



Co-funded by
the European Union

Dal laboratorio al campo: come gli scienziati testano il biorisanamento microbico negli ecosistemi reali



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."

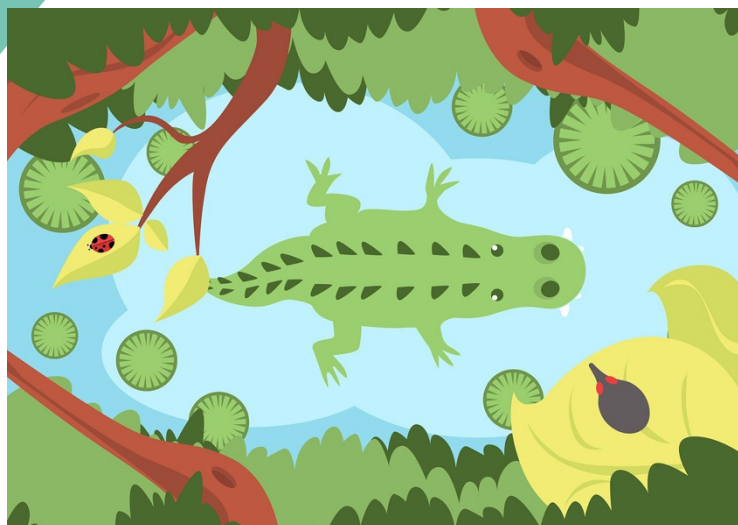




SOMMARIO

· Introduzione.....	2
· Perché i test sul campo sono essenziali.....	3
· Dal successo in laboratorio alla strategia sul campo.....	4
· Casi di studio reali	8
· Integrazione della realtà aumentata nei test sul campo di biorisanamento microbico.....	10
· Esempi concreti di realtà aumentata in campi ambientali o biorelativi.....	12
· Risorse.....	19





Argomento generale del percorso di apprendimento	Biorisanamento e bonifica ambientale mediante microrganismi (soluzioni bio-ispirate)
Nome specifico dell'unità di apprendimento	<i>Dal laboratorio al campo: come gli scienziati testano la bonifica microbica negli ecosistemi reali</i>
Età dell'utente target	14–18 anni
Prerequisiti per gli studenti	Conoscenza di base di biologia, chimica, scienze ambientali
Descrizione dell'unità di apprendimento	Questa unità introduce gli studenti alla biorisanamento microbico nel mondo reale. Utilizzando strumenti di realtà aumentata, gli studenti esplorano come gli scienziati progettano, monitorano e valutano la bonifica microbica, dalle condizioni di laboratorio a quelle di siti realmente inquinati. L'attenzione si concentra sull'ecologia microbica, sulla dinamica degli inquinanti e sull'uso della visualizzazione aumentata per comprendere i processi ambientali.
Soggetti coinvolti	Biologia, Chimica, Scienze Ambientali, Tecnologia
Parole chiave	Biorisanamento, Microbi, Bio-ispirato, Realtà Aumentata, Test sul Campo, Ripristino Ambientale, STEM, Visualizzazione
Competenze, abilità e conoscenze chiave da acquisire	- Comprensione dei ruoli microbici nella degradazione degli inquinanti - Visualizzazione della biorisanamento tramite AR - Interpretazione dei dati ambientali - Risoluzione dei problemi e pensiero sistemico in contesti ecologici - Progettazione di semplici modelli di bonifica potenziati dalla AR
Risorse e strumenti didattici utilizzati	Letteratura scientifica (ad esempio, AEM, Frontiers), strumenti di realtà aumentata didattica (ad esempio, JigSpace, Merge Cube), casi di studio ambientali, gite scolastiche virtuali, dati di simulazione
Criteri di valutazione e valutazione	Valutazione tramite attività basate sulla realtà aumentata: visualizzazione dell'inquinamento, simulazione dell'attività microbica, quiz sui percorsi di degradazione e feedback riflessivo su scenari virtuali dal laboratorio al campo





Introduzione:

Oltre la piastra di Petri: test di bonifica microbica nel mondo reale

<https://www.theguardian.com/environment/2023/sep/28/plastic-eating-bacteria-enzyme-recycling-waste>

Quando pensiamo alla scienza in azione, spesso immaginiamo camici bianchi, microscopi e piastre di Petri, ambienti puliti e controllati dove le scoperte vengono fatte in condizioni perfette. E sebbene questa sia una parte importante del processo scientifico, risolvere problemi del mondo reale come l'inquinamento richiede più del semplice successo in laboratorio. È qui che entra in gioco la sperimentazione sul campo, prendendo ciò che funziona in laboratorio e verificando se sopravvive e ha successo in natura.





Uno degli strumenti più entusiasmanti della scienza ambientale odierna è il biorisanamento, un processo in cui minuscoli organismi viventi come batteri e funghi vengono utilizzati per ripulire gli ambienti inquinati. Questi microbi possono "mangiare" sostanze nocive, come petrolio, metalli pesanti o sostanze chimiche tossiche, e trasformarle in materiali innocui. In laboratorio, i ricercatori hanno scoperto centinaia di specie microbiche in grado di digerire un'ampia gamma di sostanze, tra cui gasolio, cromo e composti di uranio (Lovley et al., 2022). Ma questi stessi microbi possono sopravvivere in un fiume inquinato, in una foresta contaminata o in un sito di rifiuti tossici? Questa è la grande domanda.

La natura è imprevedibile. Condizioni come la temperatura, la luce solare, il flusso dell'acqua e la presenza di altri organismi influenzano il comportamento dei microbi al di fuori del laboratorio. Anche se un microbo è molto bravo a scomporre gli inquinanti in una capsula di Petri, potrebbe non funzionare affatto se rilasciato in un lago o nel terreno. Ad esempio, *Alcanivorax borkumensis*, un batterio marino naturale, prospera nell'acqua di mare contaminata dal petrolio e aiuta a degradare gli idrocarburi, ma solo in condizioni specifiche di temperatura e nutrienti (Yakimov et al., 2007). Ecco perché gli scienziati devono testare strategie di biorisanamento in ecosistemi reali, attraverso esperimenti su piccola scala chiamati studi pilota o prove sul campo.

Questi studi aiutano i ricercatori a capire se i microbi scelti sono efficaci, sicuri e in grado di sopravvivere in condizioni naturali. Ad esempio, i ricercatori hanno condotto esperimenti sul campo a Rifle, in Colorado, utilizzando *Geobacter* specie per ridurre la contaminazione da uranio nelle falde acquifere iniettando loro nutrienti semplici come l'acetato (Anderson et al., 2003). In un altro progetto in Italia, gli scienziati hanno creato una "bio-barriera" in una falda acquifera per testare la riduzione del cromo esavalente (Cr VI) nelle falde acquifere utilizzando microbi presenti in natura (Beccari et al., 2010). Questi esperimenti nel mondo reale forniscono preziose informazioni su come il biorisanamento possa essere applicato in modo sicuro ed efficace su larga scala.

In questa unità, scoprirete come gli scienziati portano i microbi dal laboratorio al campo e come preparano, testano e monitorano con cura gli interventi di bonifica microbica. Esplorerete anche casi di studio reali in cui la biorisanamento ha contribuito a ripristinare aree inquinate e apprenderete le sfide che i ricercatori affrontano quando si occupano di ambienti naturali complessi. Soprattutto, vedrete come questo lavoro stia plasmando un futuro più pulito e sostenibile e come la scienza si stia muovendo oltre il laboratorio per soddisfare le esigenze del nostro pianeta (Singh et al., 2023).

2. Perché i test sul campo sono essenziali

Prima di qualsiasi utilizzo su larga scala di microbi per ripulire l'inquinamento, gli scienziati devono testarli fuori dal laboratorio in condizioni reali. Questo processo è chiamato **test sul campo**, ed è un passo cruciale per garantire che il biorisanamento sia efficace e sicuro quando applicato ad ambienti naturali come fiumi, laghi, suolo o persino fonti d'acqua sotterranee. I test sul campo forniscono risposte a domande chiave: *I microbi sopravviveranno? Si comporteranno allo stesso modo sia sul campo che in laboratorio? Potrebbero esserci conseguenze inaspettate?*





2.1. Laboratorio vs. Campo: ambienti controllati vs. complessi

In laboratorio, gli scienziati possono controllare quasi tutto: temperatura, pH, umidità, nutrienti e tipo di inquinante. Ma la natura è molto più caotica. Sul campo, i microbi possono trovarsi ad affrontare:

- **Temperature fluttuanti**(che influenzano l'attività metabolica),
- **Bassi livelli di nutrienti**(che riducono la crescita microbica),
- **Presenza di microrganismi autoctoni**(che possono competere o interferire),
- **Concentrazioni variabili di inquinanti**(che potrebbe essere troppo alto o troppo basso per la degradazione),
- **barriere fisiche**come particelle di terreno o mancanza di ossigeno (soprattutto nel sottosuolo o sott'acqua).

