



Co-funded by
the European Union

La squadra di pulizia della natura – Come i microbi “mangiano” l’inquinamento



BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."



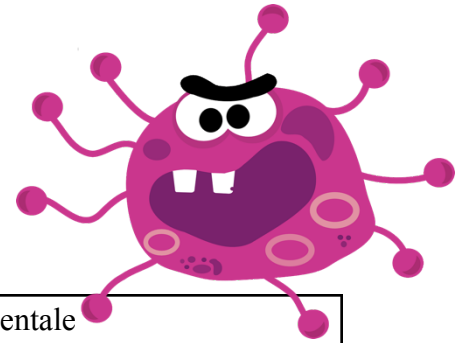


La squadra di pulizia della natura: come i microbi "mangiano" l'inquinamento

INDICE

1. [Introduzione](#)
2. [Cosa sono i microbi?](#)
3. [Importanza dei microbi](#)
4. [Il problema dell'inquinamento](#)
5. [Il ruolo dei microbi nella pulizia ambientale](#)
6. [Introduzione al biorisanamento](#)
7. [Come i microbi "mangiano" o decompongono gli inquinanti](#)
8. [Esempi di biorisanamento microbico](#)
9. [Bonifica microbica](#)
10. [Attenuazione naturale](#)
11. [Casi di studio](#)
12. [Biotecnologia e futuro](#)
13. [Realtà Aumentata in azione: esplorare la pulizia microbica](#)
14. [Implementazione dell'AR nell'educazione al biorisanamento](#)
15. [Conclusione](#)
16. [Risorse](#)





Tema generale del percorso di apprendimento:	Biorisanamento microbico e innovazione ambientale
Nome specifico dell'unità di apprendimento:	La squadra di pulizia della natura: come i microbi “mangiano” l'inquinamento
Età degli utenti destinatari:	14–18 anni
Prerequisiti degli studenti:	Questa unità introduce il concetto di biorisanamento, mostrando come i microbi possano essere utilizzati per pulire ambienti inquinati. Gli studenti esploreranno la diversità microbica, i diversi tipi di inquinamento e i metodi di bonifica attraverso contenuti interattivi e simulazioni in realtà aumentata (AR).
Descrizione dell'unità di apprendimento:	Questa unità introduce il concetto di biorisanamento, illustrando come i microbi vengano utilizzati per bonificare ambienti inquinati. Gli studenti esploreranno la biodiversità microbica, le tipologie di inquinamento e i metodi di pulizia attraverso contenuti interattivi e simulazioni in realtà aumentata (AR).
Materie coinvolte:	Biologia, Chimica, Scienze ambientali, Tecnologia
Parole chiave:	Microbi, biorisanamento, inquinamento, sostenibilità, realtà aumentata (AR), innovazione, scienze ambientali
Competenze, abilità e conoscenze acquisibili:	Comprendere il ruolo dei microbi nella pulizia dell'inquinamento, analizzare casi reali di biorisanamento, utilizzare strumenti di realtà aumentata per visualizzare l'azione dei microrganismi e sviluppare possibili soluzioni a problemi ambientali.
Risorse e strumenti didattici utilizzati:	Articoli scientifici, piattaforme di realtà aumentata (Assemblr EDU, Merge Cube), simulazioni interattive, documenti di casi studio, database microbiologici.





**Criteri di
valutazione:**

Valutazione tramite simulazioni interattive basate sulla realtà aumentata, comprensione delle funzioni microbiche, analisi di casi studio e realizzazione da parte degli studenti di spiegazioni visive o progetti.

Introduzione

Il **biorisanamento** rappresenta una soluzione promettente nella lotta contro l'inquinamento ambientale. In sostanza, sfrutta le capacità naturali dei microrganismi per ripulire siti contaminati, offrendo un approccio innovativo e spesso economico ad alcuni dei problemi ecologici più critici del nostro tempo. Utilizzando batteri, funghi o piante, il biorisanamento sta trasformando il modo in cui affrontiamo gli inquinanti, dalle fuoriuscite di petrolio ai metalli pesanti tossici, man mano che la nostra conoscenza di questi sistemi naturali continua ad aumentare.

Il concetto è relativamente semplice: i microrganismi, forme di vita minuscole ma estremamente potenti, possiedono particolari vie metaboliche che permettono loro di degradare o trasformare sostanze nocive in composti meno tossici. Negli ambienti inquinati, questi organismi possono essere stimolati o introdotti per accelerare la degradazione dei contaminanti, contribuendo così a ristabilire l'equilibrio ecologico.

Un esempio ben noto è la bonifica delle fuoriuscite di petrolio. Il disastro della petroliera **Exxon Valdez** nel 1989 mise in evidenza gli effetti catastrofici di tali incidenti, ma allo stesso tempo stimolò un grande interesse verso il biorisanamento. Gli scienziati hanno scoperto che alcuni batteri, come *Alcanivorax borkumensis*, si nutrono naturalmente degli idrocarburi presenti nel petrolio greggio. Introducendo questi microbi nei siti contaminati o favorendone la crescita attraverso l'aggiunta di nutrienti, gli interventi di bonifica possono essere notevolmente migliorati, riducendo sia i danni ambientali immediati sia quelli a lungo termine.

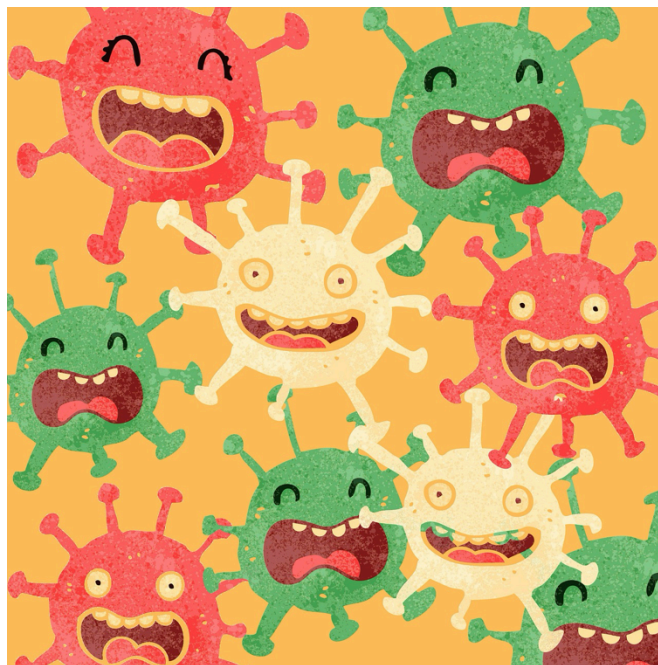
Oltre al petrolio, il biorisanamento è efficace anche nel contrastare l'inquinamento da **metalli pesanti**. Le attività industriali spesso rilasciano elementi pericolosi come piombo, mercurio e cadmio, che rappresentano una minaccia sia per gli ecosistemi sia per la salute umana. Alcuni batteri e funghi, noti come **biosorbenti**, sono in grado di legare questi metalli alle proprie strutture cellulari, rendendoli meno tossici e più facili da rimuovere dall'ambiente (Hartman, 2024).



Cosa sono i microbi?

I **microbi**, o **microrganismi**, sono forme di vita microscopiche generalmente invisibili a occhio nudo. Sono estremamente diversi e abitano praticamente ogni ambiente della Terra, dalle sorgenti idrotermali nelle profondità degli oceani fino al corpo umano.

I microrganismi svolgono ruoli fondamentali negli ecosistemi, nella salute umana e in numerosi processi industriali.



Principali tipi di microbi

1. Batteri:

Organismi unicellulari privi di nucleo (procarioti). Presentano una grande varietà di forme e capacità metaboliche. I batteri sono presenti ovunque: nel suolo, nell'acqua e come parte del microbioma umano. Sebbene alcuni batteri siano patogeni, molti sono benefici e contribuiscono a processi importanti come la digestione e il ciclo dei nutrienti.

2. Archaea (Archea):

Anch'essi microrganismi unicellulari procarioti, ma diversi dai batteri per la loro composizione genetica e la struttura delle membrane cellulari. Sono noti per vivere in ambienti estremi, come sorgenti termali e laghi salati, ma si trovano anche in ambienti più comuni, incluso l'intestino umano. Gli archaea partecipano a processi come la produzione di metano e il ciclo dell'azoto.





