



PURIFICARE L'ACQUA CON SISTEMI INTEGRATI SOSTENIBILI

Verranno studiati sistemi integrati monostadio di micro, ultra e nano filtrazione per la purificazione dell'acqua da microorganismi patogeni e antibiotico resistenti (AMR) e da inquinanti emergenti (CECs). Il prototipo sviluppato dovrà combinare capacità di pre-concentrazione, senza creazione di incrostazioni (antifouling), elevata efficienza filtrante, sicurezza, economicità e nessuna produzione di reflui. L'acqua trattata dovrà essere pronta per il riutilizzo e alcuni dei materiali usati nel prototipo deriveranno da scarti di produzione delle membrane, in linea con i principi di economia circolare.

Introduzione

Le attività antropiche e l'approccio lineare nella gestione delle risorse idriche ne hanno causato il progressivo deterioramento, riducendone la disponibilità per ragioni sia di tipo qualitativo che quantitativo. Il problema diventa ancora più rilevante in conseguenza degli effetti dei cambi climatici.

Considerando le conseguenze negative della crisi idrica, anche a livello geopolitico, i Paesi di tutto il mondo hanno cercato di far fronte a questo problema implementando piani di gestione dell'acqua sostenibili e cercando fonti di approvvigionamento idrico alternative [1]. È chiaro da alcuni anni che serve un cambio di paradigma nella gestione delle risorse idriche ed anche in questo ambito si è iniziato a ragionare in termini di economia circolare.

L'acqua in natura è già di per sé parte di un ciclo ed è determinante per la sostenibilità che si riescano ad integrare al suo interno le attività antropiche, con l'obiettivo di mantenere il più possibile inalterate le risorse disponibili sia qualitativamente che quantitativamente. Non si può pensare di aumentare lo sfruttamento di fonti primarie di alto livello qualitativo (in particolare sorgenti e acque sotterranee). Il primo passaggio per ridurre l'impatto delle attività antropiche dovrebbe essere la razionaliz-

zazione dei consumi, passando attraverso l'ottimizzazione dei processi che utilizzano l'acqua, per ridurre le necessità di prelievo. D'altro canto, è necessario pensare all'ottimizzazione dei trattamenti delle acque dopo il loro utilizzo per poterne progettare il riuso, considerando la possibilità di diversi livelli di trattamento e diverse "tipologie" di acqua, in funzione delle caratteristiche necessarie per il riutilizzo ipotizzato. Non più un'acqua per tutti gli usi ma un'acqua trattata in funzione della destinazione d'uso, secondo un approccio *fit for purpose*, cioè adattato allo scopo [2]. Il riutilizzo dell'acqua significa trattare l'acqua che è stata precedentemente usata a una qualità accettabile per il riutilizzo previsto, ponendo al contempo il minimo rischio per l'utente [3]. Tra i possibili esempi di riutilizzo di acqua trattata si possono citare: lo scopo irriguo, l'uso come acqua di scarico dei servizi igienici o per la produzione di cemento. Questa acqua viene trattata per raggiungere una qualità molto inferiore a quella richiesta per l'acqua potabile, pur rimanendo completamente sicura.

La motivazione di produrre acqua adatta allo scopo è principalmente dovuta al costo molto elevato del trattamento dell'acqua a una qualità accettabile come acqua potabile, se poi non verrà usata come tale.

Questo approccio richiede uno sforzo dal punto di vista normativo per definire tipologie di uso e relativi parametri, ma anche uno sforzo di tipo tecnologico per lo sviluppo di sistemi di trattamento sufficientemente flessibili per adattarsi alle necessità dei diversi contesti.

Non si può comunque prescindere da parametri di qualità minimi di base che forniscano un'acqua di partenza da raffinare poi opportunamente mediante i cosiddetti trattamenti terziari.

