

# BIO-RECUPERO DI METALLI PESANTI E LORO VALORIZZAZIONE / HEAVY METAL BIO-RECOVERY AND VALORIZATION

Lucia Cavalca<sup>1\*</sup>, Alice Melzi<sup>1</sup>, Gabriele Aricci<sup>2</sup>, Michele Tost<sup>3</sup> -

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze per gli Alimenti, la Nutrizione e l'Ambiente (DeFENS), Università degli Studi di Milano, Via Celoria 2, I-20133, Milano, Italy;

<sup>2</sup> Galvanica Aricci S.r.l., Via Ciurlina 55, 24050 Ghisalba Bergamo, Italy;

<sup>3</sup> SPIN S.r.l., Via San Piero di Sotto, 14a San Casciano Val di Pesa (FI), Italy

\*Correspondence to: lucia.cavalca@unimi.it

## INTRODUZIONE

L'esposizione a metalli pesanti può avere effetti cronici sulla salute umana e sull'equilibrio ecologico (Chakraborty et al., 2017). Attualmente, l'inquinamento da metalli pesanti suscita intensa preoccupazione a causa delle grandi quantità di metalli pesanti rilasciati nell'ambiente da attività antropogeniche (Kielak et al., 2017). Se smaltite in modo improprio, le acque reflue industriali causano un grave inquinamento dell'acqua e del suolo (Figura 1). Va sottolineato che, a differenza dei contaminanti organici, i metalli pesanti non sono biodegradabili e si accumulano negli organismi viventi, causando effetti tossici, cancerogeni, mutageni e teratogeni.

Al fine di prevenire l'introduzione di metalli pesanti in ambiente, le normative europee e nazionali impongono efficaci trattamenti

## INTRODUCTION

Exposure to heavy metals can have chronic effects on human health and disturbs ecological balance (Chakraborty et al., 2017). Currently, heavy metal pollution has arisen intense concern due to the large amount of heavy metals released into the environment by anthropogenic activities (Kielak et al., 2017). If disposed improperly, industrial wastewaters cause severe pollution of water and soil (Figure 1). It has to be stressed that, unlike organic contaminants, heavy metals are not biodegradable and accumulate in living organisms, causing general toxic, carcinogenic, mutagenic and teratogenic effects.

For preventing the introduction of heavy metals in the environment, European and national regulations impose

