., 2014).

3) Analisi del quadro normativo sia europeo che nazionale sull'argomento.

Nella Figura 3 si riporta una sintetica rappresentazione dei principali provvedimenti legislativi che sono stati emanati sul tema dei microinquinanti. Fra i provvedimenti europei sulle acque di più recente emanazione si ricorda il Regolamento (UE) 2020/741 sui requisiti minimi per il riutilizzo delle

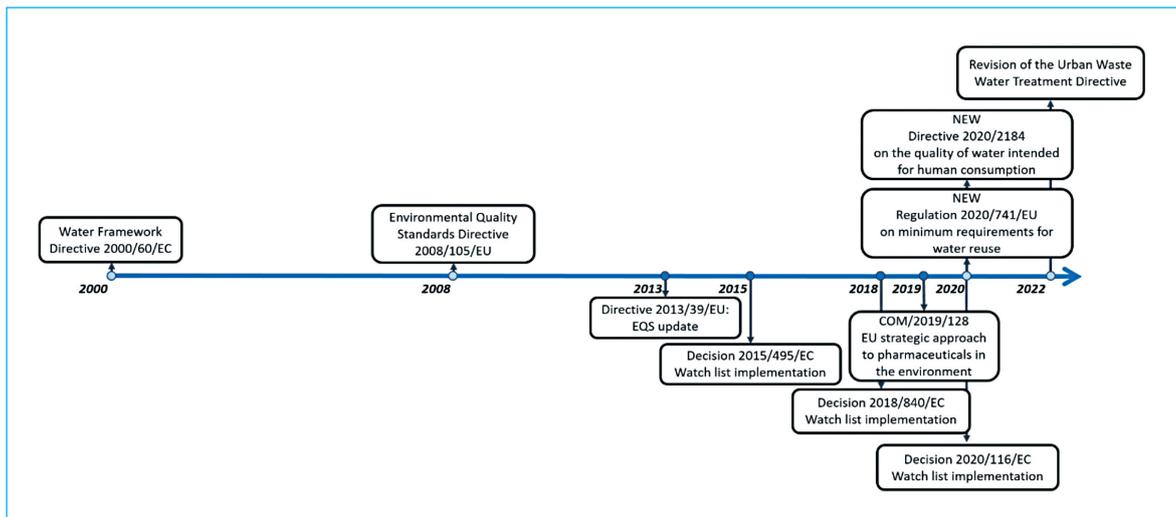


Figura 3: evoluzione temporale della normativa europea nel settore dei microinquinanti emergenti

acque affinate a fini irrigui in agricoltura (European Commission, 2019; European Parliament, 2020; Miarov et al., 2020; Wess, 2021). Questo si pone come obiettivo quello di assicurare una maggiore disponibilità delle risorse idriche, facilitando l'utilizzo delle acque reflue urbane trattate per l'irrigazione agricola.

Il Regolamento introduce le prescrizioni minime da applicare alla qualità dell'acqua ed al relativo monitoraggio, nonché le disposizioni sulla gestione dei rischi e sull'utilizzo sicuro delle acque affinate nel quadro di una gestione integrata delle risorse idriche.

Il Regolamento si applicherà a decorrere dal 26/06/2023, ogni volta che le acque reflue urbane trattate debbano essere riutilizzate a fini irrigui in agricoltura.

Nel Regolamento si fa menzione dei contaminanti emergenti, senza tuttavia fissare specifici valori limite da rispettare. In particolare, si afferma che, in base all'esito della valutazione del rischio, possono essere imposte prescrizioni supplementari per altre categorie di sostanze rispetto a quelle per cui sono già previsti limiti. Fra queste ulteriori sostanze vi sono anche i microinquinanti e le microplastiche. La scelta di non inserire i ME fra le sostanze regolamentate deriva anche dal fatto che dagli studi condotti fino ad ora è emerso che per un gran numero di questi le concentrazioni presenti nei tessuti delle colture agricole, a seguito dei vari processi di trasferimento e accumulo dalle acque reflue depurate, risultano molto basse e non rappresentano un rischio per la salute dell'uomo.

