

ELIMINARE L'ACQUA DALLE ACQUE REFLUE: UN INELUTTABILE OSSIMORO PER LA SOSTENIBILITÀ DEL CICLO IDRICO URBANO

Andrea G. Capodaglio

Dip. Ingegneria Civile e Architettura, Università di Pavia

INTRODUZIONE

Il *Nexus* tra acqua, energia e cibo, risorse chiave per lo sviluppo globale della società, è stato inizialmente identificato come sfida emergente dal World Economic Forum di Davos nel 2008. Sebbene questo articolo si concentri principalmente sui nuovi possibili paradigmi del ciclo delle acque urbane, suggerisce anche esplicite prospettive inter-settoriali alla base della logica di attuazione del *Nexus* nel suo insieme.

Nexus acqua-energia

L'approvvigionamento, la distribuzione e la depurazione dell'acqua richiedono notevoli quantità di energia: il consumo mondiale (principalmente sotto forma di energia elettrica) del settore idrico ha raggiunto nel 2014 120 Mtep, pari a circa il 4% del consumo energetico globale. All'interno di questa cifra, si stima che il consumo relativo al pompaggio rappresenti la quota maggiore della domanda energetica del settore idrico, fino al 90% del totale. Per quanto riguarda il trattamento delle acque reflue, le stime mostrano che il consumo di energia è compreso tra 0,3 e 2,1 kWh/m³ di acqua trattata nella UE (tra 0,41-0,87 kWh/m³ negli Stati Uniti) (Capodaglio e Olsson, 2020).

D'altra parte, le acque reflue contengono notevoli quantità di energia e sostanze potenzialmente recuperabili. Calcoli teorici hanno stimato l'energia chimica dei liquami in 3,86 kWh/kg COD mineralizzato, mentre ricerche sperimentali hanno indicato valori compresi tra 0,89-8,3 kWh/kg di COD.

Anche i fanghi di supero sono, letteralmente, un concentrato di energia, circa 5 volte maggiore rispetto al refluo originale, con contenuto energetico compreso tra 3,2-4,6 kWh/kg (peso secco). Uno studio dei consumi energetici dell'impianto di trattamento della città di Toronto (6,8 MWh/giorno) ha evidenziato che la stima del contenuto di energia totale del refluo (62,8 MWh/giorno) supera con rapporto maggiore di 9 l'energia richiesta dai processi (Shizas e Bagley, 2004). Anche considerando inevitabili perdite di processo e conversione, i liquami potrebbero quindi costituire una significativa fonte di energia sia nei paesi industrializzati che nei pae-

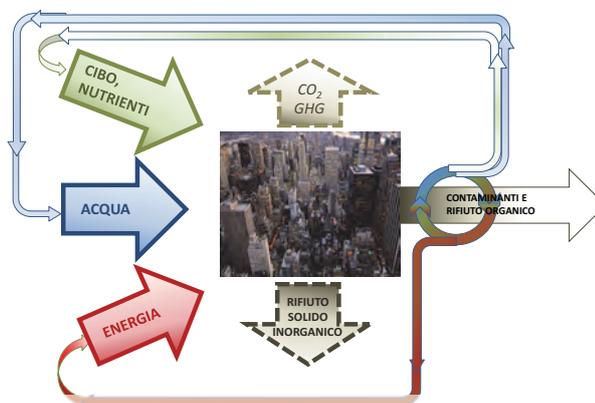


Figura 1
Economia circolare nel ciclo idrico urbano

si in via di sviluppo, spesso privi di approvvigionamento energetico locale, anche attraverso sistemi decentralizzati di trattamento. La generazione della quantità di energia teoricamente recuperabile a scala globale dai liquami (stimabile in circa 560 TWh/anno) richiederebbe l'uso di circa 50 Mtep di combustibili fossili, che produrrebbero emissioni di gas serra per circa 100×10^6 t CO_{2,eq}, poco più del 3% delle attuali emissioni globali (33×10^9 t CO_{2,eq}). Ne consegue che le acque reflue e i relativi residui di processo possano sempre più essere, a ragione, considerati come potenziali risorse energetiche e sostanze a valore aggiunto, ivi inclusi fertilizzanti e acque di riuso, secondo i nuovi paradigmi dell'Economia Circolare, esemplificata nella Figura 1 per quanto riguarda il ciclo delle acque urbane.

Nexus acqua-cibo

L'acqua è direttamente necessaria non solo per la vita, ma anche per la produzione di cibo; inoltre, le acque reflue contengono notevoli quantità di nutrienti essenziali per le colture. L'adozione di nuovi paradigmi nel ciclo dell'acqua urbano sembra quindi inevitabile non solo per le citate ragioni di conservazione dell'energia e dell'acqua ma anche considerando il trend della disponibilità, produzione e consumo di roccia fosfatica, il minerale da cui viene estratto il fosforo (per il 95% destinato al settore agricolo). Secondo il CEO della Morocco Phosphate Company, il più grande fornitore mondiale di que-

sto minerale “è probabile che il mondo esaurisca nel prossimo futuro le riserve di rocce fosfatice economicamente accessibili”, il che avrebbe conseguenze potenzialmente catastrofiche sulla possibilità di sfamare la crescente popolazione mondiale.