Qualunque sia l'utilizzo dell'acqua, bisogna garantirne la sicurezza e, negli ultimi anni, lo sviluppo dei metodi di analisi ha messo in luce la presenza di una molteplicità di sostanze, principalmente di origine antropica, a concentrazioni molto basse (parti per milione o addirittura parti per trilione) rispetto alle quali ci si è posti il problema della loro possibile minaccia per gli equilibri degli ecosistemi e per la salute umana. Stiamo parlando degli inquinanti emergenti (*Contaminants of Emerging Concern*, CECs), non ancora normati ma sempre più seguiti a livello di monitoraggio, in tutto il mondo [4]. La preoccupazione relativa ai CECs nelle acque deriva dalle conoscenze ancora piuttosto limitate sul loro destino ambientale, la loro pericolosità per la salute umana e degli ecosistemi, le loro trasformazioni e la tossicità dei loro prodotti di trasformazione. I CECs includono un ampio spettro di sostanze chimiche, tra le quali prodotti farmaceutici (antibiotici, antinfiammatori, antidepressivi, antiepilettici, antipertensivi etc.), prodotti per la cura della persona, ormoni, additivi alimentari, pesticidi e coloranti, tra i più rilevanti [5-7]. A causa delle loro caratteristiche chimiche e della limitata biodegradabilità, i CECs non vengono completamente eliminati negli impianti di trattamento delle acque di scarico e vengono rilevati nei loro effluenti. La pericolosità ambientale non è legata ovviamente alla concentrazione quanto piuttosto ad una loro continua immissione nell'ambiente, al possibile bio-accumulo e bio-magnificazione nella catena alimentare, nonché alla loro attività biologica, spesso elevata [8, 9].

Attività di ricerca

Nell'ambito del piano ERA-Net Cofund AquaticPollutants, le tre iniziative congiunte di program-

ma [*Joint Programming Initiatives* (JPI)] sull'acqua, gli oceani e la resistenza antimicrobica [*Water, Oceans and Antimicrobial Resistance* (AMR)] hanno collaborato per implementare un programma transnazionale per finanziare progetti di ricerca innovativi sui rischi per la salute umana e l'ambiente posti da inquinanti e agenti patogeni presenti nelle risorse idriche, con particolare riferimento al trattamento di inquinanti emergenti, patogeni e batteri resistenti agli attacchi dei comuni agenti antimicrobici. Nel 2020 le sinergie proposte tra enti di ricerca e aziende hanno portato al finanziamento di 18 progetti, coinvolgenti 22 Paesi, per un totale di 20 milioni di euro investiti.

L'obiettivo principale di tale programma consiste nel supportare approcci integrati e comuni ad aziende ed enti di ricerca per la gestione dei rischi coinvolgenti la contaminazione di tutti i bacini idrici (fiumi, mari e oceani) anche solo potenzialmente coinvolti nel problema e gli studi proposti hanno lo scopo di descrivere le trasformazioni degli inquinanti e dei patogeni che entrano nel ciclo dell'acqua, i loro effetti a causa del loro accumulo nella catena alimentare, l'analisi della loro diffusione, la verifica della loro resistenza ai trattamenti e lo sviluppo di strategie e tecnologie per ridurre la quantità. Oltre a questi, il progetto si propone di sviluppare metodologie e strumenti innovativi per supportare i decisori politici nello sviluppo di politiche efficaci e regolamentazioni efficienti riguardanti la cura della qualità dell'acqua.

Le tematiche evidenziate dal programma transnazionale riguardano tre azioni:

- 1) seguire il comportamento nell'ambiente di CECs, agenti patogeni e batteri resistenti agli agenti antimicrobici negli ecosistemi acquatici, determinandone le origini, gli accumuli e la diffusione e sviluppando strumenti e soluzioni digitali per comprendere e predire il loro comportamento e le loro interazioni reciproche;
- 2) valutare il rischio e gestire CECs, agenti patogeni e batteri resistenti agli agenti antimicrobici presenti negli ecosistemi acquatici caratterizzando i tipi di esposizione e gli effetti sugli ecosistemi acquatici e sulla salute umana, sviluppando procedure di valutazione e gestione dei rischi derivati, sviluppare tecniche e strategie