Un contributo invece molto rilevante al trasferimento dei ME dalle acque all'uomo sembra essere dovuto dal riutilizzo in agricoltura dei fanghi dagli allevamenti di bestiame. Altrettanto elevato sembra essere il rischio dovuto all'assunzione diretta da parte dell'uomo dei pesticidi per ingestione degli alimenti coltivati che li contengono. Le conoscenze a riguardo rimangono ancora molto limitate. Nell'ambito delle normative di settore, va menzionato che sono in corso di revisione la direttiva comunitaria quadro sulle acque e la direttiva comunitaria sulle acque reflue in ambito urbano (rispettivamente Directive 2000/60/EC, e Council Directive 91/271/EEC). È prevedibile che nei futuri aggiornamenti di questi dispositivi, si faccia specifico riferimento anche ai ME.

4) Raccolta dati, con riferimento alle principali banche dati scientifiche ed istituzionali, considerando anche recenti studi del presente gruppo di ricerca.

Per alcune classi di ME, negli ultimi anni si sono intensificate le attività di monitoraggio per la misura delle concentrazioni negli impianti di depurazione. Fra questi vi sono i composti farmaceutici, gli interferenti endocrini, e più di recente i PFOA e PFOS.

Tali dati si riferiscono alle misure sulle correnti influenti ed effluente, e più raramente sulle sezioni intermedie della linea acque. Un esempio di questi dati è riportato nella Figura 4. Molto limitati rimangono invece i dati sulle concentrazioni dei ME nella linea fanghi.

In tema di analisi dei ME, l'identificazione e la quantificazione delle specie chimiche note nelle acque reflue e nelle acque superficiali attraverso l'analisi cosiddetta *target* è una tecnica ormai consolidata ed affidabile (McEachran et al., 2018).

Nell'ultimo decennio, grazie all'applicazione della cromatografia liquida o gassosa accoppiata alla spettrometria di massa ad alta risoluzione (*High-resolution mass spectrometry, HRMS*) sono stati sviluppati altri tipi di analisi per la determinazione non selettiva delle specie chimiche presenti nei campioni considerati: la *Non-target analysis, NTA*, e la *Suspect Screening Analysis, SSA*. L'applicazione di queste nuove tecniche ha permesso di rilevare la presenza nell'ambiente di nuovi inquinanti emergenti, dei metaboliti e dei sottoprodotti di trasformazione dei ME. Alcune di queste sostanze sono state definite *unknown products*, poiché di esse non si conoscono struttura e proprietà chimiche e pertanto non è stato possibile inserirle all'interno di una specifica classe di microinquinanti.

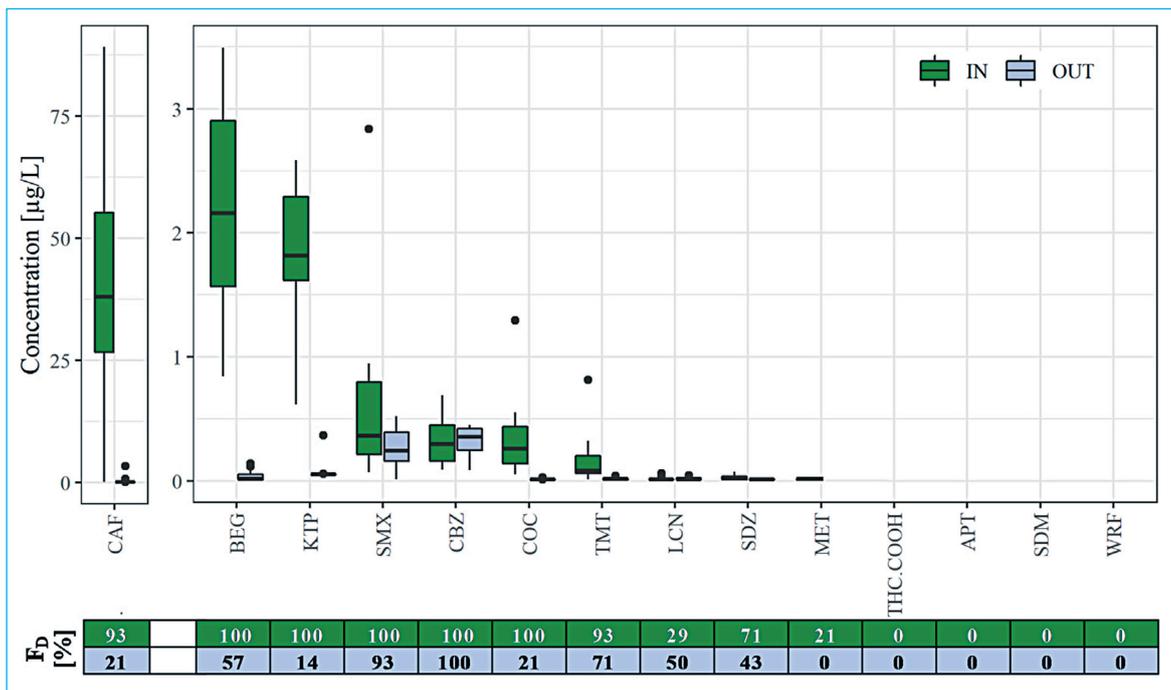


Figura 4: rappresentazione statistica delle concentrazioni influenti (IN) ed effluenti (OUT) e la frequenza di rilevazione (FD) (Di Marcantonio et al., 2021)

Legenda: CAF=caffaina; BEG=benzoilecgonina; KTP=ketoprofene; SMX=sulfametossazolo; CBZ=carbamazepina; COC=cocaina; TMT=trimetropim; LCN=lincomicina; SDZ=sulfadiazina; MET=metanfetamina; THCOOH=11-nor- Δ^9 -thc-9-acido carbossilico; APT=anfetamina; SDM=sulfadimetossina; WRF=warfarin

Le nuove tecniche hanno consentito anche di effettuare valutazioni olistiche sull'insieme delle possibili vie di esposizione dell'uomo ai contaminanti di interesse attraverso l'acqua, in tempi e punti diversi (cosiddetta "*exposome*") (Hedgespeth et al., 2019).

Un altro strumento che si sta diffondendo nei monitoraggi dei microinquinanti è rappresentato dal campionamento passivo (*passive sampling*). Tale sistema consente la raccolta di campioni rappresentativi per la misurazione dei contaminanti emergenti presenti in traccia, purché disciolti, prelevando volumi di liquido minori rispetto a quelli richiesti nei metodi tradizionali.

5) Coinvolgimento delle Utilities tramite questionari atti a fornire un quadro delle criticità e dello stato tecnologico nazionale sul tema in oggetto.

Obiettivo di questa fase è stato quello di definire il quadro delle attività in corso o già condotte sui ME negli impianti di depurazione italiani. Per tale motivo, è stato predisposto un questionario che poi è stato inviato, tramite Utilitalia, a tutti i gestori del servizio idrico integrato italiano. Purtroppo, le risposte ricevute sono state in numero molto limitato, probabilmente a causa del periodo (estivo) in cui sono stati ricevuti i questionari. In particolare, dei 139 gestori associati ad Utilitalia, hanno risposto in 17 e di questi solo 8 hanno dichiarato di condurre o aver condotto monitoraggi sui ME. Le attività hanno interessato prevalentemente la linea acque, con campionamenti delle correnti influente ed effluente. Fra i ME ricercati, vi sono prevalentemente i PFOA/PFOS, gli interferenti endocrini ed i prodotti farmaceutici. Le attività hanno avuto inizio nel 2009 e si sono poi intensificate a partire dal 2018, evidenziando un'attenzione crescente verso questa categoria di contaminanti da parte dei gestori.

Gli impianti oggetto dei monitoraggi sono a servizio di fognatura mista. Le potenzialità sono molto variabili, ma tutti hanno un processo biologico del tipo a fanghi attivi, spesso preceduto dalla sedimentazione primaria; solo in un paio di casi è presente anche un trattamento terziario, ma non specificatamente dedicato alla rimozione dei ME.

Le analisi effettuate hanno evidenziato un'ampia varietà di tipologie, concentrazioni e rimozioni dei microinquinanti presenti. In particolare, per alcuni ME, a fronte di elevate concentrazioni nell'influente, le rimozioni sono risultate complete o quasi. È questo il caso, ad esempio, della caffeina, del ketoprofene e dell'acetaminofene (o paracetamolo). Diversamente, altri ME, come diclofenac, carbamazepina e sulfametossazolo, si ritrovano nell'effluente in concentrazioni confrontabili, se non superiori.

Solo 2 gestori fra quelli che hanno risposto, hanno dichiarato di effettuare monitoraggi della linea fanghi, con campionamenti dopo disidratazione. Solo in un caso, il valore misurato è risultato superiore al limite analitico.

I gestori hanno dichiarato di aver riscontrato criticità prevalentemente nelle determinazioni analitiche, nell'interpretazione dei dati e nell'assenza di specifici limiti normativi.

Solo 1 gestore ha effettuato la valutazione del rischio per l'ecosistema associato alla presenza dei microinquinanti negli impianti di depurazione. In tal caso, è stato calcolato il rischio per acque reflue destinate al riuso o rilasciate in corpi superficiali, applicando il metodo ERA e considerando le concentrazioni mediane nell'effluente finale. Dall'analisi è risultato un rischio accettabile ($RQ < 1$), con valori < 0.1 (rischio basso) per la maggior parte dei ME analizzati, tranne che per sulfametossazolo (rischio medio) e carbamazepina (rischio alto).