Per esempio, *Pseudomonas putida*, un batterio spesso utilizzato nella ricerca sul biorisanamento, scompone efficacemente petrolio e solventi nelle colture di laboratorio. Tuttavia, nei terreni di campo con contaminanti misti, la sua efficienza può diminuire a causa della competizione con le comunità microbiche locali e dell'apporto irregolare di ossigeno (Cases & de Lorenzo, 2005).

2.2. Comprendere la biodisponibilità nel mondo reale

In laboratorio, gli inquinanti sono spesso in forma disciolta o accessibile, ma in natura possono essere intrappolati nelle particelle del terreno o nascosti negli strati di sedimenti. Questo li rende più difficili da "raggiungere" e scomporre per i microbi. Questo concetto è noto come **biodisponibilità**, che si riferisce all'accessibilità di un inquinante all'azione microbica.

Ad esempio, il petrolio intrappolato nei sedimenti finì dopo una fuoriuscita è molto più difficile da pulire rispetto al petrolio che galleggia sull'acqua, perché i microbi non riescono ad accedervi facilmente (Prince et al., 2013). Nei test sul campo, gli scienziati devono valutare non solo la capacità del microbo, ma anche se l'inquinamento è fisicamente disponibile per essere degradato.

2.3. Monitoraggio della sicurezza e dell'impatto ambientale

Una ragione critica per i test sul campo è **garantire la sicurezza**. Anche se un microbo scompone gli inquinanti, potrebbe avere effetti collaterali indesiderati:

- Potrebbe superare in competizione le specie autoctone.
- Potrebbe produrre sottoprodotti nocivi.
- Potrebbe diffondersi oltre l'area prevista.

I test sul campo consentono ai ricercatori di monitorare questi risultati e limitare la diffusione o l'impatto dei microbi introdotti. Ad esempio, i ricercatori testano i microbi geneticamente modificati (OGM) solo in siti sicuri e soggetti a rigide normative, prima di considerare un uso più ampio (Ghosal et al., 2016).

3. Dal successo in laboratorio alla strategia sul campo

Trasferire un metodo di bonifica microbica dal laboratorio a un sito inquinato è molto più di un semplice ampliamento. Richiede un'attenta pianificazione e test per garantire che i microbi funzionino efficacemente in condizioni reali. I test su scala reale comprendono diverse fasi: dalla selezione di un sito contaminato e dalla preparazione dei microbi, alla loro distribuzione, al monitoraggio della loro attività nel tempo e alla valutazione dei risultati. Questi passaggi aiutano a verificare se i microbi possono prosperare al di fuori di ambienti controllati, interagire correttamente con le comunità autoctone e ridurre effettivamente l'inquinamento in ambienti complessi.

Diversi studi recenti sottolineano l'importanza di questo processo. Esperimenti sul campo in falde acquifere inquinate dall'uranio hanno dimostrato che stimolare l'attività delle piante native *Geobacter* Le specie possono ridurre i livelli di uranio solubile a limiti di sicurezza (turn0search0, turn0search6). Analogamente, il biopiling su scala pilota per terreni contaminati da IPA dimostra che la bonifica





microbica può essere efficace ed economica, sebbene barriere specifiche del sito come la struttura del suolo e il clima influenzino significativamente i risultati (turn0search1, turn0search9). Queste intuizioni confermano che le prove sul campo sono vitali per comprendere la variabilità, la biodisponibilità, le dinamiche microbiche e la sicurezza ecologica.

Nelle sezioni che seguono, esplorerai come gli scienziati progettano e realizzano un programma di test sul campo, suddiviso in fasi essenziali. La tabella seguente presenta queste fasi con chiarezza e, in seguito, ciascuna di esse viene spiegata in modo più approfondito con ulteriori sottoargomenti per arricchire l'apprendimento.

3.1. Fasi dei test su scala di campo: tabella di panoramica

Fare un passo	Sottoargomenti	Scopo
A. Selezione del sito e valutazione dell'inquinamento	• Profilazione geochimica • Baseline microbica nativa • Analisi della biodisponibilità	Comprendere le condizioni del sito e la presentazione degli inquinanti
B. Selezione o stimolazione dei microbi	• Specie autoctone vs. specie introdotte • Consorzi stimolati • Miglioramenti genetici/ingegnerizzati	Scegli i microbi adatti all'inquinante e all'ecosistema
C. Consegna e condizionamento	• Emendamenti nutritivi (ad esempio, acetato) • Configurazione della biobarriera • Sfruttamento del biofilm	Distribuisce microbi e aumenta la sopravvivenza/attività
D. Monitoraggio e tracciamento	• Campionamento chimico • Strumenti molecolari (DNA/RNA) • Cambiamenti nella comunità e valutazione PICT	Monitorare il declino degli inquinanti e il comportamento microbico
E. Valutazione e ridimensionamento dei risultati	• Metriche di riduzione degli inquinanti • Impatto sulla sicurezza/ecologico • Pianificazione dell'ampliamento	Misurare il successo e guidare l'applicazione futura

3.2. Spiegazione estesa e sottoargomenti

A. Selezione del sito e valutazione dell'inquinamento

L'identificazione di un sito di intervento per il biorisanamento richiede un'indagine approfondita. Gli scienziati iniziano con la profilazione geochimica, esaminando parametri del suolo o delle acque sotterranee come pH, ossigeno disciolto, potenziale redox e contenuto di nutrienti, che determinano se i microbi possono sopravvivere e degradare i contaminanti (Madison et al., 2022). Stabiliscono inoltre una base microbica sequenziando i geni dell'rRNA 16S per rivelare popolazioni native, inclusi batteri in grado di degradare solventi clorurati o idrocarburi petroliferi (Madison et al., 2022). Un altro passaggio fondamentale è la valutazione della biodisponibilità dell'inquinante, ovvero quanto un contaminante è accessibile ai microbi. Le sostanze altamente assorbite nei terreni ricchi di argilla o intrappolate in liquidi in fase non acquosa potrebbero richiedere un miglioramento prima che la biodegradazione possa procedere (Semple et al., 2004).





Insieme, questi passaggi aiutano a selezionare un sito in cui sia le condizioni ambientali sia la presenza microbica supportano una bonifica efficace, evitando fallimenti di prova dovuti alla scarsa idoneità del sito.

B. Selezione o stimolazione dei microbi

Una volta caratterizzato il sito, i ricercatori decidono se introdurre microbi specifici (bioaumento) o rinvigorire i microbi nativi (biostimolazione). Nei siti di acque sotterranee contaminate da solventi clorurati come il TCE, le misurazioni di popolazioni basse ma rilevabili di *Dehalococcoides* (10^1 – 10^2 cellule/mL) hanno guidato l'uso combinato dell'aggiunta di donatori di elettroni e della bioaumento durante i test pilota, garantendo una dechlorazione rapida e completa (Madison et al., 2022). In altri contesti, la stimolazione di organismi indigeni tramite nutrienti come l'acetato si è dimostrata sufficiente. Ad esempio, i dati NGS e la quantificazione qPCR hanno mostrato che i geni coinvolti nella biodegradazione anaerobica (ad esempio, l'alchilsuccinato sintasi) erano 100-1.000 volte più abbondanti dopo la biostimolazione, indicando un'efficace attenuazione naturale dei contaminanti (Madison et al., 2022).

L'uso di consorzi microbici su misura, supportati da dati molecolari, aiuta a garantire che siano attivi più percorsi di degradazione, in particolare per gli inquinanti misti, una strategia che sta guadagnando terreno nei progetti pilota sul campo (Madison et al., 2022).

