



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE



**N. 4/2023**



## Nel trattamento delle acque il massimo rispetto per l'ambiente

Da anni ci dedichiamo con passione  
allo sviluppo ed alla messa a punto  
di sistemi per la depurazione delle acque  
senza inquinare l'aria.

Ozono per ridurre i microinquinanti,  
ossigeno per eliminare gli aerosol per soluzioni  
a scala reale e sperimentazioni a cura del nostro  
laboratorio di biologia e chimica ambientale.

Gruppo SIAD.  
Technical gases, Engineering,  
Healthcare, LPG and Natural Gas.

[thesiadgroup.com](http://thesiadgroup.com)

 **SIAD**



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

## INDICE



VOL. 10  
NUM. 4  
2023

Ingegneria  
dell'Ambiente  
per il 2023  
è sostenuta da:



WISE



### Editoriale

- 239** Il contenimento del consumo di suolo mediante il risanamento e il recupero di siti contaminati e aree degradate: criticità e opportunità  
*Carlo Collivignarelli, Maurizio Tira, Mentore Vaccari*

### Articoli

- 242** La sostenibilità ambientale ed economica del trattamento dei fanghi di depurazione: evidenze dalla letteratura  
*Stefano Puricelli, Andrea Franzoni, Marco Traversi, Mariasole Bannò, Roberto Canziani, Mario Grosso, Lucia Rigamonti*
- 262** Valutazione di un servizio di pulizia professionale in ambito civile: analisi comparativa microbiologica ed ambientale tra metodi tradizionali e "green"  
*Asia Rosatelli, Erika Bruno, Luciano Vogli, Beatrice Bandera, Cesare Buffone, Andrea Franzetti*
- 272** Rassegna ed analisi delle variabili che influenzano le emissioni di ammoniaca dal settore zootecnico  
*Elisabetta Angelino, Anna Gilia Collalto, Alessandro Marongiu*

### Comunicazioni tecnico-scientifiche

- 287** Il futuro dell'acqua e la nuova direttiva europea: tecnologie innovative e risparmio energetico  
*Domiziano Ivan Basilico, Elisabetta Vacchelli*
- 291** Economia circolare e sostenibilità locale: opportunità e vincoli per le piccole medie imprese italiane  
*Chiara Fabris, Anna Mazzi*
- 303** Sintesi del seminario di studio di ingegneria sanitaria-ambientale "esperienze di economia circolare applicata al trattamento dei rifiuti"  
*Carlo Collivignarelli, Giorgio Bertanza, Sabrina Sorlini, Mentore Vaccari, Alessandro Abbà, Claudio De Rosa*

### Pubbliredazionali

- 305** Sonde e apparecchiature da campo CID per rilevare: COD, SST, tensioattivi, volume e velocità di sedimentazione dei fanghi  
*Arcangelo Ventura, Davide Ventura, Carlo Ventura*

### Rubriche

- 310** Informazioni dalle aziende



**Direttore responsabile**Stefano Caserini (*Università di Parma*)**Direzione scientifica**Stefano Caserini (*Università di Parma*)Elena Sezenna (*Politecnico di Milano*)Roberto Canziani (*Politecnico di Milano*)**Comitato scientifico**Manuela Antonelli (*Politecnico di Milano*)Arianna Azzellino (*Politecnico di Milano*)Vincenzo Belgiorno (*Università di Salerno*)Giorgio Bertanza (*Università di Brescia*)Gianluigi Buttiglieri (*Catalan Institute for Water Research, Girona, Spagna*)Andrea Capodaglio (*Università di Pavia*)Alessandra Carucci (*Università di Cagliari*)Stefano Cernuschi (*Politecnico di Milano*)Paola Crippa (*Università di Notre Dame, USA*)Giovanni De Feo (*Università di Salerno*)Massimiliano Fabbri (*Università di Napoli Federico II*)Francesco Fatone (*Università Politecnica delle Marche*)Elena Ficara (*Politecnico di Milano*)Paola Foladori (*Università di Trento*)Mario A. Gandini (*Univ. Aut. de Occidente, Cali, Colombia*)Grazia Ghermandi (*Università di Modena e Reggio Emilia*)Daniele Goi (*Università di Udine*)Mario Grosso (*Politecnico di Milano*)Giovanni Lonati (*Politecnico di Milano*)Claudio Lubello (*Università di Firenze*)Francesca Malpei (*Politecnico di Milano*)Salvatore Masi (*Università della Basilicata*)Giulio Munz (*Università di Firenze*)Salvatore Nicosia (*Università di Palermo*)Senem Ozgen (*Laboratorio Energia e Ambiente, Piacenza*)Eleonora Perotto (*Politecnico di Milano*)Francesco Pirozzi (*Università di Napoli Federico II*)Alessandra Poletti (*Università di Roma La Sapienza*)Raffaella Pomi (*Università La Sapienza, Roma*)Marco Ragazzi (*Università di Trento*)Ezio Ranieri (*Politecnico di Bari*)Enrico Remigi (*DHI, Merelbeke, Belgio*)Lucia Rigamonti (*Politecnico di Milano*)Paolo Roccaro (*Università di Catania*)Francesco Romagnoli (*Riga Technical Univ., Riga, Lituania*)Diego Rosso (*University of California, Irvine, USA*)Sabrina Saponaro (*Politecnico di Milano*)Elena Sezenna (*Politecnico di Milano*)Fabio Tatano (*Università di Urbino*)Sergio Teggi (*Università di Modena e Reggio Emilia*)Davide Tonini (*JRC Siviglia*)Vincenzo Torretta (*Università dell'Insubria*)Mentore Vaccari (*Università di Brescia*)Paola Verlicchi (*Università di Ferrara*)Gaspere Viviani (*Università di Palermo*)Maria Chiara Zanetti (*Politecnico di Torino*)**Comitato di redazione**

Stefano Cernuschi, Arianna Azzellino, Mario Grosso,

Giovanni Lonati, Lucia Rigamonti, Elena Sezenna

**Segretaria di redazione**

Loredana Alaimo

**Grafica e impaginazione**

Loredana Alaimo

**INGEGNERIA  
DELL'AMBIENTE****N. 4/2023****Copyright**

I testi sono pubblicati da Ingegneria dell'Ambiente con la licenza CREATIVE COMMONS Attribuzione – Non commerciale – Condividi allo stesso modo 3.0 Italia (CC BY-NC-SA 3.0 IT)

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/it/deed.it>

Chiunque è libero di:

- *Condividere* – riprodurre, distribuire, comunicare al pubblico, esporre in pubblico, rappresentare, eseguire e recitare questo materiale con qualsiasi mezzo e formato;
- *Modificare* – remixare, trasformare il materiale e basarsi su di esso per le sue opere;

alle seguenti condizioni:

- *Attribuzione* – Deve essere attribuita adeguatamente la paternità del materiale, fornendo un link alla licenza e indicando se sono state effettuate modifiche. È possibile realizzare queste condizioni in qualsiasi maniera ragionevole, ma senza suggerire che il licenziante avalli il modo in cui il materiale è usato.
  - *Non Commerciale* – Non è possibile usare il materiale per scopi commerciali.
  - *Stessa Licenza* – Se si trasforma il materiale o ci si basa su di esso, è fatto obbligo di distribuire il contributo così prodotto con la stessa licenza del materiale originario.
- Il licenziante non può revocare questi diritti fintanto che i termini della licenza sono rispettati.

**Editore**

COLORSHADE

di Cabrini Matteo M., Via Cristoforo Colombo, 7, 20068 Peschiera Borromeo (MI), Italia.

• Redazione e pubblicità: Loredana Alaimo, Tel. 329.3126157, e-mail: [redazione@ingegneriadellambiente.net](mailto:redazione@ingegneriadellambiente.net)

• Registrata presso il Tribunale di Milano (n.108 del 21/3/2014)

• Per abbonamenti: Tel. 02.2847518, Fax 02.45482383, e-mail: [amministrazione@ingegneriadellambiente.net](mailto:amministrazione@ingegneriadellambiente.net)

• Per informazioni: Prof. Roberto Canziani, Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA), Sezione Ambientale, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, Tel. 02.23996410

– e-mail: [info@ingegneriadellambiente.net](mailto:info@ingegneriadellambiente.net)

Publicato on-line il 31 gennaio 2024.

Finito di stampare in **febbraio 2024**,

presso Colorshade di Cabrini Matteo M.,

Via Cristoforo Colombo, 7, 20068 – Peschiera Borromeo (MI)





Foto di Wolfgang Borchers da Pixabay.

## IL CONTENIMENTO DEL CONSUMO DI SUOLO MEDIANTE IL RISANAMENTO E IL RECUPERO DI SITI CONTAMINATI E AREE DEGRADATE: CRITICITÀ E OPPORTUNITÀ

**Carlo Collivignarelli, Maurizio Tira, Mentore Vaccari**

CeRAR – Centro di ricerca “Risanamento Ambientale e Recupero di aree degradate e siti contaminati”

Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e Matematica

Università degli Studi di Brescia

Le città italiane sono entrate da tempo in una fase del tutto nuova rispetto al passato. Questa fase si apre dopo alcuni decenni in cui le città hanno accompagnato un ciclo economico sostanzialmente espansivo, tradotto in una progressiva estensione dei territori urbanizzati.

Le urgenze poste dal cambiamento climatico e le esigenze legate alla rigenerazione urbana mettono in crisi lo sviluppo quantitativo, spingendo per una nuova progettazione urbana, in cui qualità, welfare e sostenibilità non siano solo dei titoli retorici, e in cui le risorse che il corpo sociale può mettere in campo vengano indirizzate a vantaggio di tutti.

Il tema della rigenerazione riguarda la città nel suo insieme, dal centro storico alla città diffusa, ed è neces-

sario prefigurare modelli di sviluppo fino ad ora sostanzialmente inesplorati, ma di cui possono intravedersi i contorni, ben sapendo che la rigenerazione urbana richiede un insieme d'interventi sincroni allo sviluppo economico, a partire dalle caratteristiche del contesto territoriale di riferimento nell'ottica della costruzione di una strategia di sviluppo economico locale.

I dati annuali sul monitoraggio del territorio mostrano che in Italia il consumo di suolo, invece di rallentare, tende ad accelerare, avendo raggiunto nel 2022 il picco degli ultimi 10 anni con circa 76,8 km<sup>2</sup> di nuove coperture artificiali (pari a circa 21 ettari al giorno; SNPA, 2023a). Le aree più critiche sono concentrate nelle zone periurbane e urbane, unitamente alle aree nell'intorno del sistema infrastrutturale. La

crescita delle superfici artificiali è stata solo in piccola parte compensata dal ripristino di aree naturali, che ha riguardato 6 km<sup>2</sup>, facendo risultare ancora lontano l'obiettivo di azzeramento del consumo di suolo netto, che, nel 2022, è quindi risultato pari a 70,8 km<sup>2</sup>, di cui 14,8 km<sup>2</sup> di consumo permanente. Gli impatti del consumo di suolo, come è noto, incidono fortemente sulla riduzione della capacità di adattamento al riscaldamento globale e sulla perdita di servizi ecosistemici, con un danno economico potenziale stimato in 7,8-9,5 miliardi di euro ogni anno.

In questo quadro, emerge con urgenza la tematica del recupero delle aree degradate, soprattutto quando esse necessitano di interventi di bonifica. Purtroppo, non esiste un censimento aggiornato ed esteso a tutto il territorio nazionale delle aree abbandonate; indagini ISTAT riferite al 2012 indicavano che le aree industriali dismesse in Italia rappresentano circa il 3% del territorio nazionale, con una superficie complessiva di circa 9.000 km<sup>2</sup>, il 30% dei quali collocati in ambito urbano. È disponibile, invece, un quadro aggiornato sui siti contaminati: quelli di competenza locale in cui è previsto o è in corso un intervento di bonifica sono 3065, cui si sommano 3263 siti potenzialmente contaminati e 42 Siti di Interesse Nazionale (SNPA, 2023b). L'estensione totale di tali siti ammonta a circa 200.000 ettari di terreni e 77.000 ettari di aree marine.

La diffusione e rilevanza dimensionale delle aree degradate e contaminate e la loro collocazione in aree urbane o periurbane le rende un terreno privilegiato su cui realizzare le principali trasformazioni urbane, soprattutto per contenere il consumo e l'impermeabi-

lizzazione di suolo vergine. La loro riqualificazione e rigenerazione territoriale rappresenta un'opportunità per migliorare la qualità di vita nelle città, aumentando la competitività dell'area e riducendo l'espansione urbana, nonché migliorando la qualità dell'ambiente e i servizi ecosistemici, con benefici consistenti per la collettività (Vaccari e Villani, 2021).

Il contenimento del consumo di suolo e il risanamento di aree degradate e siti contaminati non costituiscono obiettivi fini a sé stessi, ma i due aspetti sono collegati da finalità unitarie e convergenti. La bonifica, infatti, deve essere concepita come indispensabile fase intermedia in vista di un pieno recupero funzionale dell'area (contaminata o semplicemente degradata), che diventa il vero obiettivo finale, con conseguenti risparmio di suolo, sviluppo economico, benefici sociali, e che — con i relativi riflessi economici e sociali — deve fare da traino all'obiettivo intermedio (la bonifica).

Questo percorso virtuoso è oggi rallentato da numerosi ostacoli, prevalentemente di carattere normativo, procedurale ed economico, che possono essere superati con interventi mirati (CeRAR, 2020). Un esempio in tal senso è stata l'introduzione delle procedure semplificate per le operazioni di bonifica (art. 242 bis del 152/06), che consente di completarle con tempi sensibilmente inferiori rispetto alla procedura ordinaria (Araneo et al., 2023).

Ulteriori e urgenti interventi sono però necessari, come è emerso nel convegno "Il contenimento del consumo di suolo mediante il risanamento e il recupero di siti contaminati e aree degradate" organizzato dal CeRAR il 27 giugno u.s. presso il Consiglio Nazionale degli Ingegneri di Roma:



Foto di Tim Hill da Pixabay.

- è necessario prevedere un chiaro raccordo fra la disciplina in materia di bonifiche e quella urbanistica, la quale deve introdurre anche a livello statale degli strumenti finalizzati al contenimento del consumo di suolo e alla rigenerazione urbana;
- bisogna diversificare in modo significativo il regime applicabile alle situazioni di contaminazione storica;
- è urgente rivedere la coerenza dei vincoli nelle aree da salvaguardare: meno aree, ma più vincolate. Per esempio, andrebbe analizzato l'esito di vincoli indiretti, quali quelli della Legge "Galasso" (1985);
- lo stop al consumo di suolo non può essere disaccoppiato dal progetto di territorio: nelle aree urbane densificare è talvolta positivo, anche se si utilizzano suoli naturali; nelle aree pregiate vanno inaspriti i vincoli (si veda il punto precedente);
- bisogna rivedere le norme urbanistiche affinché le previsioni strategiche non implicino il versamento di imposte e siano così reversibili (definanziarizzazione dei diritti volumetrici);
- appare necessario introdurre procedure semplificate per la riqualificazione di siti industriali dismessi articolate in due fasi temporali: la prima, al termine dell'attività industriale, finalizzata alla messa in sicurezza del sito, la seconda, di completamento delle attività di dismissione, da attuarsi quando sarà stata individuata la destinazione finale del sito;
- bisogna estendere la dichiarazione di pubblica utilità alle aree degradate e dismesse ai fini dello sblocco/accelerazione delle attività di recupero;
- è necessario identificare meccanismi incentivanti per il riuso di aree antropizzate per la localizzazione dei nuovi investimenti, dando priorità ai siti bonificati e alle aree industriali dismesse, o parzialmente dismesse o in corso di conversione;
- bisogna assicurare una maggiore perentorietà dei termini nelle diverse fasi endo-procedimentali e ottenere dagli Enti proponenti la convocazione di Conferenze dei Servizi in modalità sincrona, anche con modalità telematica;
- bisogna imporre che anche gli Enti di controllo si attengano, in particolare in fase di collaudo, ai protocolli di campionamento e analisi concordati ed approvati nelle conferenze dei servizi;
- bisogna prevedere l'eliminazione delle Concentrazioni soglia di contaminazione nelle acque sotterranee per ferro, manganese e solfati dalla Tabella 2 dell'allegato 5 al titolo V Parte VI del D.Lgs 152/2006, in quanto la presenza di tali contaminanti è spesso imputabile a fenomeni naturali;
- si potrebbe riconoscere in capo ad ARPA la competenza al rilascio della certificazione di avvenuta bonifica, in sostituzione della certificazione provinciale.



Foto di falco da Pixabay.

Le proposte, formulate da relatori con lunga esperienza nel settore e condivise all'interno del centro di ricerca CeRAR, rappresentano una base di riferimento a cui, auspichiamo, il legislatore nazionale e, per quanto di competenza, quelli regionali possano riferirsi per modificare le norme vigenti al fine di favorire concretamente il risanamento e recupero funzionale dei siti bonificati e, con essi, il contenimento del consumo di suolo. ■

### Riferimenti bibliografici

- Araneo F., Bartolucci E., Pascarella F., Pinzin F., Vaccari M. (2023). *I tempi delle bonifiche: un fattore decisivo*. Convegno CeRAR "Il contenimento del consumo di suolo mediante il risanamento e il recupero di siti contaminati e aree degradate", 27 giugno 2023, Roma. Disponibile sul sito: <https://cerar.unibs.it>
- CeRAR (2020). *Proposte per favorire le bonifiche di siti contaminati in Italia*. Documento elaborato dal CeRAR – Centro di Ricerca "Risanamento ambientale e recupero di aree degradate e siti contaminati" dell'Università degli Studi di Brescia. Foroeuropa, n. 3, vol. 2020, ISSN 2038-5161. Disponibile sul sito <http://www.foroeuropa.it>
- SNPA (2023a). *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2023*. Report SNPA 37/23, ISBN 978-88-448-1178-5
- SNPA (2023b). *Lo stato delle bonifiche dei siti contaminati in Italia: secondo rapporto sui dati regionali*. Rapporti 387/23, ISBN 978-88-448-1166-2
- Vaccari M., Villani I. (2021). *Sostenibilità e benefici generati dagli interventi di risanamento e recupero di siti contaminati: analisi di un caso studio*. In "Siti contaminati. Esperienze negli interventi di risanamento", a cura di M.R. Boni, C. Collivignarelli, F.G.A. Vagliasindi, Ed. CSISA, Catania, febbraio 2021, pp.301-307, ISBN 88-7850-025-9

# LA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE ED ECONOMICA DEL TRATTAMENTO DEI FANGHI DI DEPURAZIONE: EVIDENZE DALLA LETTERATURA

Stefano Puricelli<sup>1,\*</sup>, Andrea Franzoni<sup>2</sup>, Marco Traversi<sup>2</sup>, Mariasole Bannò<sup>2</sup>, Roberto Canziani<sup>1</sup>, Mario Grosso<sup>1</sup>, Lucia Rigamonti<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale.

<sup>2</sup> Università degli Studi di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale.

## Sommario

I fanghi prodotti dal trattamento delle acque reflue urbane sono una tipologia di rifiuto che richiede un adeguato trattamento e smaltimento al fine di minimizzare odori, emissioni e possibile trasmissione di malattie. Oltre agli impatti ambientali, anche i costi hanno un ruolo di primo piano. Si è deciso pertanto di approfondire i temi della sostenibilità sia ambientale che economica del trattamento dei fanghi tramite una revisione della letteratura scientifica. Questa si compone di tre parti:

i) una revisione narrativa delle tecnologie per trattare i fanghi; ii) una revisione degli studi Life Cycle Assessment (LCA) pubblicati tra il 2010 e il 2020; iii) una revisione degli studi Life Cycle Costing (LCC) pubblicati tra il 2004 e il 2022. Sulla base della revisione di letteratura, è stato possibile trarre alcune indicazioni. La digestione anaerobica emerge come un metodo di pretrattamento che contribuisce a minimizzare gli impatti ambientali ed economici associati a qualsiasi trattamento a cui venga applicata. Non è stato possibile invece giungere a una conclusione in merito al confronto tra impatti ambientali della mono-combustione e dell'impiego agronomico. Sul fronte dei costi, la mono-combustione si configura come una delle opzioni più dispendiose per la gestione dei fanghi, mentre l'utilizzo in agricoltura risulta economicamente più vantaggioso. L'opzione di co-combustione con rifiuti mostra risultati positivi sia dal punto di vista ambientale sia economico. Il compostaggio si posiziona a metà strada tra le varie opzioni dal punto di vista ambientale, mentre è tra le scelte più convenienti dal punto di vista economico. Lo smaltimento in discarica è economicamente vantaggioso nel breve termine, ma ha benefici limitati nel lungo periodo. Inoltre, risulta spesso la soluzione meno favorevole nelle LCA. È rilevante infine sottolineare che i risultati degli studi LCA e LCC presentano una notevole variabilità e non possono essere facilmente generalizzati a qualsiasi contesto.

**Parole chiave:** *Life Cycle Assessment, Life Cycle Costing, trattamento acque, rifiuti, economia circolare, review.*

## THE ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC SUSTAINABILITY OF SEWAGE SLUDGE TREATMENT: EVIDENCE FROM THE LITERATURE

### Abstract

Wastewater sludges are the product resulting from the purification treatments applied to wastewater. These sludges, derived from sewage and industrial effluent treatment processes, may have potential beneficial uses, but they pose significant challenges due to their complex chemical composition and possible contaminations. This study aims to explore in detail various aspects related to wastewater sludges, with a primary focus on environmental and economic issues. This review consists of three parts: i) a narrative review of sludge treatment technologies; ii) a review of Life Cycle Assessment (LCA) studies published between 2010 and 2020; and iii) a review of Life Cycle Costing (LCC) studies published between 2004 and 2022. Based on the literature review, some indications can be drawn. One of the primary advantages of wastewater sludges is their potential use in agriculture as a fertilizer. These sludges contain essential nutrients such as phosphorus and nitrogen, which are valuable for plant growth. However, this approach can entail environmental risks if the sludges contain contaminants such as heavy metals, organic pollutants, or pathogens. Therefore, it is essential to carefully assess the composition of the sludges before considering their application in agriculture to prevent potential harm to the environment and human health. Furthermore, wastewater sludges can undergo various treatment methods, each with specific environmental and economic impacts. The use of methodologies such as Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Costing (LCC) is crucial for comprehensively evaluating these treatment options. LCA provides a detailed analysis of the environmental impacts associated with each treatment method. On the other hand, LCC examines the costs associated with these processes. A review of scientific literature reveals several noteworthy

\* Per contatti: Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano. Tel 02.23996406. E-mail stefano.puricelli@polimi.it

Ricevuto il 13-10-2023. Correzioni richieste il 3-12-2023. Accettazione il 11-1-2024

trends and significant findings related to wastewater sludge management. For instance, anaerobic digestion emerges as a beneficial pre-treatment method, as it not only reduces the volume of sludge but also produces biogas, a renewable energy source. This method is advantageous in terms of both environmental and economic impacts. Another treatment option is land spreading on agricultural fields, which is economically advantageous due to reduced disposal costs. However, it raises environmental concerns, particularly regarding potential soil and groundwater contamination. Therefore, careful consideration of environmental safeguards is necessary when implementing this approach. Co-incineration of sludges with other waste streams appears to be a promising solution, yielding positive results from both environmental and economic perspectives. It not only reduces the volume of sludge but also harnesses the energy content of the sludge for power generation. This approach contributes to resource recovery and waste-to-energy efforts. Composting is another option that falls within the average range for environmental impacts and is often cost-effective. It involves the biological decomposition of sludges into stable organic matter, which can be used as soil conditioner or fertilizer. However, its feasibility depends on the local conditions and on the availability of appropriate infrastructure. On the other hand, landfill disposal results the most cost-effective short-term option for sludge management. However, it raises serious environmental

concerns, as it can contribute to soil and groundwater pollution, release greenhouse gases, and occupy valuable land resources. The extent of these impacts can vary significantly depending on the disposal site, the treatment of the sludge before landfilling, and the implementation of mitigation measures. It is important to emphasize that the results of LCA and LCC studies can vary considerably depending on local conditions, the technology used, and the composition of the sludges. Therefore, conducting specific assessments for each case and carefully considering the trade-offs between environmental and economic impacts is essential. In conclusion, the management of wastewater sludges is a complex challenge that requires a holistic approach. LCA and LCC methodologies provide valuable tools for evaluating treatment and disposal options comprehensively, enabling better decision-making based on specific local circumstances. Ongoing research in this field is crucial for developing increasingly sustainable and efficient solutions for wastewater sludge management. By considering the delicate balance between environmental protection and economic feasibility, we can work towards a more sustainable and responsible approach to managing wastewater sludges, reducing their environmental impact, and maximizing their potential benefits.

---

**Keywords:** *Life Cycle Assessment, Life Cycle Costing, wastewater treatment, waste, circular economy, review.*

---

## 1. Introduzione

I fanghi prodotti dal trattamento delle acque reflue urbane, nel proseguo denominati semplicemente “fanghi”, sono una tipologia di rifiuto speciale che richiede un adeguato trattamento e smaltimento al fine di minimizzare odori, emissioni e trasmissione di malattie. Oltre agli impatti ambientali, anche i costi di gestione hanno un ruolo di primo piano, dato che lo smaltimento dei fanghi pesa mediamente tra il 15% e il 40% sui costi di gestione di un impianto di depurazione delle acque reflue (Canziani, 2016). I fanghi sono il risultato di una catena di trattamenti applicati ai materiali sedimentati nelle vasche di trattamento delle acque reflue: ispessimento, igienizzazione, condizionamento, stabilizzazione aerobica o anaerobica, disidratazione, eventuale essiccamento e stoccaggio. I tipi di trattamento utilizzati in Europa sono: utilizzo agronomico (34%), incenerimento (31%), compostaggio “e altre applicazioni” (12%), discarica (12%) e altri utilizzi (10%) (EEA, 2022). Le scelte variano fortemente da nazione a nazione. In Italia, le destinazioni principali sono la discarica (48%) e l’a-

gricoltura (33%), con il restante quantitativo inviato a trattamenti termici e altre forme di recupero (e.g., compostaggio, riciclo come gessi di defecazione, materiali per fornaci e cementifici) (Canziani, 2016; Merzari et al., 2019). A causa dei limiti sempre più stringenti sugli scarichi degli impianti di depurazione delle acque reflue e della progressiva estensione del collettamento fognario, la produzione di fanghi è destinata ad aumentare (Malacrida e Di Cosmo, 2015). Non sono tuttavia da escludere contestuali riduzioni della quantità di fanghi, grazie all’utilizzo di sistemi biologici a membrana, impianti a fanghi attivi a basso carico e tecniche di minimizzazione (Collivignarelli, 2021).

In ottica di una riduzione degli impatti associati al trattamento dei fanghi, si è deciso di approfondire i temi della sostenibilità ambientale ed economica per mezzo di una revisione della letteratura scientifica. Nello specifico, sono stati passati in rassegna articoli che applicano le metodologie del Life Cycle Assessment (LCA) e del Life Cycle Costing (LCC), le quali consentono di valutare efficacemente gli impatti ambientali e i costi legati alle modalità di trattamento dei fanghi.

## 2. Materiali e metodi

La revisione della letteratura si compone di tre parti: i) una revisione narrativa delle tecnologie per trattare i fanghi; ii) una revisione sistematica degli studi LCA applicati al trattamento dei fanghi; iii) una revisione sistematica degli studi LCC applicati al trattamento dei fanghi. Le revisioni sono state impostate con modalità differenti, come spiegato di seguito. Questo articolo, infatti, nasce come accorpamento di lavori distinti eseguiti nell'ambito del progetto "Forme Avanzate di Gestione dei fanghi di depurazione in un Hub Innovativo lombardo (FANGHI)" (Regione Lombardia, 2023).

### 2.1. Metodologia della revisione delle tecnologie di trattamento fanghi

Questa revisione si configura come revisione narrativa e offre una panoramica critica dell'argomento, includendo anche un excursus sulle tecniche di minimizzazione dei fanghi.

### 2.2 Metodologia di selezione degli studi LCA

Gli articoli sono stati scelti ricorrendo a due recenti revisioni sistematiche degli studi di LCA applicati al trattamento dei fanghi. In particolare, Teoh e Li (2020) hanno analizzato 67 LCA, mentre Ding et al. (2021) ne hanno incluse 37. Partendo quindi dagli studi analizzati da Teoh e Li (2020) e Ding et al. (2021), ne sono stati selezionati 35, limitando il periodo di pubblicazione al decennio 2010-2020. Il requisito per includere un articolo nell'analisi era la presenza di almeno uno scenario concernente le tecnologie analizzate nel progetto FANGHI: mono-combustione; co-combustione; utilizzo agricolo; digestione anaerobica; e carbonizzazione idrotermica (HTC). Dalle pubblicazioni selezionate sono state estratte le seguenti informazioni, presentate successivamente in Tabella 2:

- riferimento bibliografico (autori e anno di pubblicazione);
- metodo di valutazione degli impatti/categorie di impatto;
- metodi di trattamento dei fanghi;
- principali risultati ottenuti;
- contesto geografico oggetto di analisi.

### 2.3. Metodologia di selezione degli studi LCC

In questo caso gli articoli sono stati scelti seguendo la procedura proposta da Tranfield et al. (2003). Per identificare le potenziali fonti da esaminare sono stati utilizzati due database: Scopus e Web Of Science. Data la scarsa quantità di articoli individuati, non sono state inserite limitazioni riguardo al periodo di pubblicazione. La costituzione della stringa di ricerca è stata oggetto di discussione e dibattito tra gli autori e le autrici. Ciò ha permesso di superare la mancanza di uno

"studio di scoping" preliminare come raccomandato da Tranfield et al. (2003). L'obiettivo è stato anche di valutare la dimensione e la rilevanza della letteratura e ottenere criteri oggettivi per delimitare l'argomento della revisione (Nguyen et al., 2020). La stessa stringa di ricerca è stata utilizzata sia per Scopus sia per Web Of Science, ed è la seguente:

- (( lcc OR ( life AND cycle AND cost\* )) AND sewage AND sludge ))

La ricerca in Scopus e Web of Science, dopo aver eliminato i doppi, ha prodotto un set iniziale di 206 pubblicazioni. A seguito di un processo di selezione condiviso dagli autori e dalle autrici, sono state individuate 20 pubblicazioni ritenute coerenti con gli obiettivi dello studio. Ulteriori informazioni riguardo ai processi di individuazione e selezione delle pubblicazioni sono disponibili nel materiale supplementare.

Gli studi analizzati hanno tutti come focus di indagine l'applicazione dell'LCC ai trattamenti applicati ai fanghi di depurazione. Nonostante ciò, gli studi differiscono tra loro in base ai trattamenti applicati, che siano incenerimento, spandimento in agricoltura, smaltimento in discarica, digestione anaerobica, ecc. o ancora la combinazione di diversi trattamenti. Per questo motivo è stata inserita in Tabella 3 una colonna dedicata alla definizione del trattamento utilizzato. Inoltre, lo studio dell'impatto economico di gestione, trattamento e smaltimento dei fanghi di depurazione risulta spesso molto complesso e il risultato può variare sensibilmente a seconda della zona geografica in cui viene effettuato (Foladori et al., 2010). Di conseguenza le pubblicazioni analizzate sono state caratterizzate anche in base al luogo geografico di studio (i.e., contesto geografico oggetto di analisi).

Riassumendo, dalle pubblicazioni selezionate sono state estratte le seguenti informazioni:

- riferimento bibliografico (autori e anno di pubblicazione);
- fasi di processo analizzate;
- risultati ottenuti;
- contesto geografico oggetto di analisi.

## 3. Risultati e discussione

### 3.1. Tecnologie per il trattamento dei fanghi e tecniche di minimizzazione

#### 3.1.1. Utilizzo agricolo

I fanghi vengono usati da secoli per ammendare e concimare i terreni coltivabili, riciclando in tal modo i nutrienti e le sostanze organiche derivanti dalla depurazione delle acque reflue. Lo spandimento dei fanghi in agricoltura migliora le proprietà del terreno in termini di pH, contenuto di humus, porosità, capacità di scambio cationico e ritenzione idrica (Lederer e Rechberger, 2010). L'apporto di materia organica contra-

sta il processo di desertificazione del terreno provocato dalle coltivazioni monoculturali intensive e rende il terreno più fertile. I fertilizzanti chimici reintegrano il terreno degli elementi nutritivi ma, a differenza dei fertilizzanti organici, non forniscono materia organica. L'utilizzo agricolo è normato in Europa con la Direttiva 86/278/EEC, recepita in Italia con il D.Lgs 99/1992. I fanghi possono essere spanti tal quali o dopo un processo di pretrattamento. I pretrattamenti più comuni includono la stabilizzazione chimica (con aggiunta di agenti alcalinizzanti), la stabilizzazione biologica (aerobica o anaerobica) e la produzione di gessi e carbonati di defecazione (rispettivamente, solfato di calcio e carbonato di calcio). Questi ultimi sono correttivi agricoli ottenuti tramite idrolisi mediante calce viva e successiva precipitazione tramite dosaggio, rispettivamente, di acido solforico o CO<sub>2</sub> (Regione Lombardia, 2022).

Il rischio di contaminazione del suolo non può però essere ignorato. I fanghi sono rifiuti contaminati da metalli pesanti, idrocarburi aromatici policiclici (IPA), diossine e furani (PCDD/F), policlorobifenili (PCB), alogeni organici adsorbibili (AOX), residui di prodotti detergenti e farmaceutici, prodotti per l'igiene personale, interferenti endocrini, steroidi sintetici, droghe, pesticidi, agenti patogeni (Ding et al., 2021; Kacprzak et al., 2017; Schnell et al., 2020), microplastiche (Binelli, 2021; Ding et al., 2021) e altri inquinanti. Tali inquinanti possono contaminare il suolo, le piante, e le acque sotterranee e di superficie. Per tale ragione, le normative dei singoli stati prevedono limiti di concentrazione degli inquinanti, limiti sulle quantità ammissibili di fango utilizzato per ettaro e precise regole relative allo spandimento (periodi, tipi di colture, ecc.). Con l'aumento dell'efficienza depurativa del trattamento acque e delle tecniche di rilevazione degli inquinanti, ci si aspetta un aumento nella contaminazione dei fanghi. Per tale ragione, unitamente al rischio di smaltimento illecito dei fanghi nei terreni agricoli, i processi di trattamento termico dei fanghi stanno guadagnando crescente importanza fra i Paesi sviluppati. Questi processi infatti permettono di distruggere i componenti organici e non impediscono il successivo recupero del fosforo. È tuttavia importante che la sostanza organica prelevata dai terreni coltivati possa ritornare al terreno, per evitarne un progressivo deterioramento qualitativo. In quest'ottica, una strategia potrebbe essere quella di destinare all'utilizzo agricolo soltanto fanghi di alta qualità, ossia fanghi sottoposti a valori limite particolarmente restrittivi; tale concetto è presente, ad esempio, nella legislazione lombarda (Regione Lombardia, 2022). Un'altra strategia è l'uso del compost da fanghi come ammendante per terreni non dedicati alla catena alimentare (Liu et al., 2013).

### 3.1.2. Incenerimento

Si parla di mono-combustione quando i fanghi vengono inceneriti da soli. Si parla di co-combustione quando i fanghi vengono inceneriti assieme ad altro materiale combustibile in termovalorizzatori di rifiuti, cementifici o centrali a carbone.

A livello globale, per la mono-combustione dei fanghi ci si avvale tipicamente di forni a letto fluido (Schnell et al., 2020). Altre tecnologie utilizzate sono il forno rotativo, il forno a piani multipli e il forno a griglia. Le ceneri, pari a circa il 30% della sostanza secca iniziale (Aradelli e Cantù, 2016), sono composte principalmente da silice, ossido di alluminio, ossido di ferro, ossido di calcio e fosfato (Schnell et al., 2020), mentre i metalli pesanti sono immobilizzati e resistenti alla lisciviazione (Aradelli e Cantù, 2016). Le ceneri vengono smaltite in discarica, usate come fertilizzante in agricoltura (a seconda del contenuto di metalli pesanti), o come materiale per la produzione di sottofondi stradali e manufatti per l'edilizia (Collivignarelli, 2021; Đurđević et al., 2019). La mono-combustione dei fanghi è una promettente alternativa all'utilizzo agricolo per il recupero del fosforo, un elemento richiesto per la produzione di fertilizzanti, mangimi e detergenti. L'importanza del recupero di fosforo è dovuta alla limitata disponibilità delle rocce fosfatiche dette fosforiti, destinate a esaurirsi entro la fine del ventiduesimo secolo (Pradel e Aissani, 2019).

Circa il 70% delle riserve è localizzato in Marocco e Sahara Occidentale, il che può creare rischi di approvvigionamento in caso di crisi geopolitiche (Pradel e Aissani, 2019). Il recupero e riutilizzo del fosforo contenuto nei fanghi non è motivato soltanto dal previsto esaurimento delle riserve naturali, ma anche dal progressivo declino della qualità delle rocce fosfatiche estratte, contaminate inoltre da sostanze pericolose come il cadmio e l'uranio (Lederer e Rechberger, 2010). Il prezzo del fosforo è destinato quindi ad aumentare a causa della maggiore difficoltà di reperire fosforo di adeguata qualità (Pradel e Aissani, 2019), con conseguenti ricadute anche sui prezzi del cibo. Inoltre, il recupero di fosforo dai fanghi riduce gli impatti ambientali connessi all'estrazione di fosforo dalle miniere. Si stima che il fosforo potenzialmente recuperabile dai fanghi in UE corrisponda allo 0,6-6% del fosforo nei fertilizzanti usati in UE nel 2018 (EEA, 2022). Risulta pertanto chiaro che per ridurre l'uso dei fertilizzanti minerali non basterà fare affidamento ai soli fanghi ma bisognerà riciclare nutrienti anche tramite letame, acque depurate e altre soluzioni.

Una disamina delle possibilità di recupero del fosforo da acque di scarico e fanghi è riportata in Egle et al. (2016), mentre un elenco delle opzioni tecnologiche

che per il recupero del fosforo è disponibile su <https://phosphorusplatform.eu/activities/p-recovery-technology-inventory>.

Il recupero di fosforo dalle ceneri ha complessivamente minori impatti ambientali rispetto al recupero dalla fase liquida e dai fanghi non inceneriti, secondo lo studio di Amann et al. (2018).

La co-combustione, al contrario della mono-combustione, non necessita della costruzione di un nuovo impianto realizzato ad hoc e può beneficiare di impianti esistenti condotti da personale già esperto. Un elemento di svantaggio risiede nel fatto che il recupero di fosforo dalle ceneri da co-combustione è difficoltoso poiché la cenere originata dai fanghi risulta mescolata alle ceneri originate dagli altri materiali. In aggiunta, vi sono dei limiti tecnici alla quantità di fango miscelabile, per via dell'aumento di emissioni inquinanti e, nel caso dei cementifici, del possibile peggioramento della qualità del materiale prodotto (Aradelli e Cantù, 2016). Nei cementifici, il preventivo essiccamento dei fanghi è normalmente richiesto a causa dei problemi che un alto contenuto di acqua può arrecare durante la cottura del clinker (Schnell et al., 2020). L'uso di fango nei cementifici è limitato dal fosforo, che può peggiorare la qualità del clinker, e dal mercurio, problematico in termini di emissioni a causa della sua elevata volatilità (Schnell et al., 2020). Nei termovalorizzatori di rifiuti, i fanghi possono essere co-inceneriti dopo essere stati disidratati, parzialmente essiccati o completamente essiccati. Nel primo caso sono utili a compensare l'alto potere calorifico del rifiuto, mentre nel secondo e terzo caso sono più facilmente miscelabili; nel terzo caso, tuttavia, la loro granulometria fine tende a farli cadere attraverso la griglia (Schnell et al., 2020). Nelle centrali a lignite e antracite i fanghi possono essere co-inceneriti, seppur con alcune limitazioni legate alla composizione dei fumi e alla contaminazione dei residui. Un vantaggio delle centrali a lignite rispetto a quelle ad antracite è che i fanghi disidratati possono essere essiccati insieme alla lignite, nei mulini per carbone (Schnell et al., 2020). Visto il previsto progressivo abbandono delle centrali a carbone, è comunque ragionevole attendersi un declino della co-combustione dei fanghi in tali centrali.

### 3.1.3. Pirolisi

La pirolisi è un processo endotermico di degradazione termica che avviene in assenza di agente ossidante (atmosfera inerte). Il fango richiede un preventivo essiccamento (Kwapinski et al., 2021; Schnell et al., 2020) fino al 90% di sostanza secca (Regione Lombardia, 2022). La pirolisi può considerarsi come una tecnologia autonoma ma è bene ricordare che la fase di pirolisi precede sempre le fasi di combustione e

gassificazione. Le proporzioni fra il prodotto gassoso (gas non condensabili), liquido (bio-olio o tar) e solido (biochar) dipendono dai parametri di reazione.

I vapori condensabili tramite raffreddamento formano bio-olio. Il bio-olio può essere convertito in diversi tipi di combustibile o in materia prima per l'industria chimica tramite vari processi chimici e catalitici (Aradelli e Cantù, 2016; Brown e Brown, 2013; Ibarra-Gonzalez e Rong, 2019; Vienesu et al., 2018). La combustione dei gas non condensabili fornisce, in tutto o in parte, il calore necessario per riscaldare il reattore di pirolisi (Schnell et al., 2020). Il residuo solido può essere usato come fertilizzante, se conforme ai relativi limiti normativi e se richiesto dal mercato. Rispetto al fosforo presente nelle ceneri da incenerimento, tuttavia, nel caso del biochar bisogna tenere in conto una minore disponibilità per le piante (Schnell et al., 2020). Il biochar, in aggiunta, può essere sfruttato energeticamente in quanto è un prodotto carbonaceo combustibile. Infine, può prestarsi all'utilizzo come adsorbente per la rimozione di inquinanti (Regione Lombardia, 2022). In confronto all'incenerimento, la maggiore complessità tecnica, la minore capacità di trattamento e i maggiori costi hanno limitato l'utilizzo della pirolisi a un basso numero di impianti commerciali (Aradelli e Cantù, 2016; Schnell et al., 2020).

### 3.1.4. Gassificazione

La gassificazione è un processo termico che converte il fango mediante ossidazione parziale a opera di quantità controllate di aria, ossigeno e/o vapore. Gli agenti gassificanti convertono il fango a gas leggeri come CO e H<sub>2</sub>. I prodotti della conversione sono: gas di sintesi (syngas), sostanze condensabili (tar) e biochar. Il prodotto principale è il syngas, una miscela di gas i cui costituenti principali sono CO, H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>. Il syngas, dopo raffreddamento e purificazione, può alimentare caldaie, motori e turbine a gas, sistemi di cogenerazione, o può essere sfruttato mediante co-combustione. Inoltre, potrebbe essere utilizzato per produrre idrocarburi paraffinici. Il calore necessario viene fornito, in tutto o in parte, dalle reazioni di ossidazione parziale. Il fango può essere gassificato anche con un tenore di secco del 25% (Aradelli e Cantù, 2016; Kwapinski et al., 2021), ma la gassificazione è migliore con un fango preventivamente essiccato (Aradelli e Cantù, 2016; Schnell et al., 2020). Un processo ottimale di gassificazione produce un syngas ricco in H<sub>2</sub>, povero di gas inerti e privo di sostanze dannose per i catalizzatori, particelle e gas condensabili (Pearson e Turner, 2012). Come per la pirolisi, il biochar può essere utilizzato come fertilizzante se conforme ai relativi limiti di legge. Inoltre, anche in questo caso si osserva una ridotta disponibilità del fosforo per le piante (Kwapinski et al., 2021). La gas-

sificazione non è ancora una tecnologia tecnicamente matura per i fanghi (Schnell et al., 2020) e lo si denota dal basso numero di impianti dedicati.