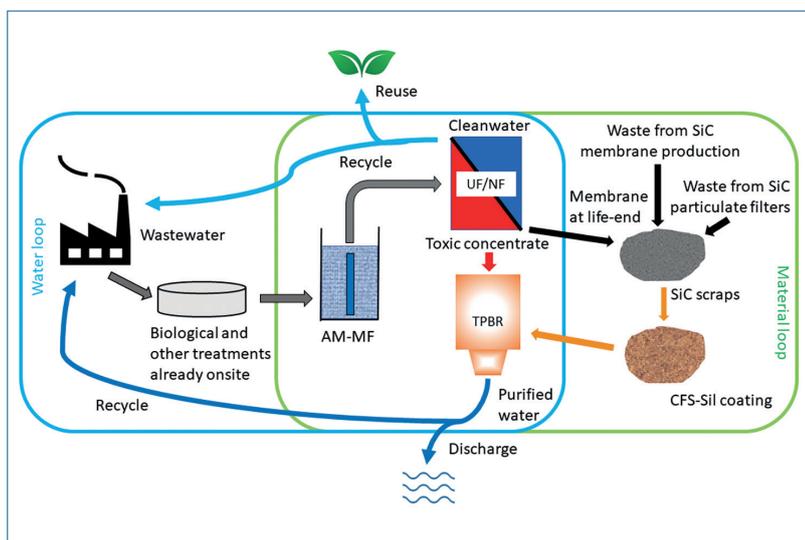
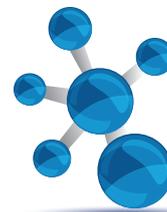


Fig. 1 - Il progetto in un'immagine. Il ciclo verde identifica il ciclo dei materiali utilizzati a partire dagli scarti di produzione delle membrane di carburo di silicio fino alla costituzione del prototipo in cui si integrano i processi di ultra/nanofiltrazione, di microfiltrazione e di termocatalisi. Il ciclo blu identifica il ciclo delle acque reflue trattate nel prototipo

per monitorare i batteri che possano diventare potenzialmente resistenti;

- 3) intraprendere azioni e strategie per ridurre CECs, agenti patogeni e batteri resistenti negli ecosistemi acquatici per ridurre la produzione alla fonte e per prevenirne la diffusione.

Il progetto NanoTheCAba, riassunto schematicamente in Fig. 1, riguarda la preconcentrazione di CECs e batteri resistenti agli agenti antimicrobici tramite processi di ultra-nanofiltrazione e abbattimento che utilizzano nanopolveri termocatalitiche perseguendo soluzioni di economia circolare, e si sviluppa proprio nell'ambito della terza azione (*Talking Actions*). I processi di membrana presentano il grosso vantaggio di non prevedere l'introduzione di reagenti nell'ambiente, aspetto non trascurabile, soprattutto quando si vogliono eliminare inquinanti presenti a livello di ultratracce. D'altro lato questi trattamenti generano un retentato in cui si concentrano le specie indesiderate (inquinanti e patogeni) che deve essere successivamente trattato in modo opportuno. Integrare nelle membrane delle sostanze con proprietà termocatalitiche [10, 11] significa poter intervenire sulle caratteristiche del retentato sempre evitando il consumo di reagenti chimici. La stabilità delle membrane termocatalitiche, meno soggette anche a fenomeni di incrostazione, ne

permette infatti un utilizzo prolungato, poiché di fatto diventano autopulenti [12-15].

In sintesi, il progetto ha lo scopo di produrre il prototipo di un apparato, efficiente dal punto di vista di consumo di risorse e di energia, che integra una membrana ultrastabile di carburo di silicio (SiC) per la preconcentrazione di CECs dalle acque contaminate tramite ultra e nanofiltrazione, un reattore termocatalitico per la generazione di radicali capaci di abbattere CECs e residui di batteri resistenti tramite processi di ossidazione avanzata e una membrana antimicrobica per microfiltrazione. Per impaccare il reattore si intende utilizzare scarti di produzione delle membrane di SiC che saranno utilizzati come supporto di nanopolveri di perovskite

termocatalitica [11, 16], la cui azione permetterà il completo abbattimento di CECs e agenti patogeni resistenti a basse temperature senza uso di prodotti chimici e/o fonti di irraggiamento. La membrana per microfiltrazione, infine, rimuoverà i solidi sospesi e sarà funzionalizzata con nanoparticelle di titania/silice per inattivare i batteri. La membrana per ultra e nanofiltrazione avrà il compito di separare il permeato pulito dal concentrato tossico mentre il reattore purifica nello stesso tempo il flusso di retentato ed evita lo scarico dei contaminanti in fiumi e oceani. Ognuna delle tre componenti del prototipo dovrà essere ottimizzata per permettere anche l'utilizzo di una singola componente, oltre che l'integrazione con le altre. Il sistema integrato dovrà essere compatto, facilmente scalabile e facilmente integrabile in impianti di purificazione di acque di tintoria, ospedali, acquacoltura, e altri tipi di impianti, garantendo un'operatività sicura ed efficiente.