C. Consegna e condizionamento

La distribuzione dei microbi e la garanzia della loro attività in situ dipendono da solide strategie di distribuzione. Nelle falde acquifere contaminate dall'uranio, le iniezioni periodiche di acetato pompano i donatori di elettroni nei pozzi per alimentare la riduzione di U(VI) guidata da fattori esterni nel corso di mesi (Anderson et al., 2003; Lovley et al., 2005). Le barriere reattive, costituite da zone permeabili di nutrienti, vengono inoltre impiegate per dirigere il flusso delle acque sotterranee attraverso zone ricche di microbi. Nei terreni, vettori come impalcature di biofilm, perle o compost organico supportano la colonizzazione microbica e il contatto con gli inquinanti, fondamentali nelle matrici complesse in cui nutrienti e microbi possono disperdersi in modo non uniforme (Semple et al., 2004). La progettazione dei sistemi di erogazione deve tenere conto della variabilità di porosità, permeabilità e condizioni stagionali per prestazioni di bonifica costanti.





D. Monitoraggio e tracciamento

Il monitoraggio oltre la concentrazione dei contaminanti è essenziale. I team conducono analisi chimiche (ad esempio, livelli di inquinanti, ossigeno disciolto, pH, sottoprodotti metabolici) periodicamente a più profondità e posizioni. Parallelamente, gli strumenti di biologia molecolare (MBT) come la qPCR misurano l'abbondanza di geni funzionali (ad esempio, naftalene succinato sintasi, *gltA* per citrato sintasi), mentre i test basati sull'RNA riflettono il metabolismo microbico attivo (Madison et al., 2022)

In particolare, gli aumenti nelle trascrizioni del gene della citrato-sintasi di *Geobacter* (*gltA*) seguono da vicino l'attività di rilascio dell'acetato e di riduzione dell'uranio durante le distribuzioni sul campo (Methe et al., 2005; Holmes et al., 2007). I ricercatori monitorano anche i marcatori dello stress ossidativo per garantire che le condizioni anaerobiche siano mantenute e che la degradazione microbica non sia inibita dall'afflusso di ossigeno (Holmes et al., 2007).

E. Valutazione e ridimensionamento dei risultati

L'analisi delle metriche di riduzione degli inquinanti, come il tempo necessario per la conformità normativa, aiuta a valutare la fattibilità del campo. Ad esempio, i livelli di uranio sono scesi al di sotto delle soglie di sicurezza entro circa 40 giorni dalla stimolazione con acetato (Lovley et al., 2005). Il monitoraggio ecologico parallelo, inclusi i cambiamenti nella diversità microbica, la resilienza della comunità nativa e l'assenza di sottoprodotti tossici, conferma il ripristino dell'ecosistema (Xiong et al., 2025). Se le prove sul campo hanno successo, la pianificazione per l'implementazione su larga scala considera le dinamiche del flusso stagionale, la logistica dei nutrienti, le approvazioni normative e l'accettazione delle parti interessate. I risultati sul campo forniscono informazioni per l'analisi costi-benefici e i requisiti di monitoraggio a lungo termine.

Per comprendere meglio come pianificare e ottimizzare la biorisanamento microbico su scala di campo, i ricercatori spesso esplorano concetti avanzati ed emergenti che migliorano la precisione e l'efficacia delle strategie di bonifica. Questi argomenti aggiuntivi rappresentano approcci scientifici all'avanguardia e offrono un contesto più ampio per gli studenti interessati all'innovazione ambientale.

a. Trasporto microbico e bioconvezione

In molti siti contaminati, in particolare nei terreni e nelle falde acquifere sotterranee, i microbi non rimangono semplicemente dove sono collocati. Si muovono, a volte tramite il flusso passivo nell'acqua, altre volte tramite la loro stessa motilità. **Bioconvezione** si riferisce al movimento delle popolazioni microbiche in risposta ai gradienti di ossigeno o chimici. Questi flussi auto-organizzati possono aiutare i microbi a raggiungere inquinanti più profondi o più inaccessibili.

Comprendere come i microbi si muovono attraverso materiali porosi come sabbia o argilla aiuta gli scienziati a progettare sistemi di iniezione migliori o a scegliere ceppi microbici con maggiore mobilità.





Ad esempio, recenti studi di modellazione hanno esplorato il modo in cui i batteri si distribuiscono nelle falde acquifere per ottimizzare la degradazione dei contaminanti, evidenziando l'importanza della fluidodinamica nella bonifica microbica (Banerjee et al., 2024).

b. I biofilm come strategia sul campo

I microbi spesso si attaccano alle superfici e formano **biofilm**, sottili strati di comunità microbiche racchiuse in una matrice protettiva. In campo aperto, i biofilm possono essere utilizzati strategicamente: aiutano i microbi a rimanere in loco, a resistere allo stress ambientale e a interagire più efficacemente con gli inquinanti. Gli approcci basati sui biofilm sono comunemente utilizzati nel trattamento delle acque reflue e sono ora in fase di sperimentazione nella bonifica di suoli e sedimenti.

Nei sistemi a biobarriera, ad esempio, i microbi formano biofilm lungo le pareti permeabili del sottosuolo. Man mano che le acque sotterranee contaminate fluiscono attraverso il biofilm, i microbi presenti nel biofilm degradano inquinanti come metalli pesanti o idrocarburi. Questo approccio è particolarmente utile quando è necessaria una bonifica a lungo termine o passiva in aree estese o difficili da raggiungere.

c. Tolleranza della comunità indotta dall'inquinamento (PICT)

Gli scienziati usano anche un metodo chiamato **Tolleranza comunitaria indotta dall'inquinamento (PICT)** per valutare come le comunità microbiche in ambienti inquinati si adattano nel tempo. Questo concetto aiuta i ricercatori a valutare la salute e la resilienza dell'ecosistema e a determinare se i microbi introdotti sul campo stanno modificando l'equilibrio microbico nativo in modi involontari.

Ad esempio, se una comunità microbica del suolo nativo diventa più tollerante a un inquinante nel tempo, ciò potrebbe indicare un adattamento riuscito o uno stress ambientale in corso. L'analisi PICT aiuta gli scienziati a monitorare l'evoluzione microbica e garantisce che l'ecosistema si stia effettivamente riprendendo, non solo diventando resistente.

d. Strumenti multi-omici per l'analisi sul campo

La scienza ambientale moderna si basa sempre più su **multi-omica**, una combinazione di genomica, trascrittomica, proteomica e metabolomica, per comprendere quali microbi sono presenti, quanto sono attivi e quali sostanze chimiche producono. Questi strumenti consentono agli scienziati di monitorare non solo la sopravvivenza dei microbi sul campo, ma anche il loro comportamento in tempo reale.

Ad esempio, uno studio recente ha utilizzato il sequenziamento del DNA ambientale (eDNA) e dell'RNA per monitorare l'attività microbica durante la biorisanamento di terreni contaminati da petrolio. Queste tecniche aiutano a garantire che i microbi non solo siano presenti, ma che scompongano attivamente gli inquinanti e non producano sottoprodotti nocivi durante il processo.

e. Modellazione e simulazione predittiva

Prima dell'implementazione su larga scala, gli scienziati utilizzano **simulazioni al computer e modelli predittivi** per prevedere il comportamento dei microbi in diverse condizioni ambientali. Questi modelli tengono conto di fattori come il flusso dell'acqua, i livelli di nutrienti, la temperatura e la concentrazione di inquinanti.

Tali strumenti aiutano a progettare studi pilota migliori identificando le condizioni ideali per la crescita e l'attività microbica. Ad esempio, le simulazioni possono prevedere se una strategia di iniezione di nutrienti raggiungerà la zona contaminata o si disperderà troppo rapidamente. Combinando dati di laboratorio e misurazioni ambientali, i modelli predittivi riducono l'incertezza e migliorano i tassi di successo.

Passare dal laboratorio al campo è un percorso complesso ma essenziale nella biorisanamento.

Ogni fase, dalla scelta del sito e dei microbi più adatti al monitoraggio, all'analisi dei risultati e alla pianificazione dell'espansione, garantisce che l'approccio di bonifica sia scientificamente





solido, ecologicamente sicuro e praticamente efficace in contesti naturali imprevedibili. L'integrazione di sottotemi come il trasporto microbico e l'omica aiuta a mostrare come strumenti avanzati possano perfezionare ulteriormente questo processo.

4. Casi di studio reali

Prima di addentrarci in esempi specifici, è importante comprendere lo scopo dello studio di progetti concreti di biorisanamento microbico:

Casi di studio reali forniscono prove concrete di come le strategie di biorisanamento vengono progettate, implementate e valutate in condizioni ambientali complesse. Svela cosa funziona, quali sono le sfide e come gli scienziati adattano i metodi agli ecosistemi locali.