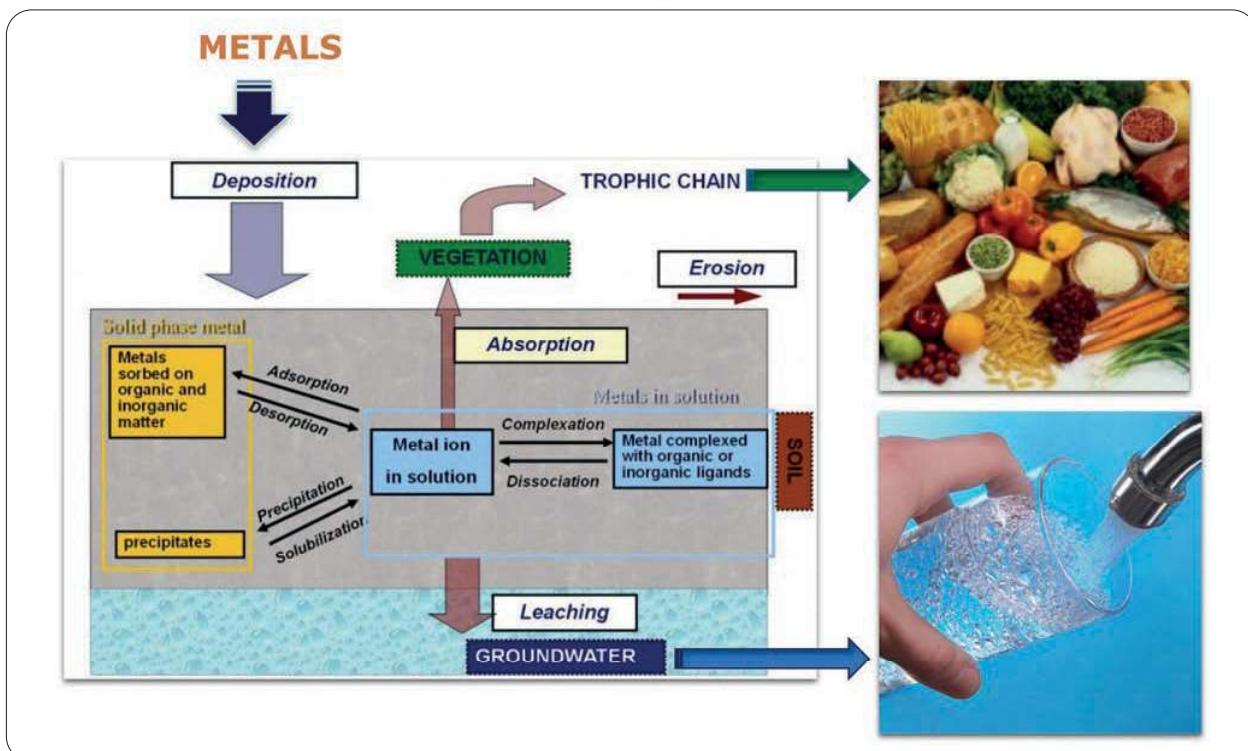


Fig. 1 - Processi di accumulo e rilascio di metalli pesanti nei suoli e nelle acque. I metalli pesanti non si degradano ma si accumulano nelle cellule degli organismi viventi (bio-accumulo) lungo la catena trofica arrivando a contaminare alimenti ed acque / Processes of accumulation and release of heavy metals in soil and water. Heavy metals do not degrade but accumulate in the cells of living organisms (bio-accumulation) along the trophic chain, contaminating food and water

delle acque reflue con lo scopo di ridurre al minimo la concentrazione di metalli pesanti in soluzione. Inoltre, per inserirsi in un contesto di Economia Circolare, i metalli pesanti rimossi dalle acque reflue dovrebbero essere riutilizzati come materia prima nei processi galvanici o per ottenere sottoprodoti industriali di alto valore (Micheletti et al., 2008; Colica et al. 2010).

Una delle sfide che i processi industriali si pongono è il raggiungimento di una bassa impronta idrica insieme alla conversione dei rifiuti in nuovi prodotti al fine di creare opportunità innovative per i settori industriali nell'ottica di una economia circolare. A livello europeo è stato compiuto lo sforzo di attuazione della strategia UE 2020 e, in particolare, la *Impact Assessment Road Map* del 2014 è strettamente correlata all'obiettivo chiave della direttiva quadro sulle acque (2000/60/CE) e della sua quarta attuazione WDF COM (2015)0210 che è il raggiungimento di un buono stato di salute tutti i corpi idrici in Europa.

Il settore galvanico italiano è uno dei settori produttivi più rilevanti e comprende aziende di medie e piccole dimensioni. I contaminanti tipici delle acque reflue galvaniche rientrano in quattro categorie:

1. metalli quali Cu (30-100 mg/L), Ni, Zn e Cd (200-800 mg/L) e Cr (100-120.000 mg/L);
2. anioni, che includono cloruri, fluoruri, borati, nitriti e nitrati, fosfati e sulfati;
3. cianuri;
4. composti organici, tra cui tensioattivi, oli, grassi e solventi.

In questo contesto, l'individuazione della composizione tipica degli effluenti dell'industria galvanica svolge un ruolo fondamentale nella scelta della tecnica più idonea per il trattamento dei rifiuti. In tale settore, uno degli aspetti più problematici risulta la rimozione di Cu, Ni e Cr dalle acque reflue. I metodi fisico-chimici utilizzati per separare i metalli pesanti dagli effluenti sono caratterizzati da elevati costi economici ed ambientali. I trattamenti fisico-chimici normalmente applicati consistono nella precipitazione di metalli come ossidi recuperati come liquami e disidratati mediante filtropressa, ed evaporazione: processi che comportano costi elevati per l'acquisto di prodotti chimici, la manutenzione degli impianti, lo smaltimento dei fanghi contaminati e il consumo di grandi quantità di acqua ed energia. I sottoprodoti vengono poi trasportati su strada ad aziende specializzate dove i metalli vengono recuperati con processi chimici ed elettrochimici.

Per la rimozione dei metalli pesanti dalle acque reflue galvaniche riscontrano sempre più interesse biotecnologie innovative ed ecocompatibili basate sullo sfruttamento del bio-adsorbimento e/o della biotrasformazione da parte di batteri. La capacità cellulare di adsorbire metalli pesanti o convertirne la valenza si basa sulla presenza di sostanze polimeriche extracellulari (EPS) e su reazioni enzimatiche (Figura 2).