A valle delle perdite legate alle molteplici inefficienze del ciclo antropico del fosforo, le deiezioni umane contengono circa il 16% del fosforo minerale consumato nel mondo. Il recupero e il riciclo di tale frazione potrebbero contribuire, anche se non in modo decisivo, a ridurre parzialmente la dipendenza dell’umanità dal fosforo estratto, e ad estendere la durata residua, stimata tra i 150 e i 300 anni, delle limitate riserve di questo minerale. Processi biologici combinati con la precipitazione di minerali di fosforo (struvite, idrossiapatite, fosfato di calcio, ecc.), sono attualmente considerati tra i metodi più efficienti per il suo recupero (Daneshgar et al., 2018).

DEPURAZIONE PER OBIETTIVI E SEPARAZIONE DELLE CORRENTI

Questi approcci sono stati proposti, in combinazione a processi di trattamento più efficienti dal punto di vista energetico, per consentire lo sviluppo di cicli idrici alternativi, energeticamente neutri, o persino positivi. Il trattamento differenziato e la riduzione dei flussi potrebbero ridurre significativamente il fabbisogno energetico non solo dal lato del trattamento e dello smaltimento del ciclo, ma anche dal la-

to dell’erogazione e della distribuzione, fornendo fonti di approvvigionamento alternative più vicine ai punti di utilizzo. Molti usi attuali potrebbero infatti essere soddisfatti da acqua di qualità inferiore a quella potabile, dal momento che l’accesso a fonti idriche di alta qualità è sempre più problematico a livello globale, e che per l’uso potabile sono richiesti trattamenti sempre più spinti, ad alta intensità energetica. Impianti decentralizzati basati su obiettivi di trattamento “personalizzati” (cosiddetti “Fit-for-Purpose”) (Figura 2) (Water Environment Federation, 2017) possono fornire acqua di approvvigionamento con requisiti di qualità adatti a diversi usi finali. Ad esempio, reflui domestici con trattamento in loco potrebbero alimentare gli sciacquoni, impianti di raffreddamento residenziale o industriale, o irrigare aree verdi. Anche l’acqua potabile potrebbe essere fornita attraverso impianti di trattamento decentralizzati, evitando il trasferimento bidirezionale a lunga distanza di reflui e dell’approvvigionamento. I sistemi fognari a lunga distanza richiedono infatti ingenti investimenti iniziali per la costruzione, che possono costituire oltre l’80% del costo totale di un sistema idrico urbano, ed elevate quantità di energia per il funzionamento. È stato anche dimostrato che, contrariamente alle ipotesi tradizionalmente adottate, le economie di scala nella progettazione dei sistemi idrici sono poco influenzate dal consumo specifico e dalla densità di popolazione assoluta, ma so-