Di seguito troverete due progetti sul campo ben documentati, uno incentrato sulle falde acquifere contaminate dall'uranio e l'altro sulla bonifica delle fuoriuscite di petrolio in mare, entrambi in cui viene illustrato come i microbi siano stati utilizzati con successo per affrontare reali problemi di inquinamento.

Caso di studio 4.1: Acque sotterranee contaminate da uranio in una falda acquifera interessata da attività minerarie

- **Problema e posizione:** Le falde acquifere precedentemente interessate dalle attività di estrazione dell'uranio contenevano livelli pericolosamente elevati di uranio solubile (U(VI)), che rappresentavano rischi per la salute umana e per gli ecosistemi.
- **Approccio:** Gli scienziati hanno stimolato i nativi *Geobacter* specie, in particolare *Geobacter metallireducens*, iniettando acetato come donatore di elettroni nell'acquifero (turn0search21). Ciò ha migliorato la riduzione microbica di U(VI) a U(IV) meno solubile, che precipita fuori dalle falde acquifere.
- **Risultati:** Entro circa 40 giorni, i pozzi a valle hanno mostrato livelli di uranio ridotti al di sotto dei livelli di rischio sanitario normativi, mentre i pozzi a monte sono rimasti invariati, evidenziando l'efficacia regionale (turn0search21). Il monitoraggio biometrico e molecolare ha confermato l'aumento dell'attività di *Geobacter*, in particolare l'espressione dei geni di risposta allo stress come *coE* e *sodA* (turn0search6, turn0search14).
- **Significato:** Questa sperimentazione pilota sul campo ha confermato che la stimolazione delle popolazioni microbiche autoctone può immobilizzare l'uranio in situ in modo sicuro ed efficace, con un impatto ecologico minimo.

Caso di studio 4.2: Biorisanamento delle fuoriuscite di petrolio in mare nel Golfo del Messico

- **Problema e contesto:** Durante la fuoriuscita di petrolio della Deepwater Horizon, la contaminazione diffusa di idrocarburi ha minacciato la fauna marina, gli ecosistemi costieri e la pesca locale.
- **Approccio:** In seguito alla fuoriuscita, il monitoraggio microbico ha mostrato un aumento dei batteri autoctoni che degradano il petrolio, in particolare *Alcanivorax borkumensis* e *Oleispira antarctica*. La loro crescita è stata ulteriormente migliorata dall'aggiunta di nutrienti (azoto e fosforo) per supportare le comunità microbiche produttrici di biosurfattante (turn0search1, turn0search26, turn0search22).





- **Risultati:** Queste popolazioni native sono rapidamente diventate dominanti nelle zone colpite, accelerando la degradazione degli idrocarburi. Studi sul campo hanno confermato l'efficace degradazione dei contaminanti senza l'introduzione di specie estranee (turn0search1, turn0search7).
- **Significato:** Questo progetto ha dimostrato che i batteri marini autoctoni, se stimolati correttamente, possono svolgere un ruolo importante nella pulizia delle fuoriuscite di petrolio in modo naturale e sostenibile.

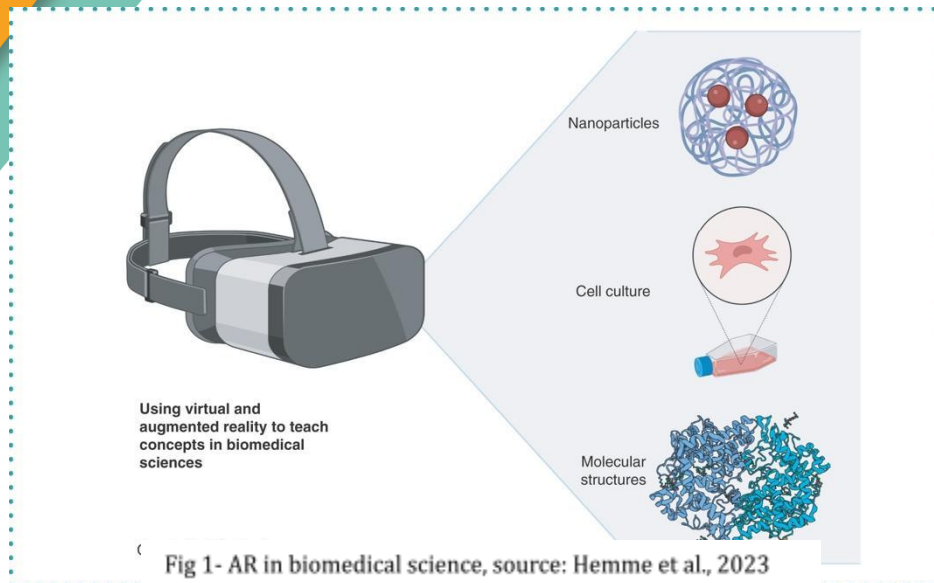
Questi due esempi concreti evidenziano come le strategie di biorisanamento siano personalizzate in base a specifici inquinanti ed ecosistemi. In entrambi i progetti, gli scienziati hanno lavorato con comunità microbiche autoctone, stimolando e monitorando le loro attività naturali per ottenere risultati di bonifica misurabili in modo sicuro ed economico. Casi di studio sul campo come questi permettono agli studenti di vedere come biologia, chimica e scienze ambientali si uniscano per risolvere i problemi di inquinamento.

Stimolazione in situ di *Geobacter* specie per rimuovere l'uranio: dimostrazione sul campo (2003) inclusa l'espressione genica di *E. coli* (Lovley e altri)

- Studio sul campo che mostra *Alcanivorax borkumensis* dominanza e attività nelle zone di fuoriuscita di petrolio in mare (post-Deepwater Horizon)
- Revisione dei meccanismi di biorisanamento degli idrocarburi e della risposta microbica in eventi di fuoriuscita di petrolio reali [Frontiere+15PMC+15PMC+15](#)
- Di più su *G. metallireducens* riduzione dell'uranio e del vanadio nelle falde acquifere inquinate (riassunto di Wikipedia) [NRC Web+13Wikipedia+13ScienceDirect+13](#)

Integrazione della realtà aumentata nei test sul campo di biorisanamento microbico





Con il passaggio delle strategie di biorisanamento microbico dalle configurazioni di laboratorio ad ambienti complessi sul campo, gli scienziati devono affrontare diverse sfide: monitorare il comportamento microbico in situ, comunicare dati spaziali e temporali alle parti interessate e garantire la sicurezza dell'ecosistema. La realtà aumentata (AR) viene sempre più esplorata come interfaccia digitale in grado di migliorare la visualizzazione, il monitoraggio in tempo reale e l'interpretazione dei dati nelle scienze ambientali. Mentre l'AR è stata ampiamente applicata nell'educazione ambientale e nel monitoraggio industriale, il suo utilizzo nel biorisanamento microbico sta emergendo, supportato dai progressi nell'integrazione dei dati geospaziali, nella visualizzazione omica e nelle interfacce digitali basate sul campo.

1. AR per visualizzare l'attività microbica e la degradazione degli inquinanti

La realtà aumentata può aiutare gli scienziati a visualizzare le interazioni microbiche con gli inquinanti in 3D, sovrapposto ad ambienti reali. Nelle prove sul campo, è fondamentale comprendere dove e come operano i microbi, soprattutto nei sistemi sotterranei o acquatici. Ad esempio, durante la biorisanamento dell'uranio in situ, è fondamentale la comprensione spaziale delle zone in cui *Geobacter* le specie sono attive è fondamentale per valutare il successo della bonifica.

Gli studi hanno dimostrato che la realtà aumentata può essere utilizzata per sovrapporre dati geospaziali ambientali, come concentrazioni di inquinanti, flusso delle falde acquifere o distribuzione dei nutrienti, in punti fisici utilizzando tablet o occhiali AR (Silva & Gültekin, 2021). Ciò consente ai ricercatori sul campo di "vedere" dove si prevede che l'attività microbica raggiunga il picco e aiuta a correlare le prestazioni di degradazione con variabili ambientali come pH, potenziale redox o biodisponibilità.

2. Integrazione AR e Multi-Omics nel monitoraggio sul campo

Una delle sfide chiave nei test sul campo è l'interpretazione di dati multi-omici (ad esempio, metagenomica, trascrittomica) raccolti da pozzi di campionamento e carote di suolo. Tradizionalmente,





questi set di dati vengono analizzati in laboratorio e visualizzati su computer. Tuttavia, **La realtà aumentata può consentire la visualizzazione in tempo reale e in base alla posizione dell'espressione genica microbica** spostamenti della popolazione.