I meccanismi coinvolti nei processi di bio-adsorbimento sono: l'adsorbimento, cioè l'adesione di una sostanza solida, gassosa, liquida o condensata a una superficie (l'adsorbente) (Qin, et al., 2020), scambio ionico, in cui uno ione presente all'interfaccia di un adsorbente solido con la fase liquida o gassosa circostante è scambiato con un altro ione di carica simile (Sutherland et al., 2010), complessazione, vale a dire la combinazione di singoli gruppi atomici, ioni o molecole in uno ione o molecola più grande (Teng et al., 2019), o diffusione e trasporto di sostanze attraverso la membrana cellulare verso l'interno della cellula (Sag et al., 2001). Più di uno di questi meccanismi può coesistere nel bioadsorbimento di Ni e Cu; la chimica di superficie del bio-

effective wastewater treatments in order to minimize their concentration in solution. Moreover, to implement the Circular Economy concept, heavy metals removed from wastewaters should be reused as raw materials in successive processes or for obtaining high value industrial byproducts (Micheletti et al., 2008; Colica et al. 2010).

The low water foot-print of industrial processes has become a challenge together with the conversion of wastes into new products that create innovative opportunities for industrial sectors with a circular economy strategy. At European level, implementation effort of the EU's 2020 Strategy has been performed and, in particular, the 2014 Impact Assessment Road Map is closely related to the key objective of the Water Framework Directive (2000/60/EC) and its 4th WDF implementation COM (2015)0210 which is the achievement of good status of all water bodies in Europe.

The Italian electroplating sector is one of the most relevant and it comprises medium- and small-size companies. Typical contaminants of electroplating wastewaters fall into four categories:

1. metals like Cu (30-100 mg/L), Ni, Zn and Cd (200-800 mg/L) and Cr (100-120.000 mg/L);
2. anions, which include chlorides, fluorides, borates, nitrites and nitrates, phosphates and sulfates;
3. cyanides;
4. organic compounds, which include surfactants, oils, fats and solvents.

The identification of the typical composition of the effluents from galvanic industry plays a fundamental role in choosing the most suitable waste treatment technique.

One of the most problematic issues is the removal of Cu, Ni and Cr from wastewaters. Physical-chemical methods are used to separate heavy metals from effluents and are characterized by high economic and environmental costs. The physical-chemical treatments usually applied consist in the precipitation of metals as oxides recovered as sludges and dewatered by filter press and evaporation: processes that imply high costs for the purchase of chemical products, the maintenance of plants, the disposal of contaminated sludge and the consumption of large quantities of water and energy. The byproducts are then road transported to specialized factories where metals are recovered using chemical and electrochemical processes.

To remove heavy metals from electroplating wastewaters the interest in innovative and eco-friendly biotechnology has been expanding, based on the exploitation of microbial biosorption and/or biotransformation. The cellular ability to adsorb heavy metals and convert their valence is based on the presence of extracellular polymeric substances (EPS) and on active enzymatic reactions (Figure 2).

The mechanisms involved in biosorption processes are: adsorption, i.e., the adhesion of a gaseous, liquid, or condensed solid substance to a surface (the adsorbent) (Qin, et al., 2020), ion exchange, where an ion present at the interface of a solid adsorbent with the surrounding gaseous or liquid phase is exchanged with another ion of similar charge (Sutherland et al., 2010), complexation, namely the combination of single atom groups, ions or molecules into one larger ion or molecule (Teng et al., 2019), or diffusion