### 3.1.5. Carbonizzazione idrotermica

La carbonizzazione idrotermica (hydrothermal carbonisation, HTC) è un processo termochimico utile per degradare biomasse a elevato contenuto di umidità come, per esempio, reflui zootecnici, fanghi municipali, fanghi dell'industria della carta e rifiuti del settore alimentare. Il processo avviene in acqua in assenza di os-

sigeno. Il preventivo essiccamento della biomassa non è quindi richiesto. L'HTC è tuttavia da considerare come un pretrattamento, che facilita le fasi di stabilizzazione e disidratazione. Infatti, l'HTC distrugge la struttura colloidale del fango e converte l'acqua legata (interna alle cellule) in acqua libera (Fiori, 2020). Inoltre, le alte temperature sterilizzano e quindi stabilizzano i fanghi. Il processo avviene in acqua a temperature comprese tra 180 e 250 °C, pressioni comprese tra 10 e 50 bar, pH acido (3-7) e tempi di residenza dell'ordine delle ore (Đurđević et al., 2019; Meisel et al., 2019; Sch-

**Tabella 1.** Panoramica degli altri processi di trattamento applicabili ai fanghi.

Tipologia	Processo	Descrizione
Processi basati sull'utilizzo di calore esterno	Essiccamento	Pretrattamento per ridurre umidità; riduce peso e volume, fino al 95% di tenore di secco (Teoh e Li, 2020); riduce costi di smaltimento.
	Condizionamento termico	Pretrattamento per migliorare disidratabilità e aumentare tenore dei solidi; a 170-250 °C per 15-60 minuti (Topal e Arslan, 2009); variante rapida fino a 220 °C per 10-30 secondi (Topal e Arslan, 2009).
	Idrolisi termica	Pretrattamento per migliorare digeribilità; anche chiamato THP – Thermal Hydrolysis Process o termolisi; a 160-165 °C e 7-9 bar per 20-30 minuti (Cambi ASA, 2022; Mills et al., 2014; Veolia Water Technologies, 2022); aumento biogas, aumento carico organico alimentare, distruzione patogeni e miglioramento disidratabilità; necessita di combustibili di supporto.
	Ossidazione a umido	Processo termico alternativo all'incenerimento; in acqua a 150-360 °C e 30-250 bar, usando ossigeno o aria (Fiori, 2020; Lombardi et al., 2017); sostanza organica trasformata principalmente in CO <sub>2</sub> e vapore acqueo; disidratazione preventiva non necessaria; supercritica o sub-critica se temperatura e pressione superiori o inferiori a 374 °C e 22,1 MPa (Aradelli e Cantù, 2016; Fiori, 2020); complessità gestionale, alti costi e immaturità tecnologica (Aradelli e Cantù, 2016).
	Liquefazione idrotermica / pirolisi idrotermica	Anche chiamata HTL – Hydrothermal Liquefaction o pirolisi idrotermica (Xiu et al., 2010); a 250-400 °C e 50-220 bar (Fiori, 2020; Teoh e Li, 2020); produzione di hydrochar e bio-olio.
	Gassificazione in acqua sub/supercritica	Sub/supercritica a temperature inferiori o superiori a 374 °C (Fiori, 2020); minor residuo solido rispetto ad HTC e liquefazione idrotermica.
	Sludge melting	Letteralmente: "fusione dei fanghi"; a 1.200-1.500 °C (Teoh e Li, 2020); combustione e solidificazione della materia inorganica rimanente a scoria vetrosa; distruzione inquinanti organici e stabilizzazione inquinanti inorganici.
Processi basati sullo sfruttamento di naturali processi biologici	Digestione anaerobica	Trattamento di stabilizzazione in assenza di ossigeno; riduce putrescibilità; produzione di biogas valorizzabile termicamente o trasformabile in biometano; fango digerito inviabile in agricoltura (tal quale o dopo pretrattamento) oppure a compostaggio.
	Digestione aerobica / compostaggio	Trattamento di stabilizzazione in presenza di ossigeno; riduce massa fango tramite conversione parziale in prodotti gassosi; co-digestione con rifiuto organico può incrementare rimozione di solidi volatili (Teoh e Li, 2020); compost utilizzabile come fertilizzante.
	Bioessiccamento	Processo aerobico alternativo all'essiccamento termico; sfrutta calore rilasciato dai microrganismi; riduce consumo di combustibili (Ciešlik et al., 2015); non è un processo di stabilizzazione (Winkler et al., 2013).
Processi basati sull'utilizzo di reagenti	Stabilizzazione chimica con calce	Riduce contenuto microbico e biodisponibilità di alcuni metalli pesanti (Teoh e Li, 2020); effetto temporaneo: dopo lo spandimento il pH scende a valori che consentono biodegradazione (Regione Lombardia, 2022); incremento di volume e peso.
	Produzione di materiali da costruzione	È possibile inglobare fanghi in clinker (per produrre cemento) o asfalto; è possibile produrre laterizi miscelando argilla.
	Ozonolisi	Ozono per idrolizzare fanghi; facilita digestione anaerobica (Peroni et al., 2022).

nell et al., 2020; Teoh e Li, 2020). Il pH acido fa sì che gran parte del fosforo venga trasferito alla fase liquida e possa eventualmente essere precipitato (Reißmann et al., 2021). L'HTC è caratterizzato da basse rese gassose e alte rese solide. Il residuo solido è un prodotto carbonaceo chiamato hydrochar, separabile dalla fase liquida e convertibile in pellet. L'hydrochar può potenzialmente essere usato come biocombustibile solido, adsorbente, ammendante del terreno e per produrre materiali avanzati (Fiori, 2020; Merzari et al., 2019). Il prodotto gassoso principale è CO<sub>2</sub> (>90%), ma in basse quantità (Kwapinski et al., 2021; Merzari et al., 2019). Il prodotto liquido separato deve essere smaltito o può essere valorizzato con la digestione anaerobica, in modo da sostenere il fabbisogno termico dell'HTC (Merzari et al., 2019). La tecnologia HTC, pur non essendo molto diffusa, è già presente su scala industriale.

### 3.1.6. Altri processi

Oltre alle tecnologie di trattamento fin qui esaminate, vi è un'ampia casistica di soluzioni tecniche applicabili ai fanghi che in Tabella 1 si vuole brevemente citare, per completezza. Alcuni processi possono essere classificati come pretrattamenti, altri come trattamenti veri e propri.

Infine, lo smaltimento dei fanghi in discarica è permesso, previo trattamento, ma la tendenza è quella di abbandonare tale pratica, conformemente alla gerarchia di gestione dei rifiuti.

### 3.1.7. Tecniche di minimizzazione

Come raccomanda la gerarchia della gestione dei rifiuti (Parlamento europeo e Consiglio europeo, 2008), la riduzione della produzione di fanghi è la strategia

da anteporre al recupero e smaltimento in discarica. La minimizzazione comprende tecniche già consolidate (stabilizzazione, disidratazione, essiccamento termico, ecc.), miglioramenti di tecniche consolidate (ispessitori dinamici, nuove centrifughe, nuove filtro-presse continue, nuove nastropresse ad alta pressione, ecc.) e nuove tecniche (idrolisi enzimatica, trattamento aerobico/anaerobico, ozonolisi, idrolisi termica, ossidazione a umido, trattamenti biologici termofili, ecc.) (Collivignarelli, 2021).

### 3.2. Studi LCA applicati al trattamento fanghi

La Tabella 2 riassume i risultati della revisione della letteratura riguardo l'applicazione della LCA ai metodi comunemente utilizzati per trattare i fanghi di depurazione. Vista la grande variabilità che caratterizza gli studi LCA, stilare una classifica tra i metodi di trattamento sarebbe un compito difficile e scientificamente non rigoroso. È possibile, tuttavia, riportare alcune riflessioni.

L'analisi della letteratura non ha permesso di addivenire a una conclusione univoca sull'annoso dualismo tra mono-combustione e utilizzo agronomico. L'utilizzo agronomico dei fanghi, digeriti o meno, comporta impatti che sono a volte minori e a volte maggiori di quelli della mono-combustione (Tabella 2). La co-combustione tende a fornire buoni risultati, a volte migliori dello scenario agronomico (Li et al., 2017a; Mills et al., 2014). Non emerge chiaramente se la co-combustione sia una scelta migliore della mono-combustione, anche per via delle molteplici applicazioni della co-combustione: cementifici, termovalorizzatori di rifiuti, fabbriche di mattoni e centrali a carbone (Tabella 2).

**Tabella 2.** Principali risultati degli studi di LCA sul trattamento dei fanghi pubblicati nella letteratura scientifica nel periodo 2010-2020 (modificato da Ding et al. (2021) e Teoh e Li (2020)). Sono stati selezionati i soli studi che includessero uno scenario fra mono-combustione, co-combustione, utilizzo agricolo, digestione anaerobica e HTC. Legenda: A = agricoltura, C = compostaggio, CC = co-combustione, CD = co-digestione anaerobica, D = discarica, DA = digestione anaerobica, DI = disidratazione, E = essiccamento, I = incenerimento, MC = mono-combustione, OU = ossidazione a umido, P = pirolisi, RSU = rifiuto solido urbano, SC = stabilizzazione chimica, THP = thermal hydrolysis process.

Fonte	Metodo di valutazione degli impatti / Categorie di impatto	Metodi di trattamento*	Principali risultati relativi alla LCA	Contesto geografico
Lederer e Rechberger (2010)	Tossicità umana, ecotossicità acquatica, ecotossicità di acque dolci, ecotossicità terrestre, emissioni di NO <sub>x</sub> in atmosfera, accumulo di metalli pesanti nel suolo, uso complessivo di risorse energetiche, recupero di P, efficienza di concentrazione di sostanze inquinanti.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DA + SC + A</li> <li>• DA + CC</li> <li>• DA + MC</li> </ul>	Utilizzo agricolo benefico con riferimento all'energia richiesta e al recupero di P, ma gli inquinanti organici non vengono distrutti; mono-combustione con utilizzo agricolo delle ceneri ha risultati complessivamente simili, ma distrugge gli inquinanti organici; mono-combustione con invio delle ceneri in discarica e co-combustione non permettono il recupero di P; mono-combustione con recupero di P dalle ceneri soluzione complessivamente più vantaggiosa.	Unione Europea

Fonte	Metodo di valutazione degli impatti / Categorie di impatto	Metodi di trattamento*	Principali risultati relativi alla LCA	Contesto geografico
Sablayrolles et al. (2010)	Uso delle risorse, acidificazione, eutrofizzazione, cambiamento climatico, riduzione dello strato di ozono, smog estivo, ecotossicità, tossicità umana.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• C + A</li> <li>• E + A</li> </ul>	Compostaggio da preferire, in quanto ha minori impatti dell'essiccamento in sei categorie di impatto su otto; compostaggio peggiore dell'essiccamento per le categorie di tossicità umana e riduzione dello strato di ozono.	Francia
Nakakubo et al. (2012)	Cambiamento climatico, recupero di fosforo, rischi per la salute umana.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MC</li> <li>• C + A</li> <li>• CC</li> <li>• carbonizzazione (P)</li> <li>• E + CC</li> <li>• CD + i precedenti metodi</li> <li>• CD + pirogassificazione</li> </ul>	Per emissioni di gas serra e recupero di P, la co-digestione di fango e della frazione organica del RSU dà migliori risultati che il trattamento separato dei due rifiuti; soluzione complessivamente migliore è pirogassificazione con recupero di P, a seguire il compostaggio; considerando i rischi per la salute, la prima soluzione causa minori emissioni di metalli pesanti.	Giappone
Cao e Pawłowski (2013)	Cambiamento climatico, consumo di energia primaria fossile.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• E + P</li> <li>• DA + E + P</li> </ul>	Scenario con DA preferibile sia per emissioni climalteranti che per consumo energetico; DA riduce richiesta energetica di disidratazione ed essiccamento; entrambi gli scenari evitano più emissioni climalteranti di quelle che producono.	Polonia
Hong et al. (2013)	ReGiPe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CC</li> </ul>	Produrre 1 GJ co-incenerendo fanghi in una centrale elettrica a carbone causa maggiori impatti ambientali rispetto a centrale a carbone in 15 su 18 categorie di impatto, a causa di ispessimento, disidratazione, trasporto e combustione fanghi, nonché smaltimento ceneri in discarica.	Cina
Liu et al. (2013)	Cambiamento climatico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• D</li> <li>• C</li> <li>• CC</li> <li>• MC</li> <li>• produzione di mattoni</li> <li>• cementificio</li> </ul>	Mono-combustione ha minor impatto su cambiamenti climatici, seguita da produzione di mattoni e compostaggio; compostaggio scelta ottimale sulla base di considerazioni ambientali, economiche e di fattibilità.	Cina
Righi et al. (2013)	Cambiamento climatico, acidificazione, eutrofizzazione, riduzione dello strato di ozono, formazione di ozono fotochimico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• D</li> <li>• CD + D</li> <li>• CD + C</li> </ul>	Co-digestione anaerobica con frazione organica del RSU, seguita da post-compostaggio del digestato, è l'opzione ambientalmente più sostenibile; riduzione volumi trasportati, risparmi energetici ed evitata produzione di fertilizzante chimico grazie a compost in agricoltura.	Italia
Wang et al. (2013)	IMPACT2002+	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DA + CC</li> <li>• DA + MC</li> <li>• DA + D</li> <li>• DA + carbonizzazione (P) + CC</li> </ul>	Carbonizzazione del fango e co-combustione del biochar con carbone complessivamente migliore soluzione, seguita da co-combustione con RSU, discarica e mono-combustione; co-combustione con RSU ha minor impatto sui cambiamenti climatici perché l'efficienza complessiva di recupero energetico è maggiore.	Taiwan

Fonte	Metodo di valutazione degli impatti / Categorie di impatto	Metodi di trattamento*	Principali risultati relativi alla LCA	Contesto geografico
Mills et al. (2014)	Cambiamento climatico, formazione di ozono fotochimico, eutrofizzazione, acidificazione, uso di risorse minerali, uso di risorse fossili.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DA + A</li> <li>• THP + DA + A</li> <li>• THP + DA + E + CC</li> <li>• THP + DA + E + P</li> </ul>	L'opzione di DA, essiccamento e co-combustione in centrale a carbone è la più sostenibile economicamente e ambientalmente, immediatamente seguita dall'opzione di DA, essiccamento e pirolisi; idrolisi termica prima di DA migliora prestazioni economiche e ambientali della sola DA.	UK
Xu et al. (2014)	ReCiPe, Impact 2002+.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• D</li> <li>• A</li> <li>• I</li> <li>• E + A</li> <li>• DA + i precedenti metodi</li> </ul>	Soluzione più adatta ambientalmente ed economicamente è DA con disidratazione e incenerimento del digestato; schema vincente grazie a riduzione volumetrica e recupero energetico in DA e incenerimento; discarica e incenerimento hanno, rispettivamente, più alti e bassi impatti ambientali; in tutti gli scenari le categorie di tossicità umana ed ecotossicità marina hanno i più alti impatti normalizzati.	Cina
Bertanza et al. (2015)	Cambiamento climatico, acidificazione, eutrofizzazione (di acque dolci, marina, terrestre), formazione di ossidanti fotochimici.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• OU + D</li> <li>• DA + I</li> </ul>	Ossidazione a umido con invio in discarica del residuo solido e DA del residuo liquido dà vantaggi ambientali ed economici rispetto a schema convenzionale di DA e incenerimento.	Italia
Lam et al. (2016)	Uso di suolo, cambiamento climatico, tossicità umana, acidificazione, eutrofizzazione.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• D</li> <li>• I + D</li> <li>• I + cementificio</li> <li>• DA + i precedenti metodi</li> </ul>	Scenari con preventiva DA complessivamente i meno impattanti; incenerimento preferibile a discarica; utilizzo delle ceneri in sostituzione del clinker preferibile a smaltimento in discarica; seguono, con medesimo ordine, gli analoghi scenari senza preventiva DA; DA riduce impatti grazie a riduzione volume da trattare e a recupero energetico.	Cina
Abuşoğlu et al. (2017)	IMPACT 2002 +	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DA + CC</li> <li>• DA + MC</li> </ul>	Mono-combustione in forno a letto fluido ha migliori performance di co-combustione in cementificio per gran parte delle categorie di impatto; co-combustione ha minore impatto su tossicità umana perché le ceneri vengono immobilizzate nel clinker, mentre in mono-combustione vengono inviate in discarica.	Turchia
Alyaseri e Zhou (2017)	ReCipe 2008	<ul style="list-style-type: none"> <li>• I</li> <li>• DA + E + D</li> <li>• DA + E + A</li> </ul>	Impatto totale più basso per DA e successivo invio a discarica del digestato; a seguire: incenerimento in forno a letto fluido con recupero energetico, DA e utilizzo agronomico del digestato, incenerimento in forno a piani multipli senza recupero energetico.	Usa
Li et al. (2017a)	Acidificazione, cambiamento climatico, uso di risorse abiotiche, ossidazione fotochimica, eutrofizzazione, tossicità umana, ecotossicità.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DA + A</li> <li>• E + I</li> <li>• E + CC</li> </ul>	Complessivamente, co-combustione in cementificio ha impatti minori; a seguire: mono-combustione, co-combustione in centrale a carbone, uso agronomico del digestato; ecotossicità vale 92-97% dell'impatto totale dello scenario agronomico, a causa dei metalli pesanti.	Cina
Li et al. (2017b)	Acidificazione, cambiamento climatico, uso di risorse abiotiche, ossidazione fotochimica, eutrofizzazione, tossicità umana, ecotossicità.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DA mesofila</li> <li>• DA termofila</li> <li>• DI + DA mesofila</li> <li>• DI + DA termofila</li> <li>• DI + idrolisi termica + DA</li> </ul>	Con fanghi ad alto contenuto organico (70% SV/TS), da impatto più basso a più alto: (disidratazione + DA termofila) < (DA termofila) < (disidratazione + idrolisi termica + DA) < (DA mesofila) < (disidratazione + DA mesofila); con fanghi a basso contenuto organico, scenario con idrolisi termica scende all'ultimo posto.	Cina

Fonte	Metodo di valutazione degli impatti / Categorie di impatto	Metodi di trattamento*	Principali risultati relativi alla LCA	Contesto geografico
Lombardi et al. (2017)	CML 2 baseline 2000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A</li> <li>• C + A</li> <li>• I</li> <li>• D</li> <li>• OU</li> </ul>	Agricoltura ha i minori impatti in 5 su 10 categorie e i maggiori in ecotossicità terrestre ed eutrofizzazione; incenerimento ha i minori impatti in 4 categorie e i maggiori in cambiamento climatico e riduzione dello strato di ozono; discarica ha i maggiori impatti in 3 categorie; ossidazione a umido ha i minori impatti in ecotossicità terrestre e i maggiori in 3 categorie; compostaggio ha risultati intermedi; rispetto a scenario in cui 78% dei fanghi è incenerito, 17% compostato, 2% utilizzato agronomicamente e 4% inviato in discarica, l'incenerimento totale dei fanghi riduce gli impatti in tutte le categorie.	Italia
Buonocore et al. (2018)	Cambiamento climatico, uso di risorse fossili, eutrofizzazione di acque dolci, tossicità umana, particolato, formazione di ossidanti fotochimici, acidificazione terrestre.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• D</li> <li>• DA + E</li> <li>• DA + E + gassificazione</li> </ul>	Soluzione più desiderabile è schema in cui il fango viene processato per produrre biogas (DA) e syngas (gassificazione del digestato essiccato) da bruciare per generare elettricità e calore; oli vegetali usati possono integrare richiesta di calore per essiccamento; categorie più impattate sono eutrofizzazione di acque dolci e tossicità umana.	Italia
Chiu e Lo (2018)	Cambiamento climatico, particolato, formazione di ossidanti fotochimici, acidificazione terrestre.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• I</li> <li>• DA + I</li> <li>• CD + I</li> </ul>	Trattamento di fanghi e scarti di cucina; scelta migliore è co-digestione, specialmente se il biogas viene valorizzato tramite impianto a ciclo combinato anziché tramite cogenerazione; scelta peggiore è invio a discarica degli scarti di cucina e delle ceneri dei fanghi inceneriti.	Cina
Do Amaral et al. (2018)	Cambiamento climatico, riduzione dello strato di ozono, formazione di ozono (ecosistemi terrestri), acidificazione terrestre, eutrofizzazione di acque dolci, ecotossicità (terrestre, in acque dolci), tossicità umana (effetti non cancerogeni).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DA + SC + A</li> <li>• DA + E + A</li> <li>• DA + E + I + A</li> <li>• DA + E + I + D</li> </ul>	Scenario base è l'uso agronomico di digestato stabilizzato con calce (senza recupero del calore da biogas); altri tre scenari (con recupero del calore del biogas) riducono impatti su cambiamenti climatici, ecotossicità terrestre e tossicità umana; incenerimento incrementa formazione di ozono e acidificazione terrestre, mentre uso agronomico di fango essiccato le riduce; no differenze statisticamente significative tra gli scenari per le altre categorie di impatto. (N.d.A., l'uso agronomico di fango essiccato risulta complessivamente la migliore opzione).	Brasile
Li e Feng (2018)	CML method, efficienza energetica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DA</li> <li>• E + P</li> <li>• DA + E + P</li> </ul>	DA è opzione migliore perché non necessita di energia per essiccamento termico; integrazione di DA e pirolisi è la seconda migliore opzione, seguita da pirolisi; energia ottenuta dalla combustione di bio-olio e gas di pirolisi non sufficiente a soddisfare il fabbisogno di energia dell'essiccamento.	Cina
Lishan et al. (2018)	Cambiamento climatico, acidificazione terrestre, eutrofizzazione di acque dolci, riduzione dello strato di ozono, tossicità umana, particolato, uso di risorse fossili.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• D</li> <li>• I</li> <li>• idrolisi termica + carbonizzazione (P)</li> <li>• C</li> </ul>	Tecnologia combinante idrolisi termica e pirolisi è la migliore, tenendo in conto gli impatti su cambiamento climatico e tossicità umana, costi di trattamento e smaltimento, consumo di suolo e commerciabilità dei sottoprodotti; a seguire: compostaggio, incenerimento di fango al 20%ss o invio in discarica di fango al 40%ss, e incenerimento di fango al 40%ss.	Cina

Fonte	Metodo di valutazione degli impatti / Categorie di impatto	Metodi di trattamento*	Principali risultati relativi alla LCA	Contesto geografico
Piippo et al. (2018)	Cambiamento climatico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• C + miscelazione con terriccio + landscaping</li> <li>• DA + A</li> <li>• I</li> <li>• E + I</li> </ul>	Conteggiando anche la CO <sub>2</sub> biogenica, in ordine da impatto più basso a più alto: (DA + agricoltura) < (incenerimento senza essiccamento termico o incenerimento dopo essiccamento termico con elettricità e vapore, tranne in uno dei sei impianti di trattamento acque, dove il compostaggio è seconda migliore opzione) < (incenerimento dopo essiccamento termico con elettricità e olio combustibile o compostaggio).	Finlandia
Rigamonti et al. (2018) (studio non pubblicato)	Cambiamento climatico, riduzione dello strato di ozono, tossicità umana (effetti cancerogeni, effetti non cancerogeni), particolato, formazione di ozono fotochimico, acidificazione, eutrofizzazione (terrestre, di acque dolci, marina), ecotossicità in acque dolci, uso di risorse minerali e fossili, uso di acqua, uso complessivo di risorse energetiche.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DA + A</li> <li>• E + I</li> </ul>	Scenario di incenerimento peggiorativo in 13/15 categorie di impatto, eccetto per tossicità umana (effetti non cancerogeni) e consumo di risorse idriche; migliorie impiantistiche e gestionali (principalmente il recupero di P dalle ceneri) riducono a 9/15 il numero delle categorie in cui incenerimento è peggiore dell'uso agricolo.	Italia
ten Hoeve et al. (2018)	ILCD	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DA + DI + A</li> <li>• DA + DI + E + I + A</li> </ul>	Focus su categorie di impatto più sensibili alla scelta del fattore di sostituzione del fosforo; consumo di risorse minerali più alto per scenario del fango disidratato rispetto a quello delle ceneri, causa maggior uso di metalli per costruzione attrezzatura per caricare e spandere il fango; scenario del digestato peggiore di quello delle ceneri sui cambiamenti climatici, principalmente per emissioni N <sub>2</sub> O.	Danimarca
Yoshida et al. (2018)	Tossicità umana (effetti cancerogeni, effetti non cancerogeni), ecotossicità, eutrofizzazione (di acque dolci, terrestre, marina), acidificazione terrestre, particolato, cambiamento climatico, formazione di ozono fotochimico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DA + A</li> <li>• SC + A</li> <li>• DA + I</li> </ul>	Incenerimento complessivamente migliore o analogo a scenari di uso agricolo, in particolare per tossicità umana, ecotossicità ed eutrofizzazione marina; negli scenari di uso agricolo, tossicità umana (effetti non cancerogeni) ed ecotossicità sono le categorie con i più alti impatti normalizzati; per entrambe le categorie, impatti dominati da emissione di zinco e rame nel terreno.	Danimarca
Barry et al. (2019)	Cambiamento climatico, ecotossicità in acque dolci.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• I</li> <li>• P</li> </ul>	Pirolisi trattamento migliore di incenerimento con recupero di energia elettrica, sia quando il biochar sostituisce fertilizzanti in agricoltura che lignite in cementificio; biochar ha minor tendenza a rilasciare metalli pesanti rispetto a ceneri e, in cementificio, i metalli pesanti vengono inglobati.	Canada
Chen et al. (2019)	Impact 2002+, Cumulative Energy Demand (CED)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• E + MC</li> <li>• E + CC</li> </ul>	Dal punto di vista ambientale, energetico ed economico, co-combustione con RSU (con autoconsumo di energia per l'essiccamento) è migliore di mono-combustione (senza autoconsumo di energia per l'essiccamento).	Cina

Fonte	Metodo di valutazione degli impatti / Categorie di impatto	Metodi di trattamento*	Principali risultati relativi alla LCA	Contesto geografico
Meisel et al. (2019)	Cambiamento climatico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A</li> <li>• DA + A</li> <li>• DA + HTC + A</li> <li>• I</li> <li>• DA + I</li> <li>• DA + HTC + I</li> </ul>	Aggiunta di HTC a filiere di incenerimento e di utilizzo agricolo non dà vantaggi in termini di gas serra e causa maggiori richieste energetiche; tuttavia, ricircolo frazione liquida da HTC a DA riduce significativamente le emissioni, permettendo a scenario agricolo di risultare migliore fra i 12 scenari.	Germania
Zhang et al. (2019)	Cambiamento climatico, acidificazione, formazione di ozono fotochimico, eutrofizzazione (terrestre, di acque dolci, marina).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DI meccanica + A</li> <li>• DI elettro-assistita + A</li> <li>• DI meccanica, E + I</li> <li>• DI elettro-assistita + E + I</li> </ul>	Per cambiamenti climatici, in ordine da impatto più basso a più alto: (disidratazione elettro-assistita, essiccamento e incenerimento) < (disidratazione meccanica e utilizzo agricolo) < (disidratazione meccanica, essiccamento e incenerimento) < (disidratazione elettro-assistita e utilizzo agricolo); disidratazione elettro-assistita riduce volume fanghi a spese di maggior consumo energetico e aumenta impatti delle categorie di acidificazione ed eutrofizzazione di acque dolci.	Italia
Lee et al. (2020)	Cambiamento climatico, acidificazione, eutrofizzazione, ecotossicità.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CD</li> <li>• D</li> <li>• C</li> <li>• CC</li> </ul>	Miscela di fanghi, rifiuti da cucina e rifiuti di giardino; co-digestione ha minori costi e impatti ambientali rispetto a discarica, compostaggio e incenerimento.	Usa
Morero et al. (2020)	Cambiamento climatico, acidificazione terrestre, eutrofizzazione di acque dolci, tossicità umana, formazione di ossidanti fotochimici, particolato, uso di suolo urbano, uso di acqua, uso complessivo di risorse energetiche.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DA + A</li> <li>• C</li> <li>• D</li> <li>• CD + A</li> </ul>	Rispetto a trattamento separato di fanghi e frazione organica del RSU tramite mix di DA, compostaggio e discarica, co-digerire la totalità dei rifiuti ha minori costi e impatti ambientali.	Argentina
Nakatsuka et al. (2020)	Cambiamento climatico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• E + DA + MC</li> <li>• E + CC</li> </ul>	Nello scenario base i fanghi vengono essiccati, sottoposti a DA e inceneriti presso il depuratore, mentre i RSU vengono inceneriti in un termovalorizzatore poco distante; rispetto allo scenario base, co-incenerire fanghi essiccati e RSU, inviando il calore recuperato a essiccamento, riduce costi del 35% ed emissioni di CO <sub>2</sub> dell'1%.	Giappone
Rostami et al. (2020)	ReCiPe, CML (baseline)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• C</li> <li>• I</li> <li>• D</li> </ul>	Sia per categorie di impatto midpoint che endpoint, compostaggio soluzione meno costosa e complessivamente meno impattante, eccetto per eutrofizzazione delle acque dolci.	Iran
Tarpani et al. (2020)	ReCiPe 1.08	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DA + A</li> <li>• C + A</li> <li>• I</li> <li>• E + P</li> <li>• OU</li> </ul>	Per ogni trattamento un intervallo di recupero di materia/energia (nullo, medio o massimo); DA ha minori impatti in 11/18 categorie di impatto; pirolisi con massimo tasso di recupero è seconda migliore opzione ma, con minori tassi di recupero, incenerimento diventa la seconda migliore alternativa; per tassi di recupero medio e massimo, compostaggio è peggiore alternativa; in confronto ai metalli pesanti, il contributo dei prodotti farmaceutici e per l'igiene personale sull'ecotossicità di acque dolci è trascurabile.	UK

\* Il processo di disidratazione è stato citato solo quando ritenuto necessario ad evidenziare le differenze fra gli scenari analizzati.

La digestione anaerobica risulta generalmente un pretrattamento che, grazie alla valorizzazione energetica del biogas e alla riduzione volumetrica conseguita, riduce gli impatti di qualsiasi catena di trattamenti a cui venga applicata (Tabella 2). L'aggiunta dell'HTC alle filiere di incenerimento e utilizzo agricolo non riduce le emissioni climalteranti (Meisel et al., 2019). Tuttavia, l'invio della frazione liquida a un processo di digestione anaerobica rende l'inserimento dell'HTC fortemente competitivo nel ridurre le suddette emissioni climalteranti (Meisel et al., 2019). Il compostaggio mostra risultati intermedi, risultando raramente l'alternativa migliore o peggiore (Lee et al., 2020; Lishan et al., 2018; Liu et al., 2013). L'essiccamento è un pretrattamento che, al contrario della digestione anaerobica, non è energeticamente autosufficiente; il suo utilizzo è indicato se vi sia un altro processo nelle vicinanze che possa inviargli energia di recupero.

Non è stato possibile trarre delle conclusioni in merito alla stabilizzazione chimica. L'invio dei fanghi a discarica è quasi sempre la soluzione peggiore. In alcuni casi però l'uso della discarica come destinazione dei residui di altri trattamenti risulta una scelta giustificata (Alyaseri e Zhou, 2017; Bertanza et al., 2015).

### 3.3. Studi LCC applicati al trattamento fanghi

La Tabella 3 riassume i risultati della revisione della letteratura riguardo l'applicazione dell'LCC ai metodi comunemente utilizzati per trattare i fanghi di depurazione. Innanzitutto, va sottolineato come lo studio

non si sia concentrato su una particolare zona geografica, bensì sull'intero panorama internazionale. In questo senso, la valutazione economica svolta in diverse condizioni geografiche può influenzare i risultati ottenuti, come già suggerito da più autori (Collivignarelli et al., 2020; Foladori et al., 2010).

Analizzando le metodologie di trattamento più comunemente utilizzate, si può affermare che l'incenerimento risulta essere l'opzione più onerosa (Lee et al., 2020; Lundin et al., 2004; Rostami et al., 2020; Xiao et al., 2022). Entrando più nel dettaglio, diversi studi propongono un confronto tra diverse opzioni di incenerimento, quali la mono-combustione di fanghi di depurazione, la co-combustione con rifiuti solidi urbani (RSU), la co-combustione in centrali a carbone e infine la co-combustione in cementifici (Chen et al., 2019; Hong et al., 2013; Li et al., 2013; Lundin et al., 2004; Xiao et al., 2022). A causa degli elevati investimenti iniziali richiesti, la valutazione LCC indica come la mono-combustione risulti l'alternativa nettamente più dispendiosa (Chen et al. 2019; Xiao et al. 2022). Al contrario, grazie ai sussidi ricevuti per lo smaltimento dei RSU, la co-combustione con RSU appare l'opzione più vantaggiosa da un punto di vista prettamente finanziario (Chen et al., 2019).

Passando alle metodologie di trattamento più economiche, si segnalano il compostaggio, lo spandimento in agricoltura e lo smaltimento in discarica (Rostami et al., 2020; Tarpani e Azapagic, 2018; Xiao et al., 2018; Zhuang et al., 2022;). Più nello specifico, lo smaltimento in discarica offre costi di investimen-

**Tabella 3.** Principali risultati degli studi di LCC sul trattamento fanghi pubblicati nella letteratura scientifica.

Legenda: A = agricoltura, C = compostaggio, CC = co-combustione, CD = co-digestione anaerobica, D = discarica, DA = digestione anaerobica, DI = disidratazione, E = essiccamento, I = incenerimento, MC = mono-combustione, OU = ossidazione a umido, P = pirolisi, RSU = rifiuto solido urbano, SC = stabilizzazione chimica, THP = thermal hydrolysis process.

Fonte	Metodi di trattamento*	Principali risultati relativi alla LCA	Contesto geografico
Lundin et al. (2004)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A</li> <li>• CC con RSU</li> <li>• MC con recupero di fosforo (Bio-Con)</li> <li>• frazionamento con recupero di fosforo (Cambi-KREPRO) + MC</li> </ul>	L'applicazione agricola presenta il costo più basso tra le opzioni valutate; la co-combustione presenta invece il costo più alto; minima differenza di costo tra Bio-Con e Cambi-KREPRO.	Svezia
Murray et al. (2008)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DI</li> <li>• DA</li> <li>• C</li> <li>• E</li> <li>• I</li> </ul>	La digestione anaerobica tecnologia di trattamento ottimale da un punto di vista economico; incenerimento opzione più onerosa tra quelle valutate.	Cina
Hong et al. (2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DI (con o senza DA)</li> <li>• C (con o senza DA)</li> <li>• E (con o senza DA)</li> <li>• D (con o senza DA)</li> <li>• A (con o senza DA)</li> </ul>	Gli LCC per gli scenari con digestione mostrano risultati migliori; incenerimento più economico rispetto a disidratazione ed essiccamento.	Giappone

Fonte	Metodi di trattamento*	Principali risultati relativi alla LCA	Contesto geografico
Hong et al. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CC</li> </ul>	Il beneficio economico ottenuto dalla co-combustione dei fanghi di depurazione all'interno di una centrale elettrica a carbone è generato principalmente dalle entrate derivanti dai fanghi e dai sussidi per l'elettricità; la riduzione del consumo di carbone ha contribuito in misura minima al beneficio economico.	Cina
Li et al. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Scenario 1: C, D, produzione di cemento.</li> <li>• Scenari alternativi, ottenuti tramite le seguenti modifiche: stabilizzazione mediante essiccamento, maggiore inclusione dei fanghi di depurazione nella produzione di cemento e utilizzo dei fanghi di depurazione essiccati o carbonizzati come combustibile sostitutivo per le centrali elettriche a carbone.</li> </ul>	Scenario 1 nettamente il più economico; le alternative incrementano i costi tra il 60% e il 95%; tra queste, i valori peggiori sono stati riscontrati per l'opzione che prevede una maggiore inclusione dei fanghi di depurazione per la produzione di cemento, sia per quanto riguarda i costi di trasporto, sia per quanto riguarda i costi operativi.	Cina
Xu et al. (2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• D</li> <li>• A</li> <li>• I</li> <li>• E + A</li> <li>• DA + i precedenti metodi</li> </ul>	Lo scenario combinato di trattamento dei fanghi con tecnologie di digestione anaerobica, disidratazione e incenerimento è il metodo più adatto dal punto di vista economico per trattare i fanghi di depurazione grazie al recupero energetico; anche la digestione anaerobica con seguente smaltimento in discarica ha ottimi risultati dal punto di vista economico.	Cina
Collet et al. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DA + tecnologia PtG (Power to Gas)</li> </ul>	Più l'elettricità è costosa, più lungo deve essere il tempo di funzionamento del processo di metanazione per essere competitivo con l'iniezione di metano dal biogas; la riduzione del consumo di elettricità della fase di elettrolisi riduce i costi di produzione.	Francia
Tarpani e Azapagic (2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DA + A</li> <li>• C</li> <li>• I</li> <li>• P</li> <li>• OU</li> </ul>	Digestione anaerobica, pirolisi e ossidazione ad aria umida possono operare con un profitto con i costi complessivi del ciclo di vita negativi se tutti i loro prodotti recuperati sono pienamente utilizzati; opzione migliore è il compostaggio; incenerimento è l'alternativa meno preferita.	UK
Xiao et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• THP</li> <li>• I</li> <li>• D</li> <li>• C</li> </ul>	Lo smaltimento in discarica presenta i costi minori, ma benefici ambientali più scarsi; il rapporto costo/beneficio analizzato consiglia fortemente l'impiego della tecnologia THP, seguito dal compostaggio e dall'incenerimento; il trattamento tramite incenerimento presenta i costi più elevati fra le alternative analizzate.	Cina
Chen et al. (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• E + MC</li> <li>• E + CC</li> </ul>	La co-combustione con RSU è l'alternativa più economica nonostante i maggiori investimenti iniziali, grazie ai sussidi ricevuti per lo smaltimento dei RSU che influiscono positivamente sul calcolo dei profitti.	Cina
Francini et al. (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DA con implementazione del pretrattamento di dark fermentation</li> <li>• co-digestione con frazione organica di RSU</li> </ul>	Entrambi i sistemi sono economicamente sostenibili; tuttavia, il caso basato sul pretrattamento preliminare di dark fermentation seguito dalla digestione ha un tempo di ritorno dell'investimento più breve e un valore attuale netto più elevato rispetto a quello della co-digestione.	Italia
Lee et al. (2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CD</li> <li>• D</li> <li>• C</li> <li>• CC</li> </ul>	Considerando i valori medi, co-digestione ha ottenuto il costo del ciclo di vita più basso, anche considerando l'acquisizione del terreno; a seguire il compostaggio.	Usa
Medina et al. (2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• THP + DA</li> <li>• DA</li> </ul>	I costi stimati per l'opzione con HTC sono del 42% superiori rispetto all'alternativa convenzionale della digestione anaerobica.	Europa

Fonte	Metodi di trattamento*	Principali risultati relativi alla LCA	Contesto geografico
Roldán et al. (2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>due configurazioni di linee di fanghi finalizzate all'estrazione e al recupero del fosforo prima della digestione anaerobica.</li> </ul>	La configurazione 1 si basa sulla produzione di un flusso arricchito di PO <sub>4</sub> dai fanghi tramite elutriazione negli ispessitori primari, mentre la configurazione 2 si basa sul processo WASSTRIP e il suo flusso arricchito di PO <sub>4</sub> viene ottenuto meccanicamente con ispessitori dinamici; nonostante la minore efficienza di recupero del fosforo, la configurazione 1 ha un costo del ciclo di vita inferiore rispetto alla configurazione 2.	Non specificato
Rostami et al. (2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>C</li> <li>I</li> <li>D</li> </ul>	Compostaggio più conveniente rispetto a incenerimento e discarica.	Iran
Alves et al. (2021)	<ul style="list-style-type: none"> <li>gassificazione</li> </ul>	Gli scenari presentano una buona fattibilità per l'implementazione; il processo di gassificazione con conseguente produzione di energia elettrica risulta più vantaggioso rispetto allo scenario con produzione di idrogeno, nel breve periodo; quest'ultimo scenario risulta invece più favorevole alla fine della vita dell'impianto.	Non specificato
Orner et al. (2022)	<ul style="list-style-type: none"> <li>cinque strategie di gestione dei nutrienti per la co-digestione di fanghi di depurazione urbani con rifiuti organici ad alta resistenza. Inoltre, la gestione attuale dei biosolidi (57% applicazione al suolo, 36% discarica e 7% compostaggio) è stata confrontata con uno scenario teorico in cui il 100% dei biosolidi viene compostato.</li> </ul>	Tutte le opzioni di recupero dei nutrienti valutate comportano un costo netto per l'impianto, con i costi del capitale e dei materiali che superano notevolmente i ricavi.	Usa
Xiao et al. (2022)	<ul style="list-style-type: none"> <li>MC</li> <li>CC con RSU</li> <li>CC in centrale elettrica a carbone</li> <li>CC in cementificio</li> </ul>	Mono-combustione alternativa nettamente più dispendiosa dal punto di vista economico; al contrario, la co-combustione in cementificio presenta i costi minori in assoluto, sebbene non si discosti molto dalle alternative valutate.	Cina
Zhang et al. (2022)	<ul style="list-style-type: none"> <li>applicazione del pretrattamento Fenton e US/UV/Elettro-Fenton a diversi scenari:</li> <li>D</li> <li>I</li> <li>A</li> </ul>	L'effetto dei pretrattamenti Fenton e US/UV/Elettro-Fenton sulla riduzione dei costi dell'LCC è stato evidente per ciascuna delle alternative valutate.	Cina
Zhuang et al. (2022)	<ul style="list-style-type: none"> <li>DA</li> <li>D</li> <li>I</li> <li>C</li> <li>P</li> </ul>	Il compostaggio e la pirolisi hanno un LCC previsto inferiore rispetto alle alternative di trattamento concorrenti; il compostaggio ottiene costi del ciclo di vita relativamente bassi grazie alla convenienza degli investimenti di capitale richiesti; viceversa, la pirolisi riduce il costo del ciclo di vita grazie al recupero di risorse preziose come energia, fertilizzanti e combustibili.	Nord America

\* Il processo di disidratazione è stato citato solo quando ritenuto necessario ad evidenziare le differenze fra gli scenari analizzati.

to contenuti, ma allo stesso tempo benefici ambientali ed economici molto limitati nel lungo periodo (Xiao et al., 2018). È stato inoltre studiato l'impatto di varie alternative di pretrattamenti subiti dai fanghi di depurazione (Francini et al., 2019; Hong et al., 2009; Zhang et al., 2022;) che sono risultati in molti casi impattanti da un punto di vista economico. L'impiego della dark fermentation ha reso meno dispendioso il processo

di digestione anaerobica (Francini et al. 2019), inoltre, l'effetto dei pretrattamenti Fenton e US/UV/Elettro-Fenton sulla riduzione dell'LCC è stato evidente, in particolare laddove il contenuto organico fosse più elevato (Zhang et al. 2022).

Infine, anche la digestione anaerobica risulta essere un'alternativa economicamente sostenibile, sia se valutata singolarmente, sia se incorporata con al-

**Tabella 4.** Livelli di raccomandazione dei principali metodi di trattamento dei fanghi analizzati dalla letteratura scientifica tramite LCA ed LCC. In verde = più consigliato. In rosso = meno consigliato.

Metodi di trattamento	LCA	LCC
Agricoltura	●	●
Co-combustione	●	●
Compostaggio	●	●
Discarica	●	●
Digestione anaerobica	●	●
Essiccamento termico	●	●
Mono-combustione*	●	●

\* Senza recupero di fosforo.

tre metodologie di trattamento in linee di processo più complesse (Hong et al., 2009; Murray et al., 2008; Tarpani e Azapagic, 2018; Xu et al., 2014;).

In particolare, è stato dimostrato come l'aggiunta di tale processo ad alternative quali la disidratazione, il compostaggio, l'essiccamento e l'incenerimento, abbatta i costi di trattamento nel lungo periodo (Hong et al. 2009).

### 3.4. Sostenibilità ambientale ed economica dei trattamenti dei fanghi

Stanti la variabilità degli obiettivi fra gli studi analizzati e la mancanza di un vero e proprio scenario convenzionale di riferimento, si è preferito non operare una, peraltro ardua, armonizzazione dei risultati. In mancanza di un criterio oggettivo, si è preferito sintetizzare le impressioni generali riportate nei paragrafi 3.2 e 3.3 tramite la Tabella 4, in cui è possibile visionare la lista dei principali metodi di trattamento dei fanghi con un livello di raccomandazione che va dal verde (più consigliato) al rosso (meno consigliato). Ne è derivato che la letteratura scientifica tende a indicare la digestione anaerobica come il metodo di trattamento più sostenibile sia ambientalmente che economicamente.

Al contrario, la discarica e la mono-combustione sarebbero sconsigliate dal punto di vista, rispettivamente, ambientale ed economico. La mono-combustione, tuttavia, se viene abbinata a un processo di recupero del fosforo, migliora le sue prestazioni ambientali (Lederer e Rechberger, 2010) ed economiche (Lundin et al., 2004).

## 4. Conclusioni

La revisione della letteratura fornisce un quadro aggiornato sulle tecnologie utilizzate per il trattamento dei fanghi provenienti dalla depurazione delle acque reflue urbane.

La digestione anaerobica emerge come un metodo di pretrattamento che, sfruttando il biogas prodotto e riducendo il volume dei fanghi, contribuisce a minimizzare gli impatti ambientali ed economici associati a qualsiasi trattamento a cui venga applicato.

Non è stato possibile invece giungere a una conclusione univoca sul confronto tra gli impatti ambientali di mono-combustione e impiego agronomico. L'uso dei fanghi in agricoltura, che siano stati sottoposti o meno a digestione, presenta infatti impatti a volte maggiori e a volte minori rispetto alla mono-combustione. Va tenuto in considerazione il rischio di contaminazione dei terreni agricoli da inquinanti, ma è altrettanto cruciale restituire la sostanza organica ai campi coltivati per prevenirne il progressivo degrado. In prospettiva, una possibile strategia potrebbe consistere nel limitare l'impiego agricolo ai soli fanghi di alta qualità. Sul fronte dei costi, la mono-combustione si configura come una delle opzioni più dispendiose per la gestione dei fanghi, mentre l'utilizzo in agricoltura risulta economicamente più vantaggioso. La mono-combustione rappresenta l'alternativa più promettente all'agricoltura per quel che riguarda il recupero di fosforo. L'opzione di co-combustione con rifiuti mostra risultati positivi sia dal punto di vista ambientale sia economico.

L'essiccamento termico, a differenza della digestione anaerobica, richiede una fonte di energia esterna; risulta pertanto applicabile quando è disponibile una fonte di energia di recupero o rinnovabile nelle vicinanze.