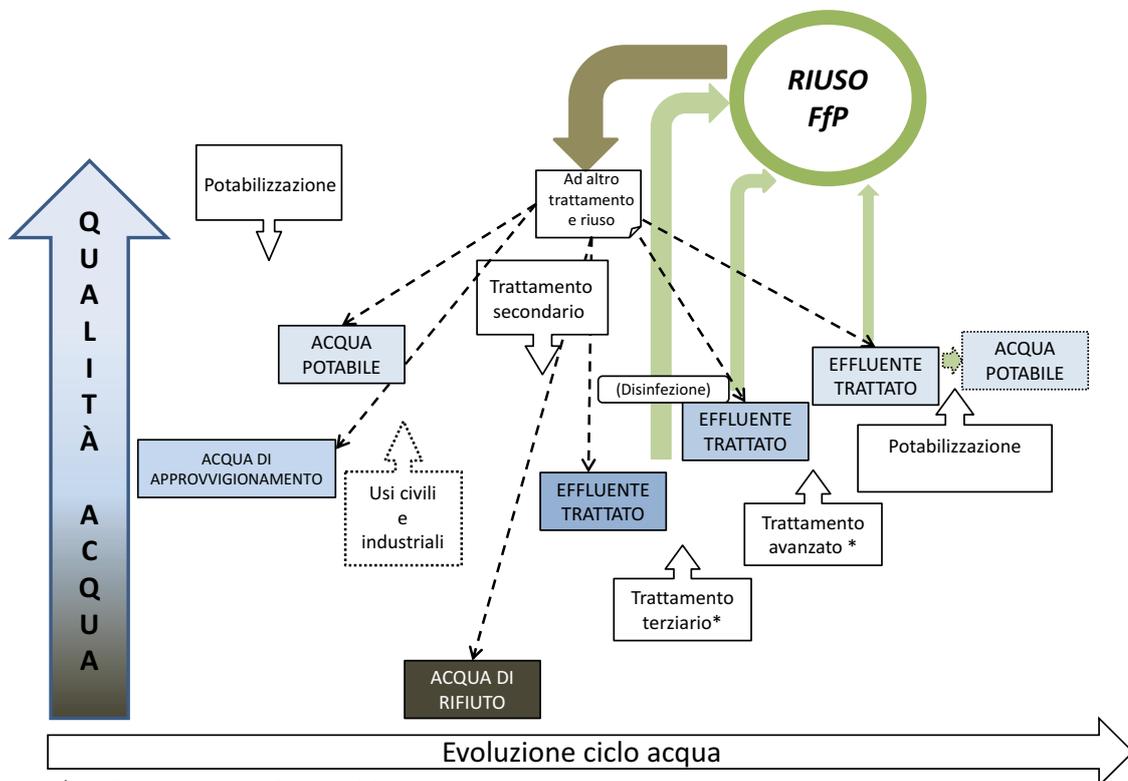


Figura 2 * Livelli di trattamento in funzione del riuso e contaminanti presenti.
 Trattamento per obiettivi (Fit-for-purpose) nel ciclo idrico. * Livelli di trattamento in funzione del riuso e contaminanti presenti.

no molto sensibili alla distribuzione spaziale della popolazione servita (Maurer et al., 2005).

Il trattamento per obiettivi può consentire il riutilizzo idrico per diversi usi, potabili e non, il ripascimento di corpi idrici, e usi industriali, in conformità con le norme applicabili esistenti. Come applicazione estrema di questi concetti, il cosiddetto “*sewer mining*”, che consiste nell'estrazione di liquame direttamente da un collettore fognario e nel suo trattamento sul posto per riutilizzo specifico, evitando quindi il pompaggio fino a un impianto di trattamento centralizzato e il successivo ripompaggio di ritorno, è attualmente applicato in alcuni paesi, ad es. in Australia, notoriamente in deficit di risorse idriche.

La separazione alla fonte delle correnti è tra le soluzioni recentemente proposte, riconosciuta da molti come uno dei concetti più promettenti di “nuova igiene urbana” (*new sanitation*) in grado di ristabilire l'equilibrio dei cicli del carbonio, dei nutrienti e dell'acqua. Le acque nere (deiezioni) sono ricche di sostanze organiche (5.000-93.000 mg/L) e nutrienti (1.500-16.000 mg N/L e 500-3000 mg P/L), caratterizzate da alto contenuto di solidi (16.000-125.000 mg/L). Le acque grigie (scarichi dei lavandini, doccia, lavatrici, ecc.), d'altra parte, hanno basso COD (200-450 mg/L), bassi N e P (6-22 e 0,4-8 mg/L, rispettivamente) e basse concentrazioni di solidi e agenti patogeni, ma un contenuto di metalli e microinquinanti più elevato. L'urina, con elevato COD (4.000-11.000 mg/L), azoto (4.000-11.000 mg/L) e fosforo (200-4.000 mg/L) e basse concentrazioni di metalli e microinquinanti, salvo l'eventuale presenza di residui farmaceutici e loro metaboliti può essere ulteriormente separata con apposita impiantistica interna (Tervahauta et al., 2013).

La separazione delle varie componenti può essere gradualmente implementata anche in aree con infrastrutture esistenti, portando a periodi di transizione durante i quali i sistemi presenti continueranno a funzionare in modalità mista. Lo studio dei bilanci di massa per valutarne l'impatto, basato sull'ipotesi di co-digestione diretta di acque nere e fanghi di depurazione, e trattamento di acque grigie mediante processi convenzionali, ha indicato che anche la implementazione graduale della separazione delle fonti domestiche potrebbe essere vantaggiosa per migliorare il bilancio energetico e il recupero dei nutrienti negli impianti, e che questi obiettivi potrebbero essere raggiunti con piccole modifiche ai processi e alle strutture esistenti (Morandi et al., 2018).

La separazione alla fonte, tuttavia, avrebbe una applicazione ideale in sistemi decentralizzati, in quanto consente il recupero locale delle risorse secondo i principi e le esigenze del trattamento per obiettivi, con minimi interventi infrastrutturali. Le tecnologie attualmente disponibili possono infatti fornire soluzioni adeguate in tutti questi casi, con trattamento della componente “nera” in impianti di piccole dimensioni e riutilizzo delle acque “grigie” appropriato alle esigenze locali. La raccolta centralizzata a scala urbana delle diverse correnti e la distribuzione di acque di approvvigionamento per usi differenziati, viceversa, richiederebbero una estesa duplicazione delle reti, sia di approvvigionamento (potabile/non potabile), che di smaltimento (nero/grigio). L'adozione della distribuzione differenziata può tuttavia rivelarsi indispensabile in aree a forte scarsità di risorse idriche, e infatti queste sono già utilizzate in alcuni paesi: in Giappone (Tokyo e Fukuoka), a Singapore, e in diverse città degli Stati Uniti (USEPA, 2012). Scelte di rottura rispetto ai paradigmi tradizionali, relative all'introduzione di schemi di riuso idropotabile delle acque reflue (*toilet to tap*) sono già state messe in atto, ad esempio attraverso il programma “NEWater” a Singapore, che fornirà a regime 600.000 m³/giorno di acqua potabile. Schemi simili sono in corso di implementazione anche negli Stati Uniti: nella città di El Paso (Texas) è attualmente in costruzione un impianto di riutilizzo potabile diretto con capacità di 38000 m³/giorno (USEPA, 2017).

Sebbene i sistemi di trattamento idropotabile diretto potrebbero avere maggior intensità energetica rispetto agli schemi tradizionali (questo dipende da molti fattori, soprattutto dalla qualità e dalla localizzazione delle fonti), la scelta di adottare queste soluzioni è spesso dettata da circostanze non altrimenti risolvibili, come la mancanza di fonti alternative sostenibili (caso di El Paso) e considerazioni geopolitiche (la scelta NEWater a Singapore include considerazioni di autosufficienza idrica strategiche per la nazione). Dal punto di vista energetico, secondo le autorità locali, la produzione di NEWater richiede all'incirca un quarto dell'energia necessaria per la produzione di acqua potabile tramite desalinizzazione.

PARADIGMI PRESENTI E FUTURI PER LE RETI DI DRENAGGIO URBANE

Per sfruttare appieno il potenziale delle tecnologie idonee al recupero di risorse dalle acque reflue è necessario applicare nuovi paradigmi per i sistemi di collettamento urbani. Storicamente, la gravità è sta-

ta utilizzata come principale forza motrice per il trasporto dei reflui; questo richiede frequenti pompaggi per il mantenimento del flusso, con forte consumo energetico. Inoltre, la gestione dei reflui si basa su un approccio svantaggioso a priori, che utilizza grandi volumi di acqua (spesso costituita da acqua potabile, costosa e ad alta intensità energetica) come mezzo di diluizione e trasporto di flussi diversi miscelati e inviati a impianti centralizzati. In regioni con deficit endemici di risorse idriche, questo approccio può influire fortemente sulla risorsa disponibile.

I sistemi tradizionali sono passibili di fenomeni di infiltrazione che possono incrementare le portate convogliate e diluire ulteriormente i liquami o, al contrario, essere soggetto a perdite con potenziale inquinamento della falda. Poiché i tempi di percorso in fognatura possono essere significativi, processi fisici e biochimici possono indurre significativi cambiamenti delle caratteristiche dei reflui, ragion per cui le reti fognarie sono considerate a pieno titolo reattori chimici e biologici (Hvitved-Jacobsen et al., 2002), con impatto diretto sia sulle strutture stesse (ad es., produzione di H_2S che può causare corrosione strutturale) e sui processi di trattamento (ad es., modificando il contenuto organico e i rapporti tra le diverse frazioni del substrato). Inoltre, sistemi fognari misti possono indurre i ben noti scarichi di troppo pieno durante eventi di pioggia (CSO – combined sewer overflows) in grado di compromettere la qualità dei recettori.

Dal punto di vista del recupero di risorse, elevati livelli di diluizione lo rendono meno efficiente a causa delle limitazioni tecniche dei processi. Reflui diluiti infatti richiedono l'adozione di processi biologici rapidi (aerobici), al fine di contenere le dimensioni delle unità di trattamento, che tuttavia impongono un elevato consumo energetico per fornire l'accettore di elettroni (ossigeno) necessario. Il fabbisogno energetico di aerazione può infatti rappresentare oltre il 50% del fabbisogno totale di un impianto. Tra le opzioni di processo che potrebbero consentire un recupero efficiente dell'energia contenuta nei reflui, i processi anaerobici possono essere considerati le più mature, già oggetto di innumerevoli applicazioni in tutto il mondo. Tuttavia, l'effetto della diluizione ostacola la loro applicazione ottimale, poiché rende necessarie unità di processo significativamente più grandi a causa delle cinetiche metaboliche più lente.

Paradigmi innovativi basati su sistemi di fognatura e trattamento decentralizzati, segregazione delle correnti e minima diluizione potrebbero comportare significativi risparmi energetici per il trasporto e

il trattamento, nonché il miglioramento dell'efficienza dei processi (Opher e Friedler, 2016). L'applicazione di approcci decentralizzati può rendere più semplice l'implementazione di schemi locali di riutilizzo dell'acqua, riducendo i consumi di acqua potabile per gli usi meno pregiati.

La segregazione delle correnti può ridurre significativamente le portate reflue e modificarne le caratteristiche, favorendo l'applicazione di tecnologie anaerobiche in condizioni ottimali. Ad esempio, considerando la componente "nera", l'uso di sistemi di separazione potrebbe consentire di risparmiare fino a 32 L/giorno procapite, rispetto ai sistemi attuali, a seconda delle soluzioni applicate. Inoltre, ipotizzando il riutilizzo di acque grigie trattate localmente per usi non potabili (ad es. sciacquone, pulizia e irrigazione) si potrebbero risparmiare ulteriori 80 L/giorno di acqua potabile procapite (Tervahauta et al., 2013). Ciò potrebbe ridurre (supponendo che si scarichi solo la componente nera) la portata in fognatura a circa 10 L/procapite/giorno, secondo ipotesi conservative (Otterpohl et al., 2002), con COD stimato in circa 8000 mg COD/L, ovvero un ordine di grandezza superiore ai valori medi attuali, con un possibile intervallo compreso tra 2500-20000 mg COD/L (Henze, 2019).

Eliminare l'acqua dalle acque reflue: si può fare?

Eliminando la maggior parte dell'acqua dalle acque reflue, i benefici della separazione alla fonte delle varie componenti potrebbero essere sfruttabili tramite sistemi di collettamento basati su nuovi paradigmi. Un esempio è il sistema di fognatura a vuoto (o a depressione), brevettato negli Stati Uniti nel 1888, ma apparso nella pratica comune, su piccola scala, solo nei primi anni '60 (Figura 3). In una fognatura a vuoto, la forza motrice è data dalla differenza tra pressione atmosferica e depressione interna, mantenuta da apposite centraline e valvole di controllo. La tecnologia dei sistemi a vuoto non è oltremodo costosa, ma è relativamente più sofisticata rispetto a quella tradizionale, e pertanto richiede progettazione e costruzione più precise. D'altro canto, i sistemi fognari a vuoto presentano notevoli vantaggi: i costi di costruzione sono in media più bassi (del 30-35%) grazie a materiali più economici e in quantità più ridotta, scavi meno profondi, assenza di tombini e passi d'uomo, maggior flessibilità nel tracciato di posa, tempi di realizzazione più rapidi e minori disagi in superficie durante la costruzione. I costi operativi e di manutenzione sono inferiori, all'incirca per la medesima percentuale, a causa dell'assenza delle necessità di

pulizia, minori requisiti energetici per il mantenimento del vuoto e facilità nel controllo delle portate (Shafiqul Islam, 2017). È stato stimato che le rotture relative a condotte (che rappresentano più del 98% dei guasti nei sistemi convenzionali) rappresentino meno del 5% dei problemi operativi nelle fognature a vuoto esistenti. D'altra parte, i problemi sulle valvole a vuoto rappresentano circa l'80% dei guasti in questi sistemi, tuttavia, i tempi di intervento necessari risultano più brevi rispetto a quelli relativi ai sistemi di gravità, infatti l'86% dei guasti nelle reti a vuoto viene generalmente risolto entro 2 ore dal rilevamento (Misza-Kruk, 2016). Inoltre, queste reti dimostrano anche importanti vantaggi ambientali, come: assenza di perdite e bassissima probabilità di infiltrazione, e trasporto rapido dei liquami cosicché la sostanza organica arriva "più fresca" al trattamento.

Al momento, il più grande sistema di questo tipo in funzione è quello costruito all'inizio del millennio a Palm Island (Dubai), con una rete totale di 40 km e circa 2000 abitazioni servite. L'affinamento tecnologico ha dimostrato l'affidabilità, efficienza ed economia, di questi sistemi e pertanto la loro applicazione è aumentata in modo significativo negli ultimi 25 anni, con diverse migliaia di reti operative. Una indagine del 2008 ha indicato che le due principali aziende specializzate nella costruzione di questi sistemi avevano completato da sole oltre 1000 installazioni in diversi paesi: Stati Uniti (> 250), Germania (> 300), Giappone, Francia, Regno Unito (> 100 ciascuno), Australia, Repubblica Ceca e Polonia (~50 ciascuno) e in molti altri (Terry e Lazar, 2016).

Idealmente, in una urbanizzazione servita da rete a vuoto, le acque grigie non sarebbero inviate in rete, ma trattate localmente per un riutilizzo locale. Al fine di massimizzare la raccolta di sostanza organica in vista del successivo recupero energetico, gli scarichi dei trituratorini da cucina potrebbero essere collegati alla componente nera, aumentandone il carico organico senza i problemi che elevate quantità di solidi aggiuntivi possono causare nelle fognature tradizionali. Un'analisi dettagliata di questa tecnologia è stata recentemente presentata dal centro di ricerca Fraunhofer di Stoccarda (Fraunhofer IGB, 2016): le conclusioni indicano che questa tecnologia dovrebbe essere considerata come opzione realistica per le future infrastrutture idriche urbane, per quanto riguarda le questioni di sostenibilità ambientale, sociale ed economica. Dal punto di vista della sostenibilità, inoltre, con questa soluzione è possibile ottenere significative riduzioni di emissioni energetiche e gas serra, sia in fase di costruzione che operativa (Panfil et al., 2013). Queste considerazioni si estendono anche ai trattamenti dei reflui: si può infatti supporre che tecnologie energeticamente più efficienti (anaerobiche) che consentano sia risparmio (per mancanza dei requisiti di aerazione) che recupero energetico (come produzione di CH_4 , o anche H_2) potrebbero essere utilizzate in queste condizioni. Questo cambio di paradigma tecnologico potrebbe quindi migliorare significativamente l'economia generale e la sostenibilità dei sistemi idrici urbani. Elevate concentrazioni dei reflui, tuttavia, potrebbero influire sulle operazioni di trattamento: se il collettamento a vuoto con separazione riduce fortemente la diluizione della sostanza organica, po-

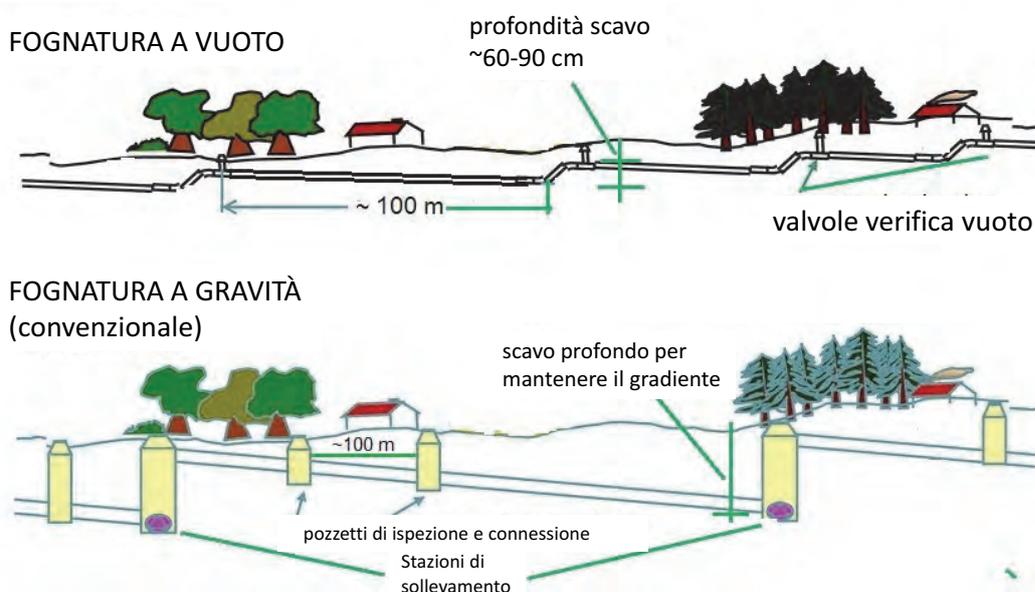


Figura 3
Schema di fognature a vuoto (sopra) e gravità (sotto)

tenzialmente massimizzando l'efficienza di recupero energetico, allo stesso tempo esso concentra anche altri inquinanti (metalli, solfuri e ammoniaca) che potrebbero inibire gli stessi processi anaerobici (Gao et al., 2019). Elevate concentrazioni di ammonio libero, infatti, possono inibire la fase metanogena del processo. È stato tuttavia dimostrato che l'aggiunta di carbone attivo granulare (CAG) al substrato può migliorare di oltre il 18% la produzione di biogas da reflui concentrati, anche in presenza di alti livelli di ammonio (Florentino et al., 2019). Una alternativa al carbone attivo convenzionale può essere rappresentata dal biochar derivato dai fanghi biologici stessi, con ulteriore miglioramento della sostenibilità del ciclo di trattamento (Callegari e Capodaglio, 2018). Miglioramenti nella produzione di biogas sono stati ottenuti mediante implementazione di digestione anaerobica bioelettrochimicamente assistita, in grado di aumentare la frazione di metanigeni presenti nel digestore (Gajaraj et al., 2016).

Le considerazioni sopra esposte evidenziano la necessità di rivalutare alcune ipotesi progettuali ben radicate per la pianificazione e la progettazione dei nuovi sistemi di gestione delle acque reflue urbane. Lo sviluppo dei nuovi paradigmi richiederà quindi un adattamento dei processi tecnologici attuali per ottimizzarne l'efficienza ed efficacia in condizioni operative modificate.