La realizzazione del progetto vede la partecipazione di diverse unità di ricerca sia accademica sia industriale:

- i) il Dipartimento di Chimica dell'Università degli Studi di Torino (coordinatore del progetto) si occupa della caratterizzazione chimico-fisica dei materiali, della definizione dei meccanismi di

reazione, della valutazione dell'attività del termocatalizzatore tal quale e supportato, nonché della disseminazione e utilizzo dei risultati;

- ii) l'Istituto per i Materiali Nanostrutturati del CNR di Palermo si occupa della sintesi delle nanopolveri di perovskite tramite combustione sol-gel, della loro caratterizzazione dal punto di vista strutturale, e dello scale up del processo di sintesi;
- iii) l'Università di Aalborg in Danimarca, segue il processo di costruzione e integrazione dei componenti nel prototipo finale;
- iv) l'azienda danese LiqTech Ceramics A/S fornisce i supporti (membrane e scarti) di carburo di silicio per la funzionalizzazione con nanopolveri termocatalitiche e nanoparticelle ossidiche per l'inattivazione dei batteri e testa il processo sonochimico (studiato e messo a punto dall'Università di Bar-Ilan in Israele) per integrarlo nell'impianto di produzione delle membrane;
- v) CeNTI, il Centro per la nanotecnologia e i materiali smart, in Portogallo, cura il processo di inattivazione dei batteri resistenti agli antimicrobici preparando membrane in cui le nanoparticelle ossidiche di titania/silice sono supportate tramite *spray coating* sui supporti di carburo di silicio.

Il consorzio conta inoltre sull'azienda italiana Project-Hub, consulente nella gestione del progetto, e su quattro partner associati: MICAMO Srl, Fonte Nuova Srl e Società Agricola San Biagio in Italia e sulla spagnola Aquanex per la fornitura di acque di provenienza diversa per testare il prototipo.

Questo progetto è appena iniziato (1° settembre 2021), avrà la durata di tre anni e le attività sono suddivise in cinque blocchi:

- 1) sviluppo di membrane per ultra e nanofiltrazione e del reattore termocatalitico. Il reattore sarà progettato seguendo i principi dell'economia circolare, grazie al riciclo degli scarti della fabbricazione delle membrane di carburo di silicio e all'imple-



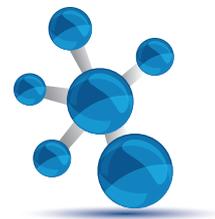
Fig. 3 - L'apparato sonochimico utilizzato per impiantare nanopolveri perovskitiche sui supporti di carburo di silicio



Fig. 2 - Effetto termocatalitico di diversi tipi di nanopolveri perovskitiche sull'abbattimento del colorante metilarancio: in alto la soluzione di riferimento senza aggiunta di termocatalizzatore (a sinistra) e cinque diverse sospensioni di perovskite a composizione diversa, in basso la soluzione di riferimento senza aggiunta di termocatalizzatore (a sinistra) e le sospensioni dopo trattamento di qualche minuto a circa 80 °C su piastra riscaldante

mentazione di un termocatalizzatore supportato attivabile a basse temperature per il rilascio di radicali attivi nell'abbattimento dei contaminanti e degli agenti patogeni;

- 2) sintesi di nanopolveri termocatalitiche a base di perovskite e nanoparticelle antimicrobiche di titania/silice per la funzionalizzazione di supporti da utilizzare per la filtrazione e per promuovere l'abbattimento dei contaminanti e l'inattivazione dei batteri. In Fig. 2 è riportata, a titolo di esempio di degradazione termocatalitica, la decolorazione di una soluzione di metilarancio in presenza di diversi tipi di nanopolveri perovskitiche;
- 3) studio di metodiche per il rivestimento di nanopolveri e nanoparticelle su supporti a base di carburo di silicio. In particolare ci si propone di sviluppare metodi sonochimici per immobilizzare le nanopolveri di perovskite (Fig. 3) e tecniche di *spray coating*



per le nanoparticelle ossidiche. La metodologia sonochimica è stata recentemente selezionata dalla IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemists) come una delle dieci tecnologie più promettenti del 2021 [17] e sarà sviluppata in collaborazione con l'Università di Bar-Ilan in Israele, che è stata individuata come subcontractor dal consorzio;