Il compostaggio si posiziona a metà strada tra le opzioni dal punto di vista ambientale ed è tra le scelte più convenienti dal punto di vista economico. Lo smaltimento in discarica è economicamente vantaggioso nel breve termine, ma ha benefici li-

mitati nel lungo periodo; inoltre, risulta spesso la soluzione meno favorevole negli studi LCA. È rilevante sottolineare che i risultati degli studi LCA e LCC presentano una notevole variabilità e non possono essere generalizzati a tutti i contesti geopolitici. Nel mondo del trattamento fanghi non vi è una tecnologia universalmente valida e i risultati degli studi sui rifiuti dipendono da fattori locali come la presenza di un mercato per i prodotti recuperati, l'efficienza dei trattamenti (che varia al variare della popolazione servita), le normative vigenti e la presenza di impianti di recupero sul territorio. Si raccomanda pertanto di condurre specifiche valutazioni LCA e LCC per ciascuna nazione o regione. ■

### Riferimenti bibliografici

- Abuşoğlu A., Özahi A., İhsan Kutlar A., Al-jaf H. (2017) Life cycle assessment (LCA) of digested sewage sludge incineration for heat and power production. *Journal of Cleaner Production*, 142(2017): 1684–1692.
- Alves O., Calado L., Panizio R.M., Gonçalves M., Monteiro E., Brito P. (2021) Techno-economic study for a gasification plant processing residues of sewage sludge and solid recovered fuels. *Waste Management*, 131: 148–162.
- Alyaseri I. e Zhou J. (2017) Towards better environmental performance of wastewater sludge treatment using endpoint approach in LCA methodology. *Heliyon*, 3(3).
- Amann A., Zoboli O., Krampe J., Rechberger H., Zessner M., Egle L. (2018) Environmental impacts of phosphorus recovery from municipal wastewater. *Resources, Conservation and Recycling*, 130: 127–139.
- Aradelli P. e Cantù G. (2016) Sewage sludge disposal routes: thermal treatments and energy recovery. Tesi magistrale, Politecnico di Milano. Disponibile su: <http://hdl.handle.net/10589/119001>.
- Barry D., Barbiero C., Briens C., Berruti F. (2019) Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge. *Biomass and Bioenergy*, 122: 472–480.
- Bertanza G., Canato M., Heimersson S. et al. (2015) Techno-economic and environmental assessment of sewage sludge wet oxidation. *Environmental Science and Pollution Research*, 22: 7327–7338.
- Binelli A. (2021) Il progetto SLURP: Saggi biologici, ecotossicologia. Disponibile su: [https://sites.unimi.it/slurp\\_project/wp-content/uploads/2021/11/Programma-Workshop-SLURP.pdf](https://sites.unimi.it/slurp_project/wp-content/uploads/2021/11/Programma-Workshop-SLURP.pdf)
- Brown T.R. e Brown R.C. (2013) A review of cellulosic biofuel commercial-scale projects in the United States. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7(3): 235–245.
- Buonocore E., Mellino S., De Angelis G., Liu G., Ulgiati S. (2018) Life cycle assessment indicators of urban wastewater and sewage sludge treatment. *Ecological Indicators*, 94(3): 13–23.
- Cambi ASA (2022) Thermal hydrolysis. Disponibile su: <https://www.cambi.com/what-we-do/thermal-hydrolysis>
- Canziani R. (2016) I fanghi, inevitabili prodotti della depurazione delle acque di rifiuto. *Ingegneria dell'Ambiente*, 3(3): 177–178.
- Cao Y. e Pawłowski A. (2013) Life cycle assessment of two emerging sewage sludge-to-energy systems: Evaluating energy and greenhouse gas emissions implications. *Bioresource Technology*, 127: 81–91.
- Chen G., Wang X., Li J. et al. (2019) Environmental, energy, and economic analysis of integrated treatment of municipal solid waste and sewage sludge: A case study in China. *Science of the Total Environment*, 647: 1433–1443.
- Chiu S.L.H. e Lo I.M.C. (2018) Identifying key process parameters for uncertainty propagation in environmental life cycle assessment for sewage sludge and food waste treatment. *Journal of Cleaner Production*, 174: 966–976.
- Cie'slik B.M., Namie'snik J. e Konieczka P. (2015) Review of sewage sludge management: Standards, regulations and analytical methods. *Journal of Cleaner Production*, 90: 1–15.
- Collet P. et al. (2017) Techno-economic and Life Cycle Assessment of methane production via biogas upgrading and power to gas technology. *Applied Energy*, 192: 282–295.
- Collivignarelli C. (2021) Pianificazione della gestione dei fanghi di depurazione e ruolo del riuso agricolo. Disponibile su: [https://sites.unimi.it/slurp\\_project/wp-content/uploads/2021/11/Programma-Workshop-SLURP.pdf](https://sites.unimi.it/slurp_project/wp-content/uploads/2021/11/Programma-Workshop-SLURP.pdf)
- Ding A., Zhang R., Ngo H.H. et al. (2021) Life cycle assessment of sewage sludge treatment and disposal based on nutrient and energy recovery: A review. *Science of the Total Environment*, 769: 144451.

- do Amaral K.C., Aisse M.M., Possetti G.R.C., Prado R.M. (2018) Use of life cycle assessment to evaluate environmental impacts associated with the management of sludge and biogas. *Water Science and Technology*, 77(9): 2292–2300.
- Đurđević D., Blečić P. e Jurić Ž. (2019) Energy Recovery from Sewage Sludge: The Case Study of Croatia. *Energies*, 12(10): 1927.
- EEA (2022) Beyond water quality: Sewage treatment in a circular economy. Disponibile su: <https://www.eea.europa.eu/publications/beyond-water-quality-sewage-treatment/file>
- Egle L., Rechberger H., Krampe J., Zessner M. (2016) Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Science of the Total Environment*, 571: 522–542.
- Fiori L. (2020) Carbonizzazione idrotermica: Principi. Disponibile su: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi7kj-2htv7AhWiavEDHTQCC9wQFnoECA4QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.fast.mi.it%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F05%2FFIORI.pdf&usg=AOvVaw020AgdgM5enB0YdwxQ8K20>
- Francini G., Lombardi L., Freire F., Pecorini I., Marques P. (2019) Environmental and Cost Life Cycle Analysis of Different Recovery Processes of Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Sewage Sludge. *Waste and Biomass Valorization*, 10(12): 3613–3634.
- Hong J., Hong J., Otaki M., Jolliet O. (2009) Environmental and economic life cycle assessment for sewage sludge treatment processes in Japan. *Waste Management*, 29(2): 696–703.
- Hong J., Xu C., Hong J., Tan X., Chen W. (2013) Life cycle assessment of sewage sludge co-incineration in a coal-based power station. *Waste Management*, 33(9): 1843–1852.
- Ibarra-Gonzalez P. e Rong B.G. (2018) A review of the current state of biofuels production from lignocellulosic biomass using thermochemical conversion routes. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(7): 1523–1535.
- Kacprzak M., Neczaj E., Fijałkowski K. et al. (2017) Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, 156: 39–46.
- Kwapinski W., Kolinovic I. e Leahy J.J. (2021) Sewage Sludge Thermal Treatment Technologies with a Focus on Phosphorus Recovery: A Review. *Waste and Biomass Valorization*, 12(11): 5837–5852.
- Lam C.M., Lee P.H. e Hsu S.C. (2016) Eco-efficiency analysis of sludge treatment scenarios in urban cities: The case of Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, 112: 3028–3039.
- Lederer J. e Rechberger H. (2010) Comparative goal-oriented assessment of conventional and alternative sewage sludge treatment options. *Waste Management*, 30(6): 1043–1056.
- Lee E., Oliveira D.S.B.L., Oliveira L.S.B.Z. et al. (2020) Comparative environmental and economic life cycle assessment of high solids anaerobic co-digestion for biosolids and organic waste management. *Water Research*, 171: 115443.
- Li X., Takaoka M., Zhu F., Wang J., Oshita K. e Mizuno T. (2013) Environmental and economic assessment of municipal sewage sludge management – a case study in Beijing, China. *Water Science and Technology*, 67(7): 1465–1473.
- Li H., Jin C. e Mundree S. (2017a) Hybrid environmental and economic assessment of four approaches recovering energy from sludge with variant organic contents. *Journal of Cleaner Production*, 153: 131–138.
- Li H., Jin C., Zhang Z., O'Hara I. e Mundree S. (2017b) Environmental and economic life cycle assessment of energy recovery from sewage sludge through different anaerobic digestion pathways. *Energy*, 126: 649–657.
- Li H. e Feng K. (2018) Life cycle assessment of the environmental impacts and energy efficiency of an integration of sludge anaerobic digestion and pyrolysis. *Journal of Cleaner Production*, 195: 476–485.
- Lishan X., Tao L., Yin W., Zhilong Y., Jiangfu L. (2018) Comparative life cycle assessment of sludge management: A case study of Xiamen, China. *Journal of Cleaner Production*, 192: 354–363.
- Liu B., Wei Q., Zhang B., Bi J. (2013) Life cycle GHG emissions of sewage sludge treatment and disposal options in Tai Lake Watershed, China. *Science of the Total Environment*, 447: 361–369.
- Lombardi L., Nocita C., Bettazzi E., Fibbi D., Carnevale E. (2017) Environmental comparison of alternative treatments for sewage sludge: An Italian case study. *Waste Management*, 69: 365–376.
- Lundin M., Olofsson M., Pettersson G.J., Zetterlund H. (2004) Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options. *Resources, Conservation and Recycling*, 41(4): 255–278.
- Malacrida W., Di Cosmo R. e Canziani R. (2015) Il trattamento e lo smaltimento dei fanghi

- industriali e di depurazione. Disponibile su: [https://www.researchgate.net/publication/283791515\\_Trattamento\\_e\\_smaltimento\\_dei\\_fanghi\\_di\\_depurazione\\_recupero\\_di\\_materia\\_e\\_di\\_energia\\_minimizzazione\\_dei\\_costi\\_e\\_degli\\_impatti\\_ambientali](https://www.researchgate.net/publication/283791515_Trattamento_e_smaltimento_dei_fanghi_di_depurazione_recupero_di_materia_e_di_energia_minimizzazione_dei_costi_e_degli_impatti_ambientali).
- Medina-Martos E., Istrate I.R., Villamil J.A., Gálvez-Martos J.L., Dufour J., Mohedano Á.F. (2020) Techno-economic and life cycle assessment of an integrated hydrothermal carbonization system for sewage sludge. *Journal of Cleaner Production*, 277: 122930.
  - Meisel K., Clemens A., Fühner C., Breulmann M., Majer S., Thrän D. (2019) Comparative Life Cycle Assessment of HTC Concepts Valorizing Sewage Sludge for Energetic and Agricultural Use. *Energies*, 12(5): 786.
  - Merzari F., Langone M., Andreottola G., Fiori L. (2019) Methane production from process water of sewage sludge hydrothermal carbonization. A review. *Valorising sludge through hydrothermal carbonization. Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(11): 947-988.
  - Mills N., Pearce P., Farrow J., Thorpe R.B., Kirkby N.F. (2014) Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies. *Waste Management*, 34(1): 185–195.
  - Morero B., Montagna A.F., Campanella E.A., Cafaro D.C. (2020) Optimal process design for integrated municipal waste management with energy recovery in Argentina. *Renewable Energy*, 146: 2626–2636.
  - Murray A., Horvath A. e Nelson K.L. (2008) Hybrid Life-Cycle Environmental and Cost
  - Inventory of Sewage Sludge Treatment and End-Use Scenarios: A Case Study from China. *Environmental Science & Technology*, 42(9): 3163–3169.
  - Nakakubo T., Tokai A. e Ohno K. (2012) Comparative assessment of technological systems for recycling sludge and food waste aimed at greenhouse gas emissions reduction and phosphorus recovery. *Journal of Cleaner Production*, 32: 157–172.
  - Nakatsuka N., Kishita Y., Kurafuchi T., Akamatsu F. (2020) Integrating wastewater treatment and incineration plants for energy-efficient urban biomass utilization: A life cycle analysis. *Journal of Cleaner Production*, 243: 118448.
  - Orner K.D., Smith S., Nordahl S. et al. (2022) Environmental and Economic Impacts of Managing Nutrients in Digestate Derived from Sewage Sludge and High-Strength Organic Waste. *Environmental Science & Technology*, 56(23): 17256–17265.
  - Parlamento europeo e Consiglio europeo (2008) Direttiva 2008/98/CE del parlamento Europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive. *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea*, L 312.
  - Pearson R.J. e Turner J.W.G. (2012) Renewable fuels: An automotive perspective. *Comprehensive Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 305-342.
  - Peroni M., Cascio M., Soderino D. et al. (2022) Ozonolisi in digestione anaerobica: un caso di studio a scala reale e di laboratorio. *Ingegneria dell'Ambiente*, 9(2): 84-99.
  - Piippo S., Lauronen M. e Postila H. (2018) Greenhouse gas emissions from different sewage sludge treatment methods in north. *Journal of Cleaner Production*, 177: 483–492.
  - Pradel M. e Aissani L. (2019) Environmental impacts of phosphorus recovery from a “product” Life Cycle Assessment perspective: Allocating burdens of wastewater treatment in the production of sludge-based phosphate fertilizers. *Science of the Total Environment*, 656: 55–69.
  - Regione Lombardia (2022) Aggiornamento del Programma Regionale di Gestione dei Rifiuti (PRGR) – Piano verso l'economia circolare: Relazione di piano. Disponibile su: <https://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/DettaglioRedazionale/servizi-e-informazioni/Enti-e-Operatori/ambiente-ed-energia/Rifiuti/aggiornamento-piano-rifiuti-e-bonifiche-regionale/aggiornamento-piano-rifiuti-e-bonifiche-regionale>
  - Regione Lombardia (2023) Forme Avanzate di Gestione dei fanghi di depurazione in un Hub Innovativo lombardo. Disponibile su: <https://www.openinnovation.regione.lombardia.it/it/b/38399/forme-avanzate-di-gestione-dei-fanghi-di-depurazione-in-un-hub-innovat>
  - Reißmann D., Thrän D., Blöhse D., Bezama A. (2021) Hydrothermal carbonization for sludge disposal in Germany: A comparative assessment for industrial-scale scenarios in 2030. *Journal of Industrial Ecology*, 25(3): 720–734.
  - Rigamonti L., Grosso M., Puricelli S., Tua C. (2018) LCA della gestione dei fanghi di depurazione nel sito di Corteolona (report confidenziale).
  - Righi S., Oliviero L., Pedrini M., Buscaroli A., Della Casa C. (2013) Life Cycle Assessment of management systems for sewage sludge and food waste: Centralized and decentralized approaches. *Journal of Cleaner Production*, 44: 8–17.

- Roldán M., Bouzas A., Seco A., Mena E., Mayor Á., Barat R. (2020) An integral approach to sludge handling in a WWTP operated for EBPR aiming phosphorus recovery: Simulation of alternatives, LCA and LCC analyses. *Water Research*, 175: 115647.
- Rostami F., Tafazzoli S.M., Aminian S.T., Avami A. (2020) Comparative assessment of sewage sludge disposal alternatives in Mashhad: a life cycle perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(1): 315–333.
- Sablayrolles C., Gabrielle B. e Montrejaud-Vignoles M. (2010) Life Cycle Assessment of Biosolids Land Application and Evaluation of the Factors Impacting Human Toxicity through Plant Uptake. *Journal of Industrial Ecology*, 14(2): 231–241.
- Schnell M., Horst T. e Quicker P. (2020) Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review. *Journal of Environmental Management*, 263: 110367.
- Tarpani R.R.Z. e Azapagic A. (2018) Life cycle costs of advanced treatment techniques for wastewater reuse and resource recovery from sewage sludge. *Journal of Cleaner Production*, 204: 832–847.
- Tarpani R.R.Z., Alfonsin C., Hospido A., Azapagic A. (2020) Life cycle environmental impacts of sewage sludge treatment methods for resource recovery considering ecotoxicity of heavy metals and pharmaceutical and personal care products. *Journal of Environmental Management*, 260: 109643.
- Teoh S.K. e Li L.Y. (2020) Feasibility of alternative sewage sludge treatment methods from a lifecycle assessment (LCA) perspective. *Journal of Cleaner Production*, 247: 119495.
- ten Hoeve M., Bruun S., Naroznova I. et al. (2018) Life cycle inventory modeling of phosphorus substitution, losses and crop uptake after land application of organic waste products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(10): 1950–1965.
- Topal M. e Arslan E.I. (2009) Thermal conditioning of sludges. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1): 108–119.
- Veolia Water Technologies (2022) Bio Thelys™. Disponibile su: <https://www.veoliawatertechnologies.it/bio-thelys>.
- Vienesescu D.N., Wang J., Le Gresley A., Nixon J.D. (2018) A life cycle assessment of options for producing synthetic fuel via pyrolysis. *Bioresource Technology*, 249: 626–634.
- Wang N.Y., Shih C.H., Chiueh P.T., Huang Y.F. (2013) Environmental effects of sewage sludge carbonization and other treatment alternatives. *Energies*, 6(2): 871–883.
- Winkler M.K.H., Bennenbroek M.H., Horstink F.H., van Loosdrecht M.C.M., van de Pol G.J. (2013) The biodrying concept: An innovative technology creating energy from sewage sludge. *Bioresource Technology*, 147: 124–129.
- Xiao H., Li K., Zhang D. et al. (2022) Environmental, energy, and economic impact assessment of sludge management alternatives based on incineration. *Journal of Environmental Management*, 321: 115848.
- Xiu S., Shahbazi A., Shirley V., Cheng D. (2010) Hydrothermal pyrolysis of swine manure to bio-oil: Effects of operating parameters on products yield and characterization of bio-oil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 88(1): 73–79.
- Xu C., Chen W. e Hong J. (2014) Life-cycle environmental and economic assessment of sewage sludge treatment in China. *Journal of Cleaner Production*, 67: 79–87.
- Yoshida H., ten Hoeve M., Christensen T.H., Bruun S., Jensen L.S., Scheutz C. (2018) Life cycle assessment of sewage sludge management options including long-term impacts after land application. *Journal of Cleaner Production*, 174: 538–547.
- Zhang H., Rigamonti L., Visigalli S., Turolla A., Gronchi P., Canziani R. (2019) Environmental and economic assessment of electro-dewatering application to sewage sludge: A case study of an Italian wastewater treatment plant. *Journal of Cleaner Production*, 210: 1180–1192.
- Zhang R., Liu X., Chen R. et al. (2022) Environmental and economic performances of incorporating Fenton-based processes into traditional sludge management systems. *Journal of Cleaner Production*, 364: 132613.
- Zhuang Z., Mohamed BA., Li L.Y. e Swei O. (2022) An economic and global warming impact assessment of common sewage sludge treatment processes in North America. *Journal of Cleaner Production*, 370: 133539.

Materiale supplementare è disponibile gratuitamente all'indirizzo [www.ingegneriadellambiente.net](http://www.ingegneriadellambiente.net)

# VALUTAZIONE DI UN SERVIZIO DI PULIZIA PROFESSIONALE IN AMBITO CIVILE: ANALISI COMPARATIVA MICROBIOLOGICA ED AMBIENTALE TRA METODI TRADIZIONALI E “GREEN”

Rosatelli Asia<sup>1</sup>, Bruno Erika<sup>2</sup>, Vogli Luciano<sup>3</sup>, Bandera Beatrice<sup>3</sup>, Buffone Cesare<sup>3</sup>, Franzetti Andrea<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Università di Milano Bicocca, Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra, Piazza della Scienza 1, 20126, Milano, Italia.

<sup>2</sup>Università di Milano Bicocca, Dipartimento di Medicina e Chirurgia, 20900, Monza, Italia.

<sup>3</sup>Punto 3 Srl, 44121, Ferrara, Italia.

## Sommario

Le superfici contaminate rappresentano una delle vie principali attraverso cui virus e batteri possono diffondersi. Un buon protocollo di pulizia e sanificazione è fondamentale al fine di preservare una superficie igienica e sanificata in spazi comuni così da limitare la trasmissione di agenti patogeni. Tuttavia, il processo di sanificazione e pulizia delle superfici può comportare degli impatti ambientali significativi. In Italia, i Criteri Ambientali Minimi (CAM) rappresentano un importante strumento normativo per promuovere la sostenibilità ambientale negli appalti pubblici e privati. Nel contesto della pulizia e della sanificazione delle superfici, i CAM possono guidare verso l'adozione di prodotti e metodi a basso impatto ambientale, promuovendo pratiche più sostenibili. In questo lavoro, un protocollo “GREEN”, sviluppato secondo i CAM, è stato valutato, mediante la sua applicazione in un contesto di pulizia civile. La valutazione è stata effettuata sia dal punto di vista ambientale attraverso un'analisi di Life Cycle Assessment (LCA), che dal punto di vista igienico-microbiologico, quantificando i batteri eterotrofi totali a 22°C e a 37°C a seguito di un campionamento esteso a 12 superfici presso l'edificio BL27 del campus Bovisa La Masa del Politecnico di Milano. Lo studio è stato effettuato in modo comparativo rispetto ad un protocollo di pulizia più tradizionale e ha dimostrato l'efficacia del protocollo “GREEN”, adeguata alla destinazione dell'uso dell'area considerata, nell'abbattimento e nel mantenimento delle cariche batteriche al di sotto del valore preso di riferimento in questo studio di 80 UFC cm<sup>-2</sup> e tramite l'analisi LCA una significativa riduzione (29 g di CO<sub>2</sub> per metro quadro) dell'impronta di carbonio, che nello scenario di applicazione del protocollo all'intero cantiere pilota porterebbe all'abbattimento di 311 kg di CO<sub>2</sub> emessa.

**Parole chiave:** *pulizia, sanificazione, sostenibilità, LCA, microbiologia.*

## EVALUATION OF A PROFESSIONAL CLEANING SERVICE IN A CIVIL CONTEXT: MICROBIOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN TRADITIONAL AND “GREEN” METHODS

### Abstract

Surface contamination represents one of the main routes for virus and bacterial diffusion due to the presence of saliva droplets, respiratory secretions, and viral particles which deposit on it. An optimal cleaning and disinfection protocol is fundamental to preserve a hygienic and disinfected surface in public areas, limiting, in this way, pathogen transmission. Nevertheless, cleaning and disinfection processes can lead to significant environmental impacts such as raw materials consumption, transportation of commodities and people, the end of life of the equipment, emissions, and waste production due to packaging. Moreover, cleaning and disinfection activities lead to the consumption of electric energy for water heating and for powering the cleaning equipment, contributing to the emission of greenhouse gasses. In Italy, Minimal Environmental Criteria (Criteri Minimi Ambientali, CAM), published on the Italian Official Journal on 01/29/2021, represent an important policy instrument to promote environmental sustainability in public and private tenders. Within the framework of the cleaning and disinfection sector, CAM can lead towards the adoption of products and processes with a low environmental impact, promoting more sustainable proceedings. In this work, a “GREEN” protocol, has been developed, according to CAM policies, and evaluated by applying it in the context of civil cleaning services. The evaluation has been carried out both through a Life Cycle Assessment analysis (LCA) with an approach “from cradle to grave” and in terms of hygienic and microbiological parameters with the quantification of heterotrophs bacteria at 22°C and 37°C in 12 sampled surfaces at BL27 building of the Bovisa La Masa Campus in Politecnico of Milano. Each surface was sampled in triplicate before and after its disinfection. This

IdA



\* Per contatti: Piazza della Scienza 1, 20126, Milano, Italia.  
Tel +39 02 6448 2927. E-mail [andrea.franzetti@unimib.it](mailto:andrea.franzetti@unimib.it)

Ricevuto il 2-10-2024. Modifiche sostanziali richieste il 27-12-2023.  
Accettazione il 17-1-2024.

location has been chosen as an example of civil environment as it comprises classrooms, connective spaces, services, offices, cafeterias, libraries and reading rooms and because it was representative for surface typologies, degree of dirt and for the frequency and methodologies used in civil cleaning worksites. Preliminarily, also the presence of pathogenic bacteria which are fecal contamination indicators has been assessed on each surface with the quantification of *E.coli* and *Clostridium perfringens*. The study has been carried out in a comparative way with respect to a more traditional cleaning protocol and it demonstrated the effectiveness of the “GREEN” protocol, appropriate to the intended use of the considered area. As there aren't any standards or guidelines about the quantitative evaluation of microbial contamination found on surfaces, we considered the one used for restoration environments (80 UFC cm<sup>-2</sup>) as a reference value as the location object of the study does not present particular issues. In fact, in almost all the samples we have taken from the 12 surfaces, the parameters relative to fecal contamination indicators were under the limit of detectability (1 CFU cm<sup>-2</sup>), only in one of the three replicas of SUP1 (classroom floor), 1 CFU cm<sup>-2</sup> of *C.perfringens* has been detected. The “GREEN” protocol guarantees a substantial reduction of the bacterial load and its maintenance under the value of 80 CFU cm<sup>-2</sup>. Through the LCA analysis, this study has also assessed a reduction of 29 g of CO<sub>2</sub> per squared meter (18.4%) in the carbon footprint of the “GREEN” protocol with respect to the traditional methodology. The value of this result can be even more appreciated if considering the entire scenario of application of the “GREEN” protocol; in fact the application of the aforementioned cleaning service in the whole pilot site would allow the abatement of 311 kg of emitted CO<sub>2</sub>.

**Keywords:** *cleaning, disinfection, sustainability, LCA, microbiology.*

## 1. Introduzione

### 1.1. Pulizia e sanificazione come strumento di sanità pubblica

La trasmissione di malattie attraverso superfici contaminate è un fenomeno riconosciuto da tempo e rappresenta una delle vie principali attraverso cui virus e batteri possono diffondersi all'interno di comunità e popolazioni (Otter et al., 2011). L'avvento della pandemia di COVID-19 ha enfatizzato in maniera significativa l'importanza di preservare una superficie igienica e sanificata, specialmente in spazi comuni, al fine di limitare la trasmissione di agenti patogeni. Le superfici in ambienti condivisi possono facilitare il passaggio di agenti infettivi tra un individuo e gli altri. La frequente manipolazione di oggetti e superfici da parte di diverse persone amplifi-

ca il rischio di contaminazione crociata. La presenza di goccioline di saliva, secrezioni respiratorie e particelle virali e microbiche sulle superfici può costituire una minaccia tangibile per la salute pubblica, poiché tali agenti patogeni possono rimanere vitali per un periodo di tempo considerevole (Kramer et al., 2006). L'attuale pandemia di COVID-19 ha sollevato considerevole attenzione sulla trasmissione del virus SARS-CoV-2 attraverso superfici contaminate. Studi hanno dimostrato che il virus può sopravvivere su varie superfici, tra cui plastica, acciaio inossidabile e vetro, per periodi variabili da alcune ore fino a diversi giorni. Ciò ha sottolineato l'importanza di attuare procedure efficaci di pulizia e sanificazione per ridurre la potenziale diffusione dell'agente patogeno (Carraturo et al., 2020; Kampf et al., 2020; Marquès et al 2021). Il processo di pulizia, sebbene fondamentale, rappresenta solo il primo passo nell'assicurare la sicurezza delle superfici. Questo processo implica la rimozione visibile di detriti e sporcizia, ma non necessariamente l'eliminazione dei patogeni. Al contrario, la sanificazione, che coinvolge l'utilizzo di agenti chimici o fisici, si pone come elemento chiave per l'annientamento dei microrganismi patogeni e la conseguente riduzione del rischio di infezione (Decreto Ministeriale 274/1997). Diverse categorie di agenti chimici vengono adoperate per la sanificazione delle superfici, tra cui alcoli, composti a base di cloro e Sali quaternari d'ammonio. Tuttavia, la scelta del prodotto sanitizzante e la sua concentrazione richiedono valutazioni ponderate. È cruciale garantire che l'agente selezionato sia efficace contro l'agente patogeno target e che sia applicato correttamente, tenendo in considerazione il tempo di contatto necessario per l'azione antimicrobica (Assadian et al., 2021).

### 1.2. Impatto ambientale dei processi di pulizia e sanificazione

Il processo di sanificazione e pulizia delle superfici può comportare tuttavia una serie di impatti ambientali significativi. L'utilizzo di prodotti, attrezzature e macchinari per l'espletamento del servizio è causa di molteplici impatti ambientali lungo tutto il ciclo di vita. Per citarne alcuni: il consumo di materie prime, il trasporto di beni e persone, il fine vita delle macchine, gli scarichi e la produzione di rifiuti da imballaggi. E ancora, le attività di pulizia e di ricondizionamento delle attrezzature sono fonte di consumi di energia elettrica, per scaldare l'acqua e alimentare le attrezzature di pulizia, e contribuiscono quindi alle emissioni di gas serra (Palabiyik et al., 2015). In Italia, i Criteri Ambientali Minimi (CAM) rappresentano un importante strumento normativo per promuovere la sostenibilità ambientale negli appalti pubblici e privati. I CAM stabiliscono requisiti che gli acquirenti pubblici e privati devono rispettare al fine di ridurre l'impatto ambientale dei prodotti, dei

servizi e dei lavori appaltati. Nel contesto della pulizia e della sanificazione delle superfici, i CAM, pubblicati in Gazzetta Ufficiale il 29/01/2021, possono guidare verso l'adozione di prodotti e metodi a basso impatto ambientale, promuovendo pratiche più sostenibili. L'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) è un approccio metodologico utilizzato per valutare gli impatti ambientali di un prodotto, un servizio o un processo lungo l'intero ciclo di vita, dalla produzione al consumo e alla gestione dei rifiuti. Nella valutazione dell'impatto ambientale della sanificazione e pulizia delle superfici, l'LCA può fornire una visione completa degli effetti ambientali associati a diverse pratiche, consentendo di confrontare l'impatto di processi tradizionali con quelli a basso impatto ambientale (Van Lieshout et al., 2015). L'adozione dei CAM e l'utilizzo dell'LCA permettono di definire pratiche di pulizia e sanificazione a basso impatto ambientale finalizzate a ridurre l'uso di prodotti chimici nocivi, a limitare l'inquinamento dell'ambiente acquatico e terrestre, ad ottimizzare il consumo di acqua ed energia, contribuendo alla riduzione delle emissioni di gas serra e alla conservazione delle risorse idriche. Inoltre, l'adozione di prodotti e metodi sostenibili può favorire la promozione dell'immagine aziendale, rispondendo alle crescenti aspettative dei consumatori per pratiche ecologiche.

### 1.3. Obiettivo del lavoro

Il presente lavoro si inserisce nel progetto CLEANING – Protocollo “GREEN”, avviato dal Politecnico di Milano in collaborazione con L'Operosa, con il supporto di Punto 3 Srl, Sutter SpA e Università degli Studi di Milano – Bicocca, finalizzato a sviluppare un percorso di valorizzazione dell'offerta dei servizi di pulizia in chiave

CAM – Criteri Ambientali Minimi, attraverso uno studio LCA – Life Cycle Assessment (Valutazione del Ciclo di Vita) comparativo della valenza ambientale e qualitativa (igienico-microbiologica) del nuovo Protocollo “GREEN” recentemente sviluppato per andare oltre la conformità richiesta dai nuovi CAM Cleaning Professionale.

## 2. Materiali e metodi

### 2.1. Area di applicazione

Il caso di studio oggetto della presente analisi è rappresentato dal servizio di pulizia erogato da L'Operosa presso l'edificio BL27 del campus Bovisa La Masa del Politecnico di Milano, viale Raffaele Lambruschini 4, 20156 Milano (MI). Il cantiere di riferimento è quindi un ambito di pulizia civile, composto da aule didattiche, spazi connettivi, servizi, uffici, mense, biblioteche e sale lettura. È stato scelto per questa analisi perché rappresentativo della tipologia di superfici, del grado di sporco, delle frequenze e delle metodologie adoperate nei cantieri di pulizia civili.

### 2.2. Protocollo “GREEN”

Il protocollo “GREEN” prevede l'utilizzo di prodotti e attrezzature a minor impatto ambientale rispetto al protocollo tradizionale. In Tabella 1 sono riportati i prodotti e le attrezzature/macchinari per il protocollo “GREEN” e Tradizionale per le operazioni di pulizia effettuate.

### 2.3. Analisi comparativa LCA

La superficie dell'area campione dello studio di analisi comparativa copre un'area complessiva di 10735.64 m<sup>2</sup>. In Tabella 2 sono riportati gli ambienti e le aree di studio per l'analisi comparativa LCA.

**Tabella 1.** Caratteristiche di prodotti, attrezzature e macchinari utilizzati nel protocollo “GREEN” e quello tradizionale.

Operazione pulizia	Protocollo Green		Protocollo Tradizionale	
	Prodotto	Attrezzatura / Macchinario	Prodotto	Attrezzatura / Macchinario
Detersione pavimenti – Aree uffici, mense, aule didattiche, biblioteche e sale lettura	"detergente Ecolabel, diluito al 3% in lavatrice sapone, tensioattivi anionici, tensioattivi non ionici < 5 %"	frangia piatta in poliestere e poliammide, ultra-microfibra, Ecolabel	"detergente Ecolabel diluito al 3% in secchio sapone, tensioattivi anionici, tensioattivi non ionici < 5 %"	frangia piatta in viscosa, microfibra
Detersione pavimenti – Spazi connettivi	"detergente Ecolabel, diluito al 3% in macchina sapone, tensioattivi anionici, tensioattivi non ionici < 5 %"	lavasciuga in modalità ECO	"detergente Ecolabel diluito al 3% in macchina sapone, tensioattivi anionici, tensioattivi non ionici < 5 %"	lavasciuga in modalità normale
Spazzatura a umido pavimenti – Aree uffici, spazi connettivi, mense, aule didattiche, biblioteche e sale lettura	-	-	-	veline impregnate monouso

Operazione pulizia	Protocollo Green		Protocollo Tradizionale	
	Prodotto	Attrezzatura / Macchinario	Prodotto	Attrezzatura / Macchinario
Spolveratura a umido, altezza operatore, di arredi, porte e punti di contatto comune – Aree uffici, spazi connettivi, mense, aule didattiche, biblioteche e sale lettura	"detergente Ecolabel super concentrato, diluito al 6% in flacone tensioattivi anionici < 5 %"	panno multiuso in poliestere e poliammide, ultra-microfibra, Ecolabel	"detergente Ecolabel pronto all'uso tensioattivi anionici < 5 %"	panno multiuso in poliestere, microfibra
Detersione banchi, piani di lavoro, lavagne – Aule didattiche	"detergente Ecolabel super concentrato, diluito al 6% in flacone tensioattivi anionici < 5 %"	panno multiuso in poliestere e poliammide, ultra-microfibra, Ecolabel	"detergente Ecolabel pronto all'uso tensioattivi anionici < 5 %"	panno multiuso in poliestere, microfibra
Aspirazione polvere – Biblioteche e sale lettura	-	aspirapolvere	-	aspirapolvere
Detersione e disinfezione pavimento – Servizi igienici al pubblico	detergente-disinfettante PMC, a base ipoclorito, diluito al 3% in vaschetta	frangia piatta in poliestere, ultra-microfibra, Ecolabel	detergente-disinfettante PMC, a base ipoclorito, diluito al 3% in secchio	frangia piatta in viscosa, microfibra
Detersione e disinfezione sanitari, pareti circostanti e arredi – Servizi igienici al pubblico	detergente-disinfettante ad azione disincrostante PMC, a base acido formico, pronto all'uso	panno multiuso in poliestere e poliammide, ultra-microfibra, Ecolabel	"detergente-disinfettante PMC, a base ipoclorito, diluito al 3% in flacone + detergente ad azione disincrostante, a base acido citrico, Ecolabel, pronto all'uso"	panno multiuso in poliestere, microfibra
Disincrostazione dei sanitari – Servizi igienici al pubblico	detergente-disinfettante ad azione disincrostante PMC, a base acido formico, pronto all'uso	-	detergente ad azione disincrostante, a base acido citrico e acido lattico, Ecolabel, pronto all'uso	-
Ricondizionamento tessili	"detergente enzimatico concentrato, Ecolabel tensioattivi non ionici 15 – 30 %, sapone, tensioattivi anionici 5 – 15 %"	lavatrice professionale, capacità 8 kg, cicli lavaggio a 40 °C	"detergente enzimatico concentrato, Ecolabel tensioattivi non ionici 15 – 30 %, sapone, tensioattivi anionici 5 – 15 %"	lavatrice professionale, capacità 8 kg, cicli lavaggio a 60 °C
	"alcalinizzante ad alta concentrazione, Ecolabel fosfonati, poliacarbossilati < 5 %"		"alcalinizzante ad alta concentrazione, Ecolabel fosfonati, poliacarbossilati < 5 %"	
	"disinfettante a base di ossigeno attivo e acido peracetico, PMC sbiancanti a base di ossigeno > 30 %"		"disinfettante a base di ossigeno attivo e acido peracetico, PMC sbiancanti a base di ossigeno > 30 %"	

Coerentemente con la norma ISO 14067, l'unità funzionale utilizzata nello studio è quella definita dalla *Product Category Rules (PCR)* esistente per il sistema di prodotto in esame, ovvero: 1 metro quadro di superficie media rappresentativa mantenuto pulito per 1 anno. Nella definizione della superficie rappresentativa sono stati tenuti in considerazione i differenti tipi di ambienti considerati nelle aree campione. I confini del sistema adottati nel presente studio sono

del tipo “dalla culla alla tomba”, coerentemente con la PCR 2011:03. Nel seguente diagramma sono indicati i processi inclusi nello studio, suddivisi nelle tre fasi “upstream”, “core” e “downstream” (Figura 1).

La metodologia di calcolo dell'analisi LCA comparativa è implementata attraverso il calcolo della categoria d'impatto *Global Warming Potential* (Potenziale di Riscaldamento Globale o GWP) basata sul modello realizzato dall'Intergovernmental Panel on Climate

Tabella 2. Ambienti e superfici di studio.

Area 1 Uffici	Area 2 Spazi connettivi	Area 3B Servizi igienici al pubblico	Area 6 Mense	Area 8 Aule didattiche	Area 14 Biblioteche e sale lettura	Area 15 Aree esterne non a verde	Area 4 Aree Tecniche	TOTALE MQ
463.26	3090.66	465.05	31.00	2177.28	1513.90	1716.13	1278.36	10735.64

Change. Tale modello valuta il contributo all'aumento di effetto serra, e quindi all'innalzamento della temperatura terrestre, di alcuni gas presenti in atmosfera (nello specifico CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SF<sub>6</sub>, HFCs, PFCs), correlando la quantità emessa all'indicatore di categoria "kg CO<sub>2</sub> equivalenti", attraverso l'utilizzo del fattore di caratterizzazione specifico. Come previsto dalle norme UNI EN ISO 14040 – 14044, per procedere con l'analisi LCA comparativa è stato necessario portare a termine un campionamento *in situ* nel cantiere pilota per ciascuno dei due protocolli analizzati. Il suddetto campionamento è stato eseguito in due finestre temporali consecutive di 29 giorni ciascuna, nei seguenti periodi:

Protocollo	Data inizio	Data fine	giorni
Protocollo Tradizionale	11/11/2022	16/12/2022	29
Protocollo Green	21/02/2023	27/03/2023	29

### 2.3. Analisi microbiologiche

La sperimentazione per la valutazione dell'efficienza di sanificazione delle superfici è stata condotta su 12 differenti superfici in quattro differenti ambienti (Tabella 3).

Le prove di lavaggio per le analisi microbiologiche sono state condotte il 15/12/2022 per il protocollo tradizionale e il 12/07/2023 per il protocollo "GREEN". Per ciascuna superficie è stato condotto il campionamento dei batteri attraverso tampone (SRK<sup>®</sup> Rinse Solution-COPAN Diagnostic). Il campionamento è stato eseguito prima e dopo l'utilizzo dei prodotti di pulizia, individuando tre aree rappresentative. Per le superfici S1, S2, S4, S8, S9 e S11 e S12 sono stati campionati 100 cm<sup>2</sup> per ogni area; per le altre superfici le superfici campionate prima e dopo il lavaggio erano equivalenti. I tamponi sono stati mantenuti nel liquido di conservazione in borsa termica e sono stati trasportati entro 4 ore presso il laboratorio di Microbiologia Ambientale dell'Università di Milano – Bicocca. Si è operato successivamente il distacco delle cellule batteriche dal tampone tramite vortex e sono stati quantificati i seguenti parametri microbiologici in accordo con metodiche standard (Istituto Superiore della Sanità, Rapporti ISTISAN 13/37):

- Batteri eterotrofi totali a 22° C;
- Batteri eterotrofi totali a 37° C.

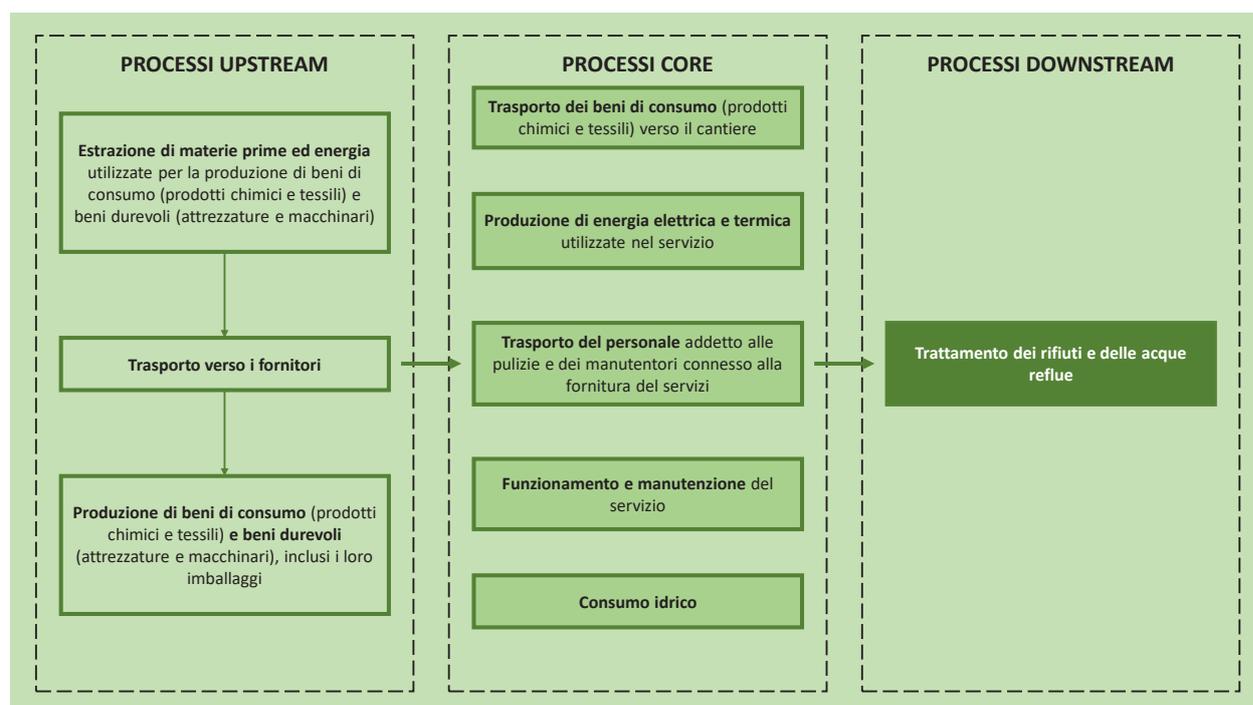


Figura 1. Diagramma di illustrazione dei processi inclusi nei confini del sistema, suddivisi nelle fasi "upstream", "core" e "downstream".

**Tabella 3.** Ambienti e superfici di studio per le analisi microbiologiche.

AMBIENTE	SUPERFICIE
AULA STUDIO BL27.10 I PIANO	S1.PAVIMENTO
	S2.TAVOLO
BAGNO UOMINI PIANO TERRA	S3. WC
	S4.PAVIMENTO
	S5.LAVANDINO
	S6.MANIGLIA
UFFICIO (primo piano)	S7. TELEFONO
	S8. SCRIVANIA
	S9. PAVIMENTO
CORRIDOIO (entrata)	S10. MANIGLIA ENTRATA
	S11. PAVIMENTO
	S12. CESTINO RIFIUTI

I risultati sono riportati come Unità Formanti Colonia per cm<sup>2</sup> o per unità di superficie (UFC per unità di superficie). Preliminarmente si è anche verificata la presenza di batteri patogeni utilizzati come indicatori di contaminazione fecale attraverso la determinazione dei parametri microbiologici:

- *E. coli* tramite metodica standard (Istituto Superiore della Sanità, Rapporti ISTISAN 13/37).
- *Clostridium perfringens* tramite Terreno Selettivo m-CP (Biolife Italiana Srl) (Direttiva del Consiglio Europeo 98/83/CE).

### 3. Risultati

#### 3.1. LCA comparativa

I risultati dell'analisi LCA comparativa evidenziano come la Carbon Footprint of Product (CFP) del protocollo tradizionale risulti essere di 159 g di CO<sub>2</sub>e per ogni m<sup>2</sup> di superficie pulita all'anno, mentre quella del Protocollo "GREEN" è risultata pari a 130 g di CO<sub>2</sub>e, con una riduzione di 29 g di CO<sub>2</sub>e per ogni metro quadro (18,4%).

Il plusvalore ambientale del Protocollo "GREEN" è ancora più evidente se si considera lo scenario di applicazione del protocollo all'intero cantiere pilota oggetto del presente studio – l'edificio BL27 del Campus Bovisa La Masa del Politecnico di Milano. Dai risultati della presente analisi comparativa si evince che il servizio di pulizia erogato in conformità al Protocollo "GREEN" sull'intero cantiere pilota permette di evitare ogni anno l'emissione di 311 kg di CO<sub>2</sub>e. In Tabella 4 sono riportati i valori di CFP per gli aspetti del servizio di pulizia considerati. Si può notare come nel protocollo "GREEN" si abbiano maggiori impatti nel consumo di energia e prodotti chimici da parte della lavatrice rispetto al Tradizionale, dovuti ad un numero superiore di cicli di ricondizionamento dei tessili. Questo aspetto è associato

alla metodologia della pre-impregnazione in macchina per le frange destinate al lavaggio dei pavimenti. D'altra parte, questa scelta risulta virtuosa perché assicura una riduzione nel consumo delle attrezzature tessili non ricondizionabili (usa e getta), e di conseguenza del rifiuto generato. La maggiore riduzione in termini assoluti di impatto è connessa alla riduzione nell'utilizzo dei prodotti chimici per la pulizia, dovuta alla maggiore concentrazione di quelli utilizzati nel protocollo "GREEN".

#### 3.2. Analisi microbiologiche

Per la quasi totalità dei campioni analizzati i parametri *E. coli* e *C. perfringens* sono risultati essere al di sotto del limite di rilevabilità uguale a 1 UFC cm<sup>-2</sup> o 100 UFC per unità di superficie campionata. Unicamente per una delle tre repliche della superficie SUP1 (AULA STUDIO BL27.10) effettuate prima della pulizia con il protocollo tradizionale il parametro *C. perfringens* è risultato essere pari a 1 UFC cm<sup>-2</sup>. Questi risultati dimostrano la sostanziale assenza di indicatori batterici di patogenicità di origine fecale dalle superfici analizzate. Per ciò che concerne l'efficacia di sanificazione, si riportano in Tabella 5 i risultati della determinazione dei parametri microbiologici prima e dopo la pulizia, sia per il protocollo tradizionale sia per quello "GREEN".