PROSPETTIVE FUTURE

Le tecnologie di trattamento decentralizzate comprendono una vasta gamma di processi di varia complessità. Dal punto di vista dei costi, le opzioni tecnologiche più avanzate stanno rapidamente diventando comparabili – per unità di carico inquinante rimosso – alle applicazioni centralizzate. La gran parte delle infrastrutture idriche nei paesi sviluppati, vicine alla vita utile di progetto, dovrà subire una sostanziale ricostruzione nel prossimo decennio, anche per essere adeguata a nuovi requisiti (maggiore efficienza, rimozione degli inquinanti emergenti, adeguamento a cicli di economia circolare e sostenibilità). Il passaggio a sistemi decentralizzati con separazione delle correnti potrebbe quindi costituire un approccio appropriato e, a lungo termine, economicamente valido, consentendo l'estensione del servizio in base a necessità correnti, con investimenti iniziali ridotti e gradualità espansioni future. È stato infatti stimato che i costi di investimento nei sistemi fognari prevalgono su quelli degli impianti di trattamento per un rapporto in eccesso a 3:1 (Maurer et al., 2005), e

le stesse stime indicano che i livelli assoluti di trattamento hanno un'influenza marginale sui costi di investimento totali. Sistemi tipo "cluster" potrebbero quindi essere una soluzione ai problemi di gestione del ciclo delle acque urbane per comunità di dimensioni ridotte anche all'interno di contesti più ampi. La transizione da grandi sistemi di trattamento centralizzati a sistemi decentralizzati potrebbe essere un approccio alternativo al ciclo delle acque urbane, con livelli di trattamento paragonabili a quelli dei sistemi centralizzati, maggiori affidabilità e flessibilità (Engin e Demir, 2006).

Moderni sistemi di raccolta decentralizzata, a bassa diluizione, progettati per il recupero sostenibile di acqua, nutrienti e materia secondo consolidati criteri di protezione ambientale, potrebbero pertanto cambiare radicalmente l'attuale approccio alla gestione delle acque urbane. Considerando i crescenti eventi di carenza idrica nel mondo, il riutilizzo efficiente delle risorse idriche dovrebbe essere una priorità generalizzata, e non a caso le Nazioni Unite hanno recentemente identificato le acque reflue come una fonte di acqua disponibile non ancora sfruttata (UN-Water, 2018).

Nuove sfide, che richiedono soluzioni innovative insorgono costantemente nel settore idrico: ad esempio, i problemi relativi ai contaminanti emergenti (prodotti farmaceutici, interferenti endocrini, ecc.) a concentrazioni molto ridotte, che non sono rimossi in modo significativo dagli attuali processi, richiedono l'adozione di nuove tecnologie di processo per essere eliminati. Segregazione alla fonte e minor diluizione potrebbero favorire l'adozione di nuove, più efficienti tecnologie (Capodaglio, 2018).

CONCLUSIONI

La combinazione di diversi fattori critici, come la variabilità climatica che altera le dinamiche idrologiche, le crescenti scarsità di nuove risorse di acqua dolce, e domanda di acqua potabile (e non), sta provocando incertezze sulle future disponibilità e sicurezza della risorsa idrica in molte aree del globo. È quindi necessaria una maggior resilienza dei sistemi di approvvigionamento e in questo senso il riutilizzo locale delle acque diventerà sempre più fondamentale nella futura gestione delle risorse idriche a livello urbano, e questo non solo nelle aree a conclamata scarsità d'acqua. Inoltre, i problemi relativi alle emissioni energetiche e ai gas serra stanno diventando sempre più ovvi grazie alla comprensione più approfondita del Nexus acqua-energia. La necessità inderogabile di modificare l'approccio alla gestione delle risorse idriche

per risolvere i problemi succitati è riconosciuta con evidenza sempre crescente. Eliminare l'acqua dalle acque reflue attraverso un uso appropriato della tecnologia disponibile potrebbe portare alla realizzazione di sistemi idrici urbani sostenibili, resilienti ed efficienti dal punto di vista energetico, in grado di recuperare risorse ed energia e fornire diversi tipi di acqua per usi locali selezionati.

Nota

Questo editoriale è basato su una più ampia pubblicazione dell'autore nella rivista *Water Environment Research*, giornale della Water Environment Federation, intitolata "Taking the water out of 'wastewater': an ineluctable oxymoron for urban water cycle sustainability" (<https://doi.org/10.1002/wer.1373>).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Callegari A., Capodaglio A.G. (2018) Properties and beneficial uses of (bio)chars, with special attention to products from sewage sludge pyrolysis. *Resources*, 7(1), 20. doi: 10.3390/resources7010020
- Capodaglio A.G. (2018) Could EB irradiation be the simplest solution for removing emerging contaminants from water and wastewater? *Water Practice and Technology*, 13(1), 172-183. doi: 10.2166/wpt.2018.027
- Capodaglio A.G., Olsson G. (2020) Energy issues in sustainable urban wastewater management: use, demand reduction and recovery in the Urban Water Cycle. *Sustainability*, 12(1), 266. doi: 10.3390/su12010266
- Daneshgar S., Callegari A., Capodaglio A.G., Vaccari D. (2018) The Potential Phosphorus Crisis: Resource Conservation and Possible Escape Technologies: A Review. *Resources*, 7, 37.
- Engin G.O., Demir, I. (2006) Cost analysis of alternative methods for wastewater handling in small communities. *Journal of Environmental Management* 79, 357-363. doi: 10.1016/j.jenvman.2005.07.011
- Florentino A.P., Sharaf A., Zhang L., Liu Y. (2019) Overcoming ammonia inhibition in anaerobic blackwater treatment with granular activated carbon: the role of electroactive microorganisms. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 5, 383-396. doi: 10.1039/c8ew00599k
- Fraunhofer IGB (2016) Guideline: Vacuum sewer systems. Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB. Stuttgart, Germany
- Gajaraj S., Huang Y., Zheng P., Hu Z. (2016) Methane production improvement and associated methanogenic assemblages in bioelectrochemically assisted anaerobic digestion. *Biochemical Engineering Journal*, 117, 105-112. doi: 10.1016/j.bej.2016.11.003
- Gao M., Zhang L., Florentino A.P., Liu Y. (2019) Performance of anaerobic treatment of blackwater collected from different toilet flushing systems: Can we achieve both energy recovery and water conservation? *Journal of Hazardous Materials*, 365, 44-52. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.10.055
- Henze M. (2019) Wastewater characterization. In "Online course on biological wastewater treatment: principles, modelling and design". IHE Delft. Retrieved from: <https://ocw.un-ihe.org/> (accessed 31 October 2019).
- Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J., Matos J.S. (2002) The sewer as a bioreactor – a dry weather approach. *Water Science & Technology*, 45(3), 11-24. doi: 10.2166/wst.2002.0044
- Maurer M., Rothenberger D., Larsen T.A. (2005) Decentralised wastewater treatment technologies from a national perspective: At what cost are they competitive? *Water Sci. Tech*, 5, 145-154.
- Miszta-Kruk K. (2016) Reliability and failure rate analysis of pressure, vacuum and gravity sewer systems based on operating data. *Engineering Failure Analysis*, 61: 37-45. doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.07.034
- Opher T., Friedler E. (2016) Comparative LCA of decentralized wastewater treatment alternatives for non-potable urban reuse. *Journal of Environmental Management*, 182, 464-476. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.07.080
- Otterpohl R., Braun U., Oldenburg M. (2002) Innovative technologies for decentralised wastewater management in urban and peri-urban areas. In *Proceedings of the 5th Specialised Conference on Small Water and Wastewater Treatment Systems*, Istanbul, Turkey, 24-26 September 2002.
- Panfil C., Mirel I., Szgyarto I., Isacu M. (2013) Technical, economical, social and ecological characteristics of vacuum sewage system. *Environmental Engineering Management Journal*, 12, 1017-1022. doi: 10.30638/eemj.2013.125
- Shafiqul Islam M. (2017) Comparative evaluation of vacuum sewer and gravity sewer systems. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 8(1), 37-53. doi: 10.1007/s13198-016-0518-z
- Shizas I., Bagley D.M. (2004) Experimental Determination of Energy Content of Unknown Organics in Municipal Wastewater Streams. *Journal of Energy Engineering*, 130(2). doi: 10.1061/(ASCE)0733-9402(2004)130:2(45).
- Terryn I.C., Lazar G. (2016) Driving forces affecting the adoption of Eco-innovation: A survey on vacuum sewer systems. *Environmental Engineering Management Journal*, 15(3), 589-598. doi: 10.30638/eemj.2016.064
- Tervahauta T., Trang H., Hernández L., Zeeman, G., Buisman C.J.N. (2013) Prospects of Source-Separation-Based Sanitation Concepts: A Model-Based Study. *Water*, 5, 1006-1035. doi: 10.3390/w5031006
- UN-Water (2018) The United Nations World Water Development Report 2018. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. New York. Retrieved from: www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2018/
- USEPA (2017) 2017 Potable Reuse Compendium. Office of Ground Water and Drinking Water, Office of Water. U.S. Environmental Protection Agency EPA/810/R-17/002. Washington, DC.
- USEPA (2012) Guidelines for Water Reuse. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development. EPA/600/R-12/618. Cincinnati, Ohio.
- WEF (2017) The Water Reuse Roadmap. Water Environmental Federation, Alexandria, VA.