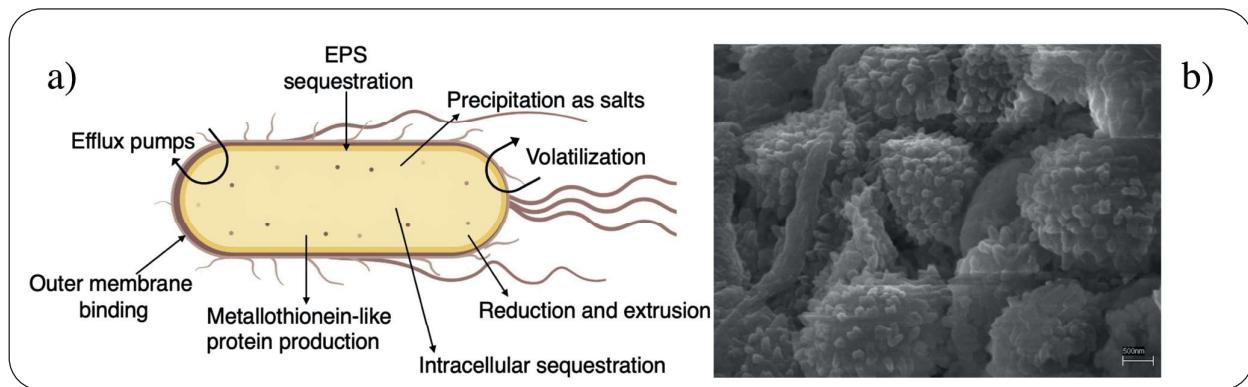


Fig. 2 - Meccanismi di resistenza batterica ai metalli pesanti: bio-adsorbimento e reazioni enzimatiche (a). Immagine al SEM di cellule batteriche con metalli adsorbiti sugli strati esterni (Zecchin et al., 2019) (b) / Mechanisms of bacterial resistance to heavy metals: bio-adsorption and active enzymatic reactions (a). SEM image of bacterial cells with adsorbed metals on outer layers (Zecchin et al., 2019) (b)

adsorbente svolge un ruolo prevalente ed è quindi molto studiata (Gadd et al., 2009). I gruppi funzionali contenenti S, N, O e P sono direttamente impegnati nel legame dei metalli (Wang et al., 2009). I ceppi che presentano una produttività elevata di EPS sono generalmente riconosciuti come bio-adsorbenti potenzialmente efficaci. Inoltre, anche le caratteristiche del metallo (vale a dire elettronegatività e raggio ionico) influenzano il processo di adsorbimento (De Philippis et al., 2009). Generalmente più la struttura del microrganismo è complessa, maggiore sarà la possibilità che la cellula catturi il metallo (Zanetti et al., 2022). I batteri possono resistere alla tossicità del Cr utilizzando sia processi di adsorbimento sia di riduzione enzimatica del Cr esavalente al meno tossico Cr trivalente, quest'ultima mediata da reduttasi specifiche del Cr(VI) e/o da sistemi aspecifici per la diminuzione dei ROS (Diaconu, et al., 2020).

### IL PROGETTO HEAVY METAL BIO-RECOVERY AND VALORIZATION -HMBV

Sulla base dei suddetti presupposti e in linea con i concetti di Economia Circolare, Fondazione CARIPLO ha finanziato il progetto **Heavy Metal Bio-recovery and Valorization -HMBV-** (<https://sites.unimi.it/hmbv/>), che sviluppa una biotecnologia innovativa ed ecologica basata sullo sfruttamento del bio-adsorbimento e delle reazioni enzimatiche dei batteri per la rimozione dei metalli pesanti dalle acque reflue galvaniche. L'iniziativa studia la capacità di cellule batteriche non geneticamente modificate di adsorbire Ni e Cu sugli strati cellulari esterni degli EPS (Zanetti et al., 2022) al fine di convertire la biomassa legante i metalli in sali metallici di alto valore e complessi metallo-organici con capacità catalitiche (Gandolfi et al., 2022). Inoltre, studia la riduzione della tossicità del Cr esavalente mediante reazioni enzimatiche (Melzi et al., 2024).

Sono stati condotti test su due ceppi di *Serratia plymuthica* per la rimozione specifica di Ni(II) e Cu(II) da soluzioni sintetiche. In un sistema cellulare planctonico sono stati valutati gli effetti di:

1. tempo di contatto,
2. concentrazione iniziale di metallo, e
3. dose di biomassa.

Il ceppo *S. plymuthica* SC3(2) era in grado di rimuovere l'89,4% di Ni(II) da una soluzione di 50 mg/L e mostrava una capacità

and transport of substances across cell membrane towards the inside of the cell (Sag et al., 2001). More than one of these mechanisms can coexist in Ni and Cu biosorption; however, the surface chemistry of the biosorbent plays a prevalent role and is therefore widely studied to characterize a biosorbent (Gadd et al., 2009). The functional groups containing S, N, O, and P are directly engaged in the binding of metals (Wang et al., 2009). Strains displaying high EPS productivity are generally recognized as potentially effective biosorbents. Metal characteristics (namely electronegativity and ionic radius) were demonstrated to influence the adsorption process (De Philippis et al., 2009). Generally, the more complex the structure of the microorganism, the higher the chance that the cell will capture the metal (Zanetti et al., 2022). Bacteria can stand Cr toxicity using both by adsorption processes, and enzymatic reduction of Cr(VI) to the less toxic Cr(III) mediated by Cr(VI)-specific reductases and/or by aspecific ROS-scavenging systems (Diaconu, et al., 2020).

### THE HEAVY METAL BIO-RECOVERY AND VALORIZATION -HMBV- PROJECT

Based on the above assumptions and in line with Circular Economy concepts, Fondazione CARIPLO funded the project **Heavy Metal Bio-recovery and Valorization -HMBV-** (<https://sites.unimi.it/hmbv/>), which develops an innovative biotechnology based on bio-sorption and enzymatic reactions for heavy metal removal from electroplating wastewaters. The initiative studies the capability of non-genetically modified bacterial strains to bind Ni and Cu onto EPS (Zanetti et al., 2022) to obtain pure metal salts and organometallic complexes with biocatalytic activities (Gandolfi et al., 2022). Furthermore, it studies the reduction of the toxicity of hexavalent Cr through enzymatic reactions (Melzi et al., 2024).

Tests have been conducted on two best-performing *Serratia plymuthica* strains for specific Ni(II) and Cu(II) removal from synthetic solutions. In a planktonic cell systems were evaluated the effects of:

1. contact time,
2. initial metal concentration, and
3. biomass dose.



Fig. 3 - Visita del gruppo di ricerca di HMBV all'azienda galvanica Aricci / Visit of the HMBV research team to Galvanica Aricci

massima di bio-adsorbimento di 33,5 mg/g. Il secondo ceppo di *S. plymuthica* As3-5a(5) era in grado di rimuovere fino al 91,5% di Cu(II) da una soluzione di 200 mg/L, mostrando una capacità massima di bio-adsorbimento di 80,5 mg/g. Gli equilibri di adsorbimento di entrambi i metalli venivano raggiunti entro 30 minuti, avvenendo la maggior parte del processo nei primi 2-4 minuti (Zanetti et al., 2022).

### L'APPLICAZIONE ALLE ACQUE REFLUE DELLA GALVANICA ARICCI

Il trattamento delle acque reflue contenenti Ni e Cu ottenute dai processi industriali dell'azienda **GALVANICA ARICCI S.r.l.** (Figura 3) che partecipa al progetto, darà la possibilità di recuperare questi metalli come sali da riutilizzare nei processi galvanici e/o valorizzare il complesso cellula-metallo come biocatalizzatore. Il sistema potrebbe consistere in un bioreattore in cui l'acqua contaminata da metalli viene mescolata con i batteri precedentemente selezionati per la loro capacità di adsorbire Ni e Cu. Nel bioreattore, i metalli sono adsorbiti su superfici cellulari e/o da EPS e successivamente recuperati.

Il processo, nell'ambito di una strategia di Economia Circolare, mira a trasformare gli effluenti ad alto impatto inquinante in rilevanti opportunità economiche per le industrie galvaniche mediante lo sfruttamento dei composti organici metallici come biocatalizzatori ibridi per la sintesi di intermedi farmaceutici o come sali ad alto valore commerciale e consentendo al contempo il riutilizzo delle acque reflue depurate nel ciclo produttivo (Figura 4).

Le industrie coinvolte nella progettazione e costruzione di impianti galvanici (come, ad esempio, Ilmar S.r.l. coinvolta nel progetto), amplieranno e diversificheranno la propria offerta sul mercato passando dai soli impianti di trattamento che utilizzano sostanze chimiche a quelli che utilizzano cellule batteriche. L'industria galvanica beneficerà della proposta di ricerca grazie alla semplificazione del processo di trattamento delle acque reflue e i rifiuti acquisiranno valore in un ciclo virtuale producendo nuovi prodotti ad alto valore di mercato. Inoltre, in futuro, la tecnologia proposta nel presente progetto per il Ni e Cu potrebbe essere proposta per altri metalli, come i metalli preziosi e Cr esavalente.

### L'IMPATTO DEL PROGETTO

Gli impatti economici sono legati alla riduzione dei costi per il recupero e la trasformazione dei metalli, delle sostanze chimiche e

*S. plymuthica* strain SC3l(2) was able to remove 89.4% of Ni(II) from a 50 mg/L solution, and showed maximum biosorption capacity of 33.5 mg/g. A different *S. plymuthica* strain As3-5a(5) removed up to 91.5% of Cu(II) from a 200 mg/L solution, yielding maximum biosorption capacity of 80.5 mg/g. Adsorption equilibria of both metals were reached within 30 min, most of the process occurring in the first 2–4 min (Zanetti et al., 2022).

### THE APPLICATION TO THE WASTEWATERS OF THE GALVANICA ARICCI COMPANY

The treatment of wastewaters containing Ni and Cu and obtained from the electroplating industry **GALVANICA ARICCI S.r.l.** (Figure 3) that participates to the project, will give the opportunity to recover these metals as salts to be reused in the electroplating processes and/or to valorize the cell-metal complex as biocatalyst. The system might consist of a bioreactor in which metal-contaminated water is mixed with the bacteria previously selected for their ability to adsorb Ni and Cu. In the bioreactor, metals are adsorbed onto cell surfaces and/or by EPS and successively recovered.

The process, in the contest of a Circular Economy strategy, wants to transform effluents with high pollution impact into relevant economic opportunities for electroplating industries by the exploitation of the metallic organic compounds as hybrid biocatalysts for the synthesis of valuable pharmaceutical intermediates or as high commercial value salts and by the reuse of the cleaned wastewater in the production cycle (Figure 4).

Industry involved in the design and construction of electroplating plants (i.e. Ilmar S.r.l. involved in the project), will expand, and diversify their offer on the market by moving from only treatment plants that use chemical substances to those that use bacterial cells. Galvanic industry will benefit of the research proposal thanks to simplification of the wastewater treatment process, and wastes will gain value in a virtual cycle becoming new products with high market value. Moreover, in the future, the technology proposed for Ni and Cu in the present project might be proposed for other metals, like precious metals and hexavalent Cr.

### THE PROJECT IMPACT

Economic impacts are related to cost reduction for metal recovery and transformation, chemicals, and sewage

dei trattamenti delle acque reflue, e alla produzione di biocatalizzatori e sali metallici. Il costo del trattamento di 1 mc di acqua da industrie galvaniche è pari a 0.5 euro e il costo di 1 mc di acqua pulita è pari a 1 euro. Se si considera una media industria che produce 20 mc di acque reflue all'ora e che lavora in due turni, il costo totale annuo è pari a 100.000 euro. Gli impatti economici del presente progetto sono: i) ridurre i costi annuali del 40-50% eliminando i prodotti chimici utilizzati (10-12.000 euro) e i trattamenti delle acque reflue (18-20.000 euro), e riciclando almeno il 20% dell'acqua (15.000 euro); ii) produrre biocatalizzatori e sali metallici con un valore di mercato minimo di 100 euro/kg e 2-5 euro/kg, rispettivamente. A titolo di esempio, in Regione Lombardia vi sono 1.400 micro e piccole imprese, con oltre 11.000 dipendenti, che utilizzano processi di elettrodepositazione di Ni e Cu su manufatti di varia natura, ciascuna dotata di un impianto di trattamento acque (Spin S.r.l., Relazione di consulenza interna, 2015).

I risultati del progetto HMBV avranno un impatto significativo a livello regionale, nazionale e internazionale dato che le leggi ambientali impongono un basso impatto dei processi di trattamento dei rifiuti. In particolare, i risultati del progetto sono di interesse per Regione Lombardia, dove si concentra il maggior numero di imprese manifatturiere galvaniche in Italia. Il presente progetto si sviluppa anche nell'ambito del programma di lavoro di Regione Lombardia nell'area specializzata di "Eco-industria, Ambiente ed Energia" e relativo a "Gestione, Monitoraggio e Trattamento delle acque urbane e industriali".

L'eventuale scale-up dell'approccio biotecnologico studiato nel progetto HMBV dipenderà dai risultati scientifici e dalle valutazioni economiche e ambientali che scaturiranno dall'analisi di Life Cycle Assessment (LCA).

treatments and to the production of biocatalysts and metal salts. The treatment cost of 1 mc water from electroplating industries is equal to 0.5 euros and the cost of 1 mc clean water is equal to 1 euro. If considering a medium sized industry that produces 20 mc wastewaters per hour and working in two rounds, the yearly total costs is equal to 100,000 euro.

The economic impacts of the present project are: i) to reduce the annual costs of the 40-50% by eliminating the chemical products used (10-12,000 euros) and the sewage treatments (18-20,000 euros), and recirculating at least the 20% of water (15,000 euros); ii) to produce biocatalysts and metal salts with a minimum market value of 100 euros/kg and 2- 5 euros/kg, respectively. As an example, in Lombardy Region there are 1,400 micro and small enterprises, with more than 11,000 employees, that perform Cu and Ni electroplates, each possessing a galvanic water treatment plant (Spin Services, Internal consultancy report, 2015).

The HMBV project results are expected to have a significant impact at regional, national and international scale where environmental laws impose low impact of waste treatment processes. In particular, the outcomes of the project are of interest for Lombardy Region, where the largest number of electroplating manufacturing enterprises in Italy is concentrated. The project is also in the frame of the work program of Lombardy Region in the specialized area of "Eco-industry, Environment and Energy" and related to "Managing, Monitoring and Treatment of urban and industrial waters".

The future possible scale-up of the biotechnological approach studied in the HMBV project will depend on scientific results and economic and environmental assessments that will arise from the Life Cycle Assessment (LCA) analysis.

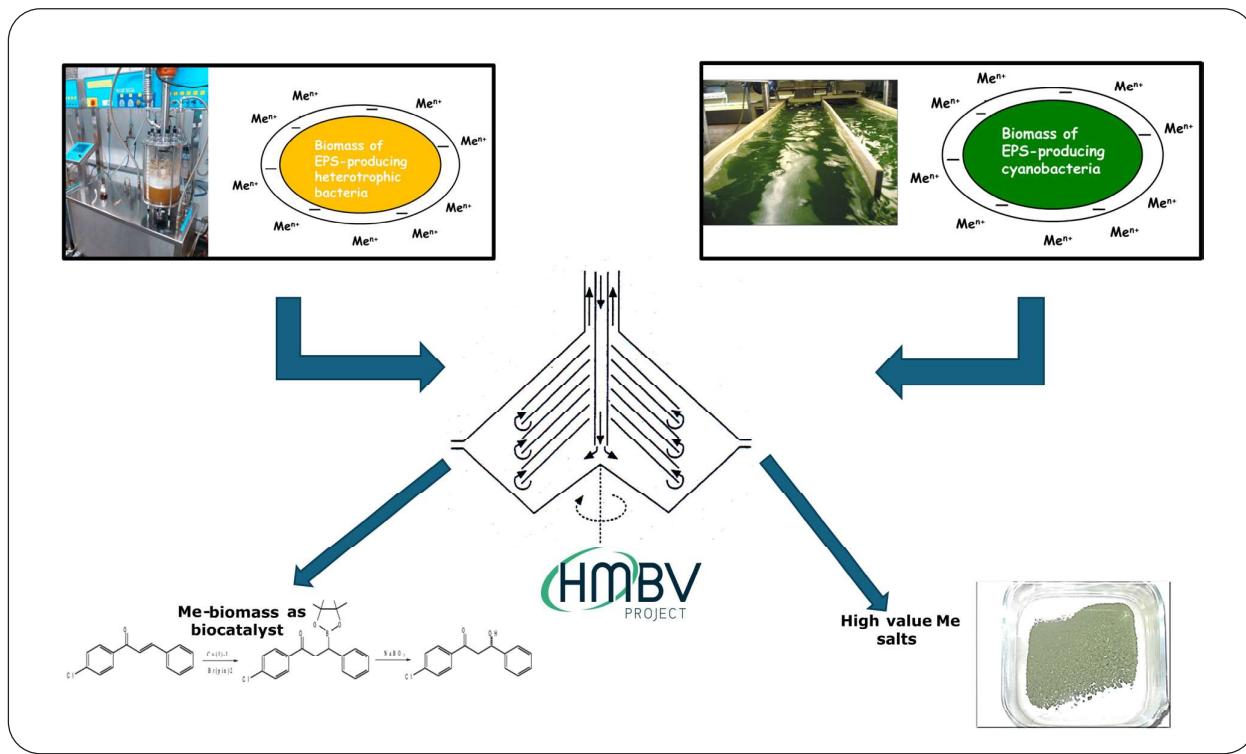


Fig. 4 - Bio-adsorbimento di metalli pesanti da parte di batteri eterotrofici e cianobatteri e recupero di biomassa metallica e sali metallici di alto valore / Heavy metals biosorption by heterotrophic- and ciano-bacteria and recovery of metal-biomass and high value metal salts

Pertanto risulta importante ai fini del progetto conoscere tramite un questionario la posizione delle aziende relativamente alla possibile adozione di un sistema di trattamento biologico delle acque reflue.

Se desideri essere parte di questi cambiamenti e vuoi partecipare al nostro sondaggio, compila il seguente questionario: <https://forms.gle/E39Ct4ruML1LDa2W8>.

#### Ringraziamenti

La ricerca è sostenuta da Fondazione CARIPLO-Circular Economy 2020 progetto 1069-2020 "Biorecupero e valorizzazione dei metalli pesanti-HMBV" <https://sites.unimi.it/hmbv/>. Gli autori ringraziano per il contributo il progetto PSR 2021 Linea 6 1H\_HUB. A. Melzi è titolare di una borsa di dottorato di ricerca presso l'Università degli Studi di Milano - Dottorato in Sistemi Alimentari.

#### Riferimenti / References

- Chakraborty, J., Dash, H. R., & Das, S. (2017). Metals and Their Toxic Effects An Introduction to Noxious Elements: An Introduction to Noxious Elements. In Handbook of Metal-Microbe Interactions and Bioremediation (pp. 3-24). CRC Press.
- Colica, G., Mecarozzi, P. C., & De Philippis, R. (2010). Treatment of Cr (VI)-containing wastewaters with exopolysaccharide-producing cyanobacteria in pilot flow through and batch systems. Applied microbiology and biotechnology, 87, 1953-1961. De Philippis, R.; Micheletti, E. Heavy metal removal with exopolysaccharide-producing cyanobacteria. Heavy Met. Environ. 2009, 29, 89-122.
- Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale", Gazzetta Ufficiale n. 88, 14 aprile 2006 - Supplemento Ordinario n. 96
- Diaconu, M., Roșca, M., Cozma, P., Minuț, M., Smaranda, C., Hlihor, R. M., & Gavrilescu, M. (2020, October). Toxicity and microbial bioremediation of chromium contaminated effluents. In 2020 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB) (pp. 1-4). IEEE.
- Gadd, G. M. (2009). Biosorption: critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment. Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology, 84(1), 13-28.
- Kielak, A. M., Castellane, T. C., Campanharo, J. C., Colhago, L. A., Costa, O. Y., Corradi da Silva, M. L., ... & Kuramae, E. E. (2017). Characterization of novel Acidobacteria exopolysaccharides with potential industrial and ecological applications. Scientific reports, 7(1), 41193.
- Gandolfi, R., Facchetti, G., Cavalca, L., Mazzini, S., Colombo, M., Coffetti, G., ... & Rimoldi, I. (2022). Hybrid catalysts from copper biosorbing bacterial strains and their recycling for catalytic application in the asymmetric addition reaction of B2 (pin) 2 on  $\alpha$ ,  $\beta$ -unsaturated chalcones. Catalysts, 12(4), 433.
- Melzi A., Mondal S., Colombo M., Zecchin S., Cavalca L., (2024). Reduction of hexavalent chromium and detection of enzymatic activity in Rhodococcus qingshengii strain SC26. 7th international Symposium on Biosorption and Biodegradation/Bioremediation - BioBio 2024. Prague, June 16-20.
- Micheletti E., Colica G., Viti C., Tamagnini P., De Philippis R. (2008) "Selectivity in the heavy metal removal by exopolysaccharide-producing cyanobacteria". Journal of Applied Microbiology 105, 88-94.
- Qin, H., Hu, T., Zhai, Y., Lu, N., & Aliyeva, J. (2020). The improved methods of heavy metals removal by biosorbents: A review. Environmental pollution, 258, 113777.
- Sag, Y., & Kutsal, T. (2001). Recent trends in the biosorption of heavy metals: a review. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 6, 376-385.
- Sutherland, C., & Venkobachar, C. (2010). A diffusion-chemisorption kinetic model for simulating biosorption using forest macrofungus, fomes fasciatus. International Research Journal of Plant Science, 1(4), 107-117.
- Teng, Z., Shao, W., Zhang, K., Huo, Y., Zhu, J., & Li, M. (2019). Pb biosorption by Leclercia adecarboxylata: Protective and immobilized mechanisms of extracellular polymeric substances. Chemical Engineering Journal, 375, 122113. Wang, J.; Chen, C. Biosorbents for heavy metals removal and their future. Biotechnol. Adv. 2009, 27, 195-226.
- Zanetti, R., Zecchin, S., Colombo, M., Borgonovo, G., Mazzini, S., Scaglioni, L., ... & Cavalca, L. (2022). Ni<sup>2+</sup> and Cu<sup>2+</sup> Biosorption by EPS-Producing Serratia plymuthica Strains and Potential Bio-Catalysis of the Organo-Metal Complexes. Water, 14(21), 3410.
- Zecchin, S., Colombo, M., & Cavalca, L. (2019). Exposure to different arsenic species drives the establishment of iron-and sulfur-oxidizing bacteria on rice root iron plaques. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 35(8), 117.



**Sei un attore del settore galvanico?**  
**Rispondi al questionario di HMBV**

<https://forms.gle/E39Ct4ruML1LDa2W8>

**Are you a player in the electroplating industry?**  
**Reply to the HMBV questionnaire**

<https://forms.gle/yWRpfaDFc2bywECk7>