In figura 2 sono riportati i box plot dei risultati delle conte dei parametri microbiologici in cui si può osservare la variabilità dei dati.

Sono riportate in Tabella 6 le percentuali di abbattimento delle cariche batteriche dopo il lavaggio delle superfici. Nei casi in cui sono risultate cariche batteriche più alte dopo le operazioni di lavaggio è stato indicato un abbattimento pari a zero. Dai risultati emerge come per entrambi i parametri analizzati ci sia stato un generale abbattimento delle cariche dopo i lavaggi, sia con il metodo tradizionale sia con quello "GREEN" che non

**Tabella 4.** Valori di CFP calcolati.

ASPETTO	$\Delta\%$ CFP	o CFP	Unità di misura
	Green Vs Tradizionale	Green Vs Tradizionale	
PRODOTTI CHIMICI PULIZIA	-0.54	-189.00	kg CO <sub>2</sub> e/ cantiere anno
CONSUMI ENERGETICI LAVANDERIA	0.20	106.00	kg CO <sub>2</sub> e/ cantiere anno
CARRELLO	-0.83	-98.00	kg CO <sub>2</sub> e/ cantiere anno
CONSUMO ENERGETICO MACCHINARI	-0.41	-97.10	kg CO <sub>2</sub> e/ cantiere anno
TRATTAMENTO ACQUE REFLUE	0.75	40.30	kg CO <sub>2</sub> e/ cantiere anno
ATTREZZATURE TESSILI	-0.59	-38.10	kg CO <sub>2</sub> e/ cantiere anno
PRODOTTI LAVANDERIA	0.13	26.00	kg CO <sub>2</sub> e/ cantiere anno
RIFIUTI IN PLASTICA	-0.40	-24.70	kg CO <sub>2</sub> e/ cantiere anno
TRASPORTO PRODOTTI PULIZIA	-0.40	-6.41	kg CO <sub>2</sub> e/ cantiere anno

presenta sostanziali differenze tra i due parametri indagati (batteri totali a 22°C e a 37°C). Per il trattamento tradizionale, nel caso dei batteri totali a 22°C il lavaggio ha ridotto le cariche batteriche sulla superficie al di sotto della rilevabilità in 7 casi sugli 11 analizzabili; per i batteri totali a 37°C questo è successo in 5 casi sui 12 analizzati. A seguito del lavaggio con il processo “GREEN” le cariche batteriche sono sempre state rilevabili pur osservando abbattimenti superiori all’80% delle cariche batteriche in 5 casi sia per batteri totali a 22°C sia per i batteri totali a 37°C. In generale, emerge come le superfici lisce e piatte quali i pavimenti (S1, S4 e S9) e il WC

(S3) siano state più efficacemente sanificate dai processi di lavaggio. In questi casi, con l’eccezione del campione S4 per i batteri a 37°C, i livelli di abbattimento a seguito dei lavaggi con processo tradizionale e “GREEN” sono comparabili. Nel caso di superfici irregolari e/o corrugate quali lavandino, maniglia e telefono si osserva una minore efficacia di sanificazione e una minore efficacia del processo “GREEN” rispetto a quello tradizionale. Particolarmente rilevanti sono i casi del lavandino e del WC. Nel primo caso, ossia il lavandino, osserviamo le più alte cariche batteriche e bassa efficacia di igienizzazione in particolare per il trattamento “GREEN”; nel

**Tabella 5.** Valori medi dei parametri microbiologici per il trattamento tradizionale e quello “GREEN”. I risultati sono riportati come Unità Formanti Colonia per cm<sup>2</sup> per le superfici S1, S2, S4, S8, S9 e S11 e come Unità Formanti Colonia per unità di superficie per le altre.

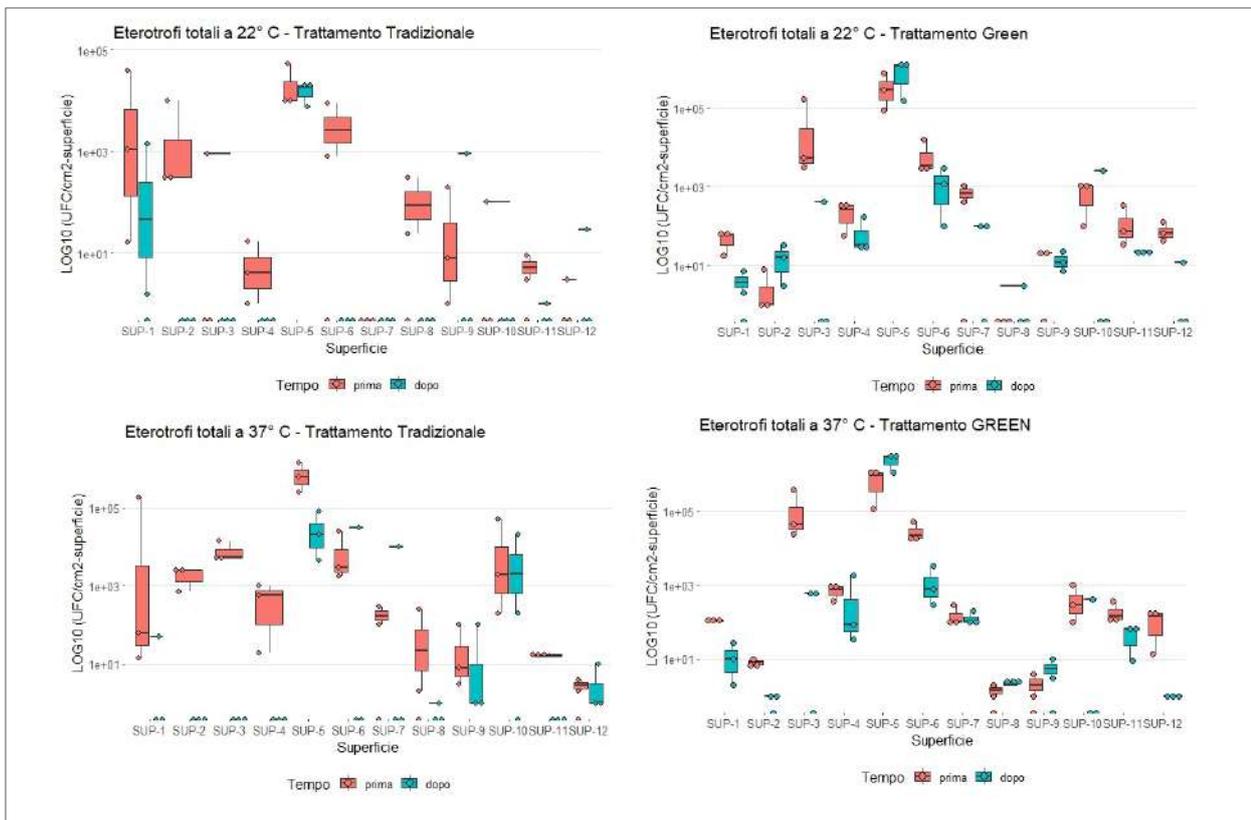
	Batteri eterotrofi totali 22°C – CFU cm <sup>2</sup> – superficie				Batteri eterotrofi totali 37°C – CFU cm <sup>2</sup> – superficie			
	Tradizionale		GREEN		Tradizionale		GREEN	
	prima del lavaggio	dopo il lavaggio	prima del lavaggio	dopo il lavaggio	prima del lavaggio	dopo il lavaggio	prima del lavaggio	dopo il lavaggio
S1.PAVIMENTO	13708	467	49	3	60025	17	111	13
S2.TAVOLO	3533	<1	3	17	1933	<1	8	1
S3. WC	300	<100	58633	133	8300	<100	146100	400
S4.PAVIMENTO	7	<1	245	77	531	<1	741	663
S5.LAVANDINO	24733	15867	385100	924000	766133	35200	795667	2454667
S6.MANIGLIA	3167	<100	7267	1433	9833	10100	30433	1500
S7. TELEFONO	<100	<100	500	67	133	3333	167	133
S8. SCRIVANIA	111	<1	<1	1	84	<1	1	2
S9.PAVIMENTO	70	306	14	14	37	34	2	4
S10. MANIGLIA ENTRATA	33	<100	767	833	17600	6833	467	133
S11. PAVIMENTO	4	<1	148	22	17	<1	203	46
S12. CESTINO RIFIUTI	100	1000	7800	400	200	400	12200	100

secondo caso (WC) si osservano alte cariche iniziali ed alti livelli di abbattimento soprattutto per il trattamento “GREEN”. In alcuni casi, le cariche batteriche sono risultate maggiori dopo il lavaggio rispetto ai valori iniziali. Questo risultato è dovuto alla variabilità della carica batterica iniziale sulle aree analizzate. Infatti, le analisi sono state condotte su sei aree differenti, tre per le analisi prima del lavaggio e tre per le analisi dopo il lavaggio. Questo tipo di risultato è stato ottenuto 2 e 3 volte nel caso del trattamento tradizionale, rispettivamente per i batteri totali a 22°C e 37°C; nel caso del trattamento “GREEN” questo risultato si è ottenuto 4 volte per i batteri totali a 22°C e 3 volte per i batteri totali a 37°C.

#### 4. Discussione

Il presente lavoro ha l'obiettivo di comparare e valutare la compatibilità di utilizzo in termini di efficacia di riduzione delle cariche batteriche, del processo di lavaggio di superfici **CLEANING – Protocollo “GREEN”**, rispetto al processo tradizionale. L'analisi LCA ha mostrato come l'utilizzo del protocollo “GREEN” porti ad un significativo abbattimento dell'impronta di carbonio (CFP) rispetto all'approccio tradizionale con conseguente riduzione delle emissioni di gas clima-alteranti. Nonostante il processo di pulizia non sia generalmente

finalizzato, in ambienti non nosocomiali, alla disinfezione delle superfici, è assodato come la pulizia rimuova fisicamente sporco, detriti e microrganismi dalle superfici, riducendone la presenza e il potenziale di trasmissione. Infatti, l'efficacia dell'abbattimento della carica batterica sulle superfici di edifici pubblici grazie alla pulizia è un aspetto importante per mantenere un ambiente pulito e salubre. Mentre gran parte della ricerca in questo settore si concentra sulla persistenza di agenti patogeni nosocomiali nelle strutture sanitarie, ci sono anche prove che suggeriscono che la pulizia può ridurre efficacemente la carica batterica sulle superfici domestiche, compresi i batteri non patogeni. Una revisione sistematica condotta da Kramer e colleghi ha esaminato la persistenza di diversi patogeni nosocomiali su superfici (Kramer et al., 2006). La revisione ha rilevato che le superfici possono fungere da fonte per focolai di infezioni nosocomiali e la pulizia a base di detergenti e disinfettanti può aiutare a controllare questi agenti patogeni (Kramer et al., 2006). In una revisione di Dancer, è stato sottolineato il ruolo della pulizia nella gestione delle infezioni acquisite in ospedale (HAI) (Dancer, 2014). La revisione ha evidenziato l'importanza della pulizia e della disinfezione nel controllo di agenti patogeni come gli enterococchi resistenti alla vancomicina (VRE),



**Figura 2.** Box-plot dei risultati delle determinazioni dei parametri microbiologici. I risultati sono espressi come  $\text{Log}_{10}$  di CFU per unità di superficie o  $\text{cm}^2$ . I dati al di sotto del limite di rilevabilità sono espressi come dato nullo. Il limite di rilevabilità per le superfici S1, S2, S4, S8, S9 e S11 è pari a 1 CFU  $\text{cm}^{-2}$ ; per le altre superfici il limite di rilevabilità è pari a 100 CFU per unità di superficie campionata.

**Tabella 6.** Valori medi di abbattimento delle cariche batteriche per il trattamento tradizionale e quello “GREEN”. Con NA sono indicate le superfici in cui la carica batterica non è stata rilevabile prima del lavaggio.

Campione	Batteri eterotrofi totali 22°C – Abbattimento (%)		Batteri eterotrofi totali 37°C – Abbattimento (%)	
	Tradizionale	GREEN	Tradizionale	GREEN
S1.PAVIMENTO	96.6	93.9	99.9	88.0
S2.TAVOLO	>97	0.0	>95.0	91.7
S3. WC	>67	99.8	>98.0	99.7
S4.PAVIMENTO	>86	68.6	>99.0	10.4
S5.LAVANDINO	35.8	0.0	95.0	0.0
S6.MANIGLIA	>97	80.3	0.0	95.1
S7. TELEFONO	NA	86.7	0.0	20.0
S8. SCRIVANIA	>99	NA	>99	0.0
S9.PAVIMENTO	0.0	0.0	9.0	0.0
S10. MANIGLIA ENTRATA	>97	0.0	61.0	71.4
S11. PAVIMENTO	>75	85.0	>94	77.1
S12. CESTINO RIFIUTI	0.0	95.0	0.0	99.2

*Staphylococcus aureus* resistente alla meticillina (MRSA) e *Clostridium difficile* (Dancer, 2014). Questi risultati suggeriscono che la pulizia può ridurre efficacemente la carica batterica e contribuire alla prevenzione delle infezioni. Sebbene vi siano ricerche limitate che affrontino specificamente l'efficacia della pulizia delle superfici in edifici pubblici non nosocomiali, è possibile applicare i principi di pulizia e disinfezione. Sebbene il focus della pulizia nelle strutture sanitarie sia spesso sui batteri patogeni, è importante notare che anche i batteri non patogeni svolgono un ruolo nel mantenimento di un ambiente sano. I batteri non patogeni possono ancora contribuire a odori sgradevoli, deterioramento delle superfici e potenziale contaminazione incrociata. Pertanto, sono essenziali pratiche di pulizia efficaci che prendano di mira sia i batteri patogeni che quelli non patogeni. Come emerge dalle linee guida INAIL (INAIL, 2017) non esistono standard o riferimenti normativi per quel che riguarda la valutazione quantitativa dei livelli di contaminazione microbica rinvenuti sulle superfici. La maggior parte dei lavori reperiti in letteratura, riporta valori finalizzati a valutare l'efficacia delle azioni di sanificazione condotte. In questi lavori vengono definiti valori limite di contaminazione microbica differenti in funzione del parametro determinato e della destinazione d'uso. Si ritrovano valori molto stringenti per le destinazioni d'uso nosocomiale e farmaceutico, mentre valori meno stringenti sono riportati per il settore alimentare. Per ambienti critici (es. sale operatorie di ospedali e *clean room*) viene proposto dai diversi autori un valore di carica batterica totale ottimale pari a 0.2 UFC cm<sup>-2</sup>, per zone a rischio molto alto il valore ottimale è 0.04 UFC cm<sup>-2</sup>. Per ambienti a media criticità (ovvero

assimilabili ai reparti di degenza delle strutture ospedaliere) vengono proposti valori ottimali variabili tra 0.6 e 2.5 anche in funzione delle diverse tipologie ambientali, con un valore modale pari a 2 UFC cm<sup>-2</sup>. Per ambienti a bassa criticità, come ad esempio uffici, zone di transito, ecc. il valore ottimale indicato è 5 UFC cm<sup>-2</sup>. Nel settore alimentare si nota una variabilità ancora maggiore, dovuta probabilmente alla necessità degli operatori del settore di garantire uno standard di qualità quanto più possibile specifico ed oggettivo. I valori indicati come ottimali per superfici sulle quali vengono preparati gli alimenti variano da 0.08 a 10 UFC cm<sup>-2</sup>. Il valore di 80 UFC cm<sup>-2</sup> è stato riferito a superfici di ambienti destinati alla ristorazione (INAIL, 2017). Nell'ambito investigato di un campus universitario non sono presenti criticità derivanti dall'utilizzo a fini di ristorazione, ma può essere utilizzato il valore sopra menzionato di 80 UFC cm<sup>-2</sup> come valore riferito ad ambienti di ristorante. In Tabella 7 si riporta, limitatamente ai pavimenti e scrivanie/tavoli in cui è stato possibile determinare il titolo batterico per cm<sup>2</sup>, la frequenza con la quale è stato superato il limite di 80 UFC cm<sup>-2</sup>, sia prima sia dopo il lavaggio.

Questa analisi mostra come anche il protocollo “GREEN” sia generalmente in grado di ridurre i superamenti dei valori di riferimento di contaminazione microbica delle superfici, in particolare per i batteri eterotrofi totali 37°C.

## 5. Conclusioni

Il protocollo “CLEANING GREEN” è stato specificamente sviluppato per ridurre l'impatto ambientale del processo di pulizia e, allo stesso tempo, garantire adeguate capacità detergenti e di sanificazione. L'analisi

**Tabella 7.** Frequenza di superamento dei valori di 80 UFC cm<sup>-2</sup> per pavimenti e tavoli/scrivanie.

Limite 80 UFC cm <sup>-2</sup>	Batteri eterotrofi totali 22°C		Batteri eterotrofi totali 37°C	
	Tradizionale	GREEN	Tradizionale	GREEN
Prima del lavaggio	7/18	3/18	8/18	9/18
Dopo il lavaggio	2/18	1/18	1/18	2/18

LCA ha dimostrato e quantificato una significativa riduzione dell'impronta di carbonio. Considerata l'assenza di microrganismi patogeni indicatori di contaminazione fecale e che il campus universitario non presenta criticità sanitarie o legate ai servizi di ristorazione, le analisi microbiologiche condotte hanno mostrato come il protocollo "GREEN" garantisca un sostanziale abbattimento delle cariche batteriche e il mantenimento di cariche microbiche adeguate alle destinazioni d'uso dell'area considerata. In conclusione, il protocollo "GREEN" ha dimostrato, sia dal punto di vista dell'analisi ambientale, sia dal punto di vista dell'analisi microbiologica, di essere conforme al CAM, nello specifico al requisito premiante di cui alla lettera "e". ■

## Riferimenti bibliografici

- Assadian O., Harbarth S., Vos M., Knobloch J. K., Asensio A., Widmer A. F. (2021) Practical recommendations for routine cleaning and disinfection procedures in healthcare institutions: a narrative review. *Journal of Hospital Infection*: 104-114.
- Carraturo F., Del Guidice G., Morelli M., Cerullo V., Libralato G., Galdiero E., Guida M. (2020) Persistence of SARS-CoV-2 in the environment and COVID-19 transmission risk from environmental matrices and surfaces. *Environmental Pollution* 265: 115010.
- Dancer S.J. (2014) Controlling Hospital-Acquired Infection: Focus on the Role of the Environment and New Technologies for Decontamination. *Clinical Microbiology Reviews*, 27(4): 665-690.
- Decreto Ministeriale 7 Luglio 1997, n. 274, per la disciplina delle attività di pulizia, di disinfezione, di disinfestazione, di derattizzazione e di sanificazione (GU Serie Generale n.188 del 13-08-1997).
- Decreto Ministeriale 29 gennaio 2021, Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di pulizia e sanificazione di edifici e ambienti ad uso civile, sanitario e per i prodotti detergenti. (21A00941) (GU Serie Generale n.42 del 19-02-2021).
- Direttiva del Consiglio Europeo 98/83/CE del 3 Novembre sulla qualità delle acque destinate al consumo umano (GU L 330 del 5.12.1998, pag. 32).
- INAIL (2017) La contaminazione microbiologica delle superfici negli ambienti lavorativi.
- Istituto Superiore della Sanità (2013) Strategie di monitoraggio dell'inquinamento di origine biologica dell'aria in ambiente indoor, Rapporti ISTISAN 13/37.
- Kampf G., Todt D., Pfaender S., Steinmann E. (2020) Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and their inactivation with biocidal agents. *Journal of Hospital Infection* 106: 678-697.
- Kramer A., Schwebke I., Kampf G. (2006) How long do nosocomial pathogens persist on inanimate surfaces? A systematic review. *BMC Infectious Diseases* 6:130.
- Marquès M., Domingo J. L. (2021) Contamination of inert surfaces by SARS-CoV-2: Persistence, stability and infectivity. A review. *Environmental Research* 193: 110559.
- Palabiyik I., Yilmaz M. T., Fryer P.J., Robbins P. T., Toker O. S. (2015) Minimising the environmental footprint of industrial-scaled cleaning processes by optimisation of a novel clean-in-place system protocol. *Journal of Cleaner Production* 108: 1009-1018.
- Otter J. A., Yezli S., French G. L. (2011) The Role Played by Contaminated Surfaces in the Transmission of Nosocomial Pathogens. *Infection Control and Hospital Epidemiology* 32(7).
- UNI EN ISO 14040:2006 Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Principi e quadro di riferimento.
- UNI EN ISO 14044:2006 Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Requisiti e linee guida.
- UNI EN ISO 14067:2018 Gas ad effetto serra – Impronta climatica dei prodotti (Carbon footprint dei prodotti) – Requisiti e linee guida per la quantificazione.
- Van Lieshout K. G., Bayley C., Akinlabi S. O., von Rabenau L., Dornfeld D. (2015) Leveraging life cycle assessment to evaluate environmental in green cleaning products. *Procedia CIRP* 29: 372-377.

## Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il Politecnico di Milano, in particolare, Eleonora Perotto (Area Gestione Infrastrutture e Servizi, Servizio Sostenibilità Ambientale) per il coordinamento del progetto in chiave sostenibile, Giacomo Rossello e Roberto Castelli (Area Gestione Infrastrutture e Servizi, Servizio Gestione Patrimonio Edilizio-Campus Bovisa) per la gestione degli aspetti logistico-infrastrutturali e il supporto nelle attività di campionamento.

# RASSEGNA ED ANALISI DELLE VARIABILI CHE INFLUENZANO LE EMISSIONI DI AMMONIACA DAL SETTORE ZOOTECNICO

Anna Gilia Collalto, Alessandro Marongiu, Elisabetta Angelino\*

ARPA LOMBARDIA, U.O. Inventario delle Emissioni in Atmosfera, Milano.

## Sommario

L'ammoniaca è un inquinante atmosferico, che porta all'acidificazione e all'eutrofizzazione del suolo e dell'acqua e contribuisce alla formazione di particolato atmosferico secondario. Secondo le stime attuali degli inventari delle emissioni nazionali e locali, gli allevamenti zootecnici e la fertilizzazione dei terreni costituiscono la principale sorgente di emissione di questo inquinante. La normativa finalizzata alla riduzione e controllo delle emissioni di ammoniaca interviene su più fronti: fissando limiti ed obiettivi di riduzione delle emissioni a livello nazionale e definendo degli standard di riferimento tecnologico per alcune tipologie di allevamenti zootecnici.

Nel presente studio, i fattori di emissione medi nazionali per l'ammoniaca, riferiti all'ultimo aggiornamento dell'inventario nazionale delle emissioni in atmosfera (ISPRA, 2023), sono stati confrontati con i risultati ottenuti dal software di supporto alle decisioni e alle autorizzazioni a livello aziendale: BAT-tool Plus (CRPA, 2021), che risulta ampiamente utilizzato nell'ambito delle autorizzazioni integrate ambientali. Verificata quindi la compatibilità delle stime nazionali con quanto ottenibile a livello della singola azienda, utilizzando dati ottenuti da misure su scala mondiale e raccolti nel database DATAMAN, è stato possibile indagare la coerenza e l'allineamento dei fattori di emissione nazionali e delle simulazioni aziendali, in un contesto geograficamente molto più ampio.

Le analisi statistiche su dati misurati effettuate in questo studio confermano l'influenza che svariati fattori hanno sulle emissioni di ammoniaca dal comparto zootecnico, quali le variabili legate alle tecnologie degli allevamenti e di fertilizzazione, le caratteristiche chimiche e fisiche degli effluenti, i parametri meteorologici.

---

**Parole chiave:** *inquinamento atmosferico, ammoniaca, effluenti zootecnici, fattori di emissione.*

---

## REVIEW AND ANALYSIS OF THE VARIABLES INFLUENCING AMMONIA EMISSIONS FROM LIVESTOCK

### Abstract

Ammonia is an atmospheric pollutant that leads to the acidification and eutrophication of soil and water and contributes to the formation of secondary atmospheric particulate matter. According to the current estimates from national and local emission inventories, livestock and soil fertilization are the main sources of this pollutant. Legislation aimed at reducing and controlling ammonia emissions intervenes on several fronts: setting limits and emission reduction targets at the national level and defining technological reference standards for certain types of livestock.

In this study, the national average emission factors for ammonia, referred to the latest update of the national inventory of emissions into the atmosphere (IIR 2023), were compared with the results obtained from the decision support and authorization software at the farm level: BAT-tool Plus, which is widely used in the context of integrated environmental authorizations. BAT-tool Plus was used to process two emission scenarios, corresponding to a maximum (HE = high emissions) and a minimum emission (LE = low emissions) scenario. The HE scenario was obtained by always inserting high emission and low efficiency techniques, while the LE scenario was processed considering some of the best available techniques. The compatibility of national estimates with what can be obtained at the level of the single farm was here verified. Therefore, using data obtained from global scale measurements and collected in the DATAMAN database, it was possible to investigate the consistency and alignment of national emission factors and livestock simulations, in a much wider geographical context.

The statistical analyses on measured data carried out in this study confirm the influence that various factors, such as variables related to the level of technological

IdA



\* Per contatti: Elisabetta Angelino, Via Ippolito Rosellini, 17, 20124, Milano. Tel 0269666721.

Ricevuto il 30-11-2023; Correzioni richieste il 15-12-2023; Accettazione finale il 10-1-2024

implementation, the chemical and physical characteristics of manure and some meteorological parameters, have on ammonia emissions from the livestock.

Regarding the housing stage, the variables that mostly affect ammonia emissions are linked to the amount of nitrogen (N) excreted by the animal and to other characteristics of the animal shelters, such as the flooring type and the ventilation system.

In reference to the storage, the presence of a cover on the slurry and the type of the cover itself are the variables that mostly affect ammonia emission rates.

Finally, broadcast is the most emissive spreading method; the action of the wind may affect ammonia emissions when the land distribution is not followed by any incorporation of manure into the soil. It would be useful in the future to investigate the concomitance and associated influence of other factors, such as the time of incorporation of manure into the soil and some chemical-physical parameters of soil.

---

**Keywords:** *air pollution, ammonia, manure management, emission factors.*

---

## 1. Introduzione

In Italia, così come in Europa, le emissioni di ammoniaca risultano legate principalmente all'agricoltura e, in particolare, agli stadi emissivi che caratterizzano gli allevamenti intensivi di bovini, suini e avicoli (ISPRAa,b, 2023; EEA/EMEP, 2019).

L'ammoniaca, insieme agli ossidi di azoto e di zolfo, contribuisce alla formazione del particolato secondario più fine ed alla eutrofizzazione ed acidificazione degli ecosistemi. Per questo, la riduzione delle emissioni di ammoniaca in atmosfera è oggetto di una specifica direttiva, nota anche come direttiva NEC – National Emission Ceilings, recepita in Italia con D.Lgs 81/2018 che introduce degli obiettivi di riduzione per diversi altri inquinanti.

Il manuale EEA/EMEP costituisce il documento di riferimento per le stime, nell'ambito degli inventari nazionali e locali, delle emissioni in atmosfera. Nel manuale EEA/EMEP si precisa come le emissioni in atmosfera possano essere stimate tramite algoritmi a differente livello di complessità, quest'ultimo definito come Tier. Il Tier 1 rappresenta la metodologia più semplice, impiegando dati statistici facilmente reperibili per descrivere l'intensità dei processi e fattori di emissione medi di default. Il Tier 2 prevede, invece, l'utilizzo di fattori di emissione più specifici, definiti sulla base della tipologia e delle condizioni dei processi per l'area in cui viene sviluppato l'inventario

delle emissioni. Nel Tier 3, il livello più complesso, le conoscenze scientifiche più aggiornate sono implementate in apposite procedure e modelli e ciò si traduce con un più alto livello di dettaglio che comporta una maggiore disaggregazione delle attività e lo sviluppo di modelli più sofisticati. La TFEIP (Task Force on Emission Inventories and Projections), costituita da esperti da tutta Europa, si occupa di armonizzare le metodologie di stima e reporting degli inventari redatti dagli Stati membri nell'ambito della Convenzione Internazionale per l'Inquinamento Transfrontaliero (CLRTAP) e di aggiornare le linee guida tecniche del manuale.

In Italia, nell'ambito dei tavoli tecnici nazionali di SNPA (Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, Legge n. 132 del 2016) sono stati sviluppati diversi documenti di riferimento che declinano le linee guida internazionali nell'ambito nazionale (CTN\_ACE, 2001; SNPA, 2016; De Lauretis et al., 2012).

Annualmente viene data la comunicazione delle stime dell'inventario nazionale delle emissioni, in accordo a quanto previsto nell'ambito della CLRTAP/UNECE e dei relativi Protocolli di riduzione delle emissioni e l'ultimo, IIR 2023, riferito al 2021 è stato pubblicato nel 2023 (ISPRA, 2023).

L'allegato VIII della parte seconda del D.Lgs 152/2006 e s.m.i., elencando gli ambiti di applicazione della normativa e ricalcando la direttiva 96/61/CE del 24 settembre 1996 sulla prevenzione e la riduzione integrate dell'inquinamento (IPPC – Integrated Pollution Prevention and Control) e la direttiva 2010/75/UE (IED – Industrial Emissions Directive), considera nella voce "altre attività" anche gli allevamenti intensivi di pollame o suini, che comprendano un numero di posti superiore a determinate soglie (40.000 posti pollame, 2.000 posti suini dai 30 kg/capo in su, 750 posti scrofe). Nello stabilire le condizioni di autorizzazione per le installazioni di cui al capo II della direttiva 2010/75/UE, fungono da riferimento le conclusioni sulle BAT (BAT-C, 2017), dove sono anche forniti livelli di emissione associati alle migliori tecniche disponibili, i BAT-AEL.

Oltre che logico in termini concettuali, risulta utile a livello operativo distinguere, nell'ambito delle attività del settore zootecnico, diverse fasi, o stadi emissivi, come di seguito specificato:

1. stabulazione o ricovero degli animali;
2. stoccaggio degli effluenti;
3. spandimento o distribuzione in campo degli effluenti.

Già il BAT-tool Plus, applicativo sviluppato dal Centro Ricerche Produzioni Animali per il calcolo delle emissioni di ammoniaca dagli allevamenti intensivi di bovini, suini ed avicoli, (CRPA, 2021), calato nel



**Tabella 1.** Fattori di emissione medi nazionali dell'ammoniaca dalla gestione degli effluenti zootecnici per il 2021.

NH <sub>3</sub> [kg capo <sup>-1</sup> anno <sup>-1</sup> ]	Stabulazione	Stoccaggio	Spandimento
Vacche da latte	16,73	13,54	11,81
Altri suini	2,38	1,61	1,11
Scrofe	4,86	3,45	2,39
Galline ovaiole	0,13	0,05	0,04
Polli da carne	0,08	0,05	0,02

nazionali per l'ammoniaca (Tier 2) espressi in kg capo<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>, riferiti al 2021, relativamente alle categorie animali di seguito considerate: vacche da latte, suini, scrofe, galline ovaiole e polli da carne. Il fattore di emissione totale, per ciascuna delle categorie animali, è ripartito nei diversi stadi emissivi (IIR 2023).

### 2.2. Software per il calcolo delle emissioni aziendali

Realizzato nell'ambito del progetto LIFE PREPAIR, il BAT-tool Plus permette di calcolare le emissioni di NH<sub>3</sub> e di GHG su scala aziendale (CRPA, 2021).

Il tool, basato sulle metodologie di calcolo proprie del Tier 2, consente di stimare le emissioni provenienti dagli allevamenti intensivi di bovini, suini e avicoli e scompone il valore delle emissioni totali (kg anno<sup>-1</sup>) nei contributi derivanti dai diversi stadi emissivi.

L'attività di applicazione del BAT-tool Plus si è articolata in due fasi:

1. elaborazione di due scenari emissivi, inserendo le caratteristiche per tre tipologie di allevamento (bovini, suini e avicoli) sotto descritte;
2. confronto tra i fattori di emissione ottenuti dalle simulazioni elaborate con il BAT-tool Plus e i fattori di emissione medi nazionali pubblicati nell'IIR 2023.

I due scenari emissivi corrispondono ad uno scenario di massima (HE) e di minima emissione (LE).

Lo scenario HE è stato ottenuto inserendo sempre tecniche ad alta emissione e bassa efficienza, mentre lo scenario LE è stato elaborato considerando alcune delle migliori tecniche disponibili presenti in BAT-tool Plus e derivanti dalle BAT-C e dal documento tecnico UNECE-TFRN (Task Force for Reactive Nitrogen).

Esistono a livello internazionale diversi software analoghi al BAT-tool Plus per presupposti concettuali, metodologie e tipo di risultati restituiti.

Tra questi, si possono citare: AgrEE tool, ALFAMI, Farm AC, Manure Management N-flow tool (TFEIP, 2023).

AgrEE tool (Agricultural Emission Estimation tool) nasce come strumento per calcolare le emissioni in atmosfera di inquinanti — ammoniaca, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, metalli pesanti, NO<sub>x</sub>, metano, ecc. — che derivano dalle attività agricole. Il tool si basa sul manuale EEA/

EMEP e sulle Linee Guida dell'IPCC, utilizzando, come approccio principale per le stime, le metodologie di calcolo proprie del metodo Tier 2. Le tre sorgenti principali considerate nell'ambito di questo strumento sono le seguenti: allevamenti (che comprendono fermentazione enterica e gestione degli effluenti), emissioni da suoli agricoli e da combustione di stoppie.

ALFAMI (Ammonia Loss from Field-Applied Manure) nasce al fine di comprendere e prevedere le emissioni di ammoniaca derivanti dalla fase dello spandimento in campo del letame (Hafner et al., 2017). Il progetto si compone di un dataset di misure di emissioni da diversi Paesi che, con la versione aggiornata di ottobre 2022, ha iniziato ad includere anche i dati dell'Italia; si compone inoltre di un modello che stima le emissioni di ammoniaca dal letame applicato sul campo, in funzione della quantità, proprietà, gestione dello stesso e delle condizioni meteorologiche.

Sviluppato nell'ambito del progetto europeo Animal-Change, Farm AC (Farm Animal Change) è un modello flessibile e adattabile che simula i flussi di azoto e di carbonio ed utilizza le metodologie di calcolo proprie del Tier 2 relativamente alle emissioni dalla gestione degli effluenti zootecnici. Per ciò che concerne il bilancio di azoto, il tool, basandosi sul modello di flusso di N che occorre negli allevamenti, combina dati di input e di specifiche variabili che descrivono l'allevamento legato allo scenario di base; quindi, quantifica e restituisce le perdite di azoto riferite allo scenario ottenuto applicando tale modello di flusso allo scenario di base.

Il Manure Management N-flow tool, sviluppato da Aether UK (<https://aether-uk.com/>), possiede anch'esso un approccio basato sul Tier 2 ed è stato concepito al fine di calcolare le emissioni dei composti azotati da diverse sorgenti, che ricalcano l'organizzazione in capitoli delle attività di applicazione dei reflui e dei suoli del manuale EEA/EMEP.

### 2.3. DATAMAN: un database di misure di emissioni di ammoniaca dal settore zootecnico

La principale raccolta di dati misurati sulle emissioni di ammoniaca dal settore zootecnico si trova nel database DATAMAN, che nasce come progetto interna-

zionale con lo scopo di sviluppare e popolare un database sulle emissioni di  $\text{NH}_3$  e GHG derivati dalla gestione degli effluenti zootecnici e, conseguentemente, per ridefinire i fattori di emissione per gli inventari nazionali (Beltran et al., 2021; Hassouna et al., 2022; van der Weerden et al., 2021; van der Weerden et al., 2023; Webb et al., 2021).

In analogia agli altri strumenti di calcolo come BAT-tool Plus, DATAMAN si articola in base a stadi emissivi ed inquinanti considerati. In termini operativi, infatti, all'interno del database DATAMAN è possibile fare riferimento a tre diversi dataset, uno relativo a ciascuna delle tre fasi di cui sopra: stabulazione, stoccaggio, spandimento.

Comune ai tre dataset è l'ampio ventaglio di variabili considerate (163 per la stabulazione, 146 per lo stoccaggio, 113 per lo spandimento), che è possibile suddividere in differenti categorie in base al tipo di informazioni ad esse associate. Infatti, le informazioni possono riferirsi, tra le altre cose, al Paese, alla zona climatica di appartenenza, alla specie chimica e ai dettagli riferiti alle misure, ai tassi di emissione, alle categorie di animali e alla descrizione delle stesse, ai fattori di emissione, a fattori di conversione e, infine, alle tecniche di stabulazione, stoccaggio e spandimento applicate.

Come riportato da Hassouna et al. (2022), la fase alla quale sono associati più dati è la stabulazione, mentre la specie più rappresentata è quella dei suini.

Uno degli obiettivi del presente studio era mettere a confronto i dati sulle emissioni derivati dal DATAMAN con quelli forniti nell'IIR 2023 e quelli delle simulazioni con il BAT-tool Plus. Per esigenze di confrontabilità, è stato quindi necessario uniformare le unità di misura dei fattori di emissione per l'ammoniaca forniti dal DATAMAN in modo che fossero rapportabili con l'unità di misura ( $\text{kg NH}_3 \text{ capo}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ ). Per fare ciò, sono state utilizzate le informazioni relative all'azoto escreto e all'azoto al campo, informazioni specifiche per ciascuna delle categorie di animali indagate. I valori dell'azoto escreto sono stati ricavati dalle tabelle del BAT-tool Plus, mentre i valori dell'azoto al campo dalla Tabella 2, Allegato I, del DM effluenti (Decreto n.5046, 2016).

#### 2.4. Le variabili meteorologiche

Le emissioni di ammoniaca che derivano dai reflui degli allevamenti sono legate all'esposizione all'aria degli stessi. La modulazione temporale delle emissioni di ammoniaca in un modello di trasporto chimico dispersivo CTM (Chemical Transport Model) può essere stimata sulla base di variabili meteorologiche che mutano nel tempo, come riportato da diverse ricerche (Ambelas-SkjøTh et al., 2004; Gyldenkerne et al., 2005; Huang et al., 2012; Hutchings et al., 2021; Reis et al., 2011; Sutton et al., 2012).

Pertanto, è opportuno che tra i fattori che influenzano le emissioni di ammoniaca dal settore zootecnico, vengano considerati anche alcuni parametri meteorologici, quali temperatura, umidità relativa, velocità del vento e radiazione solare. Tali fattori sono infatti in grado di influenzare la turbolenza nell'intorno della sorgente emissiva.

Tali parametri, per lo più, risultano influenzare non una singola fase, ma, con peso e modalità diversa, trasversalmente più fasi (figura 1).

Ad esempio, la temperatura e l'umidità relativa giocano un ruolo importante in tutte e tre gli stadi emissivi (stabulazione, stoccaggio e spandimento), poiché determinano la velocità e i tempi di reazione dell'ammoniaca in atmosfera. In questo studio, utilizzando le informazioni presenti in DATAMAN, i fattori di emissione per l'ammoniaca sono stati correlati con la temperatura media e l'umidità relativa registrate in alcuni ricoveri per animali per la fase di stabulazione.

Per le fasi di stoccaggio e spandimento in campo dei reflui, sono stati considerati gli effetti della temperatura ambiente e della velocità del vento.

### 3. Risultati e discussione

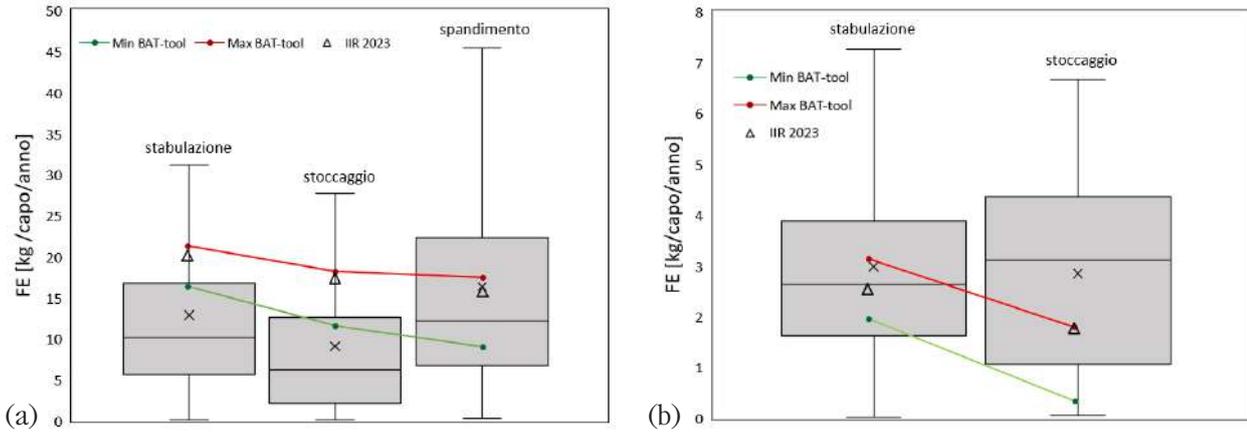
#### 3.1. I fattori di emissione nazionali e aziendali nel panorama internazionale

Vengono riportati in forma grafica i risultati del confronto tra i fattori di emissione dell'ammoniaca per le principali categorie di animali dalle tre fonti dei dati prese in esame: DATAMAN, BAT-tool Plus e IIR 2023. Rispettivamente le figure 2-a e 2-b riportano gli esiti di tali confronti per vacche da latte e suini in crescita, mentre le figure 3-a e 3-b quelli per galline ovaiole e polli da carne.

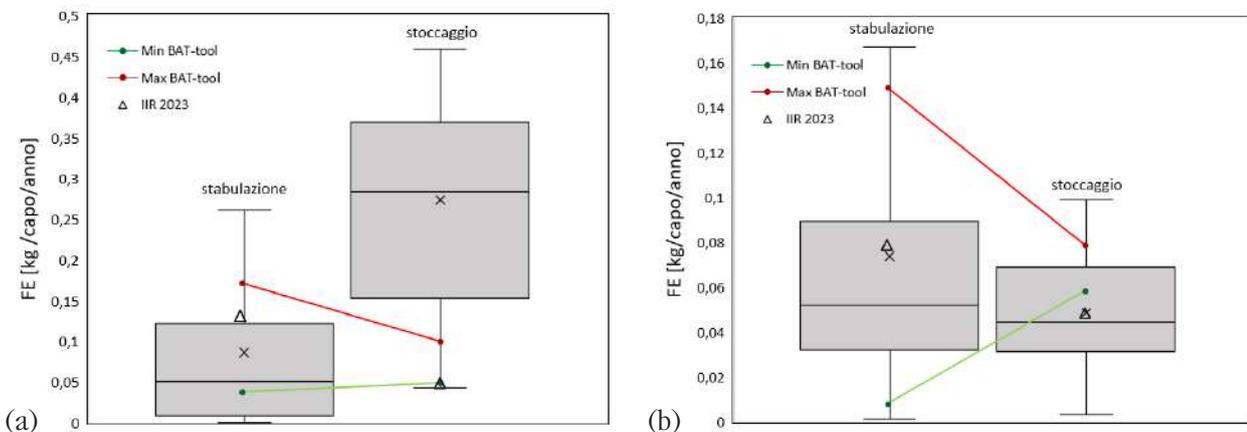
Relativamente al DATAMAN, si precisa che sono stati omessi dall'analisi i fattori di emissione negativi e dalla rappresentazione grafica gli outlier.

Per le vacche da latte è stato possibile, grazie ai dati disponibili, analizzare l'allineamento tra i fattori di emissione per l'ammoniaca afferenti alle tre fonti dei dati, per tutte e tre le fasi; mentre, per i suini in crescita e le due categorie di avicoli, lo spandimento è stato omesso. Infatti, per alcuni suini e per gli avicoli, il dataset di DATAMAN relativo allo spandimento, dispone ancora di pochi dati e/o di dati non differenziati per categoria animale.

Le figure 2 e 3 sono strutturate nel seguente modo: i boxplot grigi, relativi ai dati di DATAMAN, fotografano l'ampia variabilità dei fattori di emissione per l'ammoniaca nel panorama internazionale, all'interno del quale si collocano i dati italiani per il 2021, elaborati da ISPRA nell'IIR 2023 (triangolo nero vuoto nelle figure). Contestualmente, sono anche riportati i fattori



**Figura 2.** Confronto tra i fattori di emissione dell'ammoniaca (IIR 2023, scenari HE e LE dal BAT-tool Plus e range delle misure del DATAMAN): (a) Vacche da latte; (b) Suini in crescita.



**Figura 3.** Confronto tra i fattori di emissione dell'ammoniaca (IIR 2023, scenari HE e LE dal BAT-tool Plus e range delle misure del DATAMAN): (a) Galline ovaiole; (b) Polli da carne.

di emissione per l'ammoniaca ottenuti dall'elaborazione con BAT-tool Plus dei due scenari: HE (in figura, max BAT-tool) e LE (in figura, min BAT-tool), come spiegato nel paragrafo 2.2.

I fattori di emissione nazionali si collocano, quasi per tutti i casi illustrati, all'interno dell'intervallo minimo-massimo elaborato con BAT-tool Plus.

### 3.2. Le variabili che influenzano le emissioni di ammoniaca

Seguono la descrizione e gli esiti dell'attività svolta nel presente studio di analisi della correlazione tra diverse variabili: meteorologiche, tecnologiche, chimico-fisiche dell'effluente, considerando le differenti fasi di gestione dei reflui. Dove possibile, i fattori di emissione misurati in DATAMAN, sono stati confrontati con i coefficienti di riduzione percentuale delle emissioni riportati nelle tabelle di BAT-tool Plus.