3. **Funghi:**

Questo gruppo comprende lieviti, muffe e funghi. I funghi sono organismi eucarioti (dotati di nucleo) che possono essere unicellulari o multicellulari. Svolgono un ruolo fondamentale negli ecosistemi come decompositori della materia organica e hanno numerose applicazioni nella produzione alimentare e in medicina.

4. **Protisti:**

Un gruppo molto diversificato di organismi eucarioti, per lo più unicellulari. I protisti comprendono protozoi e alcune alghe. Vivono in diversi ambienti, dalle acque dolci agli ecosistemi marini, e contribuiscono al ciclo dei nutrienti e alle catene alimentari.

5. **Virus:**

Entità acellulari costituite da materiale genetico (DNA o RNA) racchiuso in un rivestimento proteico. I virus hanno bisogno di una cellula ospite per replicarsi e sono noti per causare malattie negli esseri umani, negli animali e nelle piante. Anche se non sono considerati “organismi viventi” secondo alcune definizioni, sono oggetto di ampi studi in microbiologia.

Importanza dei microbi

I microrganismi sono fondamentali per la vita sulla Terra e svolgono ruoli cruciali nei processi ambientali, nella salute umana e nella biotecnologia.

1. Importanza ambientale

- **Ciclo dei nutrienti:**

I microbi sono essenziali nei cicli biogeochimici, come quelli dell’azoto, del carbonio e dello zolfo, facilitando la trasformazione e il movimento di questi elementi negli ecosistemi.

- **Biorisanamento:**

Alcuni microrganismi sono in grado di degradare inquinanti ambientali, come idrocarburi e metalli pesanti, rendendoli strumenti fondamentali per la bonifica di ambienti contaminati.

2. Salute umana

- **Funzione del microbioma:**

Il microbioma umano, composto da trilioni di microrganismi, è essenziale per la digestione, lo sviluppo del sistema immunitario e la protezione contro agenti patogeni. Alterazioni di questa comunità microbica possono essere associate a diverse malattie.

- **Prevenzione e terapia delle malattie:**

I progressi nello studio del microbioma hanno portato allo sviluppo di nuovi approcci terapeutici, tra cui la modulazione del microbioma per prevenire o trattare alcune patologie.





3. Applicazioni biotecnologiche

- **Processi industriali:**

I microrganismi sono utilizzati nella biotecnologia per produrre antibiotici, enzimi, biocarburanti e alimenti fermentati. Le loro capacità metaboliche vengono sfruttate in numerosi settori industriali.

- **Ingegneria genetica:**

Microrganismi geneticamente modificati possono essere progettati per svolgere compiti specifici, come la produzione di composti terapeutici o la degradazione di inquinanti ambientali, dimostrando la loro grande versatilità nelle applicazioni biotecnologiche.





Problemi di inquinamento Tipi di inquinamento ambientale



Fig 1 Inquinamento ambientale, fonte:

https://gosharpener.com/blogs/710991/Environmental-Pollution?lang=de_de

Inquinamento dell'aria

L'inquinamento dell'aria si riferisce alla presenza di sostanze nocive nell'atmosfera terrestre, tra cui gas, particelle e molecole biologiche che possono mettere in pericolo la salute umana e l'ambiente. Inquinanti comuni come monossido di carbonio, ossidi di azoto, anidride solforosa, ozono e particolato derivano spesso dalla combustione di combustibili fossili nei trasporti, nell'industria e nella produzione di energia. Le conseguenze vanno da malattie respiratorie e problemi cardiovascolari fino al degrado ambientale, come le piogge acide e il riscaldamento globale.

Inquinamento dell'acqua

L'inquinamento dell'acqua è la contaminazione di corpi idrici come fiumi, laghi, oceani e falde sotterranee, rendendoli non sicuri per l'uso umano e dannosi per la vita acquatica. È generalmente causato dallo scarico di sostanze inquinanti come rifiuti industriali, acque reflue, pesticidi, plastica e metalli pesanti nelle fonti d'acqua. Questo tipo di inquinamento provoca diversi problemi, tra cui malattie trasmesse dall'acqua, distruzione degli ecosistemi e riduzione della disponibilità di acqua potabile.





Inquinamento del suolo

L'inquinamento del suolo comporta il degrado della qualità del terreno a causa della presenza di sostanze chimiche tossiche, metalli pesanti e rifiuti che compromettono la salute e la produttività del suolo. Le principali fonti includono attività industriali, prodotti chimici agricoli, smaltimento improprio dei rifiuti e attività minerarie. Il suolo contaminato può influire sulla sicurezza alimentare, sulla crescita delle piante e sulla qualità delle acque sotterranee, rappresentando inoltre un rischio diretto per la salute umana e animale.

Inquinamento acustico

L'inquinamento acustico è rappresentato da livelli di rumore eccessivi o disturbanti nell'ambiente che interferiscono con le normali attività e il benessere delle persone. Ha origine principalmente dal traffico, dai cantieri, dai processi industriali e dallo sviluppo urbano. L'esposizione cronica a livelli elevati di rumore è associata a diversi problemi di salute, tra cui perdita dell'udito, disturbi del sonno, aumento dello stress e riduzione delle prestazioni cognitive, soprattutto nei bambini.

Inquinamento luminoso

L'inquinamento luminoso si riferisce alla luce artificiale eccessiva o mal direzionata che illumina il cielo notturno e altera l'oscurità naturale. Deriva principalmente dall'illuminazione stradale, dalle insegne pubblicitarie, dagli edifici e dagli spazi pubblici nelle aree urbane. Oltre a ridurre la visibilità delle stelle, disturba il comportamento della fauna selvatica e i ritmi circadiani umani, causando squilibri ecologici e problemi di salute legati al sonno.

Inquinamento termico

L'inquinamento termico si verifica quando le industrie rilasciano acqua o aria riscaldata negli ambienti naturali, soprattutto negli ecosistemi acquatici, alterando l'equilibrio della temperatura. Centrali elettriche, impianti di produzione e raffinerie sono tra i principali responsabili. L'aumento della temperatura riduce i livelli di ossigeno nell'acqua, danneggia gli organismi acquatici sensibili e può causare perdita di biodiversità e fioriture algali, compromettendo gli ecosistemi acquatici.

Inquinamento radioattivo

L'inquinamento radioattivo è la contaminazione dell'ambiente da parte di sostanze radioattive, causata da rilasci accidentali, smaltimento improprio dei rifiuti o eventi naturali. Le fonti principali includono centrali nucleari, strutture mediche e di ricerca e test nucleari effettuati in passato. Questo tipo di inquinamento comporta rischi a lungo termine per la salute umana e per gli ecosistemi, tra cui tumori, mutazioni genetiche e contaminazione ambientale persistente.

Ruolo dei microbi nella bonifica dell'inquinamento ambientale

I microrganismi svolgono un ruolo fondamentale e naturale nella riduzione dell'inquinamento ambientale attraverso un processo chiamato **biorisanamento**, in cui batteri, funghi, alghe o archea degradano, trasformano o immobilizzano sostanze inquinanti dannose. Questi microbi sono altamente adattabili e possono vivere in ambienti molto diversi, tra cui aria, acqua e suolo contaminati.





Negli ecosistemi acquatici, batteri come **Pseudomonas** e alghe come **Chlorella vulgaris** possono degradare composti petroliferi, rimuovere metalli pesanti e assorbire nutrienti in eccesso, contribuendo a ripristinare la qualità dell'acqua (UNEP, 2021). Nella bonifica del suolo, alcuni microrganismi degradano idrocarburi complessi, pesticidi e persino metalli pesanti, mentre funghi come **Phanerochaete chrysosporium** sono in grado di decomporre inquinanti organici persistenti (FAO, 2021).

I sistemi di purificazione dell'aria, inclusi **biofiltri** e **bioscrubber**, utilizzano comunità microbiche per rimuovere composti organici volatili e ammoniaca dagli scarichi industriali (EPA, 2023). Inoltre, i progressi nella biotecnologia microbica hanno reso possibile l'ingegnerizzazione di ceppi microbici in grado di colpire specifici inquinanti con maggiore efficienza.

I benefici ecologici della bonifica microbica non solo riducono la dipendenza da interventi chimici o meccanici, ma promuovono anche una gestione ambientale più sostenibile. Per questo motivo, i microbi sono sempre più riconosciuti come alleati fondamentali nella lotta contro l'inquinamento e nel ripristino a lungo termine degli ecosistemi.

Metodi di bonifica dell'inquinamento dell'aria

L'inquinamento atmosferico viene ridotto attraverso filtrazione meccanica, neutralizzazione chimica e, sempre più spesso, metodi biologici. Tecnologie come precipitatori elettrostatici e scrubber rimuovono particelle e gas dalle emissioni industriali, mentre i convertitori catalitici riducono gli inquinanti prodotti dai veicoli.

I sistemi di **biofiltrazione**, che utilizzano comunità microbiche per metabolizzare tossine presenti nell'aria come composti organici volatili (VOC) e composti dello zolfo, rappresentano un'alternativa sostenibile ai trattamenti chimici. Questi sistemi biologici sono particolarmente efficaci nel trattamento delle emissioni odorose provenienti da impianti di trattamento delle acque reflue e di compostaggio (Deshusses, 1997).

Metodi di bonifica dell'inquinamento dell'acqua

La bonifica dell'acqua inquinata prevede processi di trattamento a più fasi che combinano separazione fisica, disinfezione chimica e degradazione biologica. La sedimentazione e la filtrazione a membrana rimuovono i solidi, mentre ozonizzazione e coagulazione eliminano agenti patogeni e metalli pesanti.

I trattamenti biologici, come il **fango attivo** e i **reattori a biofilm**, si basano sull'attività microbica per degradare materia organica e nutrienti. Sono state inoltre sviluppate **celle a combustibile microbiche**, che permettono di trattare le acque reflue producendo allo stesso tempo energia elettrica, dimostrando applicazioni innovative a doppio scopo (Logan et al., 2006).

Metodi di bonifica dell'inquinamento del suolo

La bonifica del suolo utilizza strategie come escavazione, immobilizzazione chimica e processi biologici. Le tecniche di biorisanamento sono particolarmente efficaci e impiegano microbi autoctoni o introdotti per degradare idrocarburi petroliferi, solventi e pesticidi.





La **fitodepurazione**, supportata dai microbi associati alla rizosfera delle piante, rappresenta una soluzione ecologica che favorisce l'assorbimento o la degradazione dei contaminanti attraverso l'interazione tra piante e microrganismi. Studi recenti evidenziano il successo dei consorzi microbici nella degradazione degli **idrocarburi policiclici aromatici (IPA)** in suoli contaminati complessi (Meckenstock et al., 2015).

Metodi di mitigazione dell'inquinamento acustico

A differenza degli inquinanti chimici, il rumore non può essere eliminato ma deve essere mitigato attraverso pianificazione e soluzioni ingegneristiche. Le strategie includono barriere acustiche, materiali da costruzione fonoassorbenti e fasce verdi urbane che riducono i livelli di rumore ambientale.

La vegetazione e il suolo, che beneficiano di comunità microbiche sane, svolgono un ruolo indiretto ma utile nella riduzione del rumore, ammorbidendo le superfici e assorbendo l'energia sonora. Uno studio sulla progettazione delle foreste urbane ha dimostrato che l'integrazione di vegetazione densa può ridurre il rumore fino a **10 dB** negli ambienti cittadini (Fang & Ling, 2003).

Metodi di riduzione dell'inquinamento luminoso

La riduzione dell'inquinamento luminoso richiede una progettazione intelligente dell'illuminazione e una pianificazione urbana che limiti la luce artificiale non necessaria. Tecniche come l'uso di lampade schermate, sensori di movimento e LED a luce calda aiutano a ridurre l'illuminazione diffusa del cielo e l'abbagliamento.

Sebbene i microbi non riducano direttamente l'inquinamento luminoso, la diminuzione della luce artificiale favorisce gli ecosistemi notturni che dipendono da suoli ricchi di microbi e da cicli naturali di luce. Studi dimostrano che l'illuminazione artificiale può disturbare le reti di impollinazione notturna e l'attività microbica nelle croste del suolo (Knop et al., 2017).

Metodi di mitigazione dell'inquinamento termico

L'inquinamento termico, soprattutto dovuto agli scarichi industriali nelle acque, viene gestito attraverso sistemi di raffreddamento ingegnerizzati come **bacini di raffreddamento** e **torri di raffreddamento**.

Sistemi naturali emergenti, come le **zone umide artificiali**, utilizzano microbi tolleranti al calore non solo per regolare la temperatura ma anche per degradare gli inquinanti presenti negli effluenti caldi. Uno studio di Vymazal (2011) evidenzia l'efficacia delle zone umide artificiali nella rimozione simultanea di nutrienti e nella riduzione della temperatura nelle acque reflue.





Metodi di bonifica dell'inquinamento radioattivo

La bonifica della contaminazione radioattiva prevede tecniche come confinamento, vetrificazione e, sempre più spesso, stabilizzazione biologica. Alcuni microbi, come **Deinococcus radiodurans** e specie del genere **Geobacter** capaci di ridurre l'uranio, mostrano una notevole resistenza alle radiazioni e possono modificare la solubilità o la mobilità dei radionuclidi.

Questi organismi sono oggetto di studio per il loro possibile utilizzo nel biorisanamento a lungo termine dei siti di rifiuti nucleari. Ricerche recenti hanno dimostrato una promettente riduzione microbica dell'uranio in condizioni anaerobiche, limitandone la mobilità nelle acque sotterranee (Fredrickson et al., 2004).

Tabella 1. Tipologie di Inquinamento Ambientale e Tecniche di Trattamento Associate

Tipo di Inquinamento	Metodo di Bonifica Microbica	Esempi di Microbi
Aria	Biofiltrazione, Bioscrubber (Lavatori biologici)	<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Aspergillus</i>
Acqua	Fanghi attivi, Bioaumento, Alghe	<i>Nitrosomonas</i> , <i>P. putida</i> , <i>Chlorella</i>
Suolo	Bioremediation (Biorisanamento), Micoremediazione	<i>Phanerochaete</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Rhizobium</i>
Acustico	Nessun ruolo diretto	—
Luminoso	Nessun ruolo diretto	—
Termico	Indiretto (microbi termofili)	<i>Thermus aquaticus</i> , <i>B. stearothermophilus</i>
Radioattivo	Sperimentale (microbi radioresistenti)	<i>Deinococcus radiodurans</i> , funghi radiotrofi



Introduzione al Biorisanamento

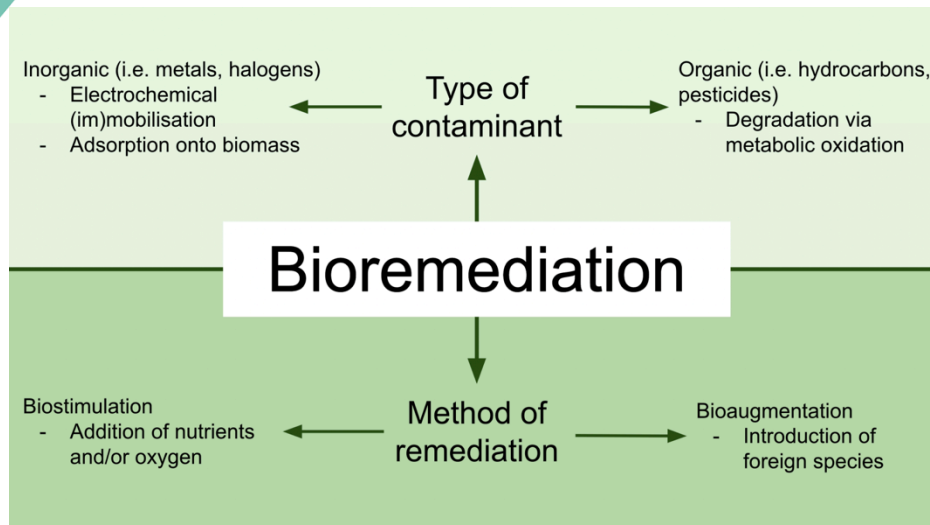


Fig 2. Biorisanamento - fonte: <https://tinyurl.com/pbdykp7a>

Gemini ha detto

Il **biorisanamento** è un approccio sostenibile e a base biologica che utilizza microrganismi viventi, principalmente batteri, funghi, alghe e archaea, per degradare, disintossicare o trasformare gli inquinanti ambientali in forme meno nocive. Sebbene sia tradizionalmente associato all'inquinamento del suolo, il biorisanamento si è dimostrato efficace in un ampio spettro di contesti ambientali, inclusi acque contaminate, aria inquinata e persino siti di scorie radioattive. Nei sistemi idrici, ad esempio, batteri degradatori di idrocarburi e alghe che consumano nutrienti vengono impiegati per ripulire fuoriuscite di petrolio e laghi eutrofici. Nella purificazione dell'aria, i biofiltri utilizzano biofilm microbici per catturare e biodegradare composti organici volatili (VOC) e gas solforosi provenienti dagli scarichi industriali. Inoltre, il

biorisanamento radioattivo rappresenta una frontiera emergente, con microbi estremofili come





Geobacter e *Deinococcus radiodurans* studiati per la loro capacità di immobilizzare o trasformare elementi radioattivi. L'applicazione crescente di consorzi microbici e ceppi geneticamente modificati ha ulteriormente ampliato il potenziale del biorisanamento per inquinanti complessi e recalcitranti. Secondo Singh e Strong (2022), l'integrazione delle tecnologie omiche e degli strumenti di bioinformatica ha migliorato significativamente la specificità, la velocità e la scalabilità degli interventi microbici nella pulizia ambientale. Mentre le sfide globali dell'inquinamento si intensificano, il biorisanamento offre un'alternativa a basso costo, a basso consumo energetico ed ecologicamente rigenerativa rispetto ai metodi di bonifica chimica e meccanica convenzionali.

Come i microbi "mangiano" o scompongono gli inquinanti

I microrganismi sono in grado di decomporre gli inquinanti attraverso processi metabolici in cui i contaminanti fungono da fonti di energia, carbonio o nutrienti. Questa degradazione biologica avviene quando i microbi secernono enzimi che alterano chimicamente le sostanze tossiche, convertendole in composti più semplici e meno dannosi. Ad esempio, batteri che degradano gli idrocarburi come *Pseudomonas*, *Alcanivorax* e *Mycobacterium* possono metabolizzare i componenti del petrolio ossidandoli in anidride carbonica e acqua durante la respirazione aerobica. In condizioni anaerobiche, alcuni batteri possono anche utilizzare gli inquinanti come accettori alternativi di elettroni, permettendo loro di degradare composti come nitrati, solventi clorurati o metalli pesanti.

Funghi come *Phanerochaete chrysosporium* sono in grado di degradare inquinanti organici persistenti come pesticidi e coloranti producendo enzimi ligninolitici che rompono le molecole complesse in frammenti più piccoli. Alcuni microbi trasformano persino i metalli pesanti in forme insolubili attraverso reazioni redox, immobilizzandoli nel suolo o nei sedimenti. Fattori ambientali, tra cui pH, temperatura, disponibilità di ossigeno e presenza di co-substrati, influenzano questi processi. Secondo recenti scoperte di Ghosal et al. (2016), le comunità microbiche spesso funzionano in modo più efficace come consorzi, dove diverse specie lavorano in sinergia per degradare miscele complesse di inquinanti in modo più efficiente rispetto ai singoli ceppi. Questi meccanismi biologici sono centrali sia nei sistemi di biorisanamento naturali che in quelli ingegnerizzati, rendendo i microbi agenti indispensabili nel trattamento sostenibile della contaminazione ambientale.

Esempi di biorisanamento microbico

Pseudomonas e degradazione del petrolio Le specie del genere *Pseudomonas*, in particolare *Pseudomonas aeruginosa*, sono rinomate per la loro capacità di degradare gli idrocarburi presenti nel petrolio greggio. Questi batteri producono biosurfattanti che emulsionano il petrolio, aumentandone la biodisponibilità per la degradazione microbica. Studi recenti hanno dimostrato che la co-coltura di *P. aeruginosa* con *Bacillus subtilis* migliora l'efficienza di degradazione del petrolio greggio, raggiungendo fino al 63,05% di rimozione dei componenti petroliferi.

Ideonella sakaiensis e capacità di "mangiare" la plastica *Ideonella sakaiensis* è un batterio in grado di degradare il polietilene tereftalato (PET), una plastica comune utilizzata in bottiglie e imballaggi. Secerne un enzima chiamato PETasi, che scompone il PET nei suoi monomeri, acido tereftalato ed glicole etilenico, che il batterio utilizza poi per la crescita. La ricerca recente si è concentrata sul miglioramento dell'efficienza della PETasi attraverso l'ingegneria genetica per aumentare i tassi di degradazione della plastica.





Specie *Geobacter* e bonifica dei metalli I membri del genere *Geobacter*, come *Geobacter metallireducens*, sono noti per la loro capacità di ridurre e immobilizzare metalli pesanti, inclusi uranio e cromo, in ambienti contaminati. Questi batteri trasferiscono elettroni agli ioni metallici durante i loro processi metabolici, convertendo metalli tossici solubili in forme insolubili che precipitano fuori dalla soluzione, riducendone così la mobilità e la biodisponibilità.

Diverse tecniche di biorisanamento

Esistono molti modi per utilizzare il biorisanamento, ciascuno per diversi inquinanti e luoghi:

- **Fitoremediation** – Le piante aiutano a pulire gli inquinanti da suolo, acqua e aria.
- **Risanamento microbico** – I microbi lavorano per decomporre e trasformare gli inquinanti in sostanze più sicure.
- **Micorisanamento** – I funghi vengono utilizzati per pulire molti tipi di inquinanti.
- **Bio-manipolazione** – Animali, come i pesci, aiutano a pulire l'acqua inquinata.

Questi metodi offrono molti modi per risolvere i problemi ambientali. Mostrano come la natura possa aiutarci a pulire.

Tabella 2. tecniche di biorisanamento

Tecnica di Biorisanamento	Descrizione	Esempi
Fitorisanamento (Phytoremediation)	Le piante aiutano a rimuovere gli inquinanti da suolo, acqua e aria.	Rizofiltrazione, Fitoestrazione, Fitostimolazione, Fitostabilizzazione
Risanamento Microbico	I microbi scompongono e trasformano gli inquinanti in sostanze più sicure.	Biostimolazione, Bioaumento, Biorisanamento intrinseco
Micorisanamento (Mycoremediation)	I funghi vengono utilizzati per ripulire inquinanti come metalli pesanti e petrolio.	Degradazione fungina di metalli pesanti, idrocarburi e composti organici
Bio-manipolazione	Animali, come i pesci, aiutano a pulire l'acqua inquinata.	Utilizzo di pesci per controllare le fioriture algali e migliorare la qualità dell'acqua

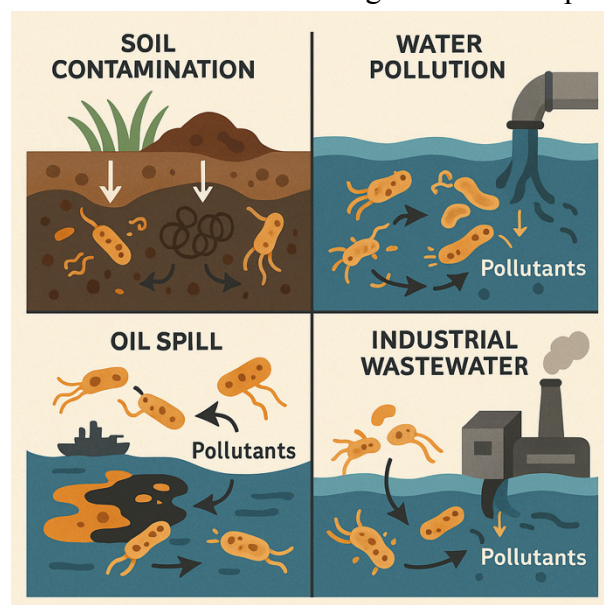


Risanamento Microbico

I microbi sono organismi microscopici classificati all'interno di due domini vitali significativi: Archaea ed Eubacteria. Essi comprendono una vasta gamma di forme di vita, tra cui i produttori primari che convertono la luce o i composti chimici in energia, così come gli eterotrofi e i decompositori che dipendono da fonti esterne per il sostentamento. Ubicui in natura, i microbi si trovano in praticamente ogni ambiente sulla Terra.

Questi minuscoli organismi giocano un ruolo significativo nella vita umana. Aiutano a ripulire gli inquinanti, arricchiscono la fertilità del suolo, contribuiscono ai progressi nella tecnologia alimentare e sintetizzano nutrienti essenziali che supportano la nostra salute. Nella maggior parte dei casi, coesistiamo con i microbi senza essere consapevoli della loro presenza.

Mentre molti microbi svolgono funzioni protettive, come schermarci da patogeni nocivi, altri possono avere effetti avversi. Possono causare focolai di malattie, deteriorare il cibo o contribuire al decadimento e alla decomposizione dei materiali (Postgate, 2003).



Strategie e tecnologie di risanamento microbico

Il risanamento microbico è un tipo di metodo di bonifica che utilizza le funzioni naturali dei microbi nel suolo per rendere i contaminanti non tossici, e tipicamente coinvolge il bioaumento (*bioaugmentation*) e la biostimolazione (*biostimulation*). A causa della loro esigua quantità e della bassa capacità degradante, i microbi autoctoni sono costantemente limitati dalla tossicità degli

inquinanti in un ambiente co-contaminato.

Il bioaumento (*bioaugmentation*) prevede la combinazione di batteri degradatori obbligati con ceppi in grado di resistere a diversi metalli pesanti (HM) per eliminare i contaminanti bersaglio (Fig. 3). La biostimolazione migliora la qualità del suolo introducendo ormoni della crescita e nutrienti per promuovere lo sviluppo della microflora locale. Tuttavia, le varie tecnologie microbiche per la bonifica sono discusse di seguito.



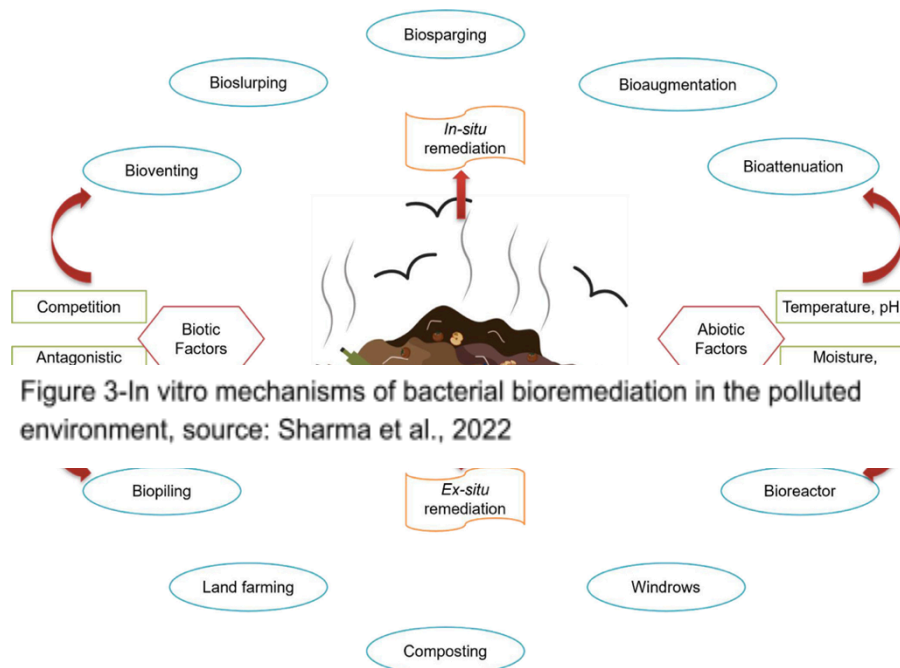


Figure 3-In vitro mechanisms of bacterial bioremediation in the polluted environment, source: Sharma et al., 2022

Tecniche di biorisanamento *in situ*

Questa bonifica elimina la necessità di estrarre il suolo inquinato e di trasportarlo verso impianti di trattamento esterni, riducendo così il disturbo al terreno, minimizzando l'esposizione alle tossine per gli operatori e la comunità, e abbassando potenzialmente i costi del trattamento. La permeabilità del suolo, la profondità dell'inquinamento, la temperatura e il probabile lisciviameto chimico profondo sono tutte caratteristiche del campo importanti da considerare (Fasani et al., 2018). La pulizia dei polluenti *in situ* è rappresentata nella Figura 4.



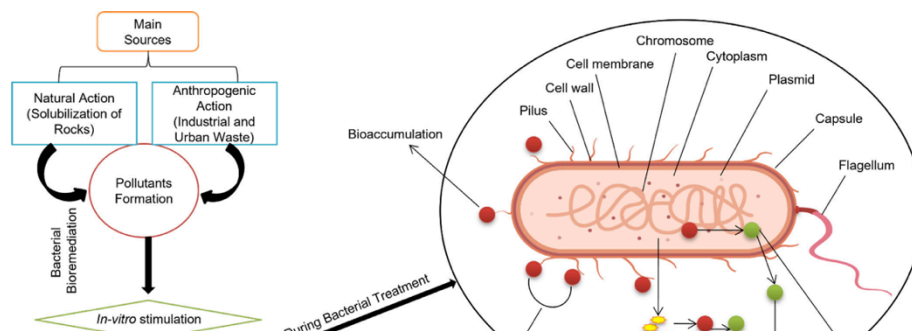
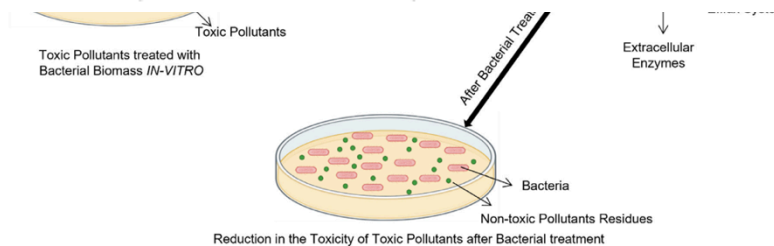


Figura 4. Biorisanamento microbico per il ripristino dei siti contaminati tramite bonifica *in situ* ed *ex-situ*, fonte: Sharma et al., 2022.



I

microbi non
degradano
inquinanti
significativi,

ma ne influenzano invece le caratteristiche fisico-chimiche (Sharma et al., 2021f; Sharma et al., 2021g). La componente di bonifica include l'accumulo intracellulare, l'ulteriore formazione di complessi cellulari e calcoli di ossido-riduzione o precipitazione. I metalli pesanti pericolosi sono ampiamente presenti nei processi industriali e sono inquinanti ambientali significativi. La filtrazione molecolare per l'estrazione di metalli da materiali di basso grado è stata semplice e di successo (Dhaliwal et al., 2020). *Pseudomonas sp.*, *Bacillus sp.*, *Torulopsis bombicola*, *Desulfuromonas palmitatis* e altri microrganismi possono disintossicare rifiuti meccanici, fanghi di depurazione e bonificare residui e suoli inquinati da metalli pesanti (HM) (Priya e Nagan, 2015). La biomassa microbica possiede diverse capacità di biosorbimento e si verificano alterazioni fondamentali tra le specie. La loro straordinaria capacità di biosorbimento è attribuita a rapporti volume-superficie più elevati e ai probabili siti di adsorbimento chimico complesso, principalmente sulle membrane cellulari (Li et al., 2019). I microrganismi sono spesso più resilienti e durano più a lungo in colture miste. I consorzi colturali sono quindi metabolicamente dominanti per il biosorbimento dei metalli e sono dunque adatti per applicazioni su larga scala.





Tuttavia, poiché la capacità di biosorbimento di ogni cellula di microrganismo varia, essa dipende dal trattamento specifico e dalle condizioni di test (Dhaliwal et al., 2020).

Attenuazione naturale

I contaminanti vengono convertiti in una forma meno pericolosa o immobilizzati durante la biodegradazione (attenuazione naturale). Questi meccanismi di trasformazione e immobilizzazione sono causati principalmente dalla biodegradazione dei microrganismi e, in misura minore, dalle interazioni con il sorbimento dei mezzi chimici e geologici naturali. Questo meccanismo è specifico per il contaminante ed è stato approvato come approccio per il trattamento di componenti del carburante, come i BTEX (benzene, toluene, etilbenzene e xilene), ma non per numerose altre classi (Ganiyu et al., 2022). Il periodo richiesto per l'attenuazione naturale varia notevolmente a seconda delle circostanze del sito. Molti siti contaminati potrebbero non richiedere una strategia di pulizia estesa, e la bioattenuazione è sia economica che efficiente. In realtà, gli Stati Uniti hanno impiegato con successo una serie di approcci di biorisanamento a prezzi che sono circa l'80-90% più economici rispetto alle tecnologie di pulizia alternative basate su principi chimici e fisici. Le spese post-pulizia sono significativamente ridotte con una minima perturbazione del sito. Le biotecnologie industriali e ambientali favoriscono inoltre approcci innovativi, portando a processi che utilizzano tecnologie pulite per massimizzare la produzione generandone meno residui (Rhea e Clark, 2022). Poiché la maggior parte dei suoli è oligotrofica o priva dei microbi necessari, la sola bioattenuazione diventa insufficiente e dispendiosa in termini di tempo in molte circostanze.

Queste tecniche di ingegneria genetica e metabolica possono aiutare nel processo di biorisanamento (Liang et al., 2020). Per l'editing del gene e l'ingegneria metabolica, i batteri che abitano gli inquinanti sono i principali candidati ideali poiché sono impiegati per sopravvivere e ripararsi in circostanze stressanti di diversi xenobiotici tossici, refrattari e non degradabili. Inoltre, la comprensione del percorso metabolico appare cruciale nell'analisi del biorisanamento microbico (Plewniak et al., 2018). La Figura 5 illustra il ruolo della ricostruzione metabolica nel biorisanamento sintetico, impiegando percorsi sia *in situ* che *ex-situ* per il trattamento di inquinanti pericolosi.



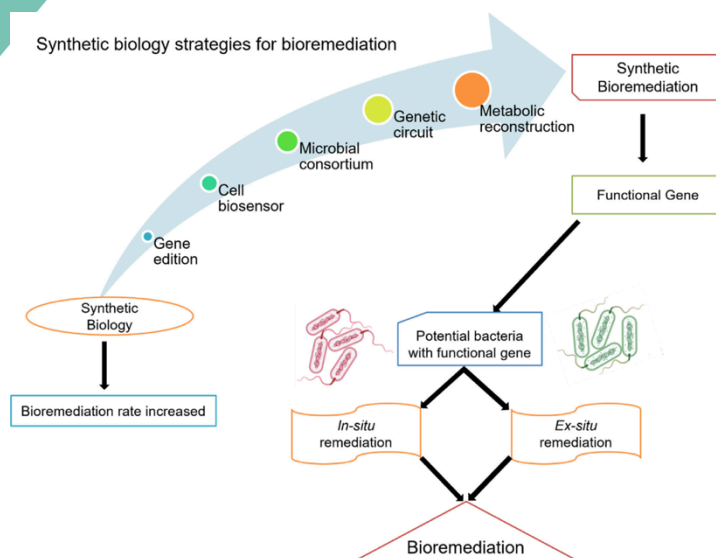


Figura 5. Il ruolo della ricostruzione metabolica nel biorisanamento sintetico attraverso percorsi *in situ* ed *ex-situ* per il trattamento di inquinanti pericolosi.

Casi di Studio

Fuoriuscita di petrolio della Deepwater Horizon (2010, Golfo del Messico) Il disastro della Deepwater Horizon ha rilasciato circa 134 milioni di galloni di petrolio greggio nel Golfo del Messico, segnando una delle più significative fuoriuscite di petrolio marino della storia. In seguito, i batteri marini autoctoni, in particolare le specie *Alcanivorax* e *Cycloclasticus*, proliferarono e giocarono un ruolo cruciale nella degradazione degli idrocarburi. Questi microbi utilizzarono il petrolio come fonte di carbonio, riducendo efficacemente l'impatto ambientale della fuoriuscita. La ricerca finanziata dalla Gulf of Mexico Research Initiative (GoMRI) ha fornito approfondimenti sulla genomica microbica e sulle risposte del biorisanamento degli idrocarburi negli ecosistemi marini.

Inquinamento da plastica negli oceani I rifiuti di plastica, in particolare le microplastiche, sono diventati pervasivi negli ambienti marini, ponendo minacce alla vita marina e alla salute umana. Si stanno esplorando approcci innovativi di biorisanamento per affrontare questo problema:

- **Iniziative guidate dalla comunità:** A Kerala, in India, la comunità di pescatori di Munambam ha avviato il progetto Drive to Recover Ocean Plastic (DROP). Oltre 600 pescherecci partecipano raccogliendo rifiuti di plastica durante i loro viaggi, portando al recupero di 22.000 kg di plastica nel solo biennio 2024-25.
- **Soluzioni microbiche:** La ricerca ha identificato funghi degradatori di plastica capaci di scomposizione di polimeri sintetici come il poliuretano. Questi funghi potrebbero essere





utilizzati in ambienti controllati, come gli impianti di trattamento delle acque reflue, per mitigare l'inquinamento da plastica.

Contaminazione da metalli pesanti nei siti minerari Le attività minerarie portano spesso alla contaminazione da metalli pesanti nei suoli e nei corpi idrici circostanti. Le strategie di biorisanamento che impiegano microbi si sono dimostrate promettenti nel mitigare questi inquinanti:

- **Miniera di piombo-zinco del monte Qixia, Cina:** Gli studi hanno rivelato un grave inquinamento da metalli pesanti nei suoli intorno alla miniera. Le comunità microbiche, comprese le specie *Sphingomonas* e *Pseudomonas*, hanno dimostrato resistenza ai metalli pesanti e hanno contribuito agli sforzi di bonifica del suolo.
- **Sito Superfund di Tar Creek, USA:** È stato implementato un sistema di biorisanamento innovativo per trattare le acque sotterranee contaminate da piombo, zinco, cadmio e ferro provenienti da miniere abbandonate. Il sistema utilizza una serie di stagni con trattamenti a base di batteri aerobici e anaerobici, riducendo significativamente le concentrazioni di metalli pesanti nell'acqua.

Biotecnologia e Futuro

Potenziamento dei microbi per la pulizia ambientale I progressi nelle biotecnologie hanno permesso agli scienziati di ingegnerizzare geneticamente i microrganismi per potenziare la loro capacità di degradare gli inquinanti ambientali. Tecniche come CRISPR-Cas9 consentono modifiche precise ai genomi microbici, migliorando i loro percorsi metabolici per la scomposizione di contaminanti complessi. Ad esempio, *Pseudomonas putida*, *Bacillus subtilis* ed *Escherichia coli* sono stati ingegnerizzati per sovraesprimere enzimi come il citocromo P450 e le diossigenasi, accelerando la degradazione degli inquinanti organici. Inoltre, strumenti come XenoBug utilizzano l'apprendimento automatico per prevedere enzimi batterici capaci di scomporre vari inquinanti, snellendo l'identificazione di ceppi microbici efficaci.

Considerazioni etiche ed ecologiche Sebbene i microbi geneticamente modificati offrano soluzioni promettenti, la loro distribuzione solleva diverse preoccupazioni:

- **Impatto ecologico:** Il rilascio di organismi ingegnerizzati potrebbe alterare gli ecosistemi esistenti, portando a conseguenze impreviste come lo spostamento delle comunità microbiche native o il trasferimento genetico orizzontale a specie non bersaglio.
- **Sfide di biocontenimento:** È fondamentale garantire che i microbi geneticamente modificati non persistano oltre le loro aree di applicazione previste.
- **Equità e accesso:** I benefici devono essere accessibili a tutte le comunità, specialmente quelle sproporzionatamente colpite dall'inquinamento.
- **Definizione degli obiettivi di ripristino:** Determinare cosa costituisca un ambiente "pulito" è soggettivo; è essenziale coinvolgere le comunità nella definizione degli obiettivi di bonifica.

Potenziale futuro nelle tecnologie verdi

- **Biologia sintetica ed evoluzione diretta:** Progettazione di microbi con capacità potenziate per soluzioni su misura.
- **Nanobiorisanamento:** Combinazione di nanotecnologia e risanamento microbico per un targeting più preciso degli inquinanti.





- **Celle a combustibile microbiche (MFC):** Utilizzo dei microbi per generare elettricità mentre degradano gli inquinanti.
- **Cattura del carbonio tramite elettrolisi microbica (MECC):** Impiego di microbi per catturare CO₂ durante il trattamento delle acque reflue.

Realtà Aumentata in Azione: Esplorare la pulizia microbica

Immagina di poter visualizzare microbi microscopici, osservare come interagiscono con gli inquinanti e vederli in azione mentre ripuliscono fuoriuscite di petrolio o rifiuti di plastica. Questa esperienza immersiva è resa possibile dalla **Realtà Aumentata (AR)**.

L'integrazione dell'AR nell'educazione scientifica permette di rendere tangibili concetti astratti. Ad esempio, specie come *Pseudomonas* e *Bacillus* possono essere osservate mentre degradano idrocarburi, o *Deinococcus radiodurans* mentre pulisce rifiuti radioattivi. Strumenti come Unity con Vuforia o Assemblr EDU possono creare simulazioni dinamiche che migliorano la comprensione e il coinvolgimento degli studenti.

Implementazione dell'AR nell'educazione al biorisanamento

Uno dei vantaggi principali dell'AR è la capacità di **visualizzare l'attività microbica invisibile**. Utilizzando simulazioni 3D, gli studenti possono osservare come i ceppi batterici rispondono ai contaminanti e come i fattori ambientali (temperatura, nutrienti) influenzano le prestazioni microbiche. Poiché l'accesso diretto a siti inquinati è spesso pericoloso, l'AR funge da **strumento di simulazione sicuro**.

Casi d'uso educativi:

- **Simulazione Lab AR su sversamenti di petrolio:** Gli studenti distribuiscono microbi virtuali su macchie di petrolio.
- **Mappa interattiva della bonifica del suolo:** Esplorazione di modelli di suolo stratificati con HoloLens.
- **App 3D Microbial Explorer:** Scansione di codici QR per attivare modelli dettagliati di batteri.

Integrazione nel curriculum: L'AR può essere introdotta attraverso l'apprendimento basato sull'indagine (*Inquiry-Based Learning*), il gioco (*Game-Based Learning*) o la classe capovolta (*Flipped Classroom*), incoraggiando gli studenti a pensare criticamente alle soluzioni sostenibili e al ruolo delle biotecnologie.

Queste applicazioni sono supportate da strumenti e piattaforme accessibili, tra cui **Unity 3D**, **AR Foundation**, **ARKit/ARCore** e software di modellazione 3D come **Blender** e **Sketchfab**. Hardware come Microsoft HoloLens e Meta Quest 3 supportano esperienze immersive in tempo reale, sempre più convenienti e scalabili.

Integrazione nel Curriculum

L'AR può essere introdotta nei corsi di scienze ambientali, biotecnologie o microbiologia nelle scuole superiori, nelle università o nella formazione professionale. Le strategie pedagogiche efficaci includono:

- **Apprendimento basato sull'indagine (Inquiry-Based Learning):** incoraggia gli studenti a testare variabili all'interno di ambienti di biorisanamento virtuali.





- **Apprendimento basato sul gioco (Game-Based Learning):** aggiunge motivazione attraverso missioni o sfide di risoluzione dei problemi.
- **Classe capovolta (Flipped Classrooms):** gli studenti esplorano i moduli AR prima della lezione e applicano i concetti durante la discussione.

I vantaggi dell'AR in questo contesto sono riassunti di seguito:

Beneficio	Descrizione
Immersione	Simulazioni realistiche e interattive di ambienti di bonifica.
Ritenzione	L'apprendimento multisensoriale migliora la comprensione e la memoria.
Accessibilità	Portatile e scalabile su vari dispositivi digitali.
Personalizzazione	Le simulazioni possono essere adattate a inquinanti, ecosistemi o microbi locali.
Collaborazione	Supporta l'apprendimento di squadra e gli ambienti AR condivisi.

Gli sviluppi futuri potrebbero includere sistemi di tutoraggio **AR guidati dall'IA**, visualizzazioni **integrate con sensori** e piattaforme di apprendimento **AR basate sul cloud**, migliorando ulteriormente l'accessibilità e l'adattabilità tra diverse discipline e località.

Conclusione

La Realtà Aumentata rappresenta un potente strumento educativo per potenziare l'apprendimento nel campo del biorisanamento microbico. Convertendo processi biologici invisibili in esperienze visibili, interattive e manipolabili, l'AR aiuta gli studenti a comprendere interazioni ambientali complesse che sono spesso inaccessibili attraverso i metodi tradizionali. Essa consente la simulazione sicura di scenari del mondo reale, migliora il coinvolgimento attraverso l'apprendimento interattivo e supporta la ritenzione delle conoscenze attraverso il ragionamento spaziale e visivo.





Con l'evolversi del campo delle tecnologie immersive, l'AR è destinata a diventare parte integrante dell'educazione e della divulgazione ambientale, in particolare nel promuovere pratiche sostenibili, l'apprendimento interdisciplinare e la curiosità scientifica. Che sia in un'aula, in un laboratorio o in un contesto pubblico, l'AR può formare una generazione di studenti più attrezzata per comprendere e affrontare l'inquinamento attraverso soluzioni biologiche ed ecologiche.

Fase	Descrizione
Esplorazione	- Indagare come i microbi ripuliscono l'inquinamento ambientale attraverso il biorisanamento e come questo venga applicato in scenari del mondo reale.
	- Sviluppo dei contenuti: Creare contenuti educativi che colleghino biologia, scienze ambientali e tecnologia relativi alla bonifica microbica.
	- Analisi dei bisogni: Identificare il livello di comprensione degli studenti su inquinamento, microrganismi e ripristino ecologico per dare forma a un'istruzione efficace.
Esecuzione	- Implementazione del curriculum: Presentare lezioni interattive su tipi di inquinamento, azione microbica e meccanismi di biorisanamento utilizzando strumenti AR.
	- Esercizi interattivi: Utilizzare app AR (es. Curiscope Virtuali-Tee, Merge Cube) per simulare ambienti inquinati e attività microbica.
	- Raccolta feedback: Registrare le osservazioni e i feedback degli studenti sulle bonifiche virtuali e sulle simulazioni del comportamento microbico per affinare le esperienze di apprendimento.
Potenziamento	- Integrazione AR: Applicare l'AR per visualizzare ecosistemi inquinati, colonie microbiche e i loro processi di scomposizione dell'inquinamento.
	- Apprendimento interattivo: Permettere agli studenti di testare l'efficienza microbica virtuale introducendo contaminanti e misurando i risultati della bonifica.





Fase	Descrizione
	Contenuti Gamificati: - <i>Punti e Badge</i>: Guadagnare premi per l'identificazione dei tipi di inquinamento, la simulazione di bonifiche efficaci o l'ottimizzazione dell'azione microbica. - <i>Classifiche</i>: Classificare le prestazioni in sfide a tempo sulla pulizia di siti inquinati virtuali. - <i>Missioni e Livelli</i>: Sbloccare fasi di crescente complessità, dall'identificazione degli inquinanti alla gestione di interi ecosistemi di risanamento. - <i>Premi per l'esplorazione</i>: Nascondere specie microbiche o indizi per la bonifica all'interno degli ambienti AR per incoraggiare un'indagine più profonda. - <i>Compiti gamificati collaborativi</i>: I team lavorano insieme per affrontare disastri ambientali su larga scala basati su AR utilizzando strategie microbiche.
	Valutazioni basate su AR: - Valutare la comprensione chiedendo agli studenti di completare missioni di pulizia dall'inquinamento usando l'AR e di riportare i risultati con analisi "prima e dopo".





Riferimenti Bibliografici

- Arici, F. (2024). Investigating the Effectiveness of Augmented Reality Technology in Science Education in Terms of Environmental Literacy, Self-Regulation, and Motivation to Learn Science. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 40(24), 8476–8496.
<https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2310921>
- Bacca, J., Baldiris, S., Fabregat, R., Graf, S., & Kinshuk. (2014). Augmented reality trends in education: A systematic review of research and applications. *Educational Technology & Society*, 17(4), 133–149.
- Beck, D. A. C., Pope, R. K., & McNicholas, P. J. (2022). The Invisible World Revealed: Augmented Reality for Microbiology Education. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 23(1), e00143-21.
- Boopathy, R. (2021). Biological Treatment of Air Pollutants: A Review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 20, 457–472. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09555-9>.
- Crawford, R. L., & Crawford, D. L. (1996). *Bioremediation: Principles and Applications*. Cambridge University Press.
- Deshusses, M. A. (1997). Biological waste air treatment in biofilters. *Biotechnology Progress*, 13(3), 239–248.





Dhaliwal, S.S., Singh, J., Taneja, P.K., Mandal, A., 2020. Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review.

Environmental Science and Pollution Research 27 (2), 1319– 1333.

Dunleavy, M., & Dede, C. (2014). Augmented reality teaching and learning. In J. M. Spector et al. (Eds.), *Handbook of Research on Educational Communications and Technology* (pp. 735–745). Springer.

Dunleavy, M., Dede, C., & Mitchell, R. (2009). Affordances and limitations of immersive participatory augmented reality simulations for teaching and learning. *Journal of Science Education and Technology*, 18(1), 7–22. <https://doi.org/10.1007/s10956-008-9119-1>

Fang, C. F., & Ling, D. L. (2003). Investigation of the noise reduction provided by tree belts. *Landscape and Urban Planning*, 63(4), 187–195.

Fasani, E., Manara, A., Martini, F., Furini, A., DalCorso, G., 2018. The potential of genetic engineering of plants for the remediation of soils contaminated with heavy metals. *Plant, cell & environment* 41 (5), 1201–1232 .

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). Soil Pollution: A Hidden Reality. Retrieved from: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/I9183EN>

Fredrickson, J. K., Zachara, J. M., Kennedy, D. W., et al. (2004). *Geobacter metallireducens* reduces uranium and promotes its immobilization. *Environmental Science & Technology*, 38(7), 2149–2154.

Gadd, G. M. (2010). Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation. *Microbiology*, 156(3), 609–643. <https://doi.org/10.1099/mic.0.037143-0>

Ganiyu, S.O., Sable, S., El-Din, M.G., 2022. Advanced oxidation processes for the degradation of dissolved organics in produced water: A review of process performance, degradation kinetics, and pathway. *Chemical Engineering Journal* 429, p.132492.

Ghosal, D., Ghosh, S., Dutta, T. K., & Ahn, Y. (2016). Current state of knowledge in microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): A review. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1369. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01369>

Hartman A (2024). Bioremediation: Nature's Eco-Conscious Cleanup Strategyn. *Adv Genet Eng*.13:282.

Haritash, A. K., & Kaushik, C. P. (2009). Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): A review. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1–3), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.137>.

Herlina.M, Fitriani.A, Lubis.R. (2024).Development of a Microbiology Practical Guide Based on Augmented Reality Technology on Virus Material, DOI: 10.35445/alishlah.v16i4.4952

Knop, E., Zoller, L., Ryser, R., et al. (2017). Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature*, 548(7666), 206–209.

Kumar, M., & Gopal, M. (2021). Microbial Bioremediation: A Sustainable Tool for Environmental Cleanup. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101693. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101693>.

Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., Han, W., 2019. A review on heavy metals contamination in soil: effects, sources, and remediation techniques. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* 28 (4), 380–394.

Liang, Y., Jiao, S., Wang, M., Yu, H., Shen, Z., 2020. A CRISPR/Cas9-based genome editing system for *Rhodococcus ruber* TH. *Metabolic engineering* 57, 13–22.





- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., et al. (2006). Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181–5192.
- Martínez-García, M., Andrés, M. A., & Andreu, A. (2020). Visualizing the invisible: Towards using immersive technologies to foster environmental stewardship. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 23.
- Meckenstock, R. U., Elsner, M., Griebler, C., et al. (2015). Biodegradation: updating the concepts of control for microbial cleanup in contaminated aquifers. *Environmental Science & Technology*, 49(12), 7073–7081.
- Plewniak, F., Crognale, S., Rossetti, S., Bertin, P.N., 2018. A genomic outlook on bioremediation: the case of arsenic removal. *Frontiers in microbiology* 9, p.820.
- Pointing, S. B. (2001). Feasibility of bioremediation by white-rot fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 57(1–2), 20–33. <https://doi.org/10.1007/s002530100754>
- Priya, A.K., Nagan, S., 2015. Remediation of heavy metals from electroplating effluent using bacterial strains in up flow immobilized column reactor. *Journal of Pure and Applied Microbiology* 9 (2), 1411–1416.
- Rhea, L.K., Clark, C., 2022. Management of large dilute plumes of chloroethenes and 1, 4-dioxane via monitored natural attenuation (MNA) and MNA augmentation. *Remediation Journal*.
- Sharma, P, Bano.A, Pratap Singh.S, Kishore Dubey. N, Chandra. R, Iqbal.H.M.N.(2022) Recent advancements in microbial-assisted remediation strategies for toxic contaminants
- Sharma, P., Kumar, S., 2021f. Bioremediation of heavy metals from industrial effluents by endophytes and their metabolic activity: Recent advances. *Bioresource Technology* 339, 125589 .
- Sharma, P., Kumar, S., Pandey, A., 2021g. Bioremediated techniques for remediation of metal pollutants using metagenomics approaches: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (4), p.105684 .
- Singh, R., & Strong, P. J. (2022). Bioremediation: Current Applications and Emerging Trends. *Frontiers in Microbiology*, 13, 872695. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.872695>.
- Singh, J., & Chandra, R. (2019). Pollution control biotechnology. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 1335–1355. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00865-6>
- United Nations Environment Programme (UNEP, 2021), Food and Agriculture Organization (FAO, 2021), U.S. Environmental Protection Agency (EPA, 2023)
- United Nations Environment Programme (UNEP, 2021). Water Pollution. Retrieved from: <https://www.unep.org/explore-topics/water/what-we-do/addressing-water-pollution>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2023). Bioreactors and Biofilters for Air Pollution Control. Retrieved from: <https://www.epa.gov/air-research/bioreactors-and-biofilters-air-pollution-control>
- Varjani, S. J. (2017). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource Technology*, 223, 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>
- Vidali, M. (2001). Bioremediation. An overview. *Pure and Applied Chemistry*, 73(7), 1163–1172.





Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 61–69.

Zeyaulah, M., et al. (2023). Advances in Bioremediation Approaches: Recent Developments and Future Prospects. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27790-z>.
https://en.wikipedia.org/wiki/Archaea?utm_source=chatgpt.com

https://www.britannica.com/science/microbiology/Types-of-microorganisms?utm_source=chatgpt.com

preprints.org

pmc.ncbi.nlm.nih.gov

nature.com

https://gosharpener.com/blogs/710991/Environmental-Pollution?lang=de_de

<https://www.who.int/health-topics/air-pollution>

<https://www.unep.org/explore-topics/water/what-we-do/addressing-water-pollution>

<https://www.fao.org/documents/card/en/c/I9183EN>

<https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>

<https://www.darksky.org/light-pollution/>

<https://www.epa.gov/nps/nonpoint-source-urban-areas>

<https://www.iaea.org/topics/radioactive-contamination>

pmc.ncbi.nlm.nih.govfrontiersin.org

en.wikipedia.org

<https://editverse.com/bioremediation-using-nature-to-clean-up-pollution/>

wired.comtos.org+1wired.com+1

timesofindia.indiatimes.com

reuters.com+1bassconnections.duke.edu+1

pubs.rsc.org

mdpi.comresearchgate.net

pollution.sustainability-directory.com





Co-funded by
the European Union

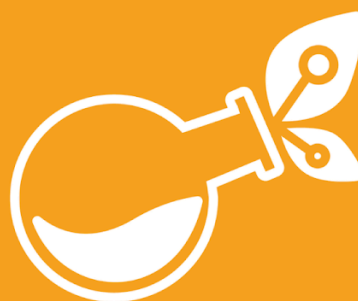
prism.sustainability-directory.com

ejmste.com/academic.oup.com





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.