Ad esempio, utilizzando un'interfaccia AR, i ricercatori potrebbero puntare un dispositivo verso un pozzo di monitoraggio e visualizzare l'abbondanza relativa di geni associati alla riduzione dell'uranio (ad esempio, *co,soda*) o percorsi di degradazione degli idrocarburi nei suoli contaminati da petrolio (Guo et al., 2023). Questo approccio non solo supporta l'interpretazione spaziale di dati microbici complessi, ma facilita anche la collaborazione tra team sul campo e analisti di laboratorio.

Studi recenti in ecologia microbica hanno sottolineato i benefici della realtà aumentata in **presentazione dei dati metagenomici nel contesto**, migliorando la comunicazione scientifica e consentendo un processo decisionale più intuitivo durante il monitoraggio del sito (Wang et al., 2022).

3. AR per la valutazione del rischio e la sicurezza ecologica

I test microbici su scala di campo devono affrontare problemi ecologici e di sicurezza, soprattutto quando sono coinvolti organismi geneticamente modificati (OGM). La realtà aumentata può fornire un'immagine **mappa dei rischi** per evidenziare:

- Aree di potenziale sovracrescita microbica,
- Zone marginali in cui i microbi introdotti potrebbero diffondersi,
- Punti critici di degradazione o zone di sottoprodotti tossici.

Questo approccio rispecchia l'uso della realtà aumentata in ambito sanitario e di biosicurezza, dove sovrapposizioni in tempo reale vengono utilizzate per tracciare le zone di contaminazione (ad esempio, Clean-AR per la mappatura del rischio aerodisperso negli ospedali; Schmidt et al., 2021). Adattare questa strategia alla biorisanamento ambientale potrebbe migliorare la risposta sul campo e la pianificazione del contenimento.

4. Comunicazione supportata dalla realtà aumentata e coinvolgimento degli stakeholder

I progetti di biorisanamento su larga scala spesso coinvolgono più parti interessate: scienziati, enti di regolamentazione ambientale, proprietari terrieri e comunità locali. **La realtà aumentata si è dimostrata efficace come strumento di comunicazione scientifica**, consentendo anche ai non specialisti di comprendere strategie di bonifica complesse (Garzón et al., 2019).

Negli studi pilota, la realtà aumentata è stata utilizzata per **sovrapporre i progetti di intervento sul campo proposti**. Come le zone di biobarriera o i pozzi di iniezione dei nutrienti, su mappe fisiche o in contesti reali. Ciò consente alle parti interessate di visualizzare i potenziali risultati, valutare le tempistiche di ripristino del sito e partecipare in modo significativo al processo di ricerca.

Sebbene ancora emergente nel campo della biorisanamento microbico, **Le tecnologie AR sono pronte a migliorare significativamente le operazioni su scala di campo**, soprattutto se integrata con dati omici, analisi geospaziali e monitoraggio ecologico. Queste applicazioni si adattano bene alla transizione "dal laboratorio al campo", rendendo i processi biologici e chimici invisibili accessibili, misurabili e comprensibili in tempo reale. Mentre la ricerca ambientale continua a digitalizzarsi e democratizzarsi, la realtà aumentata si distingue come uno strumento promettente per supportare sia il rigore scientifico che la trasparenza pubblica.

5. Esempi concreti di realtà aumentata in campi ambientali o biorelativi

La Realtà Aumentata (AR) si è rapidamente evoluta da strumento di coinvolgimento visivo a interfaccia funzionale per il monitoraggio scientifico e il processo decisionale complesso. Nelle scienze ambientali e





nelle biotecnologie, la AR sta iniziando a collegare paesaggi fisici con dati in tempo reale, consentendo a ricercatori, ingegneri e decisori di interagire con processi biologici o chimici invisibili nel sito di interesse.

Mentre le applicazioni dirette della realtà aumentata nella biorisanamento microbico sono ancora in fase di sviluppo, un numero crescente di esempi del mondo reale in **monitoraggio ambientale, controllo dell'inquinamento, visualizzazione dei dati**, E **valutazione del rischio** dimostra il potente potenziale della realtà aumentata nel migliorare i processi "dal laboratorio al campo". Di seguito sono riportati esempi chiave con implicazioni per la bonifica microbica negli ecosistemi reali.

5.1. AR per il monitoraggio ambientale in situ e la visualizzazione dei dati

Panoramica

Il monitoraggio ambientale nei siti sul campo in genere comporta l'installazione di sensori, la raccolta di campioni e l'esecuzione di analisi fuori sede, metodi che spesso ritardano i tempi di risposta e limitano il contesto spaziale. Nel caso del biorisanamento microbico, questo diventa particolarmente problematico, poiché l'attività microbica, le condizioni redox o i gradienti di concentrazione dei contaminanti sono in gran parte invisibili e altamente dinamici. **Realtà aumentata (RA)** affronta queste problematiche consentendo la visualizzazione in tempo reale e spazialmente ancorata dei dati sul campo, consentendo agli scienziati di interagire con le informazioni ambientali proprio nel luogo in cui sono più rilevanti (Wang et al., 2022; Pokrić et al., 2012).

Fig 2. A concept of an HMD-based AR application for visualising water quality, source: Cao et al., 2024

I sistemi AR pos

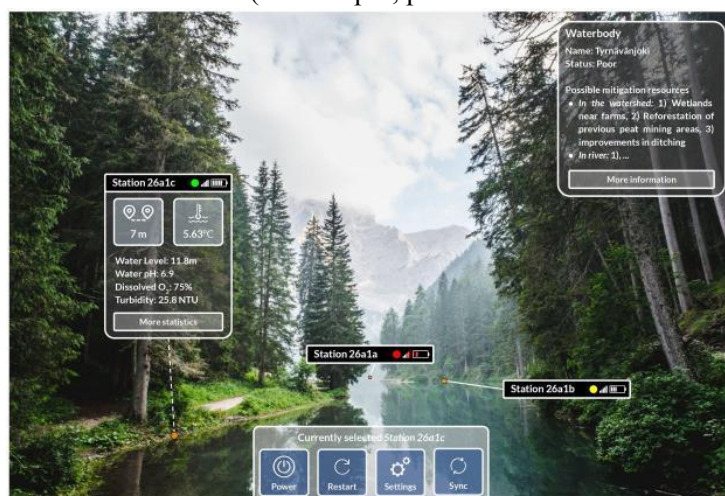
- Dati dei sensori ambientali (ad esempio, pH, ossigeno disciolto, temperatura),
- Layout del sito basati su GIS (ad esempio, zone di origine degli inquinanti),
- Modelli predittivi (ad esempio, COMSOL/MODFLOW),
- Modelli di attività microbica (ad esempio, profili di abbondanza o di espressione genica basati

Ciò consente
ingegneri
dei siti
chimici e
campo
interventi
sull'evidenza

Applicazioni

microbico

Nei progetti di
realtà

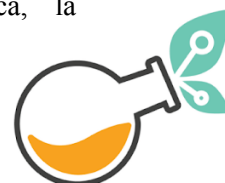


sull'eDNA).

ai ricercatori, agli
ambientali o ai gestori
di "vedere" i processi
biologici sovrapposto al
effettivo, facilitando
tempestivi e basati
(Zhang et al., 2023).

scientifiche nella
biorisanamento

bonifica microbica, la
aumentata può:





- **Visualizza concentrazioni in tempo reale** di contaminanti come uranio, idrocarburi o nitrati direttamente sulla superficie di un campo;
- **Sovrapposizione zone di colonizzazione microbica** (basato su dati qPCR, eDNA o omics) su posizioni di campionamento fisico;
- **Spettacolo zone di biodisponibilità**, dove gli inquinanti sono accessibili o inaccessibili alla degradazione microbica in base alla porosità del suolo o allo stato di legame (Guo et al., 2023);
- **Rappresentare visivamente influenza del pozzo di iniezione**, ad esempio, mostrando come l'acetato si diffonde sottoterra per stimolare *Geobacter* popolazioni (Lovley et al., 2003; Zhang et al., 2023).

Queste applicazioni trasformano il monitoraggio della biorisanamento da reattivo a proattivo: i potenziali guasti possono essere identificati precocemente e gli scienziati ottengono una mappa in tempo reale dell'attività microbica e del comportamento degli inquinanti.

Esempi di sistemi AR nel mondo reale

ekoNET: piattaforma di monitoraggio ambientale abilitata per la realtà aumentata

Sviluppato come sistema di tracciamento dell'inquinamento basato su IoT, **ekoNET** integra la realtà aumentata mobile con sensori ambientali per visualizzare in tempo reale la qualità dell'aria e dell'acqua in loco (Pokrić et al., 2012). Gli utenti scansionano l'ambiente utilizzando dispositivi mobili per visualizzare i livelli di inquinanti come CO₂, NO₂ e torbidità.

Implicazioni per la biorisanamento: Nelle prove microbiche sul campo, una configurazione simile potrebbe essere configurata per visualizzare mappe di:

- Pennacchi di contaminanti sotterranei,
- Zone di diffusione dei nutrienti,
- Barriere reattive potenziate con consorzi microbici.

Visualizzazione delle falde acquifere tramite AR

Zhang et al. (2023) hanno sviluppato uno strumento di realtà aumentata per visualizzare il flusso delle falde acquifere, la dispersione degli inquinanti e le infrastrutture di bonifica utilizzando modelli 3D georeferenziati. Questo sistema ha permesso agli utenti di comprendere le relazioni spaziali tra fonti di contaminazione, zone pulite e zone di attività microbica in siti industriali reali.

Applicazione ai test sul campo: La realtà aumentata potrebbe essere utile nei siti pilota di bonifica microbica mostrando come le concentrazioni di inquinanti cambiano spazialmente dopo l'inoculazione microbica o l'iniezione di nutrienti, direttamente in loco, senza dover consultare piattaforme GIS o attendere i risultati di laboratorio.

Integrazione con modelli omici e di simulazione

La realtà aumentata ha un potenziale crescente per supportare **interpretazione di campo basata su multi-omica**. Wang et al. (2022) hanno dimostrato l'integrazione AR con la metagenomica, consentendo agli utenti di sovrapporre l'espressione genica funzionale (ad esempio, *co*, *alkB*, *narG*) su siti specifici contrassegnati da GPS, producendo visualizzazioni spaziali delle funzioni microbiche.

Rilevanza per le prove microbiche sul campo:

- I team sul campo potrebbero visualizzare in tempo reale l'attività microbica collegata alla degradazione degli inquinanti.
- I dati omici potrebbero essere utilizzati per verificare se i microbi stanno attivamente riducendo i contaminanti o se si limitano a sopravvivere.

Strumenti di simulazione come COMSOL o MODFLOW possono essere utilizzati per prevedere la dispersione dei nutrienti o il trasporto microbico. Se abbinati alla realtà aumentata, questi modelli





possono **risultati attesi del progetto direttamente sul sito**, facilitando la pianificazione di schemi di iniezione e stazioni di monitoraggio (Silva & Gültekin, 2021).

Benefici nella pratica della biorisanamento

1. **Decisioni in tempo reale**
Combinando le visualizzazioni in loco con i dati in tempo reale, i team sul campo possono adattare rapidamente le strategie di biorisanamento (ad esempio, modificando l'iniezione di nutrienti o i piani di campionamento).
2. **Consapevolezza spaziale migliorata**
Visualizzare i gradienti chimici o le zone di abbondanza microbica direttamente sul campo aiuta a indirizzare la bonifica in modo più accurato.
3. **Comunicazione migliorata**
Le parti interessate (ad esempio, proprietari terrieri, enti regolatori) possono comprendere meglio i processi invisibili, creando fiducia e consentendo una comunicazione più chiara del rischio.
4. **Monitoraggio della sicurezza e del contenimento**
La RA può segnalare le zone in cui potrebbe emergere una proliferazione microbica o inquinanti secondari, supportando la biosicurezza nei casi che coinvolgono organismi geneticamente modificati (Schmidt et al., 2021).

5.2. Effluente ricco: modellazione AR delle dinamiche microbiche e chimiche

Sviluppato da Silva & Gültekin (2021), *Effluente ricco* è un'app di realtà aumentata che simula le interazioni ambientali tra inquinanti e popolazioni microbiche. Il modello incorpora:

- Dinamica dei nutrienti,
- Fasi di crescita microbica,
- Tassi di degradazione degli inquinanti.

1. Dinamica dei nutrienti

Definizione:

La dinamica dei nutrienti si riferisce al **movimento, trasformazione, disponibilità e assorbimento dei nutrienti essenziali** (ad esempio, carbonio, azoto, fosforo, ossigeno o donatori di elettroni come l'acetato) che supportano la vita microbica e influenzano la loro attività in ambienti inquinati.

Nel contesto della biorisanamento:

- I microrganismi utilizzati nella bonifica dei campi dipendono dai nutrienti disponibili per crescere e metabolizzare gli inquinanti.
- A volte, i nutrienti sono **naturalmente presente**, ma in molti casi, devono essere **aggiunto artificialmente** (biostimolazione) per favorire la degradazione microbica.
- Ad esempio, nelle falde acquifere contaminate dall'uranio, **acetato** viene iniettato per stimolare *Geobacter* specie, che lo usano come donatore di elettroni per ridurre l'U(VI) solubile in U(IV) insolubile (Lovley et al., 2003).

Nella modellazione AR:

- La dinamica dei nutrienti è visualizzata come **zone di diffusione o gradienti di concentrazione** che cambiano nel tempo.
- Gli studenti o i ricercatori possono vedere come **aree ricche di nutrienti** consentire una maggiore crescita microbica e una maggiore scomposizione degli inquinanti.
- La simulazione può anche mostrare **competizione per i nutrienti**, influenzando quali microbi prevalgono.





2. Fasi di crescita microbica

Definizione:

Le fasi di crescita microbica descrivono il **ciclo a quattro fasche** le popolazioni microbiche seguono tipicamente quando vengono introdotte in un nuovo ambiente o substrato:

1. **Fase di ritardo**– Periodo di adattamento in cui i microbi si adattano alle nuove condizioni (nessuna crescita).
2. **Fase logaritmica (esponenziale)**– Riproduzione rapida grazie all'abbondanza di nutrienti.
3. **Fase stazionaria**– La crescita rallenta man mano che i nutrienti si esauriscono e i rifiuti si accumulano.
4. **Fase della morte**– I microbi muoiono a causa della mancanza di risorse o dell'accumulo di sottoprodotti tossici.

Nel contesto della biorisanamento:

- La comprensione delle fasi di crescita è fondamentale per **tempi di intervento sul campo** come la reinoculazione o la riapplicazione dei nutrienti.
- Ad esempio, se una popolazione microbica si trova nella fase stazionaria, la degradazione degli inquinanti raggiungerà un plateau senza ulteriori azioni.

Nella modellazione AR:

- Queste fasi sono rappresentate visivamente, come **bolle di colonie microbiche in espansione e stabilizzazione** o cambiano colore quando entrano in fasi diverse.
- Gli utenti possono **regolare le condizioni (ad esempio, temperatura, apporto di nutrienti)** e osservare come cambia la fase di crescita, aiutandoli a comprendere il **delicato equilibrio** necessari per una biorisanamento su larga scala di successo.

3. Tassi di degradazione degli inquinanti

Definizione:

Il tasso di degradazione degli inquinanti è il **velocità alla quale uno specifico inquinante viene scomposto o trasformato** in sostanze meno nocive mediante processi microbici o chimici.

Nel contesto della biorisanamento:

- I microbi possono degradare gli inquinanti attraverso:
 - o **Degradazione aerobica** (con ossigeno) – ad esempio, idrocarburi da *Pseudomonas* specie
 - o **Degradazione anaerobica** (senza ossigeno) – ad esempio, uranio o nitrato di *Geobacter* specie
- I fattori che influenzano il tasso di degradazione includono:
 - o Efficienza del ceppo microbico,
 - o Temperatura e pH,
 - o Concentrazione dell'inquinante e forma chimica,
 - o Disponibilità di nutrienti e condizioni redox.

Nella modellazione AR:

- I tassi di degradazione sono rappresentati attraverso **curve di decadimento visivo**, **cambiamenti di colore nel pennacchio di inquinanti**, o **animazioni temporizzate** che mostra quanto inquinante rimane nel tempo.
- Gli utenti possono osservare come le mutevoli condizioni ambientali (ad esempio, l'iniezione di più nutrienti o lo spostamento del pH) influiscono sui tempi di degradazione.

Perché questi tre sono interconnessi

Questi tre processi, **disponibilità di nutrienti**, **crescita microbica**, e **degradazione degli inquinanti**, formare un **ciclo di feedback dinamico** nella biorisanamento:





1. **Disponibilità di nutrienti** colpisce...
2. **Crescita microbica**, che guida...
3. **Degradazione degli inquinanti**, che possono consumare nutrienti e produrre sottoprodotti, influenzando la salute microbica.

La modellazione di questo sistema in AR consente agli utenti di **vedere queste interdipendenze** in azione, offrendo una comprensione più approfondita per scienziati ambientali, studenti o tecnici sul campo.

Caratteristiche principali:

- Visualizza i cambiamenti nella concentrazione chimica nel tempo;
- Simula le risposte microbiche sotto diversi fattori di stress ambientale;
- Funziona su piattaforme AR mobili (ad esempio smartphone, tablet).

Rilevanza per la biorisanamento:

Questa app rappresenta un approccio precoce ma pratico a **AR basata su modelli per la simulazione di processi di bonifica**, aiutando ricercatori o studenti a prevedere i risultati in condizioni di campo. Nei progetti di bonifica reali, tali strumenti possono supportare la pianificazione di schemi di iniezione o ammendanti nutrizionali, mostrando il comportamento microbico previsto nel tempo e nello spazio.

5.3. AR per la consapevolezza dell'inquinamento urbano e industriale

I ricercatori in Italia hanno implementato un sistema di realtà aumentata per aumentare la consapevolezza pubblica sull'inquinamento atmosferico. Il sistema sovrappone **Metriche dell'indice di qualità dell'aria (AQI) e fonti di inquinamento** su posizioni fisiche utilizzando GIS e AR mobile.

Caso di studio:

- Regione Marche, Italia (Sanità et al., 2024): il sistema ha integrato dati satellitari, sensori urbani e modelli AQI, consentendo agli utenti di "camminare" attraverso le zone inquinate e visualizzare i livelli di NO₂, PM2.5 e ozono in tempo reale.

Rilevanza per la biorisanamento:

Sebbene sviluppato per l'inquinamento atmosferico urbano, questo caso d'uso illustra la **potenza visiva della realtà aumentata nel mostrare minacce ambientali invisibili**. Allo stesso modo, la realtà aumentata può essere adattata ai siti microbici per mostrare pennacchi sotterranei di metalli pesanti o petrolio, punti caldi di attività microbica o zone redox in evoluzione che influenzano la biodisponibilità degli inquinanti.

5.4. AR per la pianificazione interattiva sul campo nei progetti relativi ad acqua e suolo

Nella bonifica industriale, la gestione di più input, pozzi di campionamento, punti di iniezione e zone di specie autoctone è logisticamente complessa. La realtà aumentata può supportare:

- Sovrapposizione di elementi infrastrutturali in loco;
- Monitoraggio dei progressi (ad esempio, zone pulite, abbondanza microbica);
- Simulazione dei pennacchi di iniezione e del movimento del fronte di degradazione.

Esempio:

- **Realtà aumentata mobile per il monitoraggio ambientale** (Stojanovic et al., 2012): hanno dimostrato l'uso di piattaforme AR mobili per visualizzare simulazioni ambientali collegate a dati georeferenziati.

Rilevanza per la biorisanamento:

Questo modello può migliorare direttamente la **logistica e comunicazione sul campo** nella bonifica microbica, consentendo l'ispezione in tempo reale di quali zone necessitano di reinoculazione microbica, dove i livelli di inquinanti stanno diminuendo o come le comunità microbiche cambiano dopo il trattamento.





5.5. Clean-AR: AR per la mappatura del rischio e il controllo della contaminazione

Originariamente sviluppato per gli ospedali per gestire i rischi di malattie trasmesse per via aerea, **Clean-AR** utilizza occhiali AR e modellazione 3D per:

- Identificare le vie di contaminazione.
- Evidenziare le superfici ad alto rischio.
- Monitora la diffusione dei patogeni in tempo reale (Schmidt et al., 2021).

Rilevanza per la biorisanamento:

Nelle applicazioni microbiche su scala di campo, in particolare con microbi geneticamente modificati, il tracciamento **zone di contenimento ecologico** è essenziale. La realtà aumentata potrebbe essere utilizzata in modo simile per:

- Segnare i confini in cui i microbi introdotti non devono diffondersi.
- Identificare le zone di crescita eccessiva del biofilm.
- Avvisare i ricercatori della migrazione microbica involontaria oltre le zone di trattamento.

Ciò garantisce **conformità alla biosicurezza e documentazione trasparente**, in particolare in contesti sensibili alla regolamentazione.

5.6. Ricerca emergente: AR + Multi-Omics per la bioinformatica sul campo

Lavori recenti suggeriscono che la realtà aumentata può integrarsi con **piattaforme omiche** (metagenomica, metabolomica, trascrittomica) per presentare dati funzionali microbici nello spazio.

Esempio:

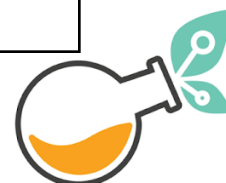
- Wang et al. (2022) hanno sviluppato un motore di visualizzazione AR che integra i dati del DNA ambientale (eDNA) con le coordinate GPS per produrre sovrapposizioni spazialmente accurate della diversità microbica e dei tratti funzionali in paesaggi reali.

Rilevanza per la biorisanamento:

Ciò ha un'utilità diretta negli studi sul campo in cui i ricercatori devono valutare se i microbi stanno attivamente degradando gli inquinanti, esprimendo geni specifici (ad esempio, *alkB*, *pahR*, *co*), o la formazione di consorzi. Con la realtà aumentata, tali dati potrebbero essere visualizzati in loco per un'interpretazione ecologica immediata.

Questi esempi concreti dimostrano come la realtà aumentata viene utilizzata nei settori ambientali per visualizzare la contaminazione, simulare le dinamiche di bonifica, monitorare il rischio ecologico e interpretare i dati microbiologici. Ogni esempio offre un **metodo traducibile per gli sforzi di biorisanamento microbico**, in particolare durante le sperimentazioni su scala di campo in cui la consapevolezza spaziale, il monitoraggio in tempo reale e la sicurezza sono fondamentali.

Fase	Descrizione
Esplorare	- Scoperta scientifica: Introdurre gli studenti agli usi concreti dei microbi nel controllo dell'inquinamento.
	- Ricerca basata su casi: Analizzare casi di studio reali (ad esempio, bonifica di fuoriuscite di petrolio utilizzando <i>Alcanivorax</i> o la bonifica dell'uranio tramite <i>Geobacter</i>).





	-Analisi dei bisogni: Identificare idee sbagliate o lacune nella comprensione dell'azione microbica e delle sfide ambientali.
Eseguire	-Lezioni interattive: Guida gli studenti attraverso le transizioni dal laboratorio al campo utilizzando animazioni microbiche e video di vita reale.
	-Esplorazione AR: Utilizzare strumenti come CoSpaces o Assemblr EDU per simulare siti sul campo e visualizzare la degradazione dei contaminanti nel tempo.
	-Attività di gruppo: Gli studenti creano modelli o storyboard di bonifica microbica utilizzando la realtà aumentata per presentare la degradazione microbica.
Migliorare	- Integrazione AR: gli studenti esplorano i punti caldi microbici, le zone di nutrienti e i gradienti di inquinamento utilizzando sovrapposizioni in AR.
	- Apprendimento interattivo: creare zone di bonifica virtuali (ad esempio, una mappa AR di un sito di fuoriuscita di petrolio e una strategia di applicazione dei microbi).
	Contenuto gamificato: Punti per la corretta identificazione delle fasi microbiche o delle interazioni AR • Missioni per ripulire diversi inquinanti (ad esempio, petrolio contro metalli pesanti) • Battaglie collaborative “Microbo contro Inquinante” per simulare dinamiche di crescita competitiva
	Valutazioni basate sulla realtà aumentata: - Valutazioni integrate con AR in cui gli studenti: • Simulare la degradazione degli inquinanti • Abbinare i microbi agli inquinanti • Interpretare set di dati del mondo reale (ad esempio, calo della concentrazione di inquinanti) - Revisione paritaria formativa degli scenari di realtà aumentata - Compito finale: gli studenti progettano e presentano un piano di bonifica AR basato sui microbi per un ecosistema inquinato

Riferimenti

Anderson, R. T., Vrionis, H. A., Ortiz-Bernad, I., Resch, J. T., Long, P. E., Dayvault, R., ... & Lovely, D. R. (2003). *Stimolazione dell'attività in situ delle specie di Geobacter per rimuovere l'uranio dalle falde acquifere contaminate da uranio*. Microbiologia applicata e ambientale, 69(10), 5884–5891.

Banerjee, R., Singh, J., e Sarkar, A. (2024). *Bioconvezione e trasporto batterico attraverso mezzi porosi: implicazioni per la biorisanamento in situ*. Meccanica dei fluidi ambientali, 24(2), 167–185.

Applicazioni del biofilm nella bonifica ambientale. [Wikipedia](#)

Bioconvezione e motilità microbica nei mezzi porosi. [arXiv](#)

Beccari, M., Di Palma, L., Lombardi, F., & Majone, M. (2010). *Studi su scala pilota sulla bonifica di falde acquifere contaminate da cromo utilizzando tecnologie di biobarriera e zone reattive*. Rivista dei materiali pericolosi, 178(1-3), 875–882.

Blanck, H. (2002). *Una revisione critica della tolleranza comunitaria indotta dall'inquinamento (PICT) e del suo utilizzo per valutare i rischi ambientali*. Tossicologia e chimica ambientale, 21(3), 503–511.

Cao, J., Liu, X., Su, X., Hædahl, J. E., Berg Fjellestad, T., Haziri, D., Hoang, A. N. V., Koskiah, J., Karjalainen, S. M., Ronkanen, A. K., Tarkoma, S., Hui, P., 2024, *Realtà aumentata basata su display montato sulla testa per la visualizzazione della qualità dell'acqua*, <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.12.002>





- Casi, I., & de Lorenzo, V. (2005). *Organismi geneticamente modificati per l'ambiente: storie di successi e fallimenti e cosa abbiamo imparato da essi*. Microbiologia internazionale, 8(3), 213–222.
- Revisione completa: *Biorisanamento di un sito contaminato da IPA in un biopiling su larga scala* (2024). [ScienceDirect](#)
- Flemming, H.-C., e Wuertz, S. (2019). *Batteri e archea sulla Terra e la loro abbondanza nei biofilm*. *Nature Reviews Microbiology*, 17(4), 247–260
- Garzón, J., Pavón, J., & Baldiris, S. (2019). *Revisione sistematica e meta-analisi della realtà aumentata in contesti educativi*. *Educational Research Review*, 27, 244–260.
- Ghosal, D., Ghosh, S., Dutta, T. K. e Ahn, Y. (2016). *Stato attuale delle conoscenze sulla degradazione microbica degli idrocarburi policiclici aromatici (IPA): una revisione*. *Frontiere della microbiologia*, 7, 1369.
- Guo, J., Lin, X., Zhao, M., et al. (2023). *Omica integrata per il monitoraggio microbico durante la biorisanamento su scala di campo di terreni contaminati da petrolio*. *Scienza dell'ambiente totale*, 869, 161649.
- Hemme, C.L., Careley, R., Norton, A., Ghumman, M., Nguyen, H., Ivone, R., Umenon, J., Shen, J., Bertin, M., King, R., Leibovitz, E., Bergstrom, R., Cho, B., 2023, *Sviluppo della realtà virtuale e aumentata applicazioni per l'istruzione scientifica, tecnologica, ingegneristica e matematica*, *BioTechniques* 75: 11–20, 10.2144/btn-2023-0029
- Holmes, D.E., Utturkar, S.M., D'haeseleer, P., et al. (2007). *Trascrittoma di Geobacter uraniireducens che cresce nei sedimenti sotterranei contaminati da uranio*. *Rivista ISME*.
- Lovley, D. R., et al. (2003). *Stimolazione dell'attività in situ delle specie di Geobacter per rimuovere l'uranio dalle falde acquifere contaminate da uranio*. *Microbiologia applicata e ambientale*, 69(10), 5884–5891.
- Keller, A. A., e Yang, R. T. (2021). *Modellazione predittiva nella biorisanamento: dalla teoria all'applicazione sul campo*. *Scienza e tecnologia ambientale*, 55(8), 5082–5094.
- Lovley, D. R., et al. (2022). *Bioteecnologie ambientali: biorisanamento mediante sistemi microbici*. *Revisione annuale di microbiologia*, 76, 145–165.
- Madison, A. S., Sorsby, S. J., Wang, Y., e Key, T. A. (2022). *Aumento dell'efficacia della biorisanamento in situ mediante l'applicazione su vasta scala di strumenti biologici molecolari*. *Frontiere della microbiologia*.
- Approcci multi-omici nell'ecologia microbica per l'ingegneria idrica. [arXiv](#)
- Panoramica del metodo di tolleranza della comunità indotta dall'inquinamento. [Wikipedia](#)
- Pokrić, B., et al. (2012). *ekoNET: sistema di monitoraggio ambientale che utilizza la realtà aumentata e la fusione dei sensori*. *Rivista di reti wireless e mobili*.
- Prince, R. C., McFarlin, K. M., Butler, J. D., & Febbo, E. J. (2013). *La biodegradazione primaria del petrolio greggio disperso in mare*. *Chemosfera*, 90(2), 521–526.
- Studio recente dell'acquifero sul campo: *Effetti dei meccanismi di biorisanamento sulla riduzione dell'uranio nelle falde acquifere* (2024). [ScienceDirect](#)
- Revisione delle strategie di biorisanamento sostenibile (2024). [ScienceDirect](#)
- Sanità, M., et al. (2024). *Realtà aumentata per il monitoraggio della qualità dell'aria nella regione Marche, Italia*. *WJARR*, 22(1), 120–128.
- Schmidt, A., Barz, M., & Wittstock, A. (2021). *Clean-AR: utilizzo della realtà aumentata per ridurre il rischio di contaminazione da agenti patogeni trasmessi per via aerea sulle superfici*. *Direzioni attuali nell'ingegneria biomedica*, 7(1), 159–162.
- Semple, K. T., Doick, K. J., Jones, K. C., et al. (2004). *Definire la biodisponibilità e la bioaccessibilità del suolo e dei sedimenti contaminati è complicato*. *Scienza e tecnologia ambientale*.
- Silva, E. R. e Gültekin, A. (2021). *Apprendimento scientifico potenziato dalla realtà aumentata per gli studenti delle scuole medie: coinvolgere gli studenti nell'inquinamento e nella sostenibilità*. *Rivista di educazione STEM*, 22(3), 45–53.



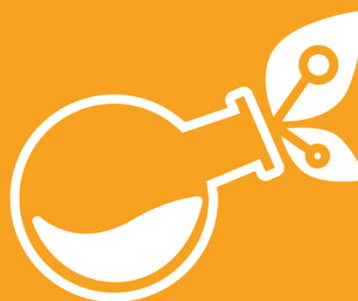


- Singh, J. S., Abhilash, P. C. e Singh, H. B. (2023). *Biorisanamento microbico: strategie per la bonifica ambientale e la sostenibilità*. Scienza dell'ambiente totale, 892, 164503.
- Stojanovic, J., et al. (2012). *Realtà aumentata mobile per il monitoraggio ambientale*. Informatica personale e ubiquitaria, 16(8), 1027–1039.
- Studio sulla bonifica del Cr(VI) mediante *Geobacter* specie: *Biorisanamento delle falde acquifere contaminate da Cr(VI)* (2019). [Wikipedia+3ScienceDirect+3Wikipedia+3](#)
- Thomsen, P. F. e Willerslev, E. (2015). *DNA ambientale: uno strumento emergente nella conservazione per il monitoraggio della biodiversità passata e presente*. Conservazione biologica, 183, 4–18.
- Wang, X., Gao, Y. e Liu, J. (2022). *Visualizzazione basata sulla realtà aumentata dei dati metagenomici nel monitoraggio ambientale*. Frontiere dell'informatica, 4, 934694.
- Wu-Juan Sun e altri (2024). *Studi pilota sul campo per la bonifica microbica attivata del suolo contaminato dal petrolio* (Ambiente Geochimica Salute). [ResearchGate+1PubMed+1](#)
- Xiong, W., Chen, L., Gao, H., et al. (2025). *Inquinamento da metalli pesanti e trasformazione nel suolo: una revisione completa delle strategie di biorisanamento naturale*. Rivista dell'Università di scienze applicate di Umm Al-Qura.
- Yakimov, M. M., Timmis, K. N. e Golyshin, P. N. (2007). *Batteri marini obbligati a degradare il petrolio: attori chiave nella bonifica delle fuoriuscite di petrolio*. Nature Reviews Microbiology, 5(10), 803–812.
- Zhang, Y., Karpf, A., & Brovelli, M. A. (2023). *Realtà aumentata per la visualizzazione delle falde acquifere nel monitoraggio industriale e nella bonifica dei siti*. Computer e geoscienze, 173, 105055.





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.