#### 3.2.1. Stabilizzazione

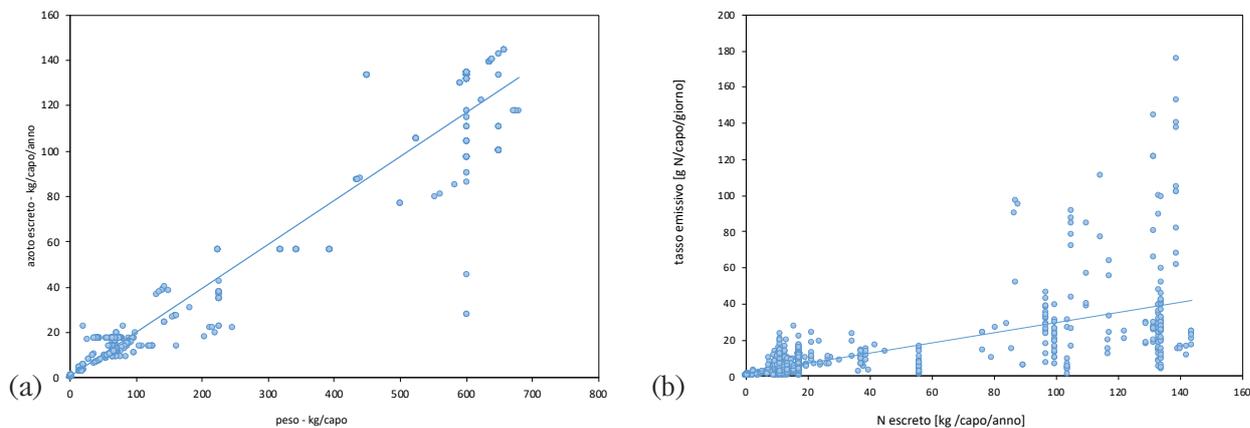
Effettuando un'analisi su tutto il dataset della stabilizzazione all'interno di DATAMAN, relativamente alle emissioni di ammoniaca, è stata ottenuta un'ottima correlazione tra il peso degli animali e il dato dell'azoto escreto (figura 4-a).

Esiste ed è positiva anche la correlazione tra il dato dell'azoto escreto e il tasso di emissione per l'ammoniaca, espresso come  $\text{g N capo}^{-1} \text{giorno}^{-1}$ , sullo stesso dataset riferito alla stabilizzazione (figura 4-b).

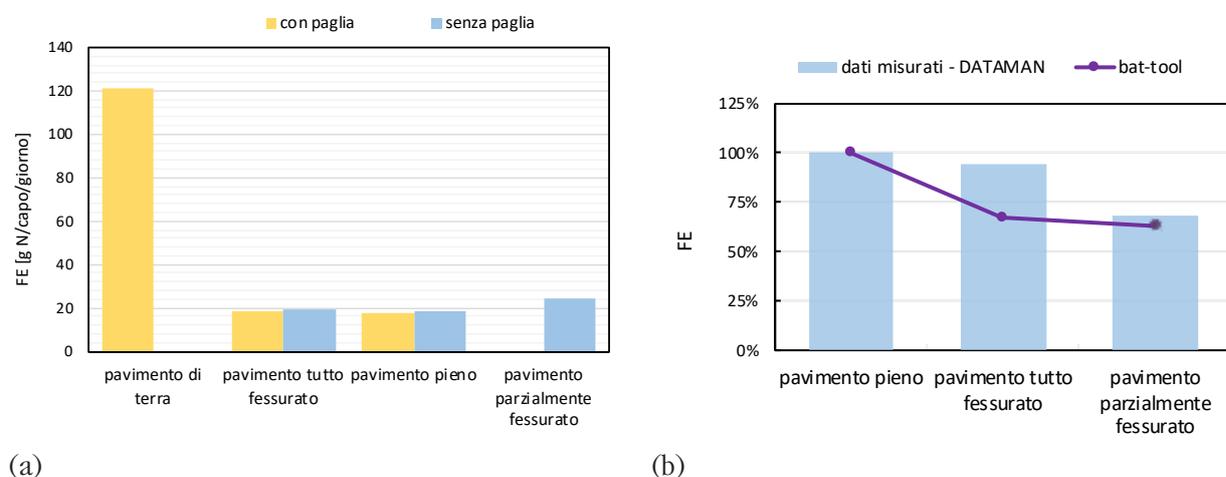
La scelta di rappresentare queste specifiche dipendenze si deve a diverse motivazioni:

- allineamento con la letteratura esistente;
- bontà della correlazione (figura 4-a);
- dispersione interessante per approfondimenti (figura 4-b);
- disponibilità di dati in DATAMAN.

Tuttavia, il valore di  $R^2$  minore nel caso della correlazione tra azoto escreto e tasso emissivo e la dispersione



**Figura 4.** Grafici di dispersione che mostrano (a) la correlazione tra il peso degli animali e il valore dell'azoto escreto e (b) la correlazione tra l'azoto escreto e il tasso di emissione.



**Figura 5.** Confronto tra tipologie di pavimenti per (a) vacche da latte e (b) suini in crescita e influenza sui fattori di emissione per l'ammoniacca.

dei punti, che mostra come ad uno stesso valore di azoto escreto corrispondano più valori di emissione, hanno reso necessario considerare la concomitanza e l'influenza di ulteriori variabili legate alla tecnica di stabulazione. Pertanto, sono state considerate anche altre variabili, relative, ad esempio, al tipo di pavimentazione e alla tipologia di ventilazione nei ricoveri degli animali.

L'analisi, condotta per vacche da latte, suini in crescita e avicoli, conferma quanto riportato nella principale documentazione tecnica: l'AGD, ossia il documento dell'UNECE Ammonia Guidance Document (Bittman et al., 2014) e le BAT-C, ossia le conclusioni sulle migliori tecniche disponibili, in ambito zootecnico (Decisione di Esecuzione (UE) 2017/302).

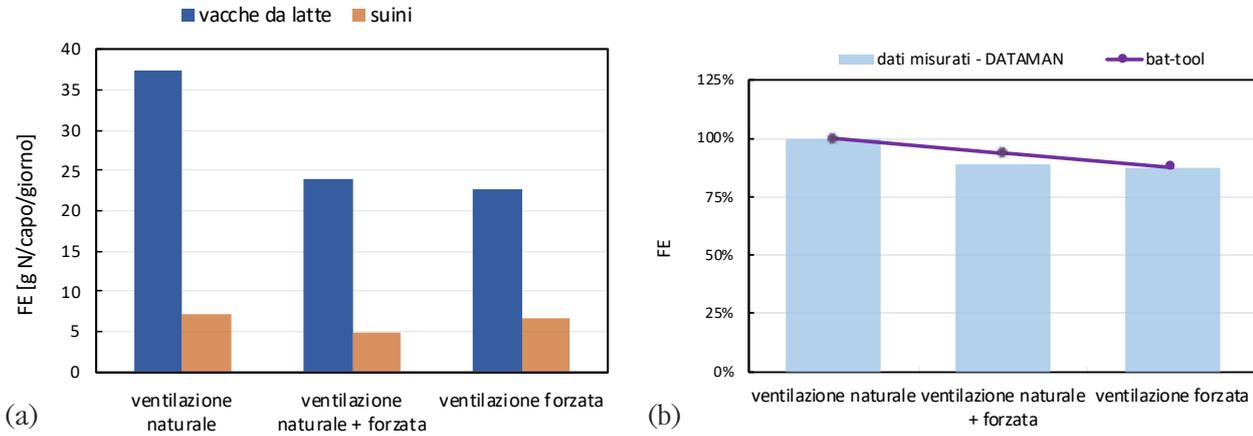
La figura 5-a mostra che, in relazione alle vacche da latte, i tassi emissivi più alti sono legati alla pavimentazione con paglia.

In relazione ai suini, in figura 5-b, le emissioni derivate dai dati di letteratura, ossia dalle misure speri-

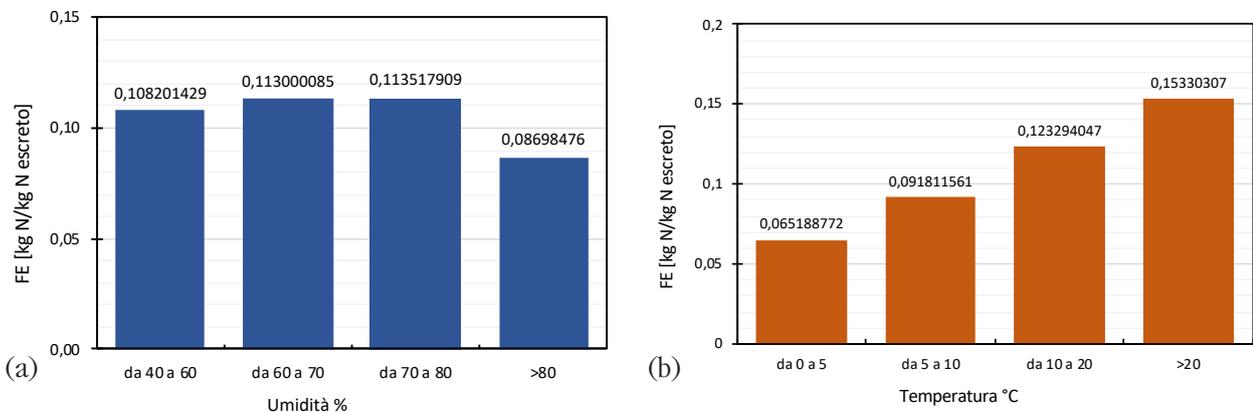
mentali raccolte in DATAMAN diminuiscono con pavimento totalmente e parzialmente fessurato rispetto al pavimento pieno. I fattori di emissione (FE), espressi come percentuale in ordinata, sono stati ottenuti rapportando i valori di emissione associati ai diversi pavimenti, rappresentati in ascissa, al valore più alto (quindi, in questo caso, il FE ottenuto col pavimento pieno). Figura 5-b riporta anche la variazione dei fattori di emissione rispetto alle stesse tipologie di pavimentazione, ottenuti da BAT-tool Plus.

I grafici in figura 6, relativamente alla modalità di ricircolo dell'aria nei ricoveri di vacche da latte e suini (a) e polli da carne (b), confermano che la ventilazione naturale è la tecnologia più emissiva, con riferimento sia ai dati misurati in DATAMAN (a), che ai coefficienti riportati in BAT-tool Plus (b), secondo le modalità descritte per figura 5-b.

Sono state considerate, congiuntamente a questi aspetti, anche la temperatura e l'umidità relativa.



**Figura 6.** Confronto tra modalità di ricircolo dell'aria (a) nei ricoveri di vacche da latte e suini e (b) nella stabulazione degli avicoli e influenza sui fattori di emissione [FE] per l'ammoniaca.



**Figura 7.** Istogrammi che mostrano, per dati misurati – fonte: DATAMAN – i valori medi dei fattori di emissione [FE] di ammoniaca associati a specifici range di (a) umidità e (b) di temperatura.

In figura 7-b si mostra come, all'aumentare della temperatura registrata nei ricoveri degli animali, si incrementano anche i fattori di emissione di ammoniaca [FE]. Invece, la relazione tra umidità relativa e fattori di emissione [FE], in figura 7-a, non sembra mostrare un andamento lineare.

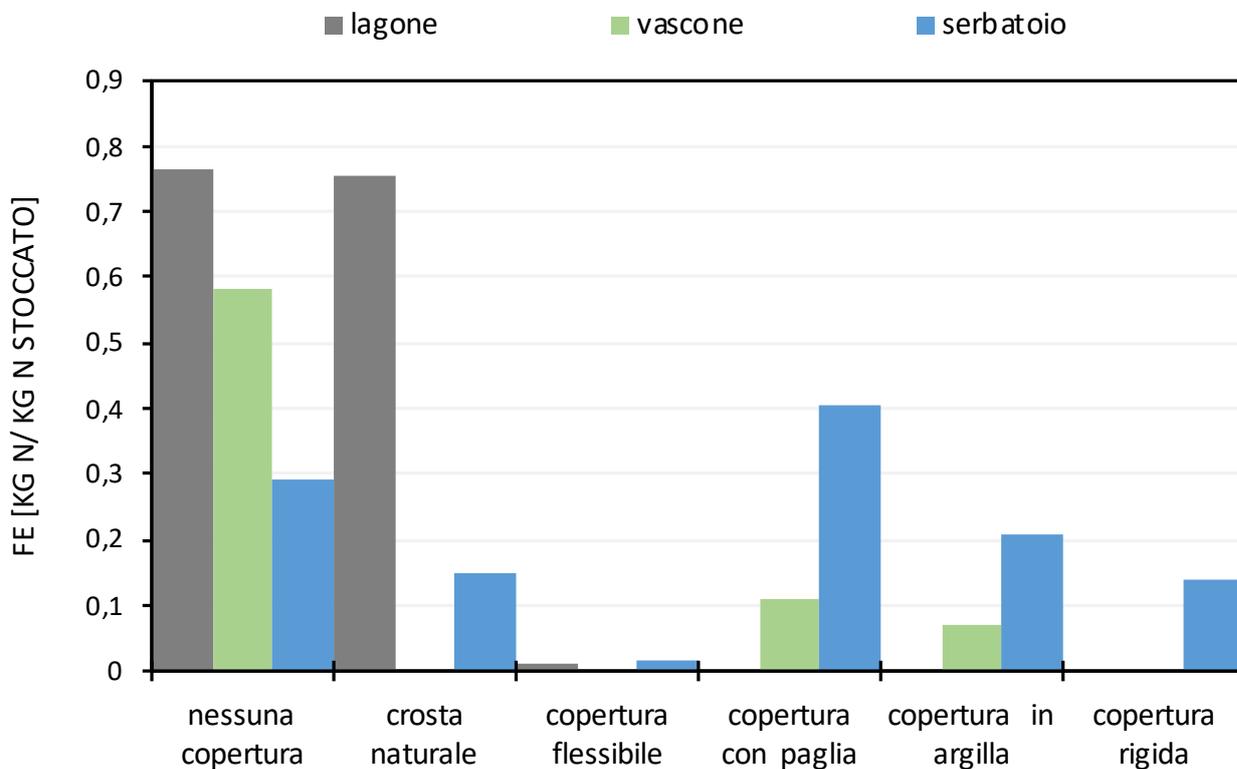
### 3.2.2. Stoccaggio

Come suggerito da Hassouna et al. (2023), sono state indagate le relazioni tra tipologia di stoccaggio (in particolare il tipo di copertura) ed emissioni di ammoniaca. A partire dalle misure raccolte nel dataset relativo allo stoccaggio presenti in DATAMAN, figura 8 riporta le emissioni di ammoniaca derivate da liquami di suini e di vacche da latte, considerando le possibili modalità di copertura. Maggiori dettagli sui fattori di emissione medi associati a tutte le diverse tipologie di copertura registrate nel database sono forniti in Tabella MS1 (materiale supplementare).

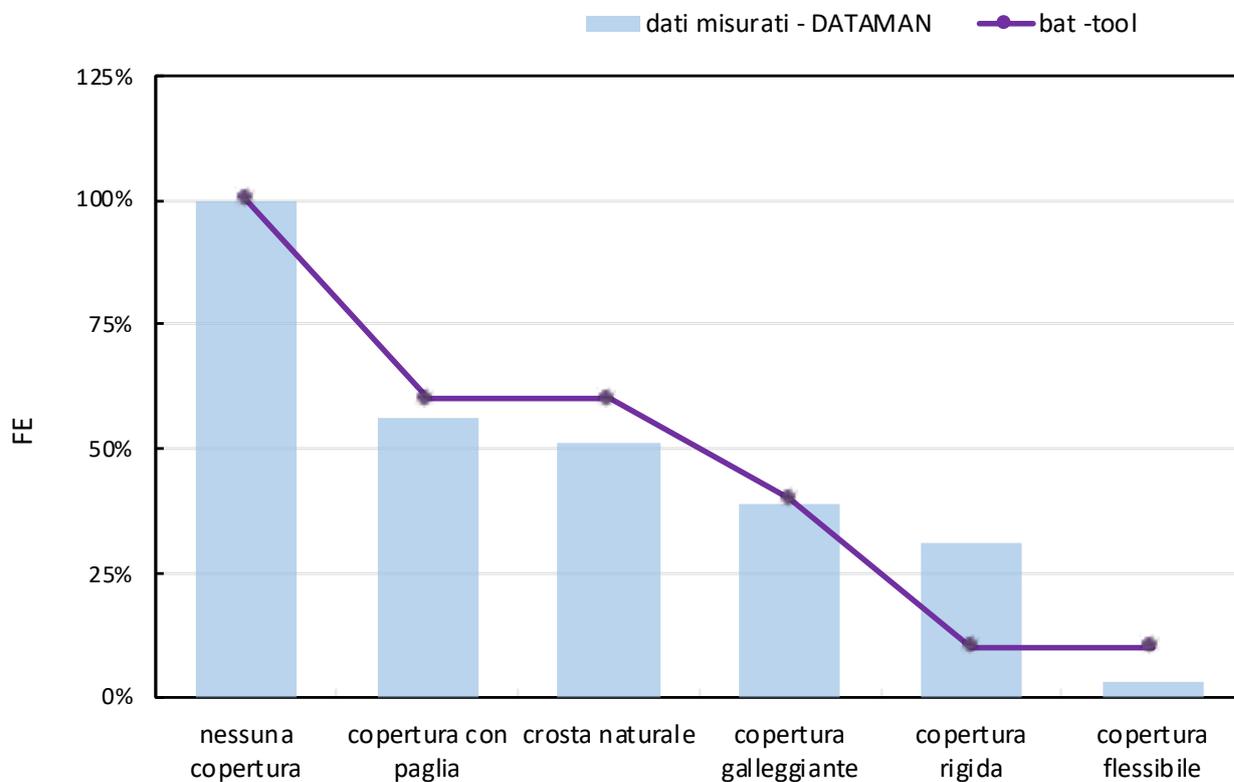
In assenza di copertura sui liquami stoccati, i fattori di emissione, espressi in kg di azoto rispetto ai kg di azoto stoccati, sono i maggiori, seguiti da quelli associati alla copertura con crosta naturale. La copertura rigida e la copertura flessibile si configurano come le tecniche di stoccaggio più efficienti.

Figura 9 è strutturata come figura 5-b: in ordinata sono riportati i FE (%) da stoccaggio dei liquami derivati dai dati misurati raccolti in DATAMAN e rapportati al valore più alto, e i FE associati alle medesime tipologie di copertura, in ascissa, ottenuti da BAT-tool Plus.

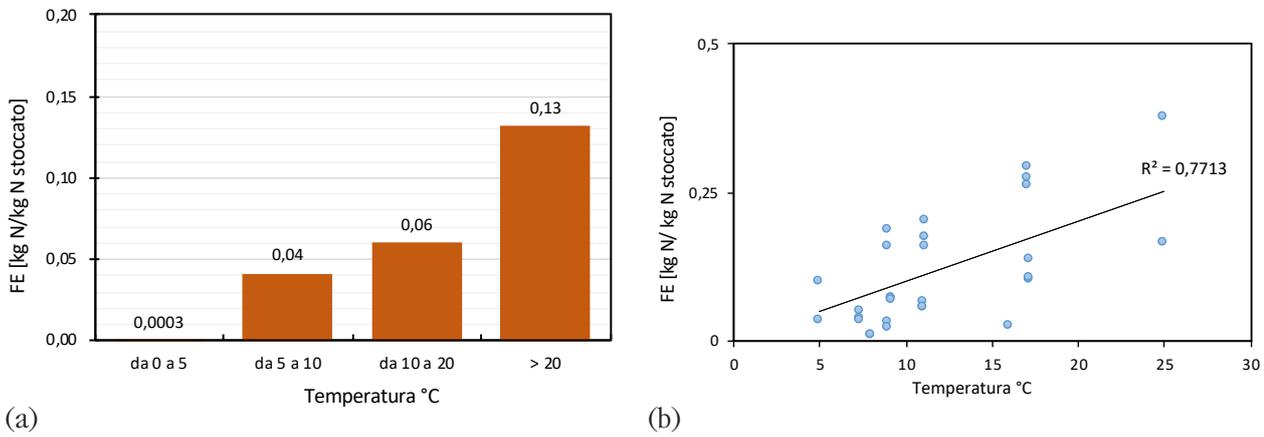
È stata indagata anche la correlazione tra il fattore di emissione di ammoniaca e il pH dei liquami di bovini e suini all'inizio dello stoccaggio, sempre a partire dai dati misurati e raccolti in DATAMAN. Considerando due tipologie di stoccaggio, ovvero quella in lagone e quella in serbatoio, e non contemplando per gli effluenti alcun tipo di trattamento, è stato possibile osservare un rapporto di proporzionalità diretta



**Figura 8.** Fattori di emissione [FE] per l'ammoniaca ottenuti dalle misure raccolte in DATAMAN, in funzione delle principali tecniche per lo stoccaggio dei liquami, in legenda, e diversi tipi di copertura.



**Figura 9.** Confronto tra diverse tipologie di copertura nello stoccaggio dei liquami e influenza sui fattori di emissione per l'ammoniaca.



**Figura 10.** (a) Valori medi dei fattori di emissione [FE] di ammoniaca in funzione della temperatura e (b) correlazione tra la temperatura e le emissioni di ammoniaca.

( $R^2 = 0,6$  calcolato rispetto all'intercetta) tra pH ed emissioni di ammoniaca: maggiore è il pH di partenza dei liquami e maggiori sono le emissioni misurate di ammoniaca (figura MS2). Tale aspetto trova riscontro nelle BAT-C, dove l'acidificazione dei liquami, ovvero l'abbassamento del pH, viene elencata tra le tecniche per abbattere le emissioni di ammoniaca dalla fase di stoccaggio degli effluenti.

Come per la stabulazione, anche per lo stoccaggio, completano l'analisi le variabili meteo, quali umidità, temperatura, radiazione solare e velocità del vento

Grazie ai dati misurati disponibili in DATAMAN, è stato possibile evidenziare una correlazione positiva tra il fattore di emissione per l'ammoniaca, espresso in  $\text{kg N kg N stoccato}^{-1}$ , e la temperatura, considerando solo i liquami senza copertura, che non abbiano subito alcun trattamento (figura 10).

In questo studio non è stato possibile considerare allo stesso modo l'influenza del vento, a causa della mancanza dei corrispondenti dati di velocità del vento rispetto ai valori di emissione.

### 3.2.3. Spandimento

Secondo un recente studio (van der Weerden et al., 2023), è possibile identificare tre principali fattori che influenzano le emissioni di ammoniaca durante lo spandimento di liquami bovini e suini, come di seguito riportato:

- contenuto di sostanza secca (DM);
- azoto ammoniacale totale (TAN);
- tecnica di applicazione dei reflui in campo.

Analizzando i dati misurati presenti in DATAMAN qualitativamente è possibile confermare che ai liquami siano associate emissioni relativamente più alte che non al letame solido palabile. Si può trovare riscontro di ciò anche nelle tabelle del BAT-tool Plus, dove i fattori di emissione associati alla distribuzione in campo dei solidi e dei liquidi per i bovini sono

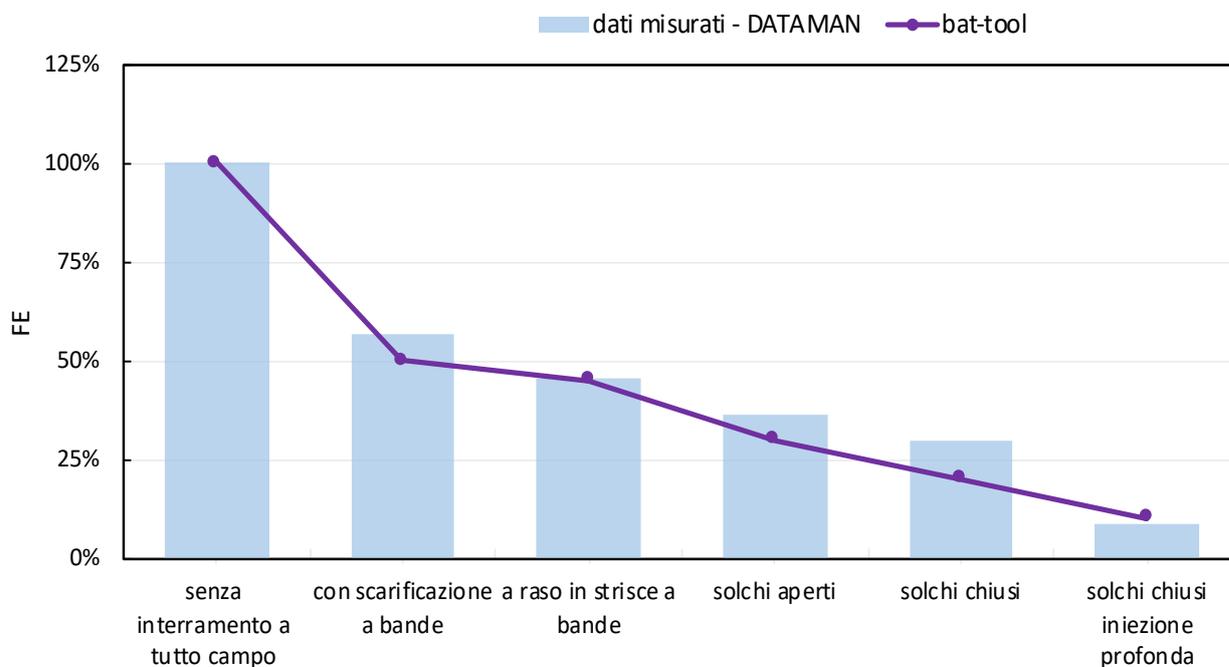
**Tabella 2.** Correlazione tra TAN e DM con il fattore di emissione per l'ammoniaca dalla fase di spandimento a tutto campo.

Suini	FE ~ TAN	0,72
	FE ~ DM	0,72
Bovini	FE ~ TAN	0,77
	FE ~ DM	0,73

rispettivamente del 10 e del 20 % dell'azoto presente nel refluo.

Analizzando le stesse misurazioni raccolte in DATAMAN, inoltre, i fattori di emissione dell'ammoniaca, quando è stata considerata la tecnica di spandimento a tutto campo, sono risultati direttamente proporzionali alla concentrazione dell'azoto ammoniacale totale (TAN) e alla percentuale di sostanza secca (DM) dei liquami. Come è ragionevole ipotizzare, alte concentrazioni di TAN determinano un aumento delle emissioni. L'ulteriore osservazione riguarda il rapporto tra le emissioni di ammoniaca e il contenuto di DM nei liquami. Un aumento della sostanza secca ridurrà il tasso di infiltrazione nel terreno, allungando così la durata dell'esposizione dei reflui all'aria, cosa che a sua volta contribuirà alle emissioni (van der Weerden et al., 2023). La Tabella 2 riassume gli esiti dell'analisi di correlazione, calcolata rispetto alla intercetta, tra i fattori di emissione dell'ammoniaca (FE) dallo spandimento a tutto campo dei liquami di suini e di bovini, con TAN e DM. Nella elaborazione non sono stati considerati i valori negativi dei fattori di emissione e quelli che ricadevano nel 99-percentile più alto dei dati.

Figura 11 mostra per tutte le categorie di animali presenti in DATAMAN, ed in riferimento esclusivamente ai liquami, che lo spargimento a tutto campo senza interrimento è la tecnica più emissiva, seguita dalle due differenti modalità di spandimento a bande. Sempre in figura 11, analogamente alle figure 5-b, 6-b e



**Figura 11.** Influenza della tecnica di spandimento sulle emissioni di ammoniaca.

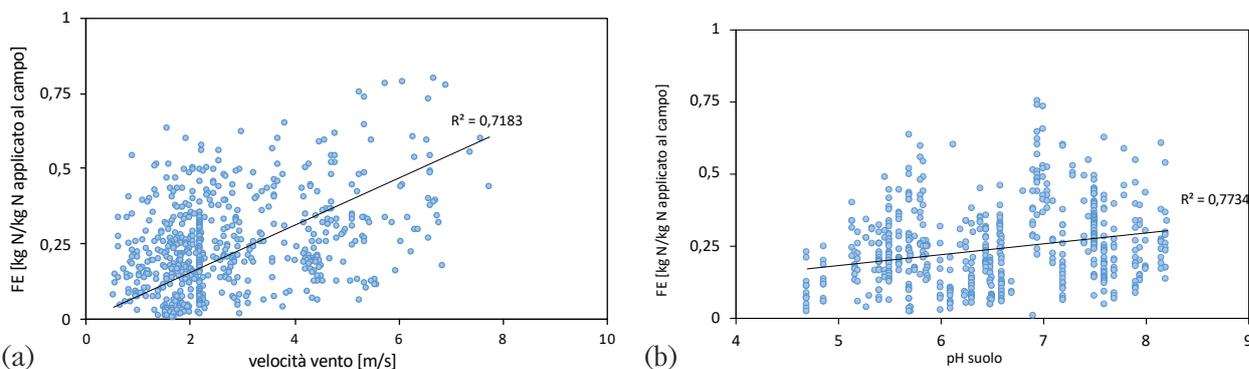
9, è riportato il confronto con i coefficienti tecnologici impiegati nel BAT-tool Plus. Si precisa che lo spandimento a bande con scarificazione è stato considerato, sulla base dei dati misurati disponibili in DATAMAN, non contemplando alcuna incorporazione degli effluenti nel terreno, a differenza delle modalità di distribuzione rimanenti: a raso in strisce, solchi aperti e solchi chiusi. Anche in relazione alla fase dello spandimento, completa l'analisi la valutazione del peso che hanno le variabili meteorologiche.

A determinate condizioni, la correlazione tra la velocità del vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e le emissioni di ammoniaca ( $\text{kg N kg N applicato al campo}^{-1}$ ) risulta positiva e il corrispondente valore del coefficiente  $R^2$  calcolato rispetto all'intercetta elevato (figura 12-a). Sono stati omessi dall'analisi i valori negativi di emissione e quelli ricadenti nel 99-percentile più alto; è stata

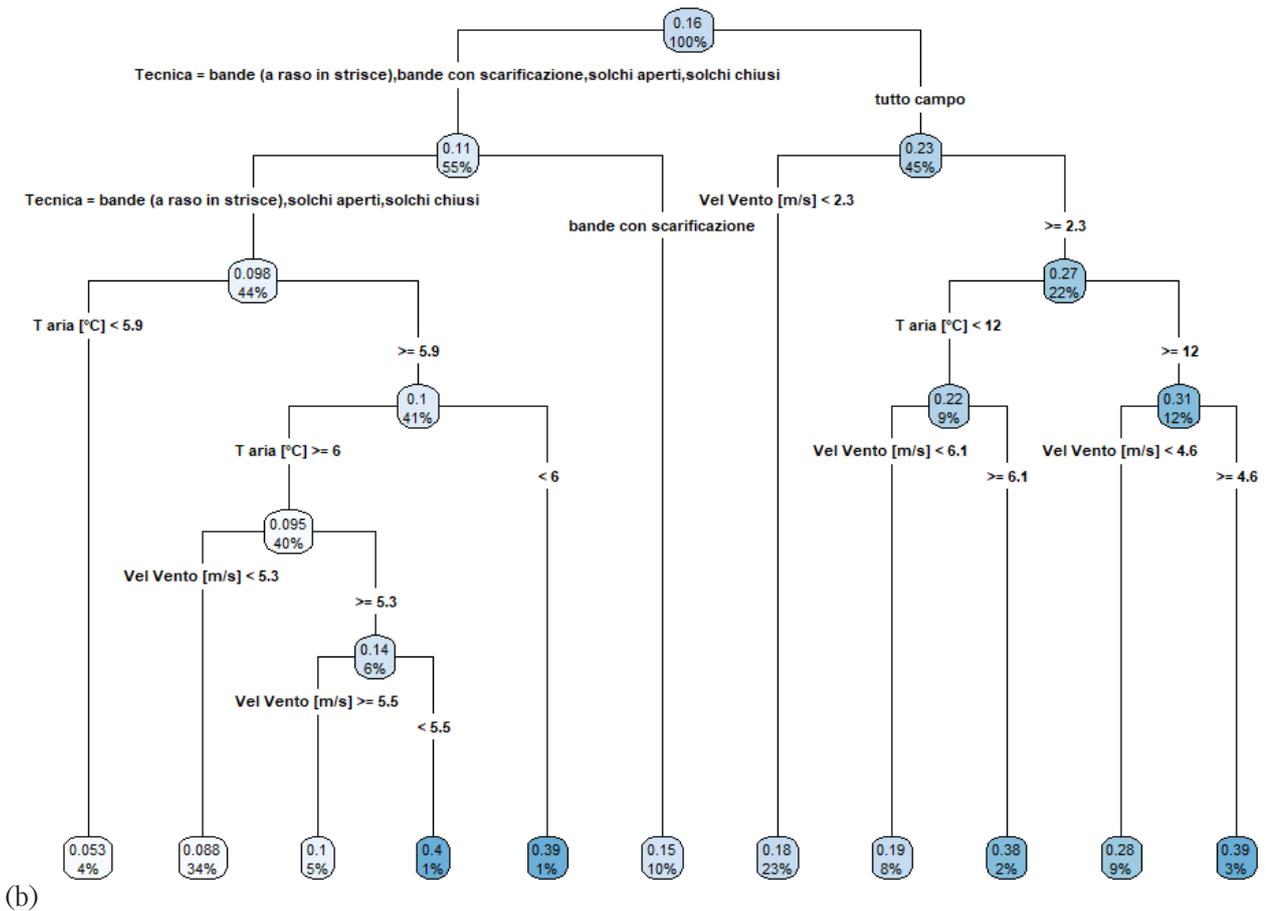
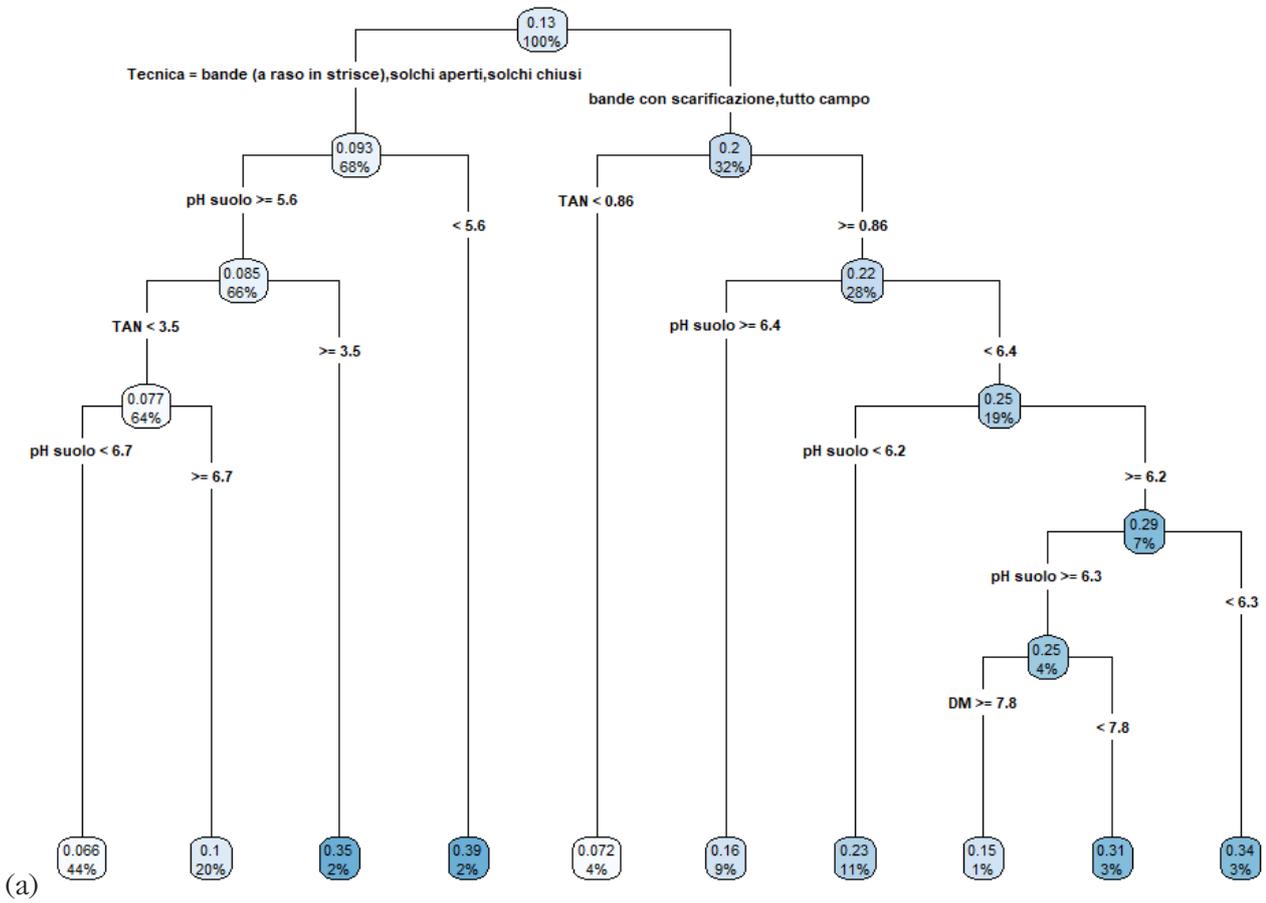
presa in esame la sola modalità di distribuzione degli effluenti a tutto campo e, infine, come tipologia di effluenti, sono stati considerati i solidi parabili, i liquami e la lettiera avicola.

Inoltre, può essere utile considerare anche la variabile relativa al pH del suolo. In questo studio, a partire dai dati misurati nel DATAMAN, il fattore di emissione per l'ammoniaca è stato considerato in relazione al pH del suolo. Il grafico di dispersione riportato in figura 12-b mostra come esiste ed è positiva la correlazione tra le due variabili in gioco ( $R^2$  rispetto all'intercetta = 0,77). L'analisi è stata condotta per i liquami applicati a tutto campo senza interrimento, omettendo i valori negativi e quelli ricadenti nel 99-percentile più alto.

Tuttavia, la dispersione dei dati rispetto alla retta di correlazione appare significativa in entrambi i grafici. Ciò suggerisce la necessità di considerare le variabili



**Figura 12.** Correlazione tra emissioni di ammoniaca e (a) velocità del vento e (b) pH del suolo



**Figura 13.** Alberi di regressione per le variabili nello spandimento dei reflui. a) Valutazione su tutte le possibili variabili, b) Valutazione considerando tecnica e parametri meteorologici medi.

in gioco contemporaneamente, in una analisi di regressione multipla, come riportato in figura 13.

Gli alberi di classificazione e regressione sono stati ottenuti utilizzando la libreria “rpart” (<https://cran.r-project.org/package=rpart>) nel software statistico R (versione 4.0.3) – RStudio (2023.06.1). Maggiori approfondimenti sull’influenza delle variabili meteorologiche sono riportati in un recente lavoro (Marongiu et al., 2023). I due alberi riportati in figura 13 mostrano che la scelta di una o dell’altra tecnologia di spandimento è il primo discriminante sulle emissioni di ammoniaca da questa fase.

Figura 13-a individua due gruppi separati di tecniche come primo livello di ramificazione: spandimento a tutto campo e a bande con scarificazione da una parte, e spandimento a raso in strisce, solchi aperti e solchi chiusi dall’altra. Quindi, per le tecnologie più emissive (sulla destra dell’albero), il TAN viene riconosciuto come primo attributo sulla base del quale effettuare una partizione, visto che crea una ramificazione rispetto al valore di 0,86; mentre per le altre tecniche (sulla sinistra dell’albero), incide innanzitutto il pH del suolo, e poi il TAN a pH maggiori.

L’albero in figura 13-b riporta un secondo livello di approfondimento e considera la relazione tra le emissioni di ammoniaca e le sole variabili meteorologiche. Sulla destra dello schema è presentata l’analisi per la tecnologia più emissiva, lo spandimento a tutto campo, mentre sulla sinistra vengono raggruppate tutte le altre modalità. Quando gli effluenti vengono applicati a tutto campo, velocità del vento maggiori determinano fattori di emissione più alti. A tale livello di ramificazione, l’attributo su cui effettuare una divisione è la temperatura ambiente, che, incrementando, porta

a fattori di emissione ancora più alti. D’altro canto, la velocità del vento non ha la stessa importanza quando i reflui vengono applicati in campo mediante tecniche meno emissive quali lo spandimento a bande con scarificazione o a raso in strisce, oppure a solchi, per cui il tempo di esposizione all’aria del refluo è minore.

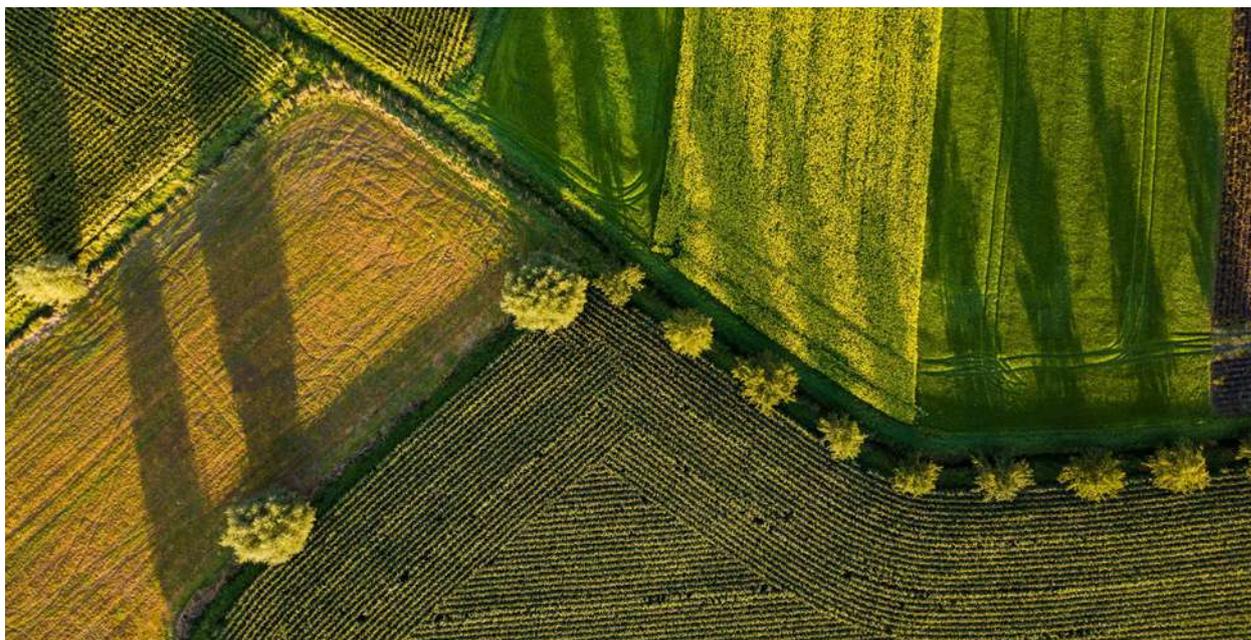
#### 4. Conclusioni

Prendendo in considerazione quanto disponibile ad oggi nella bibliografia di settore, questo lavoro è stato condotto con l’obiettivo di verificare l’allineamento di dati sulle emissioni di ammoniaca dal settore zootecnico afferenti a fonti di natura diversa. Nello specifico, sono stati considerati:

- i dati nazionali di sintesi contenuti nell’ultimo aggiornamento dell’inventario nazionale delle emissioni in atmosfera;
- i dati legati alle simulazioni di scenario elaborate con il BAT-tool Plus;
- i dati derivanti da misure sperimentali condotte in varie parti del mondo, raccolti in DATAMAN.

Potendo dunque contare, da un lato su un database così ricco e geograficamente esteso e dall’altro, sul dettaglio e sul livello di precisione garantiti dal BAT-tool Plus, è stata poi condotta un’analisi quantitativa, oltre che descrittiva, sulle variabili che possono influenzare le emissioni di ammoniaca nei tre stadi principali che avvengono negli allevamenti di bovini, suini e avicoli.

In questo studio, relativamente alla fase di stabilizzazione, si conferma che la quantità di azoto escreto dall’animale, che può dipendere dal peso dello stesso e dalla dieta, ha una significativa influenza sulle emissioni di ammoniaca pur non essendo l’unica variabile.



Infatti, anche le caratteristiche del ricovero, quali, ad esempio, la tipologia di pavimentazione e la modalità di ricircolo dell'aria, possono giocare un ruolo importante sulle emissioni. Ad esempio, per i suini, i pavimenti totalmente o parzialmente fessurati parrebbero più efficienti dei pavimenti pieni. Una ventilazione meccanica nei ricoveri sembrerebbe determinare minori emissioni.

In riferimento allo stoccaggio, la presenza (o l'assenza) di una copertura sui liquami e il tipo di materiale della stessa, sono le variabili che incidono maggiormente sulle emissioni. In diversi casi, i coefficienti di abbattimento forniti dal BAT-tool Plus (cfr. figure 5-b, 6-b, 9 e 11) sembrano essere confermati dalle elaborazioni sulle misure delle emissioni di ammoniaca raccolte nel database DATAMAN.

Le principali tecniche di trattamento dei reflui, che possono avere effetti sulla riduzione delle emissioni di ammoniaca dagli allevamenti, sono descritte nelle BAT-C: separazione meccanica, digestione anaerobica, tunnel esterno, digestione aerobica, nitrificazione-denitrificazione e compostaggio. Il BAT-tool Plus contempla la possibilità di valutare gli effetti del trattamento sulle emissioni. Il DATAMAN, pur non dedicando a questa fase un dataset separato, considera il trattamento degli effluenti tra le variabili nelle fasi di stoccaggio e di spandimento. Futuri approfondimenti sul tema potranno valutare l'influenza dei trattamenti sulle emissioni totali di ammoniaca da un allevamento, considerando, in maniera integrata, l'intera filiera di gestione degli effluenti.

Lo spargimento a tutto campo senza interrimento è la modalità di distribuzione più emissiva ed in questo caso l'azione del vento sembra influenzare maggiormente i tassi di emissione che non quando viene effettuata la incorporazione.