Nessuno dei gestori prevede di attivare negli impianti unità specifiche di trattamento per la rimozione dei ME.

I dati ottenuti dai monitoraggi condotti sugli impianti di depurazione italiani sono in accordo con quelli presenti nella letteratura specializzata, sia per quanto riguarda le concentrazioni che le rimozioni osservate. È anche comune l'assenza di trattamenti dedicati ai ME.

6) Definizione delle concentrazioni massime ammissibili e delle efficienze di rimozione richieste per assicurare un rischio residuo accettabile.

Allo stato attuale non sono previsti valori limite di emissione o concentrazioni massime ammissibili per la maggior parte dei contaminanti emergenti. Sebbene negli ultimi anni si siano intensificate le attività di studio e ricerca su queste sostanze, le informazioni ed i dati sui loro effetti a lungo termine ed in condizioni ambientali reali (e quindi più complesse di quelle di laboratorio), e le relazioni fra salute dell'uomo e concentrazione, risultano ancora non esaustivi e definitivi.

Una sostanza o miscela di inquinanti presenti nell'effluente finale dalla depurazione può rappresentare o meno una fonte di rischio per l'ecosistema e/o la salute dell'uomo in funzione di molteplici fattori. Pertanto, solo l'analisi di rischio ambientale effettuata caso per caso può fornire le indicazioni

necessarie per decidere se sia necessario intervenire o meno, su che tipologia di ME e quali siano i livelli di riduzione richiesti (Dulio and von der Ohe, 2013).

Non tutti i paesi hanno avviato attività sui ME, solo alcuni hanno o stanno effettuando monitoraggi ma focalizzati solo su alcune classi di sostanze, spesso già note. Va però considerato come l'ampia diffusione nell'ambiente e l'estrema varietà di tipologie di inquinanti riconosciuti come ME rende il monitoraggio continuo di ogni sostanza chimica potenzialmente pericolosa molto complesso ed oneroso per il gestore.

I monitoraggi del contenuto dei ME nei fanghi non sono molto diffusi, come è risultato anche dall'analisi delle risposte dei questionari inviate dai gestori italiani del servizio idrico. Questo dipende principalmente dalle difficoltà analitiche nella determinazione di concentrazioni molto basse in matrici così complesse come i fanghi biologici. Ne consegue una scarsità di informazioni e dati ancora superiore rispetto a quella sulla presenza dei ME nelle acque.

Conseguentemente, solo pochi paesi hanno intrapreso iniziative per ridurre la presenza dei microinquinanti nell'ambiente, e quindi del rischio ad essi associato.

La Svizzera rappresenta il primo paese europeo in cui si è deciso di affrontare sistematicamente il problema. In particolare, è stato emanato il *newWater Protection Act* nel 2016 che regola la rimozione dei ME dalle acque reflue urbane, e conseguentemente è iniziato l'adeguamento degli impianti di depurazione. In Germania, l'adozione di sistemi per la rimozione dei ME avviene su base volontaria, in particolare nei due stati federali di Baden-Württemberg e North Rhine-Westphalia.

7) Individuazione e descrizione delle tecnologie più adatte in termini di costi-efficacia ai fini del raggiungimento degli obiettivi depurativi definiti precedentemente e del superamento delle criticità riscontrate dalle Utilities.

Gli impianti di depurazione convenzionali non sono in grado di conseguire elevate rimozioni per molti dei contaminanti emergenti. L'ampia variabilità dei dati riportati sulle rimozioni dipende dai molteplici fattori che possono influenzare le rese, come la tipologia di processo depurativo e di tecnologia, le caratteristiche della fase biologica, la composizione delle acque influenti all'impianto, i valori dei parametri operativi con cui questo viene gestito, la concentrazione e le caratteristiche dei microinquinanti in ingresso, la variabilità delle condizioni (Di Marcantonio et al., 2020a; Di Marcantonio et al., 2022).

Le basse rimozioni riscontrate per molti ME sono da attribuire alla loro limitata biodegradabilità, dal momento che negli impianti tradizionali il processo biologico rappresenta la fase principale dei trattamenti. Efficienze maggiori sono state osservate nei processi biologici cosiddetti avanzati, come MBR e MBBR, probabilmente come conseguenza dei più lunghi tempi di residenza cellulare, che favoriscono la selezione ed adattamento dei microrganismi specifici responsabili della biodegradazione dei ME (dos Santos et al., 2022). Miglioramenti sono stati osservati anche intervenendo su altri parametri operativi, come il tasso di aerazione (Di Marcantonio et al., 2020b).

Per molti microinquinanti non è stato ancora chiarito definitivamente il comportamento negli impianti a fanghi attivi: questo è il caso, ad esempio, delle sostanze perfluoroalchiliche (PFAS), ed in particolare dell'acido perfluorooctanoico (PFOA) e dell'acido perfluorooctano sulfonico (PFOS). Altri inquinanti presentano una forte tendenza alla rimozione per adsorbimento sui fanghi attivi.

I trattamenti terziari presenti negli impianti tradizionali, come disinfezione e filtrazione, non contribuiscono in modo rilevante alla rimozione dei ME, anche se i dati a riguardo rimangono limitati. Per ottenere elevate rimozioni dei microinquinanti, in particolare di quelli recalcitranti, è necessario dotare gli impianti di unità di trattamento terziarie specificatamente progettate. Come detto in precedenza, i pochi impianti in Europa che sono stati integrati a questo scopo sono presenti prevalentemente in Svizzera.

Fra le varie soluzioni di trattamento proposte, i migliori risultati sono stati ottenuti con l'ozonizzazione, l'adsorbimento e la separazione a membrana. In particolare, i primi due tipi di processo si stanno diffondendo sempre di più alla scala reale, come in Svizzera.

In generale, è preferibile inserire questi processi a valle del trattamento secondario, per ridurre le interferenze e competizioni con le altre sostanze presenti nelle acque reflue. Per la complessità e la varietà dei ME, può rendersi necessario adottare combinazioni di diverse tecnologie, sia biologiche che chimico-fisiche, per raggiungere la riduzione richiesta del rischio posto dall'effluente finale.

IV. Conclusioni

Il tema dei ME e dei rischi associati alla loro presenza nelle acque ha acquisito negli ultimi anni una rilevanza sempre crescente, sia dal punto di vista normativo che tecnico e di ricerca.

La normativa di recente emanazione dà riscontro di queste evidenze, inserendo i microinquinanti fra le classi di specie chimiche sulle quali è necessario intensificare le attività di monitoraggio. È quindi verosimile attendersi in un prossimo futuro l'emanazione di una specifica normativa che regolamenti la presenza dei ME nelle acque.

Gli impianti di depurazione sono stati riconosciuti come una delle principali fonti di rilascio dei microinquinanti emergenti nell'ambiente. Pertanto, il servizio idrico integrato dovrà intervenire, adottando sistemi e tecnologie in grado di garantire anche la rimozione dei ME.

V. Bibliografia

Q. Aemig, A. Hélias, D. Patureau, 2021. *Impact assessment of a large panel of organic and inorganic micropollutants released by wastewater treatment plants at the scale of France*. *Water Research*, 188, 116524. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116524>.

Council Directive of 21 May 1991 91/271/EEC concerning urban wastewater.

C. Di Poi, K. Costil, V. Bouchart, M.-P. Halm-Lemeille, 2018. *Toxicity assessment of five emerging pollutants, alone and in binary or ternary mixtures, towards three aquatic organisms*. *Environmental Science Pollution Research*, 25, 6122–6134. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9306-9>.

C. Di Marcantonio, A. Chiavola, S. Dossi, G. Cecchini, S. Leoni, A. Frugis, M. Spizzirri, M.R. Boni, 2020a. *Occurrence, seasonal variations and removal of Organic Micropollutants in 76 Wastewater Treatment Plants*. *Process Safety and Environmental Protection*, 141, 61-72, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.032>.

C. Di Marcantonio, A. Bains, A. Chiavola, N. Singhal, 2020b. *Effect of oxic/anoxic conditions on the removal of organic micropollutants in the activated sludge process*. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101161, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101161>.

C. Di Marcantonio, A. Chiavola, S. Paderi, V. Gioia, M. Mancini, T. Calchetti, A. Frugis, S. Leoni, G. Cecchini, M. Spizzirri, M.R. Boni, 2021. *Evaluation of removal of illicit drugs, pharmaceuticals and caffeine in a wastewater reclamation plant and related health risk for non-potable applications*. *Process Safety and Environmental Protection*, 152, 391-403, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.024>.

C. Di Marcantonio, A. Chiavola, V. Gioia, A. Frugis, G. Cecchini, C. Ceci, M. Spizzirri, M.R. Boni, 2022. *Impact of COVID19 restrictions on organic micropollutants in wastewater treatment plants and human consumption rates*. *Science of the Total Environment*, 811, 152327. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152327>.

C.R. dos Santos, Y.A.R. Lebron, V.R. Moreira, K. Koch, M.C.S. Amaral, 2022. *Biodegradability, environmental risk assessment and ecological footprint in wastewater technologies for pharmaceutically active compounds removal*. *Bioresource Technology*, 343, 126150. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126150>.

European Commission, 2019. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, and the European Economic and Social Committee: European Union Strategic Approach to Pharmaceuticals in the Environment*. *EU Commission*, 128, 13.

European Commission, 2020. *Update on Progress and Implementation European Union Strategic Approach to Pharmaceuticals in the Environment*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b74925bf-2f9c-11eb-b27b-1aa75ed71a1>.

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Water Framework Directive, WFD*.

V. Dulio., P.C. von der Ohe, 2013. *NORMAN Prioritisation framework for emerging substances*. NORMAN Association - Network of reference laboratories and related organisations for monitoring and bio-monitoring of emerging environmental substances. Working Group on Prioritisation of Emerging Substances. April 2013. ISBN: 978-2-9545254-0-2.

V. Dulio, B. van Bave, E. Brorström Lundén, J. Harmsen, J. Hollender M. Schlabach, J. Slobodnik, K. Thomas, J. Koschorreck, 2018. *Emerging pollutants in the EU: 10 years of NORMAN in support of environmental policies and*

regulations. *Environmental Science Europe*, 30:5. <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0135-3>.

ECHEA 2017, *Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment Chapter R.11: PBT/vPvB assessment*. ECHA-17-G-12-EN. <https://doi.org/10.2823/128621>.

EMA, *Guideline on the Environmental Risk Assessment of Medicinal Products for Human Use*. European Medicines Agency, London, 2006 (Doc. Ref. EMA/CHMP/SWP/4447/00).

EMA, *Guideline on the Environmental Risk Assessment of Medicinal Products for Human Use*. Rev. 1. Draft. European Medicines Agency, London, 15 November 2018 (Doc. Ref. EMA/CHMP/SWP/4447/00 Rev. 1).

M.L. Hedgespeth, N. Gibson, J. McCord, M. Strynar, D. Shea, E.G. Nichols, 2019. Suspect screening and prioritization of chemicals of concern (COCs) in a forest-water reuse system watershed. *Science of the Total Environment*, 694, 133378. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.184>.

A. Küster, N. Adler, 2014. Pharmaceuticals in the environment: scientific evidence of risks and its regulation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 369, 20130587. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0587>.

A.D. McEachran, M.L. Hedgespeth, S.R. Newton, R. McMahan, M. Strynar, D. Shea, E.G. Nichols, 2018. Comparison of emerging contaminants in receiving waters downstream of a conventional wastewater treatment plant and a forest-water reuse system. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 12451–12463. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1505-5>.

O. Miarov, A. Tal, D. Avisar, 2020. A critical evaluation of comparative regulatory strategies for monitoring pharmaceuticals in recycled wastewater. *Journal of Environmental Management*, 254, 109794. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109794>.

I. Muñoz, M. José Gómez, A. Molina-Díaz, M.A.J. Huijbregts, A.R. Fernández-Alba, E. García-Calvo, 2008. Ranking potential impacts of priority and emerging pollutants in urban wastewater through life cycle impact assessment. *Chemosphere*, 74, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.09.029>.

Regolamento (UE) 2020/741 che stabilisce prescrizioni minimi per il riutilizzo dell'acqua.

F. Riva, E. Zuccato, E. Davoli, E. Fattore, S. Castiglioni, 2019. Risk assessment of a mixture of emerging contaminants in surface water in a highly urbanized area in Italy. *Journal of Hazardous Materials*, 361, 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.099>.

L. Semerjian, A. Shanableh, M.H. Semreen, M. Samarai, 2018. Human health risk assessment of pharmaceuticals in treated wastewater reused for non-potable applications in Sharjah, United Arab Emirates. *Environment International*, 121, 325–331, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.048>.

Wess, 2021. Update of EMA's Guideline on the Environmental Risk Assessment (ERA) of Medicinal Products for Human Use. *Therapeutic Innovation & Regulatory Science*, 55-309–323 <https://doi.org/10.1007/s43441-020-00216-1>.