- 4) test e validazione del sistema integrato su una apparecchiatura sviluppata su scala di laboratorio per testare campioni di acque reflue opportunamente preparate con diverse tipologie di inquinanti chimici e microbici. Successivamente, sulla base dei risultati ottenuti in laboratorio, verrà installato un prototipo di scala pilota che verrà testato con acque reali derivanti da impianti di partner associati al progetto (un'industria tessile, un'industria di prodotti ittici, una conceria e un ospedale);
- 5) infine, verrà effettuata la disseminazione e l'implementazione dei risultati del progetto.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare la Commissione Europea e FCT (Portogallo), IFD (Danimarca), MUR (Italia) per il finanziamento nell'ambito del consorzio collaborativo internazionale NanoTheC-Aba finanziato nell'ambito della Joint call 2020 AquaticPollutants di AquaticPollutants ERA-NET Co-fund (GA N° 869178). Questo ERA-NET è parte integrante delle attività sviluppate dalle JPI Water, Oceans e AMR.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Eslamian, *Urban Water Reuse Handbook*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2016.
- [2] G. Chhipi-Shresth, K. Hewage, R. Sadiq, *Science of the Total Environment*, 2017, **607**, 600.
- [3] A. Angelakis, P. Gikas, *Water Util. J.*, 2014, **8**, 67.
- [4] V. Dulio, B. van Bavel *et al.*, *Environ. Sci. Eur.*, 2018, **30**, 5.
- [5] T. Nawaz, S. Sengupta, *Contaminants of Emerging Concern: Occurrence, Fate, and Remediation*, Elsevier Inc., 2018.
- [6] S. Sauv e, M. Desrosiers, *Chem. Cent. J.*, 2014, **8**, 1.
- [7] W.W.P. Lai, Y.C. Lin *et al.*, *Emerg. Contam.*, 2016, **2**, 135.
- [8] K.M. Blum, S.H. Norstr om *et al.*, *Chemosphere*, 2017, **176**, 175.
- [9] Q. Bu, X. Shi *et al.*, *Emerg. Contam.*, 2016, **2**, 145.
- [10] F. Deganello, M.L. Testa *et al.*, *J. Mater. Chem., A*, 2014, **2**, 8438.
- [11] M.L. Tummino, E. Laurenti *et al.*, *Appl. Cat. B: Environ.*, 2017, **207**, 174.
- [12] E. Eray, V. Boffa *et al.*, *Journal of Membrane Science*, 2020, **606**, 118080.
- [13] M. Facciotti, V. Boffa *et al.*, *Ceramics International*, 2014, **40**, 327.
- [14] X.Z. Ma, K. Janowska, V. Boffa, D. Fabbri, G. Magnacca, P. Calza, Y.Z. Yue, *Nanomaterials*, 2019, **9**, 1368.
- [15] K. Janowska, V. Boffa *et al.*, *npj Clean Water*, 2020, **3**, 34.
- [16] <https://liqtech.com/corporate/innovation/nanoperwater/>
- [17] <https://iupac.org/iupac-announces-the-2021-top-ten-emerging-technologies-in-chemistry/>

Water Purification with Sustainable Integrated Systems

One step water treatment prototype system that combines pre-concentration, antifouling, high filtration efficiency, CECs abatement, operation safety, simplicity, cost effectiveness and without consumption or waste of natural resources, will be developed. The following aspects will be investigated: A) Generation of membranes for AMR pathogens abatement, by using antibacterial nanoparticles immobilized on SiC flat membrane; B) Packed bed reactor exploiting beads produced by SiC-based membranes scraps and functionalized with thermocatalytic perovskite-based nanopowder. The system aims at providing abatement (>99%) of the largest spectrum of CECs and AMR-pathogens, and the complete reuse of process effluents. This will benefit people at large providing a measurable positive impact on society and health.