Dalle elaborazioni su dati misurati risulta che le caratteristiche del refluo e il pH del suolo influenzano le emissioni di ammoniaca nella fase di distribuzione in campo. Sarebbe utile approfondire in futuro la concomitanza e l'influenza associata di altri fattori, quali, ad esempio, il tempo di incorporazione dei reflui nel terreno e ulteriori parametri chimico-fisici del suolo. ■

## Riferimenti bibliografici

- AgrEE tool – Agricultural Emission Estimation tool. Disponibile su: [https://www.tfeip-secretariat.org/\\_files/ugd/e5a9c7\\_eee53299f86948edac11147fc7134390.pdf](https://www.tfeip-secretariat.org/_files/ugd/e5a9c7_eee53299f86948edac11147fc7134390.pdf)
- ALFAM2 Project – Ammonia Loss from Field-Applied Manure. Disponibile su: <https://projects.au.dk/alfam>

- Ambelas-Skjøth C., Hertel O., Gyldenkærne S. et al. (2004). Implementing a dynamical ammonia emission parameterization in the large-scale air pollution model ACDEP. *J. Geophys. Res.*, 109(D06306).
- Angelino E., Costa M.P., D'Allura A. et al. (2013). Air quality influence of ammonia and nitrogen oxides emissions reduction over the Po valley. Convegno: Proceedings of 15th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Madrid, 6-9 maggio 2013.
- Beltran I., van der Weerden T.J., Alfaro M.A et al. (2021). DATAMAN: A global database of nitrous oxide and ammonia emission factors for excreta deposited by livestock and land-applied manure. *J. Environ. Qual.* 2021, 50(2): 513–527.
- Bittman S., Dedina M., Howard C.M., Oenema O., Sutton M.A. (eds) (2014). Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen, Centre for Ecology and Hydrology, Edimburgo, Regno Unito.
- Centro Ricerche Produzioni Animali (CRPA), BAT-tool – Un software per il calcolo delle emissioni di ammoniaca dagli allevamenti intensivi di suini e avicoli. Disponibile su: [www.crpa.it/battool](http://www.crpa.it/battool)
- Centro Ricerche Produzioni Animali (CRPA), 2021. Software BAT-tool plus. Manuale di utilizzo. Progetto LIFE\_PREPAIR. Disponibile su: [https://www.crpa.it/media/documents/crpa\\_www/Software/bat-tool/Manuale\\_BAT-tool\\_Plus\\_rev1.pdf](https://www.crpa.it/media/documents/crpa_www/Software/bat-tool/Manuale_BAT-tool_Plus_rev1.pdf)
- CTN\_ACE (2001). Linee guida agli inventari locali di emissioni in atmosfera, Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, RTI CTN\_ACE 3/2001.
- DATAMAN – A Database of Greenhouse Gas Emissions from Manure Management. Disponibile su: <https://www.dataman.co.nz/?AspxAutoDetectCookieSupport=1>
- Decisione di Esecuzione (UE) 2017/302 della Commissione del 15 febbraio 2017 che stabilisce le conclusioni sulle migliori tecniche disponibili (BAT) concernenti l'allevamento intensivo di pollame o di suini, ai sensi della direttiva 2010/75/UE del Parlamento europeo e del Consiglio.
- Decreto n. 5046 del 25 febbraio 2016. Criteri e norme tecniche generali per la disciplina regionale dell'utilizzazione agronomica degli effluenti di allevamento e delle acque reflue, nonché per la produzione e l'utilizzazione agronomica del digestato.
- Decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 e s.m.i. Norme in materia ambientale.
- De Lauretis R., Taurino E., Angelino E. et al. (2012). Qualità dell'ambiente urbano VIII Rapporto Edizione 2012, Emissioni in atmosfera: 138-143. Disponibile su:

- [https://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/statoambiente/VIII\\_RAPP\\_AREE\\_URBANE.pdf](https://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/statoambiente/VIII_RAPP_AREE_URBANE.pdf)
- Direttiva 2010/75/UE/IED – Industrial Emissions Directive.
  - Direttiva 2016/2284/UE/NEC – National Emission Ceilings.
  - EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016: Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories.
  - EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019: Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories.
  - EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019. Capitoli 3B e 3D.
  - Gyldenkærne S., Ambelas-Skjøth C., Hertel O., Ellermann T. (2005). A dynamical ammonia emission parameterization for use in air pollution models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 2005, 110(7): 1–14.
  - FarmAC model. Disponibile su: <https://www.farmac.dk/>
  - Hafner S.D., Pacholski A., Bittman S. et al. (2017). The ALFAM2 database on ammonia emission from field-applied manure: Description and illustrative analysis. *Agricultural and Forest Meteorology* 258(2018): 66–79.
  - Hassouna M., van der Weerden T.J., Beltran I. et al. (2023). DATAMAN: A global database of methane, nitrous oxide, and ammonia emission factors for livestock housing and outdoor storage of manure. *Journal of Environmental Quality*, 52(1): 207–223.
  - Huang X., Song Y., Li M. et al. (2012). A high-resolution ammonia emission inventory in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(1).
  - Hutchings N.J., Sommer S.G., Andersen J.M., Asman W.A.H.A. (2001). A detailed ammonia emission inventory for Denmark. *Atmospheric Environment* 2001, 35(11): 1959–1968.
  - IPCC, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006. Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use, Capitolo 10 – Emissions From Livestock And Manure Management.
  - IPCC, Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2019.
  - ISPRAa, Italian Informative Inventory Report 2023.
  - ISPRAb, Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2021. National Inventory Report 2023.
  - Disponibili su: <http://emissioni.sina.isprambiente.it/inventario-nazionale/#Documenti Manure Management N-flow tool>. Disponibile su: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/4-agriculture/manure-management-n-flow-tool/view>
  - Marongiu A., Collalto A.G., Distefano G.G., Angelino E. (2023). Application of Machine Learning to Estimate Ammonia Atmospheric Emissions. Preprints 2023, 2023090607. <https://doi.org/10.20944/preprints202309.0607.v1>
  - Pain B. e Menzi H. (2011). Glossary of terms on livestock and manure management 2011, Second Edition.
  - Reis S., Ambelas-Skjøth C., Vieno M. et al. (2011). Why time and space matters-arguments for the improvement of temporal emission profiles for atmospheric dispersion modeling of air pollutant emissions. 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia.
  - SNPA (2016). Inventari regionali delle emissioni in atmosfera e loro articolazione a livello locale. Disponibile su: [https://www.isprambiente.gov.it/files/snpa/consiglio-federale/DOC78\\_CFIinventariemissioniinatmconallegati.pdf](https://www.isprambiente.gov.it/files/snpa/consiglio-federale/DOC78_CFIinventariemissioniinatmconallegati.pdf)
  - Sutton P., Chemel C., Griffiths S., Sokhi R.S. (2012). Investigation, using CMAQ, of sensitivity of air quality modelling to input ammonia emissions. *Air Pollution Modeling and its Application XXII*: 571-575.
  - TFEIP – Task Force on Emission Inventories and Projections (2023). Disponibile su: <https://www.tfeip-secretariat.org/>
  - van der Weerden T.J., Noble A., de Klein C.A.M. et al. (2012). Ammonia and nitrous oxide emission factors for excreta deposited by livestock and land-applied manure. *Journal of Environmental Quality*, 50(5):1005–1023.
  - van der Weerden T.J., Noble A., Beltran I. et al. (2023). Influence of key factors on ammonia and nitrous oxide emission factors for excreta deposited by livestock and land-applied manure. *Science of the Total Environment* 889.
  - Webb J., van der Weerden T.J., Hassouna M., Amon B. (2021). Guidance on the conversion of gaseous emission units to standardized emission factors and recommendations for data reporting. *Carbon Management*, 12(6): 663-679.

## Ringraziamenti

Il lavoro descritto nel presente articolo è stato svolto nell'ambito del "Progetto di monitoraggio delle concentrazioni di ammoniacale dal comparto agricolo" richiesto ad ARPA Lombardia da Regione Lombardia e che prevede uno studio specifico di approfondimento dell'impatto del comparto agricolo sulle emissioni di ammoniacale <https://www.arpalombardia.it/progetti/aria/progetto-ammoniaca-2017-oggi/>. Si ringrazia la Direzione Generale Agricoltura, Alimentazione e Sistemi Verdi di Regione Lombardia.

Materiale supplementare è disponibile gratuitamente all'indirizzo [www.ingegneriadellambiente.net](http://www.ingegneriadellambiente.net)

# IL FUTURO DELL'ACQUA E LA NUOVA DIRETTIVA EUROPEA: TECNOLOGIE INNOVATIVE E RISPARMIO ENERGETICO

Domiziano Ivan Basilico\*, Elisabetta Vacchelli

Ricerca e sviluppo SDG s.r.l.

## Sommario

L'articolo riporta i principali risultati del convegno organizzato da SEAM engineering sul tema nella nuova direttiva europea sulle acque reflue.

**Parole chiave:** *acque reflue; direttiva europea; microinquinanti; tecnologie innovative.*

## THE FUTURE OF WATER AND THE NEW EUROPEAN DIRECTIVE: INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND ENERGY SAVING

### Abstract

The paper summarizes the main contents of the conference organized by SEAM engineering on the topic of the draft of the new European wastewater Directive.

**Keywords:** *waste water; European directive; micropollutants; innovative technologies.*



Figura 1. Convegno SEAM “Il Futuro dell’acqua”

Il 26 ottobre 2022 la Commissione Europea ha presentato una proposta di revisione della Direttiva sul trattamento delle acque reflue urbane, che modifica e aggiorna la vigente Direttiva 91/271/CEE, che contribuirà in particolare al raggiungimento dell’obiettivo di inquinamento zero (riduzione dei microinquinanti e delle concentrazioni allo scarico) e azzeramento dei consumi.

La proposta legislativa è una delle iniziative chiave previste dal EU zero pollution action plan for air, water and soil, presentato nel maggio 2021. Essa punta ad introdurre nuovi obblighi relativi a:

- incremento dei volumi di acque piovane trattate, al fine di minimizzare il contributo di inquinamento attribuibile agli «stormwater overflows»;

- standard più severi per la rimozione dei nutrienti (azoto e fosforo);
- introduzione di trattamenti avanzati per la rimozione dei microinquinanti e adozione di un sistema di responsabilità estesa del produttore (EPR) al fine di coprire i costi di tali trattamenti;
- raggiungimento progressivo della neutralità energetica negli impianti di trattamento delle acque reflue;
- incentivazione delle pratiche di riutilizzo dell’acqua e gestione dei fanghi (recupero di risorse e materia), in ottica di maggiore circolarità dei sistemi;
- Istituzione di reti di monitoraggio di patogeni e altri elementi di carattere sanitario dalle acque reflue (WBE), per supportare le azioni di sanità pubblica.

\* Per informazioni: SEAM engineering S.r.l.,  
E-mail [info@seam-eng.com](mailto:info@seam-eng.com)

Ricevuto il 6-12-2023. Accettazione il 12-12-2023

**Tabella 1.** Proposta di revisione della Direttiva Europea per il trattamento delle acque reflue.

	2025	2030	2035	2040
<b>Tracimazione delle acque meteoriche e deflusso urbano (acque piovane)</b>	Monitoraggio	Piani integrati per agglomerati superiori a 100.000 AE e per le aree identificate a rischio	Piani integrati per agglomerati a rischio compresi tra 10 a 100.000 AE	Obiettivo indicativo UE in vigore per tutti gli agglomerati superiori a 10.000 AE
<b>Sistemi individuali o appropriati (IAS)</b>	Ispezione regolare per tutti gli Stati Membri + segnalazione per Stati Membri con elevati IAS	Standard UE per IAS		n.a.
<b>Agglomerati su piccola scala</b>	Nuove soglie per 1.000 AE	Tutti gli agglomerati superiori a 1.000 AE conformi		n.a.
<b>Azoto e fosforo</b>	Identificazione delle aree di rischio (agglomerati tra 10 e 100.000 AE)	Obiettivo intermedio per la rimozione di N/P per gli impianti superiori a 100.000 AE + nuovi standard	Rimozione N/P in tutti gli impianti superiori a 100.000 AE + obiettivo intermedio per le aree a rischio	Rimozione N/P in tutte le aree a rischio (comprese tra 10 e 100.000 AE)
<b>Microinquinanti</b>	Definizione di schemi di responsabilità estesi del produttore	Aree identificate a rischio (10 – 100.000 AE) + obiettivo intermedio per gli agglomerati superiori a 100.000 AE	Tutti gli impianti superiori a 100.000 AE attrezzati + obiettivo intermedio per le aree a rischio	Tutti gli impianti a rischio attrezzati con trattamenti avanzati
<b>Energia</b>	Audit energetici per gli impianti sopra 100.000 AE	Audit per tutti gli impianti sopra 10.000 AE + obiettivo intermedio	Obiettivo intermedio per la neutralità energetica	Raggiungimento della neutralità energetica e della relativa riduzione delle emissioni di gas serra

È su questo tema che si è focalizzato un recente convegno organizzato da SEAM engineering.

La normativa è in continua evoluzione, nella Tabella 1 si riporta lo stato dell'arte ad oggi.

La vigente Direttiva 91/271/CEE si è concentrata prevalentemente sull'inquinamento proveniente da fonti domestiche, contribuendo in modo significativo a migliorare la qualità dei fiumi, dei laghi e dei mari in Europa, e su impatti ambientali valutati secondo criteri ancora validi. Tuttavia, gli sviluppi tecnologici e le conoscenze sullo stato dei corpi idrici e delle pressioni cui sono sottoposti, acquisiti negli ultimi trent'anni, ne rendono necessario l'aggiornamento.

La proposta di revisione della Direttiva appare molto ambiziosa, puntando a ridurre i limiti di concentrazione da raggiungere per lo scarico dei nutrienti, azoto e fosforo, negli effluenti degli impianti di depurazione.

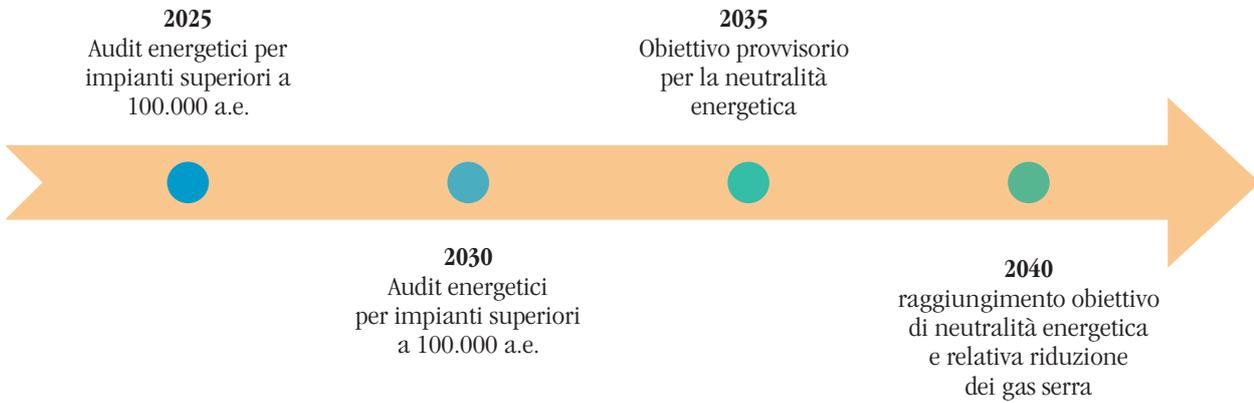
Oltre agli obiettivi per la tutela dell'ambiente, nella proposta di revisione della Direttiva, sono inclusi obiettivi inerenti la tutela della salute umana, la riduzione delle quali obblighi di recupero dei nutrienti dalle acque reflue, nuovi requisiti di monitoraggio per le microplastiche e nuove norme per i microinquinanti emergenti – si tratta di contaminanti presenti in trac-

ce, ma che possono causare un serio impatto sull'ambiente e sulla salute umana per le loro caratteristiche di mobilità, bioaccumulabilità e tossicità – che richiederanno trattamenti dedicati, in quanto gli impianti di depurazione non sono progettati per rimuovere in maniera efficiente questo tipo di contaminanti, necessitando un adeguamento con l'inserimento di trattamenti terziari e quaternari.

Nella revisione della Direttiva sono state proposte diverse misure che saranno progressivamente applicate fino al 2040, tra cui l'obiettivo per gli impianti di ridurre le emissioni di gas climalteranti, dei consumi di energia fossile e di essere energeticamente neutri, che rappresenta una sfida per il settore della depurazione delle acque reflue sia dal punto di vista tecnico che economico.

Sarà infatti richiesto ai gestori degli impianti di sviluppare, nei prossimi anni, tutto il proprio potenziale di efficientamento e ammodernamento dei trattamenti di depurazione, porgendo particolare attenzione all'implementazione di sistemi volti al recupero di materia ed energia.

Nella proposta di revisione della Direttiva tutto ciò viene preso in considerazione e incluso, in linea con i



**Figura 2.** Obiettivi per il raggiungimento della neutralità energetica previsti nella proposta di revisione della Direttiva Europea.

principi definiti nel Green Deal europeo, anche al fine di una maggiore armonizzazione dei livelli di governance dei sistemi di depurazione delle acque reflue urbane. Occorrerà infatti contribuire al raggiungimento dell'obiettivo di inquinamento zero proclamato con il Green Deal europeo, allineandosi alle nuove ambizioni in materia di ambiente e clima (incoraggiare la circolarità delle risorse, sostenere nature-based solutions, incrementare la digitalizzazione e adottare misure che contribuiscano a ridurre le acque reflue prodotte).

Nella prospettiva di produrre energia in modo diffuso e di integrare gli impianti con le comunità circostanti si sono introdotte le CER, o Comunità Energetiche Rinnovabili, strumenti normativi che si propongono l'obiettivo di promuovere un modello di produzione diffusa dell'energia mediante l'incentivazione economica a favore di chi investe in fonti rinnovabili e incrementa l'autoconsumo ed il consumo condiviso all'interno della comunità rappresentata dalla CER.

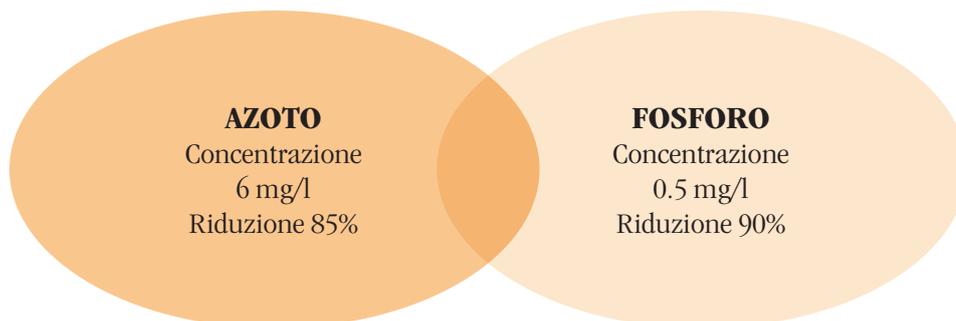
Le CER possono quindi rappresentare, per gli impianti di depurazione, l'occasione di ripensare al proprio "ruolo" energetico. Infatti, oltre a svolgere la funzione di depurazione delle acque reflue, questi impianti possono compensare parte (anche notevole) dei propri consumi, producendo energia sfruttando fonti rinnovabili come il biogas, il fotovoltaico e il calore

prodotto. In questo contesto, il contributo producibile dalle rinnovabili delle comunità circostanti, opportunamente incentivate, può essere determinante per raggiungere una effettiva neutralità energetica. L'energia da fotovoltaico, ad esempio, produce durante il giorno, proprio quando gli impianti di depurazione richiedono più energia.

L'impatto della nuova Direttiva rappresenta quindi una sfida per i gestori degli impianti di depurazione, dato dall'aumento delle responsabilità e dalla necessità di adottare nuove tecnologie e investire in nuove infrastrutture, per consentire il raggiungimento delle nuove richieste normative riguardanti i limiti più stringenti in termini sia di qualità dell'acqua trattata sia di quantità di emissioni consentite.

Attualmente sono presenti diverse tecnologie innovative che si propongono di rispondere alle richieste normative sempre più stringenti in termini di limiti allo scarico, e che, allo stesso tempo, consentono di incrementare l'efficienza di trattamento degli impianti di depurazione delle acque reflue.

Tecnologie innovative sono, ad esempio, i processi a biomassa adesa su membrana, che permettono di aumentare la capacità di trattamento dell'impianto e di migliorare la rimozione dei nutrienti in modo semplice, rapido e modulare, garantendo allo stesso tempo la riduzione del consumo di energia e la mitigazione delle emissioni di gas serra.



Un'altra tecnologia innovativa, della quale è stato osservato un significativo incremento delle applicazioni su scala reale, è quella che adotta biomasse granulari aerobiche, che sfruttando al meglio la capacità depurativa degli impianti, consente di ottimizzare gli spazi e ridurre sia le emissioni di gas climalteranti, quali  $\text{NO}_2$ , sia il fabbisogno di reattivi chimici, contenendo al contempo i consumi energetici.

Una sfida notevole infine riguarda anche l'ente che deve guidare questa transizione con una adeguata po-

litica tariffaria. A questo proposito ARERA (Autorità di Regolazione per Energia, Reti e Ambiente) è intervenuta evidenziando la difficoltà e dando alcune indicazioni anche in merito a un nuovo parametro tariffario in fase di preliminare valutazione per consentire questa fondamentale transizione.

Gli atti del convegno sono disponibili sul sito di SEAM Engineering ([www.seam-ing.com](http://www.seam-ing.com))



**Figura 3.** Momento di dibattito durante il convegno SEAM “Il Futuro dell’acqua”.



**Figura 4.** Locandina convegno SEAM “Il Futuro dell’acqua”.

# ECONOMIA CIRCOLARE E SOSTENIBILITÀ LOCALE: OPPORTUNITÀ E VINCOLI PER LE PICCOLE MEDIE IMPRESE ITALIANE

Chiara Fabris, Anna Mazzi\*

Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Padova

## Sommario

Per favorire lo sviluppo dell'economia circolare nel tessuto industriale italiano è necessario investire in semplificazione, condivisione e innovazione. L'articolo traccia un'analisi critica dell'attuale stato dell'economia circolare in Italia, sottolineando in particolare le difficoltà che le piccole-medie imprese si trovano ad affrontare nell'approcciarsi a questo ambito, e propone alcune soluzioni operative che possono facilitare la diffusione di iniziative di circolarità in diversi settori economici. Infatti, se da un lato la politica comunitaria indirizza il mercato verso il riciclo per cercare di ridurre la quantità dei rifiuti da trattare e contenere il consumo di materia prima vergine, sono molti gli ostacoli che ancora oggi condizionano le imprese e limitano lo sviluppo di pratiche circolari: la confusione del quadro normativo e la difficoltà di trovare sul territorio servizi di supporto sono due delle principali limitazioni all'innovazione circolare. Di contro, se opportunamente supportato da strumenti normativi e tecnici, lo sviluppo dell'economia circolare rappresenta un'opportunità preziosa di sviluppo sostenibile locale per il territorio nazionale.

**Parole chiave:** *materie prime seconde, riciclo, scarti industriali, materie prime critiche, sostenibilità ambientale.*

## CIRCULAR ECONOMY AND LOCAL SUSTAINABILITY: OPPORTUNITIES AND LIMITS FOR ITALIAN SMALL MEDIUM ENTERPRISES

### Abstract

To encourage diffusion of circular economy within Italian industrial territory it's necessary to invest in simplification, sharing and innovation. This paper outlines critical analysis of the Italian situation related to the diffusion of circular economy, underlining difficulties to be solved by small and medium enterprises interested to circular and sustainable innovation. Some operative solutions to facilitate the

diffusion of circular initiatives are reported, with examples and case studies related to several industrial sectors. In fact, EU policy directs the market towards recycling, to try to reduce the amount of waste to be treated and contain the consumption of virgin raw materials. Otherwise, it's evident that at local level there are many obstacles that still affect companies and limit development and innovation. Confusion of the regulatory framework and difficulty of finding support services are two of the main limitations to circular innovation. The Italian economic context has interesting potential for the development of the circular economy: two-thirds of our imports are intermediate products, so greater access to materials and components and greater availability of services could be elements of further development of numerous industrial sectors. More organised and transparent market system would allow an increasing number of companies to adopt circular solutions in the purchase of secondary raw materials and in encouraging the return of waste materials to the market. Moreover, in Italian context, circular economy is significant opportunity for sustainable local development, if adequately supported by legislative and technical tools.

**Keywords:** *secondary raw materials, recycling, industrial scraps, critical raw materials, environmental sustainability.*

### 1. Introduzione

I principi di sostenibilità, circolarità e tutela dell'ambiente adottati dalla Commissione e dal Consiglio d'Europa, hanno come obiettivo quello di dissociare la crescita economica da un continuo approvvigionamento di materie prime scarse e risorse non rinnovabili. Con il Green Deal europeo, l'impegno assunto dai paesi dell'Unione Europea (UE) a conseguire l'obiettivo della neutralità cli-

\* Per contatti: via Marzolo n.9, 35131, Padova.  
E-mail [anna.mazzi@unipd.it](mailto:anna.mazzi@unipd.it).

Ricevuto il 27-12-2023; Correzioni richieste il 3-1-2024;  
Accettazione finale il 16-1-2024.

matica entro il 2050 è diventato un obbligo giuridico. A tale scopo il Green Deal adotta un pacchetto di iniziative strategiche che riguardano diversi ambiti, tra cui l'ambiente e il clima, l'energia e i trasporti, l'industria, l'agricoltura e la finanza sostenibile (COM 62/2023). Tra le disposizioni europee, il Regolamento sulle Materie Prime Critiche ha definito la cornice per trasformare i settori industriali, che a loro volta sono alla guida della transizione verde: l'industria manifatturiera è riconosciuta come il motore del cambiamento e la forza trainante per la crescita, l'innovazione tecnologica, la lotta ai cambiamenti climatici e la sfida ambientale. L'UE mira, pertanto, ad abbandonare lo schema lineare classico "risorsa-produzione-scarto" a favore di un modello economico circolare, il cui punto di forza è riutilizzare i materiali in cicli successivi, mantenendone il valore più a lungo possibile e riducendo gli sprechi (Mazzi, 2021).

L'end-of-waste (acronimo EoW), il cui termine rappresenta letteralmente il "rifiuto cessato", è un tassello fondamentale dell'economia circolare: esso è stato introdotto dalla direttiva quadro sui rifiuti 2008/98/CE (modificata dalla dir. 2018/851/CE nell'ambito di un pacchetto di misure sull'economia circolare) e rientra nella disciplina dell'art. 184 ter. del D.Lgs 152/2006 (cd. Codice dell'Ambiente, o Testo Unico Ambientale – T.U.A.), che descrive le condizioni affinché la sostanza o l'oggetto possa essere utilizzata in uno specifico ciclo produttivo. L'EoW è un obiettivo chiave dell'economia del riciclo, perché è la trasformazione dei rifiuti in risorse e consente la chiusura del ciclo (Blois e Passeri, 2020). Ad oggi, dopo l'abrogazione dell'art. 181 bis. del D.Lgs 152/2006 (che disponeva in merito a quelle materie, sostanze e prodotti i quali, avendo subito un'attività di recupero, non potevano rientrare nella disciplina dei rifiuti), la definizione di EoW ha assorbito anche quella di materia prima-seconda. Infatti, se sottoposto ad un procedimento di recupero, incluso il riciclo e la preparazione per il riutilizzo e qualora soddisfi criteri specifici, il rifiuto torna a livello del prodotto sotto l'aspetto sia merceologico che giuridico, con riconoscimento di materia prima-seconda e rientra in un nuovo ciclo di vita, all'interno di un nuovo circuito produttivo. Inoltre, la lett. b. del 1° co. dell'art. 184 ter. del D.Lgs 152/2006 sulla cessazione della qualifica di rifiuto ha posto l'accento sul requisito della "commerciabilità" delle materie prime-seconde, specificando la condizione della «esistenza di un mercato o di una domanda per tale sostanza od oggetto».

## 2. I limiti del contesto attuale

I criteri per la cessazione della qualifica di rifiuto vengono definiti secondo un preciso ordine gerarchico: (i) con regolamento europeo, (ii) con D.M. e (iii) dalle Regioni caso per caso.

Con le tre direttive EoW (Reg. UE 2011/333 contenente i criteri per alcuni rottami metallici quali ferro, accia-

io e alluminio, reg. UE 2012/1179 contenente i criteri per i rottami di vetro e reg. UE 2013/715 contenente i criteri per i rottami di rame), l'Europa ha disciplinato alcuni dei maggiori flussi di materiali, focalizzandosi sugli elementi di input/output e sulle tecniche utilizzate nei processi di recupero, obbligando chi produce e chi importa il rifiuto a dichiarare la conformità dei prodotti agli standard richiesti.

Altre tipologie di sostanze e materiali di scarto sono state regolate prima dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) e poi dal Ministero della Transizione ecologica (MITE), attraverso i DD.MM. 5/1998 (come modificato dal D.M. 5 aprile 2006, n. 186) per i rifiuti non pericolosi e 161/2002 per i rifiuti pericolosi, ai quali tuttora si ricorre per il rilascio delle autorizzazioni in forma semplificata e per altri diversi aspetti connessi alla gestione dei rifiuti, malgrado risultino superati e siano antecedenti al Testo Unico Ambientale, che li richiama agli artt. da 214 a 216.

Negli anni si sono aggiunti numerosi altri decreti, come sintetizzato in Tabella 1: il D.M. 14 febbraio 2013, n. 22 per la cessazione della qualifica di rifiuto in relazione a determinate tipologie di combustibili solidi secondari, il D.M. 28 marzo 2018, n. 69 sulla cessazione della qualifica di rifiuto del conglomerato bituminoso, il D.M. 188/2020 per la cessazione della qualifica di rifiuto di carta e cartone, i DD.MM. 62/2019 e 78/2020 regolanti, rispettivamente, la cessazione della qualifica di rifiuto dei prodotti assorbenti per la persona e della gomma vulcanizzata derivante da pneumatici fuori uso, il dm. 27 settembre 2022, n. 152, per la cessazione della qualifica di rifiuto dei rifiuti inerti da costruzione e demolizione e di altri rifiuti inerti di origine minerale e, infine, in itinere, il decreto EoW (notificato EC il 5 luglio 2020) per i rifiuti inerti non pericolosi da spazzamento stradale. Per il 2023 è prevista la fine dei lavori per la definizione dei criteri EoW in materia di rifiuti tessili, dopo che la Commissione Ambiente del Parlamento Europeo ha approvato l'invito della Commissione Europea ad individuare specifici obiettivi di prevenzione, riutilizzo e riciclo per i rifiuti tessili. Entro il 2024 si prevede che verranno definiti i criteri per i rifiuti della plastica.

Molte altre tipologie di materiali rimangono tuttavia prive di un regolamento e il potere conferito alle autorità regionali e a quelle da esse delegate (ex. artt. 208, 209 e 211 del Codice dell'Ambiente) di rilasciare o rinnovare le autorizzazioni, ha portato ad una sorta di «federalismo dell'end-of-waste» (Castellano, 2017), ossia a decisioni assunte a livello locale spesso discriminatorie e più o meno cautelative nei confronti della salute e dell'ambiente, fondate su giudizi arbitrari ed in contrasto tra loro. Questo, oltre a confondere, crea una disparità di trattamento tra imprese produttrici, alle quali le autorizzazioni vengono negate o accolte in base al luogo in cui sono ubicati gli impianti.

Gli ultimi anni, fortemente segnati da crisi sanitarie, energetiche e politiche internazionali, hanno mostrato i danni che possono derivare dall'interruzione delle catene di approvvigionamento di determinati beni di consumo e in particolare dei beni strategici, che possono includere le cosiddette materie prime critiche, ossia: un insieme di materie prime di elevata importanza economica per l'economia dell'Unione europea, ritenute essenziali al funzionamento e per l'integrità di una vasta gamma di ecosistemi industriali, oltre che al funzionamento del mercato interno e la cui disponibilità è fortemente a rischio per l'elevata concentrazione di forniture da parte di pochi paesi terzi (COM 2020/474). Da qui l'urgenza per l'UE di ridurre la dipendenza dai paesi stranieri. Per questo sarà necessaria una spinta sempre maggiore verso un approvvigionamento attivo delle materie prime critiche, oltre che sullo studio di soluzioni per ridurre l'inquinamento e in particolare l'emissione di gas climalteranti, dal momento che si prevede un forte aumento sia dello sviluppo tecnologico, che della produzione manifatturiera, la quale rischia però di ve-

nire ostacolata dalla competizione globale per le materie prime e per le materie prime critiche (JRC, 2020). Impedire che la dipendenza dai combustibili fossili venga presto sostituita da altre dipendenze strategiche è uno tra i primi obiettivi e a tale riguardo si dovrà ridurre la dipendenza dalle materie prime per le catene del valore industriale ed il benessere sociale, diversificando le fonti di approvvigionamento, rafforzando l'approvvigionamento interno e lavorando sull'efficienza dell'uso delle risorse e sulla circolarità (COM 2008/699). Inoltre, raggiungere un certo livello di autonomia in questo senso, porterebbe ad un risparmio sulle importazioni da investire, ad esempio, per finanziare ulteriori iniziative a tutela dell'ambiente, creando così un cerchio nel cerchio.

### 3. cambiamenti necessari

#### 3.1. Scarsità di risorse come volano della circolarità

Per i prossimi decenni è prevista in Europa una forte impennata della domanda di materie prime critiche, le quali già oggi rappresentano per l'economia comu-

**Tabella 1.** Sintesi dei principali decreti ministeriali che disciplinano l'ambito EoW in Italia.

Codice e titolo	Finalità	Rifiuti considerati
D.M. 5/98 Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero, ex. artt. 31 e 33 del d.lgs 22/97	Definisce modalità, procedimenti e metodi di recupero per i rifiuti non pericolosi, ammessi alle procedure semplificate. La norma dispone che i prodotti, le materie prime, o le materie prime secondarie ottenuti dalle attività di recupero o riciclaggio, devono presentare caratteristiche merceologiche conformi alla normativa tecnica di settore o, alle norme commerciali e non devono presentare caratteristiche di pericolo superiori a quelle dei prodotti e delle materie che si ottengono dalla lavorazione delle materie prime vergini	Oltre 200 materiali non pericolosi
D.M. 161/2002 Reg. attuativo degli artt. 31 e 33 del D.Lgs 22/97, relativo all'individuazione dei rifiuti pericolosi che è possibile ammettere alle procedure semplificate	Il decreto si riferisce ai rifiuti pericolosi e prevede di applicare quanto già indicato dal D.M. 5/1998 riguardo all'attenzione per la salute dell'uomo e dell'ambiente, dando indicazioni per evitare situazioni di rischio e inconvenienti, e per garantire la tutela del paesaggio e dei siti di interesse.	Materiali pericolosi
D.M. 14.02.2013, n. 22 Reg. per la cessazione della qualifica di rifiuto di determinate tipologie di combustibili solidi secondari (Css) – Attuazione art. 184-ter del D.Lgs 152/2006	La norma definisce i criteri specifici da rispettare affinché determinate tipologie di combustibili solidi secondari (Css) cessino di essere qualificate come rifiuto e stabilisce procedure e modalità affinché le fasi di produzione e utilizzo dei Css- avvengano senza pericolo per la salute dell'uomo e senza pregiudizio per l'ambiente.	Combustibili solidi secondari (Css) e oli usati
D.M. 28.03.2018, n. 69 Reg. per la cessazione della qualifica di rifiuto di conglomerato bituminoso, ex. art. 184-ter, 2°co. del D.Lgs 152/2006	Il regolamento stabilisce i criteri specifici in presenza dei quali il conglomerato bituminoso cessa di essere qualificato come rifiuto, e non si applica al conglomerato bituminoso qualificato come sottoprodotto.	Conglomerato bituminoso e granulato di conglomerato bituminoso
D.M. 188/2020 Reg. per la cessazione della qualifica di rifiuto di carta e cartone, ex. art. 184-ter, 2°co. del D.Lgs 152/2006	Disciplina i criteri specifici per la cessazione della qualifica di rifiuto da carta e cartone (definiti "carta e cartone recuperati"), mentre non incide né sugli aspetti quantitativi, né sulle condizioni per svolgere attività di recupero secondo la procedura semplificata.	Carta e cartone, imballaggi di carta e cartone, imballaggi compositi, imballaggi in materiali misti.

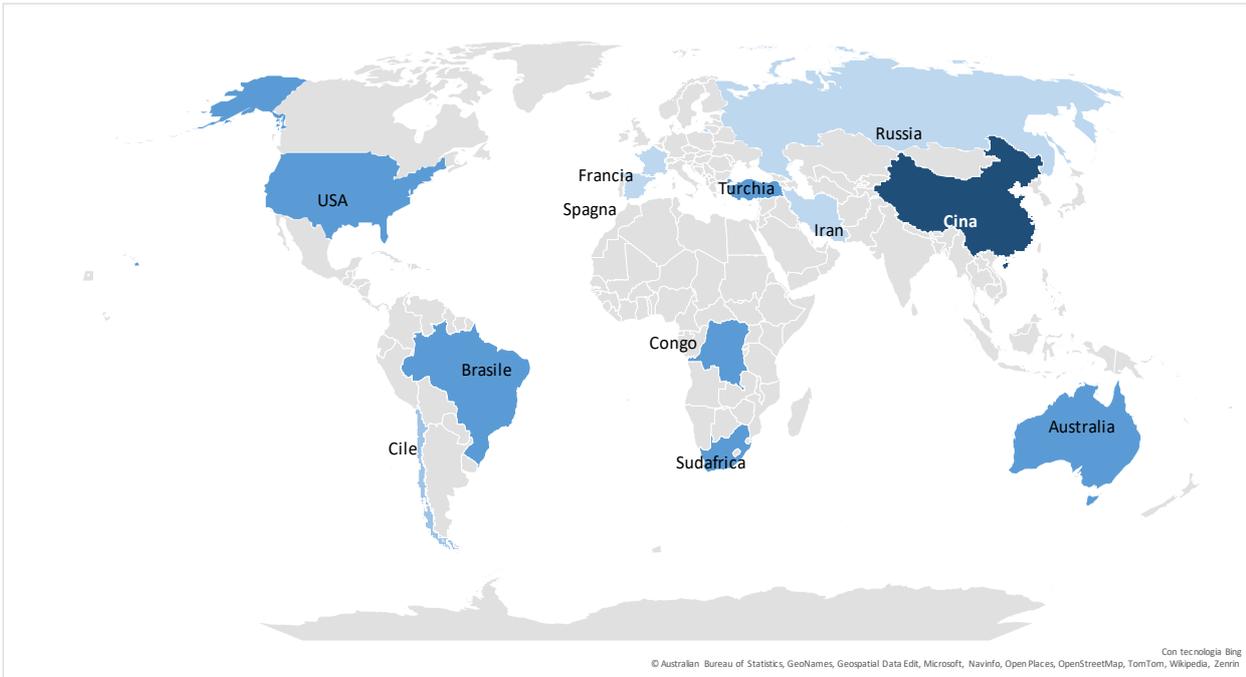
Codice e titolo	Finalità	Rifiuti considerati
D.M. 62/2019 Reg. per la cessazione della qualifica di rifiuto di prodotti assorbenti per la persona (PAP), ex. art. 184-ter, 2°co. del D.Lgs 152/2006	Il decreto disciplina i criteri specifici in base ai quali le plastiche eterogenee a base di poliolefine, il SAP1 e la cellulosa, derivanti dal recupero di rifiuti di prodotti assorbenti per la persona, cessano di essere qualificati come rifiuto.	Plastiche eterogenee a base di poliolefine, SAP (Super Absorbent Polymer), poliacrilato di sodio, cellulosa ad alto o a basso contenuto di SAP.
D.M. 78/2020 Reg. per la cessazione della qualifica di rifiuto della gomma vulcanizzata derivante da pneumatici fuori uso, ex. art. 184-ter del D.Lgs 152/2006	La norma stabilisce i criteri specifici in base ai quali la gomma vulcanizzata derivante dal recupero di pneumatici fuori uso e gli sfridi di gomma cessano di essere qualificati come rifiuto. La norma non si applica alla gomma vulcanizzata qualificata come sottoprodotto.	Pneumatici, gomma vulcanizzata, sfridi di gomma vulcanizzata che possono provenire sia dalla produzione di pneumatici nuovi, sia dall'attività di ricostruzione degli pneumatici.
D.M. 27.09.2022, n. 152 Reg. per la cessazione della qualifica di rifiuto dei rifiuti inerti da costruzione e demolizione e di altri rifiuti inerti di origine minerale, ex. art. 184-ter, 2°co. del D.Lgs 152/2006	La norma stabilisce i criteri specifici in base ai quali i rifiuti inerti dalle attività di costruzione e di demolizione e gli altri rifiuti inerti di origine minerale sottoposti ad operazioni di recupero, cessano di essere qualificati come rifiuti	Rifiuti inerti derivanti dalle operazioni di costruzione e demolizione e altri rifiuti inerti di origine minerale

nitaria un forte elemento di dipendenza da altri Paesi (Figura 1). Si calcola, ad esempio, che la richiesta di litio, necessario per la produzione delle batterie, in tutto il settore della mobilità e per l'accumulo di energia, da qui al 2050, crescerà di 89 volte. Già oggi l'Europa non è in grado di soddisfare più del 50% della domanda di cobalto, mentre per le terre rare vi sarà un aumento della richiesta pari a 17 volte in più rispetto ad oggi e per il gallio, utilizzato per produrre i semiconduttori, la domanda crescerà di almeno 6 volte (Carrara et al., 2023). Per converso, la Cina detiene una posizione di quasi monopolio nell'estrazione degli elementi pesanti delle terre rare, che vengono utilizzati nei magneti permanenti e per la raffinazione del magnesio, fornendo di tali materie prime il 97% del totale importato dall'Europa; inoltre, il 63% del cobalto è estratto in Congo e la Cina provvede per il 60% alla sua raffinazione. Il reperimento di questi materiali ha poi dei costi ambientali e sociali molto elevati. Il litio, ad esempio, richiede circa 1,2 milioni di litri d'acqua per estrarne 1 tonnellata dalla salamoia ed il costo per il recupero è ancora piuttosto elevato: circa 62\$ per kWh, contro un guadagno di 42\$ per kWh (Ciez e Whitacre, 2019). L'utilizzo del sodio, che presenta caratteristiche chimico-fisiche molto simili e che si ricava dal mare, potrebbe costituire una valida alternativa; assieme anche ad altre soluzioni quali la geotermia, che abbina alla produzione termoelettrica l'estrazione di minerale dalle brine, a ciclo chiuso e con ridotte emissioni, o la tecnologia elettrocinetica, tutt'ora in fase di studio, ma già utilizzata per l'estrazione di altri metalli più comuni come, ad esempio, il rame (Battistel et al., 2020).

### 3.2. Le opportunità dell'innovazione sostenibile

Un altro aspetto rilevante riguarda la sostituzione dei materiali più inquinanti ed il reimpiego di determinati composti, come quelli presenti nei RAEE, allo scopo di massimizzare l'utilizzo e l'efficienza di quelle sostanze che, durante le fasi di estrazione e di lavorazione hanno impatti significativi sull'ecosistema. Ricerca e innovazione stanno offrendo una gamma sempre più ampia di prodotti alternativi, che consentono di ridurre l'uso di materiali inquinanti. Ad esempio, la lignina, costituita da uno scarto della produzione della polpa di cellulosa derivante dal legno potrebbe sostituire la grafite nelle batterie: con la lignina potrebbe essere possibile produrre i transistor, che sono i componenti fondamentali di qualunque circuito elettronico e per i quali si stima per i prossimi anni una produzione di sei sestilioni (Operamolla, 2017).

La diffusione su tutto il territorio nazionale degli impianti necessari al funzionamento delle nuove tecnologie, alle telecomunicazioni, per il passaggio alla mobilità elettrica e per la produzione di energia da fonti rinnovabili presenterà, in un prossimo futuro, il problema dello smaltimento delle componenti dismesse, oltre a quello dei rifiuti prodotti in fase di ammodernamento degli impianti già esistenti (IEA, 2021). Anche in questo ambito la ricerca e sviluppo può contribuire in modo significativo nell'individuare soluzioni innovative per il recupero dei materiali o per il loro riutilizzo, riducendo gli impatti ambientali associati alla gestione del fine vita di prodotti complessi e al contempo favorendo il riutilizzo di materiali preziosi (Cellura et al., 2023).



**Figura 1.** Paesi fornitori delle principali Materie Prime Critiche (elaborazione degli autori da JRC, 2020).

### 3.3. Tracciabilità del ciclo di vita dei materiali

In continuità con altre disposizioni comunitarie in materia di ambiente e lotta al cambiamento climatico, il Regolamento per le Materie Prime Critiche si concentra sulle materie prime non energetiche e non agricole indispensabili a numerosi settori strategici, come il settore energetico, l'industria digitale, il settore aerospaziale, la difesa ed il settore sanitario: si tratta di settori la cui continuità è strategica e di conseguenza la disponibilità di materie prime è essenziale per garantire la tenuta del sistema economico internazionale (COM 2023/160). La proposta è in linea con le precedenti strategie europee ed è basata sulla valutazione delle criticità economiche e sociali legate alla dipendenza dei Paesi membri da materie prime non disponibili in Europa. Le azioni che fino ad ora l'UE ha messo in campo non sono state tuttavia sufficienti a garantire un approvvigionamento sicuro delle materie prime critiche. La COM 2023/160 si pone l'obiettivo di semplificare l'estrazione, la lavorazione ed il riciclaggio delle sostanze e dei materiali, attraverso il rafforzamento delle diverse fasi della catena del valore e la garanzia della libera circolazione dei materiali nel mercato unico, pur tenendo alta l'attenzione sulla tutela dell'ambiente e migliorando circolarità e sostenibilità.

A questo proposito, l'UE sta lavorando su diversi fronti. A giugno del 2023 ha affrontato la questione della tracciabilità di rifiuti complessi con una nuova proposta di regolamento del Parlamento Europeo e del Consiglio relativa alle batterie ed ai rifiuti delle batterie, che ha modificato la direttiva 1020/2019/

CE e che andrà gradualmente a sostituire la Direttiva 2006/66/CE. Il fine è quello di incentivare il progresso tecnologico nel settore delle batterie, riducendo gli impatti causati dalla loro produzione sull'ambiente. Per la prima volta i requisiti obbligatori riguarderanno l'intero ciclo di vita delle batterie al litio e si prevede una suddivisione delle batterie in gruppi a seconda dell'applicazione per cui vengono progettate. Inoltre, da maggio 2026, quelle con capacità superiore ai 2kWh, immesse sul mercato europeo, per essere conformi ai requisiti di tracciabilità e sicurezza previsti dal regolamento, dovranno possedere il cosiddetto "battery passport", documento digitale finalizzato a rendere disponibili a tutta la filiera, dai produttori agli utilizzatori finali e agli operatori addetti al riciclo, informazioni dettagliate sugli elementi componenti tali prodotti e sulla tracciabilità di sostanze e componenti (Halleux, 2023). Sempre sotto il profilo dell'identità dei materiali e della trasparenza per la tracciabilità dei prodotti vanno altresì segnalate la COM 142/2022 sulla progettazione ecocompatibile dei prodotti sostenibili, che verrà applicata ad una più ampia gamma di prodotti, e la direttiva 2017/821/CE sui minerali provenienti dalle zone di conflitto, con la quale si richiede agli importatori di stagno, tantalio, tungsteno e oro di istituire e attuare politiche che affrontino gli impatti sui diritti umani legati ai conflitti armati e sui diritti del lavoro lungo la catena del valore.

In tema di etichettatura e di comunicazione al mercato, con la COM 166/2023, in particolare, il Parlamento europeo ed il Consiglio hanno denunciato

che il 53,3% degli slogan ambientali utilizzati dalle imprese contengono informazioni vaghe, fuorvianti ed infondate sull'impatto ambientale dei prodotti. Lo studio ha poi rilevato che il 40% delle indicazioni tra quelle analizzate non erano comprovate e ciò permette (anche ad alcuni grandi marchi) di ingannare i consumatori, che credono di operare delle scelte etiche acquistando abiti fatti con: cotone organico, nylon riciclato, risparmio di acqua, pelle rigenerata, quando invece non è così (Della Rosa, 2022).

Con riferimento allo sviluppo dell'economia circolare, l'Italia ha buone possibilità per essere sfidante, avendo un'economia caratterizzata dalla presenza di piccole e medie imprese, operanti soprattutto nel manifatturiero, attente alle evoluzioni del mercato e particolarmente votate all'innovazione.

### 3.4. Imprese italiane leader nell'innovazione circolare

L'Italia, da sempre povera di materie prime, è una delle economie più circolari d'Europa (Figura 2). Nel nostro Paese si ricicla circa il 68% dei rifiuti prodotti, in particolare rifiuti tessili, carta, metalli, vetro, materiali da costruzione ed oli minerali usati. Per questi ultimi, in particolare, vantiamo un primato avendo rigenerato, solo nel 2021, il 68% delle 186.000 T di olio usato conferito e nel 2022 il 65,5% pari a 177.400 T di olio processato nelle raffinerie, risparmiando così circa 82 milioni di Euro in importazioni di greggio. Dobbiamo però poi fare i conti con un sistema normativo

che non agevola gli operatori economici e ostacola la capacità di aumentare le attività di estrazione, lavorazione e riciclo delle materie prime e con un mercato non strutturato degli EoW, incapace di fare fronte alla domanda di materia prima.

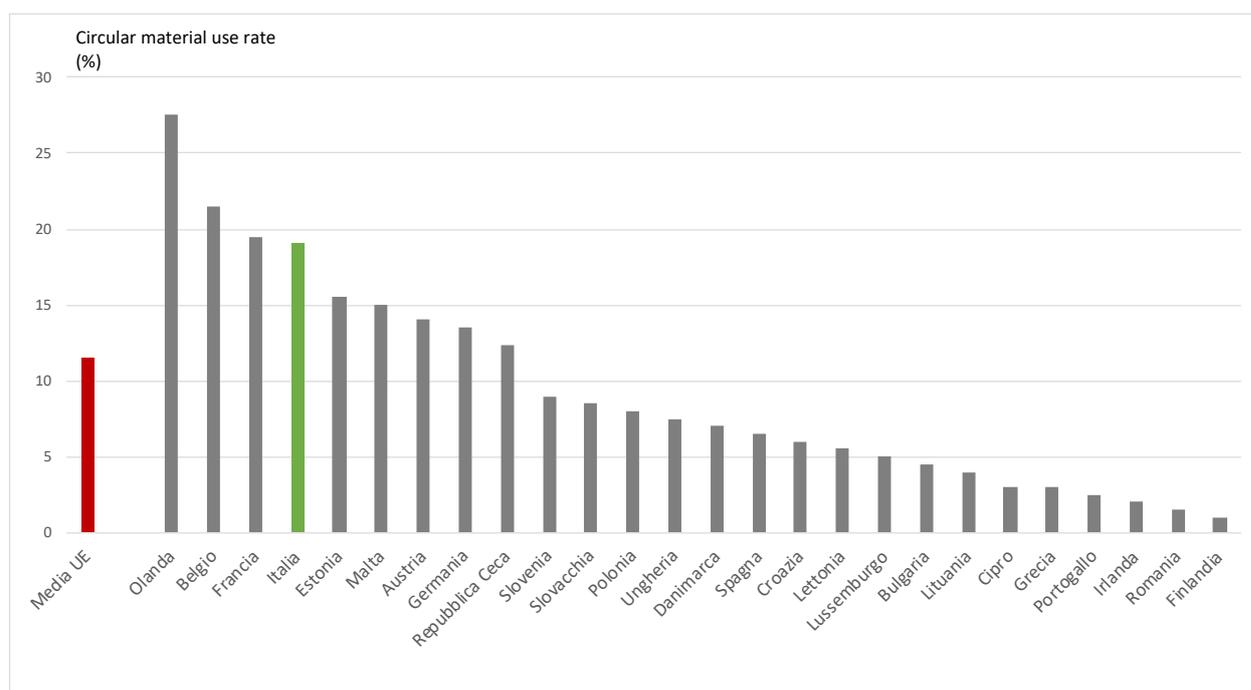
Nella comunità scientifica sono numerosi i progetti di ricerca, di base e applicata, in tutti i settori, per testare sempre nuove opzioni di riciclo di materiali, materiali sostitutivi, o maggiormente ecologici, aprendo innumerevoli opportunità per il mercato. Parallelamente cresce il numero delle imprese che investono risorse e idee per sviluppare tecnologie e processi volti a valorizzare gli scarti e i rifiuti, come dimostrano i brevetti industriali depositati in Europa. I partner europei stanno già iniziando a cogliere le opportunità industriali e chi farà investimenti per primo e più velocemente, si assicurerà un posto di rilievo in questo nuovo paradigma di sviluppo economico (Carollo e Rigamonti, 2019).

Per venire incontro alle realtà produttive italiane, servono dunque azioni coordinate da diversi soggetti economici e politici a livello locale e nazionale, che consentano di fare dell'economia circolare il volano per uno sviluppo locale sostenibile.

## 4. Alcune proposte per uno sviluppo circolare e sostenibile

### 4.1. Servizi informativi diffusi e integrati

In primo luogo, è importante riconoscere che le aziende interessate a sviluppare progetti di economia



**Figura 2.** Percentuale di utilizzo di materiali provenienti da riciclo nei Paesi europei (elaborazione degli autori con dati da Eurostat, 2022).

circolare necessitano di servizi informativi strutturati, che consentano loro sia di operare scelte consapevoli, sia di avvicinare offerta e domanda di materie prime-secondarie, ottimizzando così i processi produttivi, i costi energetici, nonché l'impiego del personale, delle capacità e delle competenze di ciascuno e massimizzando i profitti.

Operare in un'ottica di circolarità sarà fonte di ricchezza per le imprese italiane, che potranno aumentare l'efficienza della propria attività produttiva, grazie a dei sistemi di riutilizzo dei materiali e allo sviluppo di soluzioni alternative per la sostituzione di alcuni di essi. Viceversa, quando i prodotti, al termine del loro ciclo di vita, non vengono adeguatamente reintegrati in regolari circuiti di riciclo, il valore dei materiali che li compongono viene irrimediabilmente perduto.

Questo potrà anche mettere un freno alla domanda interna di materie prime, venendo a crearsi una sorta di "riserva interna" per una maggiore autonomia grazie alla capacità di auto approvvigionamento cui farà seguito anche una riduzione delle importazioni ed un abbattimento dei costi. L'Europa, ad esempio, è già autosufficiente nei minerali da costruzione; in particolare nel settore del recupero dei granulati è uno tra i principali produttori mondiali di pietra di gesso e pietra naturale, oltre a vantare un primato a livello mondiale nella produzione di alcuni materiali industriali. Concentrarsi sulle attività necessarie al recupero dei materiali, potrebbe rivelarsi una valida alternativa anche per occupare una grossa parte della forza lavoro già presente nelle aziende, se non addirittura portare all'apertura di nuovi comparti e ciò è importante in vista dei cambiamenti dovuti all'avvento delle nuove tecnologie. Secondo le previsioni dell'Associazione Componentisti dell'Automotive Europea (CLEPA – European Association of Automotive Suppliers), ad esempio, il passaggio all'auto elettrica previsto per il 2035, che indurrà all'abbandono dei motori termici, metterà a rischio molti posti di lavoro. Da qui al 2040, solo in Europa, le competenze di 275.000 lavoratori non saranno più necessarie, di questi 60.000 sono in Italia. Il problema nasce dal fatto che la costruzione di un'auto elettrica richiede dal 25% al 35% di manodopera in meno. Specularmente, la Commissione Europea calcola che, grazie all'economia circolare, nasceranno nuovi settori economici che potranno offrire all'incirca 170.000 nuove occupazioni. La filiera della componentistica in Italia rappresenta un'eccellenza mondiale e l'avvento dell'auto elettrica abiliterà comunque dei nuovi settori industriali, come quello delle batterie, che darà lavoro non soltanto a chi è stato formato nel campo della progettazione e della produzione, ma anche a chi abbia acquisito delle conoscenze nel campo del riciclo; a patto, ovviamente, di provvedere allo sviluppo di nuove tecnologie, capaci di trattare rifiuti difficili, o di recuperare materie prime di maggiore valore. (Larizza, 2023).

#### 4.2. *Strumenti normativi a supporto di ricerca e sviluppo*

Un secondo ambito di crescita per l'economia circolare in Italia riguarda le attività di ricerca e sviluppo, che necessitano di supporto consulenziale per risolvere i vuoti normativi che inibiscono i percorsi autorizzativi per nuove opzioni di recupero e riciclo. Se, in generale, un contesto normativo lacunoso, confuso e discordante può impigrire un qualsiasi spirito d'iniziativa, nel caso di specie, questo sta addirittura scoraggiando la volontà delle aziende ad attribuire un valore ai propri scarti e sta lasciando che una parte molto importante delle potenzialità di crescita dell'impresa italiana resti inutilizzata (Fabris e Mazzi, 2018).

Non è un caso che, tra i pilastri su cui si basa il piano industriale del Green Deal, vi sia la volontà di creare "un contesto normativo prevedibile, coerente e semplificato" assieme ad un "commercio aperto per catene di approvvigionamento resilienti". È dunque evidente che rafforzare la certezza del diritto per gli investitori e per le imprese, sia un passo fondamentale per promuovere la stabilità del mercato internazionale. D'altro canto l'Europa ha sempre voluto favorire la creazione di un quadro legislativo e amministrativo chiaro e ciò anche al fine di creare condizioni eque tra le imprese e i Paesi che vogliono accedere alle materie prime. La stessa Commissione Europea sottolinea il fatto che una regolamentazione non equilibrata può impattare sulla competitività, attraverso l'imposizione di oneri inutili, oltre ad ingenerare sfiducia, timori e incertezze sia nella domanda che nell'offerta. Un ambiente normativo chiaro, viceversa, costituisce un incentivo fondamentale per gli investimenti. Un traguardo importante, dunque, deve essere quello di semplificare le procedure di autorizzazione, rendendole più snelle e prevedibili, di ridurre la durata e di eliminare gli intoppi burocratici, venendo così incontro a chi opera all'interno di un mercato unico, pur senza abbassare il livello di attenzione sulla conservazione e sulla salvaguardia dell'habitat e della salute umana.

Molte poi sono le iniziative legislative che si concentrano sul trattamento ed il riciclaggio dei rifiuti provenienti da prodotti che contengono materie prime critiche. La cornice normativa in tema di rifiuti (Direttiva 2008/98/CE) ha messo l'accento sulla necessità di prevenire la produzione di rifiuti per i prodotti contenenti CRM ed include una disciplina sui flussi che le contengono. La direttiva quadro sui rifiuti estrattivi 2006/21/CE, generati dalle operazioni minerarie, ha richiesto agli operatori per le strutture di deposito dei rifiuti attualmente in funzione ed agli Stati membri per le strutture di deposito dei rifiuti chiuse e abbandonate, di analizzare il potenziale di recupero delle CRM nei rifiuti di estrazione. La direttiva sui Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche, 2012/19/CE, stabilisce regole per promuovere la prepara-

zione per il riutilizzo, il riciclo e altre forme di recupero dei RAEE e ciò non solo al fine di contribuire all'uso efficiente delle risorse, ma anche per il recupero delle materie prime-secondarie, comprese quelle critiche. Inoltre, è in corso una revisione congiunta delle direttive 2000/53/CE, per i veicoli fuori uso e 2005/64/CE sull'omologazione dei veicoli a motore, con l'obiettivo di ridurre i rifiuti dei veicoli a fine vita e dei loro componenti e di aumentare la circolarità dei veicoli convenzionali ed elettrici che contengono quantità significative di CRM. Sono anche stati introdotti requisiti specifici per migliorare la riciclabilità dei magneti permanenti nei veicoli. Infine, la proposta relativa alle pile e ai rifiuti di pile (COM 798/2020) contiene disposizioni specifiche per le CRM per le pile immesse nel mercato unico, in linea con il Reg. per le Materie Prime Critiche che mira ad incrementare la capacità dell'Ue di rifornirsi.

#### *4.3. Tracciabilità circolare, da risorse a rifiuti a nuove risorse*

Una terza linea di sviluppo dell'economia circolare italiana riguarda i materiali recuperati, che necessitano di sistemi di tracciabilità che contengano informazioni precise e dettagliate sulle caratteristiche merceologiche dei materiali di origine, oltre che sui trattamenti cui vengono sottoposti durante le diverse fasi di produzione e recupero. Anche il fattore culturale gioca un ruolo importante per incoraggiare imprese e consumatori ad acquistare prodotti di "seconda vita". Trasparenza e garanzia di sicurezza sono alcuni tra i fattori principali che possono garantire un nuovo mercato dei materiali recuperati. Ciò spingerà le aziende a vedere come una "risorsa" ciò di cui, ancora troppo spesso si disfano, per scarsa informazione, per cattiva gestione, o per mancanza di opportunità. Lo stesso Parlamento ed il Consiglio, mediante proposta di regolamento n. 798/2020 hanno richiesto una maggiore trasparenza e più informazioni per gli utilizzatori finali sull'impronta ecologica delle materie prime critiche immesse nel mercato unico europeo. Troviamo, ad esempio, le direttive 1272/2008/CE per la classificazione, l'etichettatura e l'imballaggio di sostanze e miscele e 1907/2006/CE sulle misure di riduzione dei rischi, che disciplina la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche (REACH) per garantire la loro stessa sicurezza e quella dei prodotti che le contengono e che circolano in territorio europeo. Questo filone di norme, specificatamente dedicate, assume un'importanza particolare in alcuni degli utilizzi delle materie prime critiche, giacché tutela in maniera più stringente la salute dell'uomo e dell'ambiente disponendo l'eliminazione delle sostanze tossiche in linea con il Green Deal e la sostituzione delle sostanze chimiche più pericolose contenute nei prodotti di consumo e ad uso professionale. Di tracciabilità si è occupato

anche COMIECO (Consorzio Nazionale Recupero e Riciclo degli Imballaggi a base Cellulosica), con un progetto pilota rivolto al settore cartario, che sfrutta una tecnologia in grado di tracciare i flussi dell'intera filiera (ossia: ogni balla che fuoriesce dall'impianto), compreso il tratto intermedio a valle dell'impianto di recupero che, fino ad oggi, era il solo rimasto scoperto. Il sistema si chiama RFID ed è composto da un microchip che comunica con gli altri componenti, quali l'antenna che, a sua volta, viene gestita da un controller che trasferisce i dati ad un computer, al cloud e viceversa. Il microchip assume forme diverse e questo lo rende adattabile a diversi tipi di supporto, a seconda degli usi. Il RFID rileva in modo univoco, massivo e a distanza gli oggetti sia statici che in movimento, identificandoli automaticamente e riuscendo non solo a leggere, ma anche a scrivere i dati raccolti, che vengono infine registrati su un'etichetta ed inseriti nei documenti di trasporto (Fragali, 2023).

Un'ulteriore opportunità di sviluppo dell'economia circolare tra le imprese italiane riguarda tutte le iniziative a sostegno della tracciabilità delle materie prime-secondarie. I materiali che, cessata la qualifica di rifiuto, possono rientrare nel mercato in sostituzione di altre materie prime vergini, devono riportare informazioni complete e consistenti circa la loro precedente vita, così da poter essere utilizzate in modo adeguato per ottenere nuovi prodotti, garantendo la possibilità di verifiche circa composizione e provenienza. Lo stesso Green Deal esprime l'importanza di informare l'utilizzatore finale in merito alla sostenibilità, alla durata ed all'impatto ambientale dei prodotti, consentendogli così di operare scelte consapevoli.

Le aziende possono ottenere concreti vantaggi dall'economia circolare se domanda e offerta di materie prime-secondarie consentono un utilizzo a pieno regime degli impianti, minimizzando i costi di produzione e massimizzando gli investimenti legati alle innovazioni. Inoltre, i benefici ambientali ed economici che si possono ottenere dalla chiusura del cerchio richiedono la minimizzazione delle fasi di trasporto, avvicinando le attività che producono gli EoW alle attività che utilizzano le materie prime-secondarie. Se questi elementi non vengono ottimizzati, l'economia circolare rappresenta una sfida troppo rischiosa per le imprese e gli ostacoli al suo sviluppo superano le opportunità (Mazzi e Zampiero, 2019).

#### *4.4. Metriche per misurare la sostenibilità ambientale della circolarità*

Un ulteriore elemento di riflessione riguarda le modalità con cui si può misurare la sostenibilità delle opzioni di circolarità. Infatti, se tra le imprese sta emergendo l'esigenza di valutare l'opportunità di soluzioni di riciclo, anche il sistema economico nel suo complesso necessita di nuovi strumenti per misurare la convenienza ambientale associata all'utilizzo efficiente dei materiali e al tasso

di recupero e di riciclo degli scarti industriali. Nuove metriche di sostenibilità ambientale devono essere elaborate per consentire a coloro che operano sul territorio di sostenere cambiamenti verso l'economia circolare che garantiscano uno sviluppo locale sostenibile; ne sono un esempio le iniziative volte a quantificare i benefici apportati dall'ecodesign dei prodotti e dai processi produttivi ripensati per un miglioramento complessivo delle performance di settore (Barbato e Rigamonti, 2023).

In merito, si può citare la strategia di CONAI (Consorzio dei produttori e degli utilizzatori degli imballaggi), volta a conseguire gli obiettivi di riciclo dei rifiuti di imballaggio valorizzando l'eco-design e il "design for recycling". Si calcola, infatti, che le scelte adottate in fase di progettazione, incidano addirittura per l'80% sugli impatti ambientali che l'imballaggio può produrre durante il suo intero ciclo di vita.

Nell'ottica di venire incontro alle aziende che, nelle varie fasi di recupero e di riciclo dei materiali, devono ottemperare agli obblighi di legge, sono state attuate diverse iniziative di supporto. CONAI, ad esempio, ha sviluppato delle "Linee guida per la facilitazione delle attività di riciclo degli imballaggi in materiale a prevalenza cellulosa" (Picerno, et al., 2020). Accanto a queste, si ricordano altresì le linee guida SNPA, aventi l'obiettivo di agevolare le aziende nella comprensione della procedura per l'ottenimento delle autorizzazioni e per assicurare armonizzazione, efficacia ed omogeneità su tutto il nostro territorio, nel rilascio dei pareri e per pianificare e portare a compimento le ispezioni agli impianti di trattamento dei rifiuti (Mazzella e D'Alessandro, 2022).

## 5. Conclusioni e sviluppi futuri

Le aziende italiane, ed in particolare le piccole e medie imprese manifatturiere, necessitano di strumenti e di incentivi che le rendano più resilienti e maggiormente preparate ad affrontare le sfide dell'economia circolare, delle materie prime critiche e della digitalizzazione (Figura 2). Questo, in particolare, ottimizzando l'uso delle risorse nei processi produttivi e risparmiando sui costi dei materiali con un relativo aumento dei profitti. Serve inoltre un sistema normativo più chiaro e coerente, che non si limiti a tracciare i confini tra ciò che è lecito e ciò che non lo è, o a stabilire presupposti e condizioni, ma che sappia anche farsi interprete delle attività d'impresa, attraverso una più approfondita analisi delle difficoltà che s'incontrano, in concreto, durante le diverse fasi dei processi di produzione. Ad oggi, viceversa, la norma si presenta vaga, eccessivamente astratta e troppo lontana dai singoli contesti, generalmente non fornendo delle soluzioni, ma limitandosi a stabilire dei vincoli. Nel complesso, la regolamentazione per la gestione dei rifiuti lascia troppo soli gli operatori e talvolta addirittura limita le possibilità di innovazione circolare ed il com-

mercio di alcune materie prime-secondarie. Un aspetto importante che riguarda tutti gli attori della filiera, direttamente o indirettamente coinvolti, consiste nel rendere disponibili informazioni e dati relativi alla "storia" dei prodotti e dei materiali. Ogni soggetto sul mercato ha il diritto di ricevere informazioni consistenti circa l'origine e i passaggi di ogni materiale; al contempo, ciascun soggetto deve assumersi il dovere di trasferire informazioni complete e trasparenti circa l'origine e le trasformazioni di ogni materiale e componente. Codificare e tracciare i materiali, le sostanze e i prodotti rappresenta una delle condizioni sine qua non per operare scelte consapevoli e per sostenere uno sviluppo sostenibile dell'economia circolare.

Dall'analisi fin qui condotta emergono dunque alcune raccomandazioni volte a snellire i percorsi burocratici e a favorire la piena conoscenza delle proprietà e degli utilizzi dei materiali, al fine di ottimizzare i processi di produzione e l'impiego delle risorse a disposizione, di dare maggiore impulso al mercato delle materie prime seconde e al loro interscambio. In primis, appare necessario operare una raccolta dei criteri EoW fino ad ora autorizzati, per disporre di una banca dati completa, che rappresenti l'intero territorio nazionale, che sia costantemente aggiornata e facilmente fruibile. I dati potrebbero essere attinti dal catalogo della piattaforma Recer del MATTM, dagli archivi degli uffici regionali preposti e dalle aziende che sperimentano nuovi processi di recupero. L'attività verrebbe sia incontro alle imprese, al momento di definire le loro scelte strategiche; sia potrebbe, in un immediato futuro, costituire un buon punto di partenza per la stesura dei nuovi decreti con cui si andranno a regolamentare le sostanze ed i materiali tuttora privi di una disciplina ad hoc. Nel primo caso, infatti, parteciperebbe a colmare il gap normativo dovuto a delle leggi spesso contraddittorie e a dei criteri il cui raggio d'azione copre soltanto alcune zone d'Italia; nel secondo caso, invece, andrebbe ad integrare i contenuti delle linee guida SNPA, aggiungendo sostanza agli stessi obiettivi delle autorità regionali per la tutela dell'ambiente.

È altrettanto importante integrare il lavoro con uno studio degli impatti ambientali e sociali evitati dagli EoW, che derivano ad esempio dall'estrazione di determinate materie prime e/o materie prime critiche, tenendo in debita considerazione anche i rischi associati a salute e sicurezza dei lavoratori nei processi di riciclo (Battiston et al., 2023). Il tutto fornirebbe un quadro dei costi e dei ricavi per il recupero dei materiali e una valutazione dei benefici sociali associati al recupero di materiali: tali informazioni, unite alla convenienza ambientale del riciclo, potrebbe guidare a scelte effettivamente sostenibili, non solo dal punto di vista ambientale ma anche socio-economico.

Per dare maggiore equilibrio al mercato degli EoW e per ripensare i processi produttivi affinché diventi possibile dissociare l'incremento degli utili all'acquisto compulsivo di materia prima vergine, bisogna attribuire agli scarti/sfridi il loro giusto valore e tale obiettivo non può essere raggiunto senza una conoscenza adeguata circa: le migliori tecnologie disponibili per le attività di recupero e l'estrazione delle materie prime (in particolare di quelle cd. critiche) che consentono, ad esempio, un minore consumo di acqua, minori rischi di subsidenza, o di abbassamento dei terreni, o di rilascio di composti chimici; i case studies di successo (o "best ideas") in tema di riutilizzo dei materiali; le "best end-of-waste practice", ossia le pratiche che utilizzano materiali facilmente riutilizzabili o riciclabili, progettati in funzione anche alla loro possibilità di diventare materia prima seconda, o che consentono una maggiore efficienza in fase di produzione; e i "best end-of-waste criteria", ossia i criteri da cui si generano prodotti di qualità superiore.

Altro nodo fondamentale è quello della tracciabilità: per sostenere lo sviluppo di un mercato della circolarità è essenziale definire una procedura di codificazione alla quale le aziende potranno fare riferimento per scrivere i loro codici che costituiranno il documento identificativo per tracciare i loro prodotti recuperati, quali sfridi e scarti industriali. Questi "passaporti" dovranno riportare l'intero ciclo di vita dei materiali: estrazione, fasi di lavorazione, utilizzo/scopo, smaltimento e infine, le attività di recupero svolte per il ritorno sul mercato. Dovranno essere indicati gli elementi estranei, eventualmente presenti, gli agenti chimici, o le sostanze tossiche con cui i materiali siano entrati in contatto e riportate puntualmente le proprietà e le caratteristiche dei materiali e/o delle sostanze.

Prima di procedere alla stesura di un modello di codificazione, bisognerà soffermarsi sulle singole definizioni di "sfrido" e "scarto industriale", la cui natura e le cui caratteristiche incidono sui contenuti e sulle finalità dell'etichetta che li accompagnerà. Questo non soltanto per garantire sicurezza, qualità e trasparenza dei rinati prodotti, ma anche e soprattutto per stabilire e sviluppare un linguaggio comune, che unisca tutti gli operatori della filiera, che potranno così interfacciarsi tra loro in modo massimamente efficace, chiaro, semplice e veloce, indipendentemente dalle diverse competenze di ciascuno. Si ritiene, infatti, che solo una condivisione ampiamente diffusa delle esperienze e delle competenze sul campo dei rifiuti recuperati, potrà portarci verso l'eccellenza delle performance di circolarità.

Per concludere, in accordo con quanto detto sopra, la realizzazione di una piattaforma web open access, realizzata con tecnologie che garantiscano la massima sicurezza e veridicità dei contenuti, oltre a favorire la compravendita degli scarti/sfridi, dei materiali recu-

perati e dei rifiuti cessati (anche sui mercati esteri) e a promuoverne l'utilizzo (allungando, di conseguenza, il tempo della loro vita utile), consentirà anche una maggiore visibilità delle nostre imprese, senza lasciare indietro nemmeno i piccoli artigiani e gli artisti che utilizzino, anche in piccole quantità, materiali recuperati per la realizzazione delle loro opere. Grazie a questo strumento, tutti gli attori della filiera potranno fare rete, dando avvio ad un processo di contaminazione che con il tempo potrà progressivamente autoalimentarsi e coinvolgere investitori, produttori, distributori e consumatori. Un simile traguardo è in linea con gli stessi obblighi commerciali e internazionali stabiliti dall'UE e con la politica commerciale comune dei Paesi membri, la quale al fine di rafforzare e diversificare l'approvvigionamento di materie prime critiche, prevede l'opportunità di rivolgersi ai mercati esteri, pur senza compromettere le norme commerciali e la concorrenza internazionale.

In questo contesto, sarà utile anche svolgere un'attività di disseminazione che consenta alle imprese di testimoniare le proprie esperienze nel campo della circolarità, oltre che di valutare assieme anche alle autorità preposte i punti di forza e le fragilità che, in futuro, richiederanno maggiori investimenti. La piattaforma fornirà l'opportunità di farsi conoscere, di mettere in luce il proprio impegno nel campo della sostenibilità, catturando l'attenzione anche di nuovi investitori e nuove fasce di stakeholder. La piattaforma avrà altresì l'effetto di mettere in risalto sul mercato le imprese con i maggiori "hot-spot" ambientali, ovvero le attività dove si concentra un consumo eccessivo di materie prime, e le imprese con i maggiori "soft-spot" ambientali, caratterizzate dalle migliori performance di circolarità.

Infine, la piattaforma potrebbe fungere da ulteriore garanzia di sostenibilità, non soltanto ambientale e circolare, ma più ampiamente anche sociale ed etica: le aziende potrebbero essere chiamate a fornire prove verificabili dei loro comportamenti etici, dimostrando di operare nel pieno rispetto dei diritti umani e dei lavoratori. Questo, tra l'altro, rispecchierebbe i propositi della COM 71/2022 (che modifica la direttiva 2019/1937/CE) sull'obbligo di diligenza in materia di sostenibilità delle imprese, con cui si prevede che le aziende forniscano garanzie adeguate sia in termini di rispetto dei diritti umani, sia sugli impatti ambientali negativi derivanti dalle proprie operazioni e lungo le catene del valore. ■

## Riferimenti bibliografici

- Barbato P.M., Rigamonti L. (2023). Analisi dei metodi di integrazione degli indicatori economici e ambientali. *Ingegneria dell'Ambiente* Vol. 10 n. 3/2023, 149-164.
- Battistel A., Palagonia M.S., Brogioli D., La Mantia F., Trócoli R. (2020). *Electrochemical methods for lithium*

- recovery: a comprehensive and critical review. *Advanced Materials* Vol. 32 n. 23, 1905440.
- Battiston E., Lovato G., Carlesso L., Mazzi A. (2023). Riciclo di pannelli solari e batterie: non solo una questione ambientale. *Ingegneria dell'Ambiente* Vol. 10 n.2/2023, 109-118.
  - Blois L., Passeri V. (2020). End of waste ed economia circolare. *Ecoscienza* Vol. 4, 64-67.
  - Carollo F., Rigamonti L. (2019). L'End of Waste: dalla culla alla crisi. *Ingegneria dell'Ambiente* Vol. 6 n. 4/2019, 286-294.
  - Carrara S., Bobba S., Blagoeva D., Alves Dias P., et al. (2023). Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study, Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC132889.
  - Castellano F., 2017. End-of-waste, servono regole e procedure certe. *Ecoscienza*, 5, 46-48.
  - Cellura M., Luu L.Q., Guarino F., Longo S. (2023). A review on life cycle environmental impacts of emerging solar cells. *Science of The Total Environment* Vol. 908, 168019.
  - Ciez R.E., Whitacre J.F., 2019. Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. *Nat Sustain* Vol. 2, 148-156.
  - COM 699/2008 (2008). Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo e al Consiglio, iniziativa “materie prime” – rispondere ai nostri bisogni fondamentali per garantire la crescita e creare posti di lavoro in Europa.
  - COM. 474/2020 (2020). Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni resilienza delle materie prime critiche: tracciare un percorso verso una maggiore sicurezza e sostenibilità.
  - COM 798/2020 (2020). Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo e al Consiglio relativo alle batterie e ai rifiuti di batterie, che abroga la direttiva 2006/66/CE e modifica il regolamento (UE) 1020/2019.
  - COM 142/2022 (2022). Proposta di regolamento del Parlamento europeo e del Consiglio che stabilisce il quadro per l'elaborazione delle specifiche di progettazione ecocompatibile dei prodotti sostenibili e abroga la direttiva 125/2009/CE.
  - COM 71/2022 (2022). Proposta di Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio relativa al dovere di diligenza delle imprese ai fini della sostenibilità e che modifica la Direttiva 1937/2019/CEE.
  - COM 62/2023 (2023). Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni. Un piano industriale del Green Deal per l'era a zero emissioni nette.
  - COM 160/2023 (2023). Proposta di regolamento del Parlamento europeo e del Consiglio che istituisce un quadro per garantire un approvvigionamento sicuro e sostenibile di materie prime essenziali e che modifica i regolamenti (UE) 168/2013, (UE) 858/2018, 1724/2018 e (UE) 102/2019.
  - COM 166/2023 (2023). Proposta di Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio sull'attestazione e sulla comunicazione delle asserzioni ambientali esplicite.
  - CONOU – Consorzio Nazionale Oli Usati, 2022, rapporto di sostenibilità.
  - Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 Norme in materia ambientale. *Gazzetta Ufficiale* n. 88 del 14 aprile 2006.
  - Decreto 5 febbraio 1998 individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22 (modificato dal dm 5 aprile 2006) *Gazzetta Ufficiale* suppl. ord. 16 aprile 1998, n. 88.
  - Decreto 12 giugno 2002, n. 161 regolamento attuativo degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, relativo all'individuazione dei rifiuti pericolosi che è possibile ammettere alle procedure semplificate. *Gazzetta Ufficiale* 30 luglio 2002, n. 177.
  - Decreto 14 febbraio 2013, n. 22 regolamento recante disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto di determinate tipologie di combustibili solidi secondari (css), ai sensi dell'articolo 184-ter., comma 2, del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, e successive modificazioni. *Gazzetta Ufficiale* s.g. n. 62 del 14 marzo 2013.
  - Decreto 11 ottobre 2017 criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici. *Gazzetta Ufficiale* s.g. n.259 del 6 novembre 2017.
  - Decreto 28 marzo 2018, n. 69 regolamento recante disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto di conglomerato bituminoso ai sensi dell'articolo 184-ter., comma 2 del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152. *Gazzetta Ufficiale* n. 139 del 18 giugno 2018.
  - Decreto 22 settembre 2020, n. 188 regolamento recante disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto da carta e cartone, ai sensi dell'articolo 184-ter, comma 2, del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152. *Gazzetta Ufficiale* n. 33 del 9 febbraio 2021.
  - Decreto 31 marzo 2020, n. 78 regolamento recante disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto della gomma vulcanizzata derivante da pneumatici fuori uso, ai sensi dell'articolo 184-ter del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152. *Gazzetta Ufficiale* n. 182 del 21 luglio 2020.
  - Decreto-legge 19 maggio 2020, n. 34 (convertito con modifica dalla legge 17 luglio 2020, n. 77 in s.o. n. 25, relativo alla GU 18 luglio 2020, n. 180) misure urgenti in materia di salute, sostegno al lavoro e all'economia, nonché di politiche sociali connesse all'emergenza epidemiologica da covid-19. *Gazzetta Ufficiale* s.g. n.128 del 19 maggio 2020, suppl. ord. n. 21.
  - Decreto 27 settembre 2022, n. 152 regolamento che disciplina la cessazione della qualifica di rifiuto dei

- rifiuti inerti da costruzione e demolizione e di altri rifiuti inerti di origine minerale, ai sensi dell'articolo 184-ter, comma 2, del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152. Gazzetta Ufficiale n. 246 del 20 ottobre 2022.
- Della Rosa D. (2022). Moda e Greenwashing, verso la regolamentazione del settore, NT+Diritto, Comunitario e Internazionale, Il Sole24h.
  - Directorate-General for Environment., 2014. The circular economy: connecting, creating and conserving value, KH-04-14-408-EN-C. Publications Office of the European Commission, ISBN 978-92-79-37810-2, doi: 10.2779/80121. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/80121>.
  - Direttiva 66/2006/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 6 settembre 2006 relativa a pile e accumulatori e ai rifiuti di pile e accumulatori e che abroga la direttiva 157/91/CEE.
  - Direttiva 1907/2006/CEE del Parlamento europeo e del Consiglio del 18 dicembre 2006 concernente la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche (REACH), che istituisce un'agenzia europea per le sostanze chimiche, che modifica la direttiva 45/1999/CEE e che abroga il regolamento (CEE) n. 93/793 del Consiglio e il regolamento (CE) n. 1488/94 della Commissione, nonché la direttiva 769/76/CEE del Consiglio e le direttive della Commissione 155/91/CEE, 67/93/CEE, 105/93/CEE e 21/2000/CEE.
  - Direttiva n. 1272/2008/CEE del Parlamento europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2008 relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele che modifica e abroga le direttive 548/67/CEE e 45/1999/CEE e che reca modifica al regolamento (ce) n. 1907/2006.
  - Direttiva 98/2008/CEE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea L. 312/3 del 22 novembre 2008.
  - Direttiva 19/2012/CEE del Parlamento europeo e del Consiglio del 4 luglio 2012 sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (raee).
  - Direttiva 821/2017/CEE del Parlamento europeo e del Consiglio del 17 maggio 2017 che stabilisce obblighi in materia di dovere di diligenza nella catena di approvvigionamento per gli importatori dell'Unione di stagno, tantalio e tungsteno, dei loro minerali, e di oro, originari di zone di conflitto o ad alto rischio – Gazzetta ufficiale Europea L. 130/1 del 19 maggio 2017.
  - Direttiva 2018/851/CEE del Parlamento europeo e del Consiglio del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 98/2008/CE relativa ai rifiuti. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea L. 150/109 del 14 giugno 2018.
  - Direttiva 1937/2019/CEE del Parlamento europeo e del Consiglio del 23 ottobre 2019 riguardante la protezione delle persone che segnalano violazioni del diritto dell'Unione 26.11.2019 Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea L. 305/17 del 26 novembre 2019.
  - Eurostat (2022). EU's circular material use rate slightly up in 2022. Eurostat <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20231114-2>.
  - Fabris C., Mazzi A. (2018). "End of Waste": Dopo lo stop ai criteri regionali caso per caso, lo stato intervenga in fretta. Rivista Giuridica dell'Ambiente Vol. 4, 689-706.
  - Fragali E. (2023). Tracciabilità filiera cartaria – progetto pilota Comieco. Ingegneria dell'Ambiente Vol. 10 n. 3/2023, 209-211.
  - Halleux V. (2023). New EU regulatory framework for batteries: Setting sustainability requirements, EPRS – Servizio Ricerca del Parlamento europeo, servizio di ricerca per i deputati, PE 747.922.
  - IEA (2021). How can the world get to net zero emissions by 2050? – Financial Times. International Energy Agency, <https://www.ft.com/content/f9a03568-1cb1-4218-a519-5fcb528d03a>.
  - JRC (2020). Study on the EU's list of Critical Raw Materials. Final report. Joint Research Center.
  - Larizza A. (2023). Auto elettrica. L'Italia che non ha paura del 2035, Ed. Il Sole 24 Ore.
  - Mazzella D., D'Alessandro P. (2022). Linee Guida SNPA (Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente) 41/2022. Linee Guida per l'applicazione della disciplina End-of-Waste di cui all'art. 184-ter, 3°co. del D.Lgs 152/2006. Delibera del Consiglio SNPA – seduta del 23.02.2022. Doc. n. 156/22. ISPRA, ISBN 978-88-448-1099-3.
  - Mazzi A. (2021). Rifiuti: riciclarli o evitarli? Risposte dagli studi di analisi del ciclo di vita. Ingegneria dell'Ambiente Vol. 8 n. 2/2021, 114-125.
  - Mazzi A., Zampiero C. (2019). Circular Economy VS End of Waste: Quando la mancanza di regole limita l'innovazione. Ingegneria dell'Ambiente Vol. 6 n. 2/2019, 114-122.
  - Operamolla A. (2017). Nanocarta di cellulosa: proprietà e prospettive, La Chimica e l'Industria online, anno I, n. 3, 16-21.
  - Picerno G., Bonori B., Del Curto B. (2020). Linee guida per l'ecodesign: come facilitare il riciclo degli imballaggi in carta e cartone. Ingegneria dell'Ambiente Vol. 7 n. 3/2020, 251-253.
  - Regolamento (CE) n. 333/2011 del Consiglio europeo del 31 marzo 2011 recante i criteri che determinano quando alcuni tipi di rottami metallici cessano di essere considerati rifiuti ai sensi della direttiva 2008/98/CEE. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea L. 94/2 del 8 aprile 2011.
  - Regolamento (CE) n. 1179/2012 della Commissione europea del 10 dicembre 2012 recante i criteri che determinano quando i rottami di vetro cessano di essere considerati rifiuti ai sensi della direttiva 2008/98/CEE. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea L. 337/31 del 11 dicembre 2012.
  - Regolamento (CE) n. 715/2013 della Commissione europea del 25 luglio 2013 recante i criteri che determinano quando i rottami di rame cessano di essere considerati rifiuti ai sensi della direttiva 2008/98/CEE. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea L. 201/14 del 26 luglio 2013.

# SINTESI DEL SEMINARIO DI STUDIO DI INGEGNERIA SANITARIA-AMBIENTALE “ESPERIENZE DI ECONOMIA CIRCOLARE APPLICATA AL TRATTAMENTO DEI RIFIUTI”

Carlo Collivignarelli<sup>1</sup>, Giorgio Bertanza<sup>1</sup>, Sabrina Sorlini<sup>1</sup>, Mentore Vaccari<sup>1</sup>,  
Alessandro Abbà<sup>1,\*</sup>, Claudio De Rose<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Università degli Studi di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica, Brescia.

<sup>2</sup>Istituto di Studi Europei “Alcide De Gasperi”, Roma.

## Sommario

Il termine “economia circolare” è ormai entrato nella nostra quotidianità. Sebbene il Recupero di Risorse sia applicato ormai da anni, specialmente dalle imprese, tale concetto rappresenta un approccio importante per garantire la sostenibilità di un ciclo produttivo. L'obiettivo del Seminario di studio di Ingegneria Sanitaria-Ambientale svoltosi a Brescia il 15 dicembre 2023 è stato quello di affrontare il tema della valorizzazione di risorse in alcuni settori industriali del trattamento rifiuti. Per ciascuno dei cinque ambiti presi in considerazione (fanghi di depurazione, costruzioni, metallurgia, rifiuti urbani, incenerimento dei rifiuti) è stato presentato un primo intervento (svolto da un esperto del mondo universitario) di illustrazione delle alternative di recupero dei residui, a cui ha fatto seguito un esempio concreto di economia circolare presentato dalle diverse imprese partecipanti.

**Parole chiave:** *economia circolare, recupero rifiuti, ricerca, industria, innovazione.*

## SUMMARY OF THE SEMINAR IN SANITARY-ENVIRONMENTAL ENGINEERING “EXPERIENCES OF CIRCULAR ECONOMY APPLIED TO WASTE TREATMENT”

### Abstract

The term “circular economy” is already commonplace in our daily lives. Although Resource Recovery has been used for many years, especially by the industry sector, this concept represents an important approach to ensure the sustainability of a production cycle. The aim of the Sanitary-Environmental Engineering seminar held in Brescia on 15 December 2023 was to address the issue of the valorization of resources in some industrial sectors of waste treatment. For each of the five fields taken into consideration (sewage sludge, construction, metallurgy, municipal waste, waste incineration), an initial

presentation was made (carried out by an expert from the University world) illustrating waste recovery alternatives. Then, a tangible example of circular economy was presented by the various participating companies.

**Keywords:** *circular economy, waste recovery, research, industry, innovation.*

L'evento si è aperto con i saluti da parte del Prof. Giulio Maternini, vicedirettore del Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica dell'Università di Brescia, e dell'Ing. Luca Giaccari, rappresentante dell'ordine degli Ingegneri di Brescia. La prima parte del Seminario è stata coordinata dalla Prof.ssa Maria Chiara Zanetti (Politecnico di Torino) e dal Prof. Marco Ragazzi (Università di Trento).

Il Prof. Carlo Collivignarelli (Università di Brescia) ha introdotto il tema del Seminario, citando alcuni esempi di valorizzazione delle risorse dai rifiuti risalenti già ai primi anni '80 ed evidenziando come la sinergia tra Università (in particolare le discipline ingegneristiche, vocate alla ricerca applicata) ed Impresa (in possesso di esperienze già consolidate) possa portare alla realizzazione della prima parte del programma di economia circolare (quello essenzialmente tecnico); ad esso deve poi far seguito la fase di implementazione economica e di riconoscimento politico.

Per quanto riguarda il tema dei *fanghi di depurazione*, l'Ing. Stefano Bellazzi (Università di Pavia) ha esposto le alternative per il recupero di tali residui ed ha presentato i primi risultati di una ricerca sull'utilizzo dei fanghi stessi per la produzione di biochar da utilizzare nel settore del trattamento delle acque. A seguire, la Dott.ssa Livia

\* Per contatti: via Branze 43, 25123, Brescia. Tel 030 3711303; Fax 030 3711312. E-mail [alessandro.abba@unibs.it](mailto:alessandro.abba@unibs.it)

Ricevuto il 4-1-2024; Accettazione 11-1-2024.

Molinari (Valli S.p.A.) ha presentato l'esperienza del recupero dei fanghi per la produzione di fertilizzante organico rinnovabile, evidenziando come tale pratica, di antiche origini, oggi venga condotta con tecniche moderne e con numerosi controlli lungo tutta la filiera (dall'impianto di depurazione sino all'applicazione sul campo) che garantiscono il risultato sul piano ambientale.

In merito al *settore delle costruzioni*, la Prof.ssa Sabrina Sorlini (Università di Brescia) ha sottolineato l'importanza del recupero dei rifiuti da costruzione e demolizione, sia per via delle notevoli quantità in gioco, sia per consentire la riduzione dei volumi delle discariche per il loro stoccaggio e delle cave deputate all'estrazione di materiali naturali. Sono stati presentati i risultati di alcune ricerche riguardanti la valutazione della conformità ambientale dei rifiuti da costruzione e demolizione e dei benefici ambientali ottenibili dalle operazioni di recupero. A seguire, il Prof. Giovanni Plizzari (Università di Brescia) ha presentato l'esperienza di utilizzo di tali rifiuti per il confezionamento di calcestruzzo: sebbene resista ancora una certa diffidenza verso tali residui, una corretta progettazione ed uno studio accurato del mix design consentono di ottenere calcestruzzo idoneo per essere impiegato nel settore delle costruzioni, ad esempio nelle pavimentazioni industriali.

Per quanto riguarda il *settore metallurgico*, la Dott.ssa Chiara Lanzini (Confindustria Brescia) ha presentato lo scenario attuale, descrivendo i quantitativi e le tipologie di residui che si originano dai processi metallurgici (scoria nera, scoria bianca e polveri), gli attuali recuperi e le prospettive future con le iniziative per decarbonizzare e ridurre i consumi di materie prime. Il Dott. Sergio Magri (Fonderia di Torbole S.r.l.) ha riportato l'esperienza della propria Azienda evidenziando che è possibile attuare un recupero sia dei materiali in ingresso (attualmente pari all'88%) sia dei rifiuti prodotti (nel 2022 pari al 92%). Ha inoltre accennato ad alcuni progetti in corso, finalizzati a migliorare ulteriormente i risultati in termini di economia circolare.

In merito al settore dei *rifiuti urbani* sono stati presentati dal Prof. Giorgio Bertanza (Università di Brescia) i risultati degli studi condotti dall'Università, in collaborazione con l'allora ASM Brescia (oggi A2A), evidenziando il complesso sistema integrato della gestione dei rifiuti urbani nel Comune di Brescia e la sua evoluzione nel corso degli anni. L'Ing. Paolo Avanzi (A2A S.p.A.) ha presentato l'esperienza di A2A sia per quanto riguarda il recupero di materia (con un focus su frazione organica, carta, vetro, plastica e terre di spazzamento), sia in merito al recupero di energia dalle frazioni da cui non è più conveniente recuperare materiali.

Da ultimo è stato affrontato il *settore dell'incenerimento dei rifiuti*, in particolare per ciò che riguarda la gestione dei residui prodotti. L'Ing. Alessandro Abbà (Università di Brescia) ha presentato le alternative di recupero

delle scorie e delle ceneri volanti derivanti dalla termovalorizzazione dei rifiuti. Dal recupero di risorse materiali da tali residui, costituiti da un 10% circa di metalli ferrosi e non ferrosi e dal 90% da frazioni inerti, è possibile ottenere una serie di benefici ambientali ed economici. Antonio Amato (RMB S.p.A.) ha presentato le attività di recupero attuate presso la propria Azienda con un focus sul quantitativo di CO<sub>2</sub> sequestrata dalle operazioni di maturazione controllata delle scorie. Ha inoltre riportato alcune concrete esperienze di utilizzo delle scorie recuperate e la metodologia di valutazione dell'ecotossicità prevista per la loro classificazione come End of Waste.

Il Seminario si è concluso con una discussione coordinata dal Prof. Mentore Vaccari (Università di Brescia) e dall'Ing. Sergio Padovani (ARPA Lombardia). Ai partecipanti (Giorgio Gallina – Regione Lombardia; Chiara Lanzini – Confindustria Brescia; Paolo Avanzi – A2A S.p.A.; Laura Cutaia – ENEA; Enrico Massardi – ANCE Brescia) è stato chiesto di evidenziare come si possono superare le criticità che molte volte limitano la piena applicazione dell'economia circolare. È emerso che sono necessari:

- *coraggio*, sia da parte delle associazioni di categoria che dagli imprenditori;
- *idoneo mercato* per le risorse recuperate;
- *certezza dei tempi* autorizzativi: le lungaggini burocratiche rappresentano una barriera;
- *pragmaticità*: l'eccessiva normazione nei minimi dettagli può essere controproducente;
- *innovazione e ricerca*: è necessario studiare continuamente il tema per affrontare nuove sfide;
- *produttività*: il settore dei rifiuti deve diventare sempre più un settore produttivo;
- *semplificazione* delle norme e dell'iter burocratico;
- *uniformità di applicazione delle norme*: la differente declinazione della normativa a livello territoriale può ostacolare l'economia circolare;
- *disponibilità di impianti* nelle vicinanze.

In conclusione, alla luce di quanto emerso nel corso del Seminario, il Prof. Claudio De Rose (Direttore dell'Istituto di Studi Europei "Alcide de Gasperi", Roma) evidenzia che, anche per il miglioramento delle operazioni di riduzione, riutilizzo e riciclo dei rifiuti, si nota oggi una chiara tendenza a incrementare le azioni volte a favorire l'economia circolare. Non bisogna però dimenticare il principio di utilità marginale, per il quale l'autorità deve legiferare con l'obiettivo di favorire un beneficio economico per l'impresa stessa.

## Ringraziamenti

Si ringraziano tutte le persone che hanno contribuito alla buona riuscita del Seminario di studio, nonché ai partecipanti, a distanza ed in presenza, per un totale di circa 300 persone.

## SONDE E APPARECCHIATURE DA CAMPO CID PER RILEVARE: COD, SST, TENSIOATTIVI, VOLUME E VELOCITÀ DI SEDIMENTAZIONE DEI FANGHI

Ing. Arcangelo Ventura<sup>1</sup>, Ing. Davide Ventura<sup>2</sup>, Ing. Carlo Ventura<sup>3</sup>

<sup>1</sup> A.D. CID

<sup>2</sup> Responsabile R&D

<sup>3</sup> Responsabile tecnico

Il CID Ing Ventura Srl opera nel settore della depurazione delle acque reflue da oltre 40 anni attraverso la progettazione e fornitura chiavi in mano di impianti di depurazione e i servizi di gestione degli impianti, grazie alle sonde e ai sistemi di telecontrollo di propria produzione. L'esperienza maturata nel campo della depurazione ha permesso di realizzare sistemi di rilevazione da campo CID, coperti da Brevetto Europeo, costituiti dalle sonde e apparecchiature per la rilevazione in continuo di diversi parametri: [ppm] COD, Solidi Sospesi, Tensioattivi, e il misuratore del Volume [cc/l] e Velocità di sedimentazione dei fanghi [m/h].

Nel presente articolo presentiamo più in dettaglio i nostri sistemi che sono particolarmente indicati nella gestione e nel telecontrollo degli impianti per la versatilità, robustezza e assenza di manutenzio-

ne, dovuta ai componenti utilizzati, alla struttura delle sonde in acciaio inox, e al sistema di pulizia pneumatica automatica particolarmente efficiente.

Le Sonde CID funzionano collegandole alle apparecchiature CID nei modelli Mini, che produciamo da oltre 20 anni e nel nuovo sistema **smartCID**.

### SONDA inoxCID mod. TE

Per rilevazione in continuo ogni 2 sec. nell'acqua tal quale della concentrazione dei Tensioattivi Totali nel range: 0,5- 70 ppm.

Il funzionamento prevede il collegamento alla apparecchiatura CID nei modelli Mini (prodotto da oltre 20 anni) e nel nuovo sistema smartCID.

### Principio di misurazione

La sonda CID mod. TE è indicata per rilevare i tensioattivi con potere schiumogeno che diminuiscono la tensione superficiale delle molecole, per cui si formano bolle piene d'aria cioè schiuma. La concentrazione di tensioattivi totali rilevata dalla sonda con la curva di default va da 0,5 a 8ppm. Per valori superiori è necessaria la verifica preliminare. La schiuma formata nel reattore passa nel vetrino di misurazione attraversato dall'infrarosso dell'unità analogica che ne trasmette il segnale al programma CID che lo elabora per fornire la concentrazione in ppm dei tensioattivi.

### SONDA inoxCID mod. CODout

È particolarmente indicata per il controllo dell'acqua depurata in uscita da impianti di depurazione con trattamento biologico.

La sonda immersa nell'acqua rileva in continuo i seguenti parametri: COD, SST (Solidi sospesi totali), BOD5.

Il funzionamento prevede il collegamento alla apparecchiatura CID nei modelli Mini (prodotto da oltre 20 anni) e nel nuovo sistema smartCID.



## Sistema smartCID



Sonda  
CODout



Apparecchiatura  
smartCID  
per Sonde CID



Sonda TE  
Tensioattivi



Misuratore fanghi  
Vf30

### Caratteristiche sistema smartCID

Il nuovo sistema smartCID, composto da apparecchiature e sonde, è stato ideato come sistema di controllo sviluppato sulla nuova piattaforma CID open-source che permette di integrare tecnologie eterogenee come sonde, sensori, dispositivi di automazione industriale, telecamere e il Web per la condivisione dei dati.

### Misuratore fanghi smartCID Vf30

*per rilevare in automatico  
la quantità di fango [cc/l]  
e la velocità di sedimentazione [m/h]*

#### Generalità

Nella gestione degli impianti di depurazione biologica uno dei parametri rilevato saltuariamente e manualmente dagli addetti alla gestione è il **Vf30** [cc/l] cioè la quantità di fango prelevato in ossidazione che sedimenta dopo 30min in cilindro o cono da 1lt. Il dato permette di stabilire quando inviare i fanghi di supero in eccesso nel processo depurativo e di indicarne la quantità più probabile da smaltire.

L'importanza del Vf30 oltre che processuale è economica poiché il trattamento e smaltimento dei fanghi di supero rappresenta mediamente il 35% dei costi gestionali dell'impianto.

A tale scopo il CID ING VENTURA SRL di Brescia ha messo a punto e brevettato la nuova apparecchiatura **smartCID Vf30** per la rilevazione automatica della quantità e velocità di sedimentazione dei fanghi basata su una complessa elaborazione delle immagini scattate dalla telecamera sul cilindro da 1.000cc, riempito con la miscela di fango che giunge in sedimentazione, eseguita sulla media di tre linee di pixel definite da 0cc a 1.000cc.

Il misuratore fanghi smartCID Vf30 è indicato sia nei processi biologici che chimico-fisici di flocculazione poiché i tempi per Vf, Vsed1, Vsed2 sono impostabili dall'utente nella tabella di configurazione.

È composto da due armadi in termoresina IP65 assemblati e provvisti dei componenti necessari. Alimentando a 220V si avvia automaticamente il ciclo composto dalle fasi: carico, intervalli Vsed1 e Vsed2 per

# Sonde da campo per rilevazione in continuo

Interfaccia SmartCID per l'invio automatico dei dati registrati e visualizzati su pc, smartphone e tablet.

## SONDA TENSIOATTIVI

Per la rilevazione automatica in continuo di ppm Tensioattivi



SONDA TENSIOATTIVI

## SONDA COD OUT

Per rilevazione automatica in continuo di:

ppm Solidi sospeso totali  
ppm BOD5, COD, Torbidità



SONDA COD OUT

## VF30 FANGHI

Misura automatica del volume dei fanghi [cc/1] e velocità di sedimentazione [m/h]

Brevetto 2021 n. 102021000028064

**NOVITA'**



VF30 FANGHI

dal 1979

 **CID**  
Ing. VENTURA srl

la velocità di sedimentazione [m/h], l'intervallo per determinare il Vf30 [cc/l], scarico. Al termine del ciclo i dati vengono visualizzati sul display e con gli allarmi salvati sulla memoria microSD e inviati sia sul **database** del server che su **Telegram** impostati dal cliente, per renderli disponibili su **pc, smartphone, tablet** in modo semplice e immediato.

L'immagine del fango sedimentato nel cilindro risulta importantissima poiché con i dati Vf30[cc/l] e Vsed [m/h] indica la qualità del fango (se ben sedimentato o rotto a zone) determinante nel caso di disfunzioni tipo bulking, permettendo di intervenire subito sui parametri di processo.

Aperto Telegram e cliccando sul gruppo impostato si visualizzano l'immagine del cilindro graduato col fango sedimentato, data e ora della rilevazione, i valori del volume di fango Vf30 [cc/l] e della velocità di sedimentazione [m/h], potendo inoltre scorrere lo storico delle immagini e dei dati rilevati. Telegram è stato scelto per smartCID perché grazie ai bot (programmi automatizzati che svolgono funzioni definite) permette di ricevere i dati e le immagini su qualsiasi dispositivo; è una delle app di messaggistica istantanea tra le più utilizzate al mondo grazie alla sua stabilità, sicurezza e facilità di utilizzo, è disponibile sia per iOS che per Android oltre ad avere una componente web molto utile che permette di utilizzarlo da desktop.



## Apparecchiatura CID mod. MINI

L'apparecchiatura CID mod. Mini, che produciamo da oltre 20 anni, permette il collegamento sia delle sonde inoxCID CODout e TE che qualsiasi altro sensore oltre alle macchine presenti nell'impianto, consentendone il telecontrollo completo. È composta da armadio in termoresina per posizionamento a parete completo di PC industriale con Lcd 10" TFT con funzione touch-screen, barra alimentazione, moduli I/O.

Le sonde sono collegate alla morsettiera con il cavo speciale CID.

Alimentando a 220V. e collegando le sonde e le macchine la MINI inizia subito la rilevazione in continuo ogni 2 sec. dei parametri, registrando ad intervalli di tempo prefissati a piacere il dato rappresentativo di ogni intervallo, e ad ogni ora lo stato macchine.

Il programma Depura web permette di rilevare in continuo i parametri e lo stato delle macchine collegate e permette il telecontrollo via rete Ethernet o protocollo ftp per internet. Via ftp invia al server i files di dati grafici ed allarmi registrati; tali dati saranno acquisiti ogni minuto automaticamente dai pc di sorveglianza abilitati dotati del programma Accentra web.

L'utente può impostare a piacere le soglie di allarme, scaricare i dati e i grafici in Excel o sfruttare le potenzialità del telecontrollo. ■



**CID Ing. Ventura Srl**  
 BRESCIA, Tel. 0303730699  
 E-mail: [info@venturacid.it](mailto:info@venturacid.it)  
 Web: [www.venturacid.it](http://www.venturacid.it)



# Waste Management Europe

**Trasformare i rifiuti in Risorsa**  
Innovare, Collaborare,  
Sostenere.

---

**9 - 11 Aprile 2024**  
Bergamo, Italia

Scopri un mondo di opportunità  
a WME 2024

[www.wme-expo.com](http://www.wme-expo.com)

Organized by **IES** Events



# Informazioni DALLE AZIENDE

## Coperture in lega di alluminio JSF ALUROOFS

Da oltre 25 anni la JSF ALUROOFS di Villadangos del Paramo – Leon (E) propone sul mercato mondiale coperture in lega di alluminio per depuratori oltre che per edifici civili con centinaia di referenze in tutto il mondo e migliaia di metri quadrati coperti.

L'alluminio ha preso sempre più piede nelle coperture di depuratori rispetto alla classica vetroresina grazie alle sue caratteristiche ed ai suoi indubbi vantaggi:

- L'alluminio non si degrada con la luce ultravioletta e non trasmette la luce perché ha una bassa emissività termica. Quindi zero radiazioni verso l'interno e zero calore dall'esterno verso l'interno.
- L'alluminio non fa scintille ed è quindi un materiale ideale ovunque ci siano pericoli di esplosione o di incendi.
- Le leghe di Al non richiedono manutenzione o alcun tipo di trattamento nel tempo (vernici, gel ecc.)
- Le coperture hanno un basso profilo con un minore volume di aria da trattare.
- La struttura delle coperture in Al garantisce una qualità uniforme nel tempo. Il processo di lavorazione delle coperture in alluminio non determina o provoca modifiche o danni alle sue caratteristiche strutturali; le leghe di alluminio sono fornite allo stabilimento di lavorazione con certificati che attestano le prove effettuate per garantire la loro robustezza strutturale.
- Le coperture piane in lega di Al sono estremamente versatili e possono essere modificate ed adattate alle più svariate situazioni di impiego senza alterare le loro caratteristiche strutturali e sono a tenuta stagna.
- Sono leggere e facilmente smontabili e amovibili dal personale che può avere necessità di intervenire all'interno delle vasche urgentemente. Botole, porte, valvole antidepressione, aperture

re, raccordi possono essere montati in ogni momento sui pannelli senza pregiudicare le caratteristiche strutturali e la sicurezza.

- Sono autoportanti e calpestabili con la massima sicurezza del personale
- La vetroresina ha problemi per la salute durante la lavorazione: formazione di micropolveri giudicate cancerogene negli USA.
- Al contrario della vetroresina l'alluminio è riciclabile all'infinito e la JSF Aluroofs garantisce per almeno 50 anni le proprie coperture.

Dopo le ultime perturbazioni che hanno devastato il centro-nord dell'Italia nell'estate 2023 facendo strage di coperture tradizionali in PRFV, l'utilizzo delle coperture JSF Aluroofs dà la massima garanzia di resistenza anche alle grandinate più estreme.

La JSF ALUROOFS produce una serie di coperture adatte a tutte le applicazioni:

- Aluplan: coperture piane lisce per co-

prire vasche di piccole dimensioni.

- Alugreca: coperture piane gregate per coprire vasche di grandi dimensioni con luce fino a 20 m o di dimensioni maggiori con l'impiego di travi portanti in lega di alluminio.
- Alusphere: coperture a cupola sferica applicabili anche per impieghi civili come coperture di palazzetti sportivi, centri commerciali, teatri ecc.
- Alucone: coperture coniche per serbatoi, digestori ecc.
- Architectural: rivestimenti in Alluminio per digestori o qualsiasi altra costruzione in lega di alluminio.

Fra le migliaia di referenze anche la copertura Alugreca della vasca di ossidazione 38 x 33 m del depuratore di Torreveja (Alicante) e la copertura Alusphere con  $\text{AE}$  53,45 m del centro commerciale di Rzesow (PL) inaugurato nella primavera del 2022.

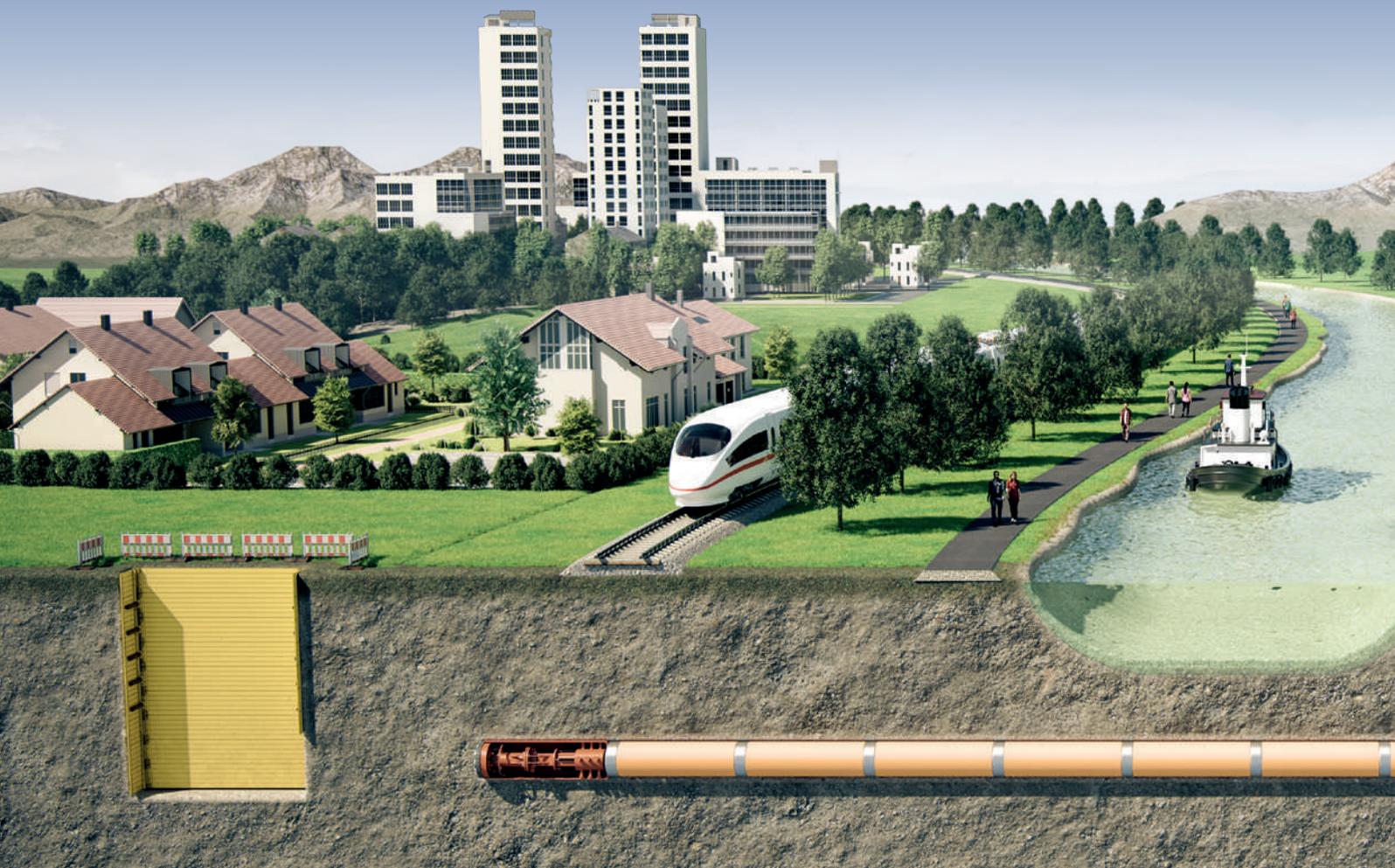
JSF ALUROOFS è commercializzata in Italia dalla Moreschini Rappresentanze snc, che da oltre 40 anni propone sul mercato italiano la più vasta gamma di macchinari di qualità per depuratori civili ed industriali, per potabilizzatori e per le energie rinnovabili. ■

**Moreschini Rappresentanze snc**  
www.moreschinisnc.it  
moreschini@moreschinisnc.it



# POSA SENZA SCAVO

NON SI NOTA, NON DISTURBA ED È ECOLOGICA



La posa in trincea chiusa offre numerosi vantaggi dal punto di vista economico, ambientale e sociale.

**Società del Gres S.p.A.**  
Via Martiri della libertà 22  
24010 Sorisole (BG) · Italia

T +39 035 199 110 55  
F +39 035 199 110 57

E [dac@gres.it](mailto:dac@gres.it)  
I [www.gres.it](http://www.gres.it)

Produciamo tubi, pozzetti, pezzi speciali e accessori di alta qualità e offriamo soluzioni di sistema – per un impiego sicuro, affidabile ed economico per le future generazioni.

Il nostro portafoglio di servizi è orientato alla gestione efficiente dei cantieri e soddisfa tutti i requisiti dei moderni sistemi di canalizzazione. L'utilizzo di materie prime naturali e l'impiego di tecnologie di processo innovative ci permettono di produrre materiali estremamente resistenti, la cui durata di vita supera i 150 anni, e che possono essere completamente riciclati.

**SOCIETÀ DEL GRES**  
**GRUPPO STEINZEUG-KERAMO**



## “Patto per l’Acqua” per la tutela della risorsa

Riduzione della frammentazione, introduzione di parametri di verifica gestionale, consolidamento industriale del settore e approccio integrato tra i diversi usi dell’acqua. Sono le quattro proposte di riforma del

comparto idrico intorno alle quali Utilitalia (la Federazione delle imprese idriche, ambientali ed energetiche) ha invitato le proprie associate di siglare un “Patto per l’Acqua”.

In occasione della Fiera Ecomondo di Rimini, Utilitalia ha presentato l’iniziativa al ministro dell’Ambiente e della sicurezza energetica Gil-

berto Pichetto Fratin. In un contesto di crisi aggravato dagli effetti dei cambiamenti climatici, le eccellenze dell’industria idrica italiana associate alla Federazione hanno deciso di fare squadra per mettere al servizio del Paese le proprie competenze e capacità industriali. Sono 43 le aziende ad aver già siglato il “Patto per l’Acqua”, un’iniziativa che punta a compiere ogni azione utile a sostegno di politiche nazionali di tutela ambientale e della risorsa, di resilienza delle reti e dei sistemi di approvvigionamento, per garantire ai cittadini universalità e qualità dei servizi offerti e gestioni all’altezza delle future sfide.

“Come Utilitalia – ha spiegato il presidente di Utilitalia, Filippo Brandolini – ci siamo fatti promotori di una proposta di riforma del settore in quattro punti, espressione degli stessi gestori che intendono elevare il livello degli investimenti e la qualità dei servizi offerti ai cittadini. Le nuove sfide poste dal cambiamento climatico, insieme alle norme europee che stabiliranno standard ambientali sempre più stringenti, impongono al comparto un cambio di passo: gli investimenti complessivi dovranno salire dagli attuali 4 miliardi fino a 6 miliardi annui”.

Attraverso le proposte di riforma avanzate da Utilitalia si punta a raggiungere l’obiettivo 100, arrivando a un centinaio di gestori di media/grande dimensione e a un livello di investimenti di 100 euro l’anno per abitante, in linea con le migliori esperienze europee. “Con il ‘Patto per l’Acqua’ – ha concluso Brandolini – le aziende che hanno operato e reso possibile la crescita del comparto in questi anni si impegnano a fare un passo avanti per garantire investimenti adeguati alle sfide del climate change e chiedono al Governo di accompagnare questo percorso, fondamentale affinché anche i territori senza gestore integrato possano crescere”. ■

### RIFORMA DEL SERVIZIO IDRICO: LE PROPOSTE DI UTILITALIA

1

#### Superare le gestioni in economia

Garantire l'immediato trasferimento alle Regioni dell'esercizio delle funzioni ed il mantenimento delle stesse per tutta la durata dell'affidamento a regime del Servizio Idrico Integrato, in tutti quei territori in cui la legge Galli prima, e il Testo Unico Ambientale dopo, non sono mai state attuate e persistono le gestioni in economia



2

#### Rafforzare le capacità gestionali

Utilizzare in tempi rapidi parametri oggettivi di capacità gestionale (ARERA) sulla base dei quali effettuare verifiche semestrali. Alla verificata incapacità gestionale dovrà seguire una delibera dell'EGATO che motivi la prosecuzione della concessione, oppure la sua revoca con contestuale affidamento a un nuovo gestore con adeguato « rating » di capacità



3

#### Favorire le aggregazioni

Favorire le aggregazioni tra aziende rafforzando gli attuali assetti anche prevedendo incentivi economici e/o le aggregazioni per riperimetrazioni, valutando l'efficienza di affidamenti per ambiti più ampi, non legati necessariamente a linee di demarcazione di carattere amministrativo e più aderenti alle esigenze operative



4

#### Sostenere un approccio integrato

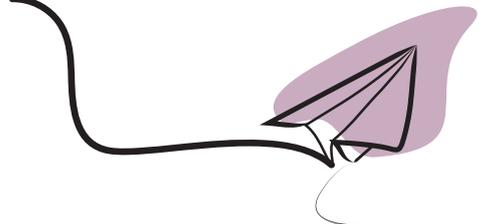
Prevedere, per favorire l'adattamento delle infrastrutture agli effetti dei cambiamenti climatici, un allargamento del perimetro di attività dei gestori che ricomprenda il campo delle infrastrutture per il riuso, la gestione sostenibile delle acque meteoriche, il recupero energetico e di materia, il drenaggio urbano e il governo di infrastrutture di livello distrettuale quali invasi ad uso plurimo e interconnessioni sovragionali



Utilitalia

stampa@utilitalia.it  
https://www.utilitalia.it/





hai carta

# BIANCA!

Se sulla carta  
hai qualcosa da  
raccontare, la Paper Week  
è il momento e il "posto"  
giusto per farlo,  
insieme a noi.

diventa un

# #PAPERWEEKER



**Comieco** – in collaborazione con la **Federazione Carta e Grafica** e **Unirima**  
e con il patrocinio di **ANCI** e **Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica** e **Utilitalia** –  
**dall'8 al 14 aprile 2024**, promuove la **4ª edizione della Paper Week**:  
una settimana di formazione, informazione e confronto per  
affrontare da più punti di vista il grande tema della qualità della raccolta differenziata  
di carta e cartone e presentare agli Italiani tutto il valore della filiera del riciclo.

### HAI UNA STORIA DA RACCONTARE?

**La Paper week è l'occasione per mettere le tue carte in tavola.**

Nella passata edizione sono state oltre 80 le iniziative collaterali che sono entrate a far parte del palinsesto! Stiamo lavorando all'agenda e se hai un'attività in linea con la Paper Week, ti invitiamo a candidarla utilizzando l'apposito modulo che trovi su [comieco.org](http://comieco.org).

**Hai tempo fino al 9 marzo 2024.**

## Impianto fotovoltaico di autoproduzione ibrido

È operativo il nuovo impianto fotovoltaico targato Grastim JV, specializzata nel settore della decarbonizzazione di complessi industriali, situato nello stabilimento di Kohler Engines a Reggio Emilia. L'inaugurazione della centrale fotovoltaica rappresenta la prima materializzazione di un ambizioso progetto ibrido e di autoproduzione nato dall'accordo siglato tra Grastim e Kohler Engines.

Il progetto prevede l'integrazione di un impianto fotovoltaico da 860,2 kW, installato sulla superficie di copertura dell'edificio SMUT (Blocco A), con una produzione attesa di 1148 MWh. Composto da 1870 pannelli da 460 W ciascuno, l'impianto è parte di un accordo più ampio che include anche una centrale di trigenerazione da 2 MW, attualmente in fase autorizzativa.

L'unione di questi due impianti avrà notevoli riflessi ambientali ed economici, prevedendo una significativa riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> fino a 1300 tonnellate all'anno, pari al 19,5% delle emissioni energetiche complessive del sito. Inoltre, si stima un risparmio dei costi energetici fino al 15%.

La centrale ibrida è predisposta per il futuro: la possibilità di estendere il fotovoltaico su aree di parcheggio e altri edifici fino a ulteriori 2 MW è già contemplata, mentre il modulo di cogenerazione sarà "hydrogen ready", in grado di essere alimentato da idrogeno fino al 20% nel fuel mix. L'idrogeno verde, prodotto in sito mediante elettrolisi in caso di eccesso di produzione fotovoltaica, potrà essere reinserito nel trigeneratore.

Grastim si impegna a sviluppare e integrare soluzioni tecnologiche all'avanguardia per multinazionali industriali impegnate nella decarbonizzazione delle proprie attività produttive. Entrata sul mercato come un player globale nel campo della cogenerazione, Grastim prosegue il suo impegno non solo nel solare e nell'idrogeno, ma anche in soluzioni innovative come la cattu-



**Figura 1.** Pannelli solari per l'impianto targato Grastim per lo stabilimento di Kohler Engines a Reggio Emilia.



**Figura 2.** Pannelli solari per l'impianto targato Grastim per lo stabilimento di Kohler Engines a Reggio Emilia.

ra della CO<sub>2</sub>, il biometano e il "waste to power".

Con questa operazione, Kohler Engines rafforza la sua strategia di focalizzarsi sempre di più sulla sostenibilità, investendo in diverse soluzioni tecnologiche avanzate sulla strada della transizione energetica. ■

**Grastim JV  
Kohler Engines**  
www.grastim.it.  
engines.kohlerenergy.com.  
kohlerenergy.com.



# TRATTA - CONCENTRA - RICICLA E VALORIZZA LE TUE ACQUE REFLUE

## IL FUTURO DELL'EVAPORAZIONE



LA TUA SOLUZIONE COMPLETA  
PER LO SCARICO ZERO



VALORIZZAZIONE DEI  
CASCAMI TERMICI



TRATTAMENTO DEI REFLUI INDUSTRIALI



**NEW**

EVAPORATORE A  
RICOMPRESIONE MECCANICA

VERSIONE IBRIDA

BASSO FABBISOGNO  
ENERGETICO

FINO AL **40%** DI SALI  
NEL CONCENTRATO

## TUTTE LE TECNOLOGIE DI EVAPORAZIONE E DI SCAMBIATORI DI CALORE



ECO DRY



ECO DPM



ECO DPM SE



ECO VR-HP



ECO VR-WW



ECO VS-HP

EVAPORATORI E CONCENTRATORI SOTTOVUOTO DAL 1984

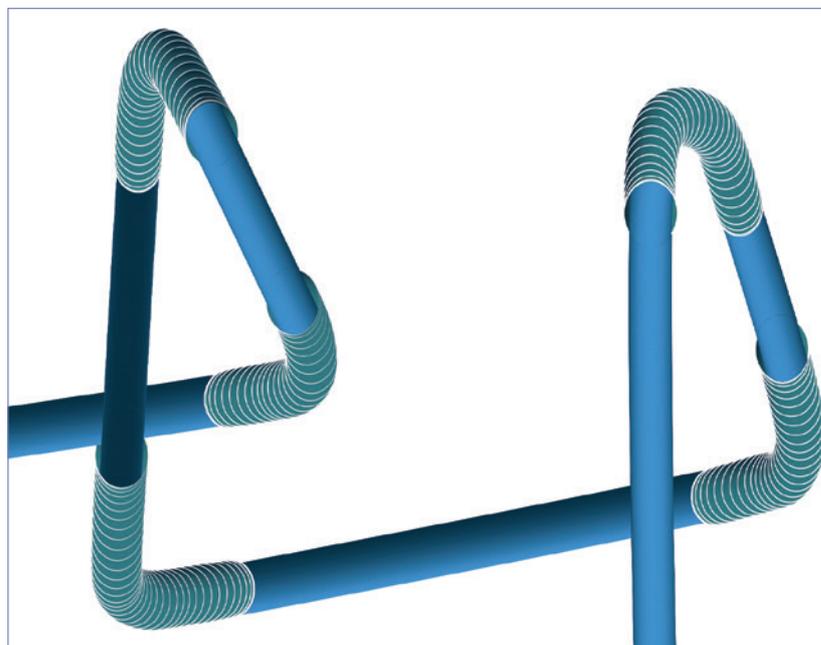
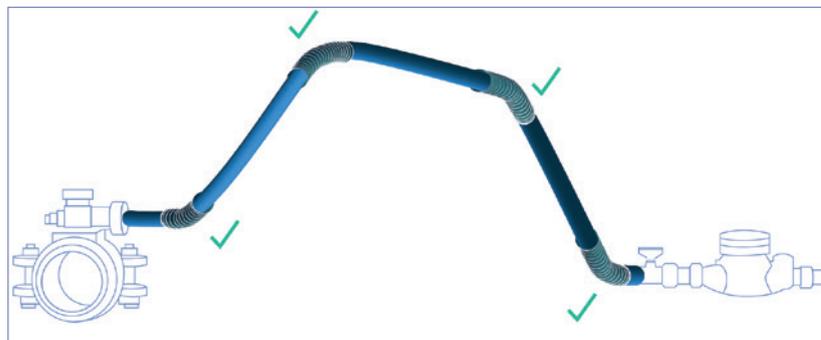
## HydraToZero, innovativo progetto di tubature sostenibili

CPC INOX, in collaborazione con Team Stainless, ha presentato alla fiera Accadueo di Bologna un sistema composto da tubi e raccordi completamente in acciaio inossidabile AISI 316L, caratterizzato da una lavorazione unica che conferisce al materiale delle corrugazioni in grado di rendere il condotto flessibile e curvabile, per adattarsi ad eventuali asperità e tortuosità della zona di posa e per permettere di assorbire movimenti tellurici di qualsiasi genere una volta in opera.

Questa particolare conformazione dei tubi in acciaio inossidabile consente di azzerare quasi interamente lo spreco idrico di strutture pubbliche e private, permettendo di risparmiare non solo in termini economici ma anche ambientali. L'acciaio inox AISI 316L scelto da CPC Inox si configura come il materiale ideale per le tubature di nuova generazione anche per le sue altre numerose qualità: è flessibile, resistente, igienico, facilmente riparabile, completamente riciclabile e altamente durevole, con una vita utile centenaria e un tasso di rottura trascurabile.

L'ispirazione di HydraToZero proviene dai sistemi di tubature adottati con successo in Giappone, Taiwan e Corea del Sud. Agli inizi del 1980, Tokyo è stata una delle prime città ad adottare sistematicamente un complesso idrico in acciaio inox, raggiungendo il totale rinnovo in circa vent'anni. Le perdite sono scese dal 15% al 3% circa, una percentuale ulteriormente migliorabile a fronte di alcune prese di utenza difficilmente sostituibili in proprietà private, e le rotture del sistema idrico sono drasticamente crollate: in presenza di oltre 2 milioni di prese d'utenza, si è passati da 90.000 rotture all'anno ad appena 9000.

La scommessa virtuosa proposta da questi paesi orientali, dove questo tipo di tubature in acciaio corrugato è regolarmente in produzione, è diventata un progetto a tutto tondo sul quale investire anche per CPC Inox. La media nazionale delle perdite d'acqua in Ita-



**Figura 3.** Tubi e raccordi completamente in acciaio inossidabile AISI 316L con corrugazioni in grado di rendere il condotto flessibile e curvabile

lia supera il 40% (fonte ISTAT), un dato altamente migliorabile anche alla luce dell'operato di altre nazioni europee come Danimarca e Olanda, dove le perdite sono inferiori al 10% e che dimostrano come il risparmio idrico sia possibile attraverso investimenti e innovazione. L'anzianità delle reti di distribuzione idrica italiana è il fattore determinante dello spreco idrico e delle frequenti rotture, in considerazione del fatto che il 60% dei sistemi di tubature ha più di 60 anni e un ulteriore 25% ne ha oltre 70.

All'anzianità della rete idrica italiana si aggiunge un tasso di rinnovo medio praticamente nullo, pari allo 0,5%, implicando un arco di rinnovo completo di oltre 200 anni. A perdite alte e un rinnovamento esiguo la soluzione può essere quella radicale di un sistema innovativo e comprovatamente efficace come quello in acciaio inossidabile.

La tecnologia HydraToZero è già stata sperimentata con successo con 12 prove di posa in Lombardia, Toscana, Marche. CPC Inox ha inoltre già ottenuto tramite gara d'appalto la copertura di 460 allacci Inox da parte di Vivaservizi, società che gestisce la rete idrica della provincia di Ancona.

Grazie al progetto HydraToZero, CPC Inox ha vinto, fra le aziende finaliste candidate, il premio Materials del premio BFW Innovation Award, riconoscimento nato dalla joint venture fra BolognaFiere e Mirumir destinato alle innovazioni di prodotto, processo e servizio sviluppate da aziende che operano nel mondo scientifico e delle utilities. ■

**CPC INOX**  
<https://www.cpcinox.com/>





**Figura 4.** L'Atlante Arena a City Life.

### Atlante inaugura la sua nuova stazione di ricarica rapida a CityLife

Atlante, la società del Gruppo ANHOA (NHOA.PA, già Engie EPS) dedicata alla rete di ricarica rapida e ultra-rapida per veicoli elettrici, dal 2023 mette a disposizione degli oltre 10 milioni di persone che ogni anno visitano quest'area, la prima stazione di ricarica rapida per veicoli elettrici aperta 24 ore su 24 di CityLife.

La stazione è dotata di 4 punti di ricarica rapida e si prevede un successivo allargamento fino a 12 nuovi punti di ricarica rapida e ultra-rapida, non appena ottenute le autorizzazioni amministrative necessarie. La stazione di ricarica sarà anche co-brandizzata con BMW e MINI e immediatamente localizzabile, sia tramite le principali applicazioni di servizi per la mobilità elettrica, che con le app dedicate ai clienti del BMW Group, con cui è possibile accedere alla tariffa flat Active. Il pagamento è facilissimo poiché, grazie anche alla partnership con Mastercard, sarà possibile ricaricare il proprio veicolo pagando anche tramite POS direttamente con carta di debito, credito o prepagata, offrendo così

maggiore semplicità di utilizzo e trasparenza dei prezzi.

La stazione di ricarica si inserisce in un più ampio progetto di collaborazione con CityLife. Atlante si occuperà infatti della realizzazione di un impianto fotovoltaico che ricoprirà il nuovo centro per il padel di CityLife, l'*Atlante Arena*, il modernissimo edificio pro-

gettato da Novembre Studio con grande attenzione ai temi dell'efficienza e sostenibilità. L'energia solare prodotta dall'impianto fotovoltaico alimenterà l'Atlante Arena con energia a zero emissioni e a chilometro zero e sarà il primo passo verso la creazione all'interno di CityLife di una vera e propria "comunità energetica", integrata con



**Figura 5.** Da sinistra: Stefano Terranova, CEO di Atlante; Gabriele Tuccillo, CEO di Atlante Italia; Giorgio Lazzaro, Direttore Commerciale City Life; Roberto Russo, AD di SmartCityLife.

sistemi di accumulo, volta a decarbonizzare l'intero complesso, includendo anche le stazioni di ricarica e le utenze adiacenti all'Arena.

Il progetto di CityLife nasce nel 2004 e rappresenta una delle aree di intervento urbanistico più importanti d'Europa, ai vertici mondiali per l'alta vivibilità e la qualità architettonica e ambientale. CityLife è un'area di oltre 360 mila metri quadri, di cui 178 mila di parco pubblico, che include residenze e spazi commerciali, oltre alle tre torri uffici progettate da Zaha Hadid, Arata Isozaki e Daniel Libeskind, ormai landmark riconoscibile per lo skyline milanese.

La stazione di ricarica, accessibile anche alle persone a ridotta mobilità, sarà a disposizione 24ore su 24 e 7 giorni su 7, fruibile da tutti i veicoli elettrici e compatibile con ogni standard di ricarica e provider di servizi per la mobilità elettrica. ■

**Atlante**  
www.atlante.energy



## Trasformare i rifiuti in risorsa – Innovare, Collaborare, Sostenere

**W**aste Management Europe (a Bergamo dal 9 all'11 aprile 2024) è un evento di riferimento nel panorama fieristico legato al tema dell'Economia Circolare che mette insieme decisori politici, organizzazioni globali e soluzioni innovative per affrontare le sfide della gestione dei rifiuti e guidare l'attuazione delle varie attività in tale ambito.

La prima edizione nel 2022 ha creato un luogo di incontro annuale di valore per l'Europa. La seconda edizione nel 2023 ha ospitato molti nomi di spicco che hanno condiviso soluzioni per ridurre la quantità di rifiuti, aumentare la percentuale di riciclo e realizzare una vera economia circolare, tra cui Amazon, IKEA, Deloitte, ENI, IBM per citarne alcune, oltre a rappresentanti delle istituzioni locali e internazionali. WME 2024 collegherà migliaia di professionisti uniti dal comune sforzo di garantire un pianeta adatto alle generazioni future.

L'evento, incentrato per questa terza edizione sul tema "Trasformare i rifiuti

in risorsa – Innovare, Collaborare, Sostenere", sarà ancora una volta allestito alla Fiera di Bergamo, in uno spazio espositivo e congressuale di oltre 4000 mq dove l'intera filiera dell'industria della gestione dei rifiuti e del riciclo dei materiali sarà ben rappresentata.

La conferenza internazionale si svolge nell'arco di tre giorni e offre completa copertura con relatori esperti, contributi e interventi su vari temi, tra cui il miglioramento della sostenibilità ambientale, affrontare il cambiamento climatico, i benefici economici legati all'economia circolare, l'approfondimento di leggi e regolamenti.

Ampio spazio verrà dedicato alle numerose presentazioni di tipo tecnico – scientifico nel "Teatro" allestito all'interno del padiglione espositivo, grazie al contributo di espositori innovativi e di importanti Università ed Enti di ricerca. ■

**WME Waste Management Europe**  
www.exhibition@wme-expo.com



Facile da installare, facile  
da gestire, facile da adattare  
Fino al 99% di inquinanti acidi  
abbattuti



# SOLVAir<sup>®</sup>

Il nostro lavoro? Aiutare centinaia di operatori a gestire a costi contenuti le loro emissioni nel rispetto di normative sempre più severe, aumentando l'efficienza energetica dei loro impianti e migliorando i risultati industriali.

Come ci riusciamo? Offrendo soluzioni personalizzate a base di sodio per abbattere i gas acidi (HCl, SO<sub>x</sub>, HF...) nei fumi di ogni tipo di attività industriale, in tutto il mondo.

CLEAN AIR SOLUTIONS FOR HIGHER PERFORMANCE.  
[solvairsolutions.com](http://solvairsolutions.com)



# INDEX

  
VOL. 10  
NUM. 4  
2023

## Editorial

Mitigating land consumption through remediation and recovery of brownfields – challenges and opportunities

*Carlo Collivignarelli, Maurizio Tira, Mentore Vaccari*

## Articles

The environmental and economic sustainability of sewage sludge treatment: evidence from the literature

*Stefano Puricelli, Andrea Franzoni, Marco Traversi, Mariasole Bannò, Roberto Canziani, Mario Grosso, Lucia Rigamonti*

Evaluation of a professional cleaning service in a civil context: microbiological and environmental comparative analysis between traditional and “green” methods

*Rosatelli Asia, Bruno Erika, Vogli Luciano, Bandera Beatrice, Buffone Cesare, Franzetti Andrea*

Review and analysis of the variables influencing ammonia emissions from livestock

*Anna Gilia Collalto, Alessandro Marongiu, Elisabetta Angelino*

## Technical-scientific communications

The future of water and the new European Directive: innovative technologies and energy saving

*Domiziano Ivan Basilico, Elisabetta Vacchelli*

Circular economy and local sustainability: opportunities and limits for italian small medium enterprises

*Chiara Fabris, Anna Mazzi*

Summary of the seminar in sanitary-environmental engineering “experiences of circular economy applied to waste treatment”

*Carlo Collivignarelli, Giorgio Bertanza, Sabrina Sorlini, Mentore Vaccari, Alessandro Abbà, Claudio De Rose*

Immagine  
in copertina  
di ShadOwfall  
da Pixabay

ISSN e e-ISSN 2420-8256

Ingegneria dell'Ambiente per il 2023 è sostenuta da:

