

Bioteχνologie per l'ambiente

- *Biorisanamento*
- *Prevenzione*
- *Rilevazione e monitoraggio*
- *Ingegneria genetica*

Le bioteχνologie consistono nella "integrazione di scienze naturali ed ingegneria al fine di ottenere beni e servizi dall'impiego di organismi, cellule, loro componenti ed analoghi molecolari" (Assemblea Generale EFB, 1989). Le bioteχνologie per l'ambiente esaminate nella presente Comunicazione consistono nell'applicazione di processi bioteχνologici allo scopo di proteggere e ripristinare la qualità del nostro ambiente.

La presente comunicazione si propone di offrire una rassegna delle diverse aree di applicazione delle bioteχνologie ambientali, insieme con le relative problematiche ed implicazioni. Lo scopo complessivo è quello di fornire un'informazione equilibrata, tale da consentire un effettivo progresso del dibattito. Questo documento scaturisce dal contributo congiunto di scienziati e di rappresentanti di organizzazioni industriali, governative ed ambientaliste di tutta Europa. Esso è stato redatto a scopo informativo e non rappresenta l'opinione o la politica della Federazione Europea di Bioteχνologia, né di qualsiasi altra Organizzazione.

INTRODUZIONE

I processi bioteχνologici vengono utilizzati per la protezione dell'ambiente da ormai quasi un secolo, ovvero da molto prima che venisse coniato il termine "bioteχνologie". Impianti municipali di trattamento dei liquami e filtri per la purificazione dei gas urbani furono sviluppati intorno all'inizio del secolo, rivelandosi molto efficaci, sebbene a quel tempo si sapesse molto poco dei principi biologici che ne governavano l'azione. Da allora, le nostre conoscenze sono enormemente cresciute: questa Comunicazione descrive lo "stato dell'arte" e le attuali potenzialità delle bioteχνologie ambientali, ed inoltre ne prende in considerazione gli aspetti sociali.

Le tecniche bioteχνologiche per il trattamento dei rifiuti - prima o dopo la loro immissione nell'ambiente - vengono descritte ed esemplificate nella sezione sul biorisanamento. Le bioteχνologie possono venire impiegate anche per lo sviluppo di prodotti e processi che generino meno rifiuti e consumino meno energia e risorse non rinnovabili; sotto questo aspetto, esse costituiscono una notevole risorsa per l'evoluzione della nostra società nella direzione di uno sviluppo maggiormente sostenibile, principio invocato nel Rapporto Brundtland del

1987 e nell'Agenda 21 del secondo summit della Terra tenutosi a Rio de Janeiro nel 1992, ed ormai quasi universalmente accettato. La sezione sulla prevenzione si occupa di tale aspetto.

Le tecniche bioteχνologiche per la sorveglianza della qualità ambientale vengono presentate nella sezione su rilevazione e monitoraggio. La tecnologia del DNA ricombinante ha migliorato le nostre capacità di prevenzione dell'inquinamento ed appare promettente nel consentire un ulteriore sviluppo del biorisanamento di rifiuti e contaminanti: questi temi vengono discussi nella sezione sull'ingegneria genetica. Lo sviluppo delle bioteχνologie moderne è stato accompagnato dall'elaborazione di normative ad hoc - o dall'adattamento di quelle preesistenti - per quanto concerne gli organismi geneticamente modificati; il paragrafo dedicato alla legislazione si occupa del significato di tali normative per le bioteχνologie ambientali. La parte dedicata ad opinione pubblica, dialogo e dibattito si occupa della percezione delle bioteχνologie ambientali da parte della gente comune, e dei canali attraverso cui essa si forma e si modifica.

BIORISANAMENTO

Per biorisanamento si intende l'impiego di sistemi biologici per la riduzione dell'inquinamento dell'aria, delle acque o dei suoli: i sistemi biologici utilizzati sono di solito piante e/o microorganismi. L'opzione di biorisanamento cui si ricorre con maggior frequenza è la biodegradazione ad opera di microorganismi: questi ultimi sono infatti in grado di decomporre la maggior parte delle sostanze per i loro bisogni energetici o di crescita, attraverso una serie di processi di biodegradazione che possono aver luogo in presenza oppure in assenza di ossigeno (ovvero di aria). In alcuni casi, detti di co-metabolismo, l'azione delle vie metaboliche normalmente usate dagli organismi per i loro rifornimenti energetici e di crescita comporta anche la demolizione delle molecole inquinanti, da cui il microorganismo non trae alcun beneficio diretto, in concomitanza con quella dei substrati ad esso utili; molta della ricerca svolta è stata imperniata sul trarre vantaggio da questo fenomeno e sul suo sfruttamento per sistemi di biorisanamento. Una biodegradazione completa ha come effetto la detossificazione degli inquinanti per mineralizzazione, ovvero la loro conversione in anidride carbonica, acqua e sali inorganici innocui, mentre una biodegradazione incompleta

FEDERAZIONE EUROPEA
DI BIOTECHNOLOGIA

EFB

GRUPPO DI LAVORO
SULLA PERCEZIONE DELLE
BIOTECHNOLOGIE DA PARTE
DELL'OPINIONE PUBBLICA

INFORMAZIONI

Per ulteriori informazioni riguardo alle Comunicazioni o ad altre pubblicazioni ed attività del Gruppo di Lavoro sulla Percezione delle Bioteχνologie da parte dell'Opinione Pubblica della Federazione Europea di Bioteχνologia, si prega di contattare:

Prof John Durant (*Presidente*)
Research and Information Services
National Museum of Sciences & Industry
GB-SW7 2DD London
Tél: +44 171 938201
Fax: +44 171 938213
E-mail: j.durant@nmsi.ac.uk

Dr. D J Bennett (*Segretario*)
Secretary, EFB, Task Group on Public
Perception of Biotechnology
Oude Delft 60
NL 2611 CD Delft
Tél: +31 15 2127800
Fax: +31 15 2127111
E-mail: efb.cbc@stm.tudelft.nl

<http://www.kluyver.stm.tudelft.nl/efb/home.htm>

© Copyright EFB Task Group on Public Perceptions of Biotechnology, 1999

Questa Comunicazione è intesa a scopo informativo e non rappresenta l'opinione della Federazione Europea di Bioteχνologia né di qualsiasi altra Organizzazione. Questa pubblicazione può venire riprodotta unicamente per scopi di ricerca o di studio, con debito riconoscimento del proprietario del copyright e la citazione della presente nota. In tutti gli altri casi, nessuna parte può venire riprodotta senza autorizzazione.

Il Gruppo di Lavoro desidera ringraziare la Commissione Europea, Direzione Generale XII, per il continuo supporto e sostegno finanziario alla presente ed alle altre Comunicazioni.



Comunicazione

4

Seconda Edizione, Gennaio 1999
traduzione dall'originale inglese

risulta nell'ottenimento di prodotti di demolizione intermedi, che possono essere o non essere meno tossici dell'inquinante di partenza; ad esempio, la biodegradazione incompleta di tri- o tetra-cloroetilene può risultare nella produzione di cloruro di vinile, che è maggiormente tossico e cancerogeno rispetto alle sostanze originarie.

La biodegradazione può avvenire spontaneamente, nel qual caso si parla di "biorisanamento intrinseco" oppure di "attenuazione naturale". Tuttavia, in molti casi le circostanze naturali non sono abbastanza favorevoli al suo compimento, a causa della mancanza di batteri adatti, di nutrienti in quantità sufficiente, oppure di ossigeno; in tali situazioni, si può intervenire fornendo gli elementi mancanti. Ad esempio, lo spargimento di supplementi di nutrienti è stato utilizzato per accelerare la degradazione ad opera di batteri del petrolio riversato a 1000 miglia dalla costa dell'Alaska dalla superpetroliera Exxon Valdez nel 1989. Le prospettive future del biorisanamento tendono sempre di più verso l'osservazione della velocità della biodegradazione naturale prima di decidere se "aiutarla", e di intervenire solamente nel caso in cui l'attività spontanea sia insufficiente per una rimozione dell'inquinante abbastanza rapida da prevenirne i danni previsti.

Le tecniche di biorisanamento possono venire applicate per ridurre o rimuovere rifiuti pericolosi che hanno già contaminato l'ambiente. Possono inoltre venire impiegate per il trattamento di rifiuti e scarti prima che questi lascino i loro luoghi di produzione. Alcune applicazioni del biorisanamento vengono esaminate qui di seguito.

Acque reflue ed effluenti industriali. Negli impianti di trattamento dei liquami, i microorganismi rimuovono gli inquinanti più comuni dalle acque reflue prima di scaricarle nei fiumi o in mare. L'incremento dell'inquinamento industriale ed agricolo ha condotto ad un maggior bisogno di processi che rimuovano inquinanti specifici, quali nitrati e fosfati, metalli pesanti e composti clorurati. I nuovi metodi comprendono processi aerobici, anaerobici e chimico-fisici, che hanno luogo in filtri a letto fisso ed in bioreattori in cui materiali e microorganismi vengono mantenuti in sospensione. I costi del trattamento delle acque reflue possono venire ridotti mediante la trasformazione dei contaminanti in prodotti utili. Ad esempio, metalli pesanti e composti solforati possono venire rimossi dalle acque reflue dei processi industriali di zincatura mediante l'ausilio di batteri opportuni, e quindi riutilizzati. Un altro esempio consiste nella produzione di mangime dalla biomassa fungina residua della produzione di penicillina. La maggior parte dei sistemi anaerobici di trattamento delle acque reflue producono biogas utili.

Acque potabili e di processo. La disponibilità di abbondanti rifornimenti d'acqua è vitale per il moderno sviluppo urbano ed industriale. Entro la fine del secolo, si stima che due terzi delle nazioni del pianeta avranno problemi di approvvigionamento idrico, poiché consumano acqua pulita più velocemente di quanto questa si rigeneri nelle falde o nei fiumi: un aspetto molto importante delle biotecnologie è quindi il loro potenziale nel recupero e nella purificazione delle acque reflue, in modo da poterle riutilizzare. Sono inoltre aumentate le preoccupazioni del pubblico circa la qualità attuale dell'acqua potabile; perciò, non occorre solamente riciclare l'acqua nello sviluppo di un uso sostenibile delle risorse, ma bisogna anche migliorarne globalmente la qualità per soddisfare i consumatori. In molte regioni agricole del

pianeta, i reflui degli allevamenti e l'eccesso di fertilizzanti provocano la presenza di elevati livelli di nitrati nell'acqua potabile; le biotecnologie hanno fornito metodi efficaci per rimuovere questi composti dall'acqua trattata prima di erogarla agli utenti.

Aria e reflui gassosi. In origine, i sistemi di smaltimento dei rifiuti industriali gassosi erano basati su filtri poco costosi, riempiti di compost, per la rimozione dei cattivi odori. Questi sistemi vengono tuttora utilizzati, tuttavia la lentezza del procedimento e la breve durata di tali filtri ha spinto alla ricerca di metodi migliori, quali i bio-*scrubbers*, che comportano l'asportazione degli inquinanti per lavaggio mediante l'uso di sospensioni cellulari, oppure i filtri a gocciolamento, in cui gli inquinanti vengono degradati da microorganismi immobilizzati su una matrice inerte, cui viene fornito il nutrimento mediante un film acquoso che sgocciola attraverso la matrice di supporto. La selezione di microorganismi più efficienti nel metabolizzare gli inquinanti ha inoltre condotto ad un continuo miglioramento di questi nuovi bio-filtri per la purificazione di aria e gas: ad esempio, sono stati ottenuti sistemi basati su bio-*scrubbers* per la rimozione simultanea di ossidi di azoto e di zolfo dalle emissioni degli altiforni, sviluppati come alternativa al classico filtro di gesso calcareo, oppure l'eliminazione dello stirene dai reflui gassosi delle industrie di lavorazione del polistirene utilizzando biofiltri a base di funghi.

Trattamento di suolo e terreni agricoli. Sono disponibili sul mercato metodi di risanamento dei suoli e delle relative falde idriche effettuabili sia *in situ* (ovvero direttamente sul posto) sia *ex situ* (che prevedono l'asportazione meccanica del suolo per trattarlo altrove). I trattamenti *in situ* possono consistere in metodi di bio-incremento, ovvero l'immissione di microorganismi, e/o in misure di bio-stimolazione, quali la ventilazione o l'aggiunta di soluzioni nutritive quali ausili all'attività dei microorganismi - già presenti oppure immessi - nei suoli da trattare. I metodi *ex situ* implicano il prelievo di suoli ed acque di falda ed il loro trattamento in superficie. Il suolo può venire trattato come compost in cumuli, oppure in appositi bioreattori per impasti semiliquidi. Le acque di falda vengono trattate in bioreattori e successivamente ripompeate nel suolo oppure riversate nelle acque di superficie. Il biorisanamento dei terreni agricoli (o bio-ripristino) è spesso meno oneroso dei metodi fisici, ed i suoi prodotti sono innocui in caso di mineralizzazione completa; tuttavia, la sua azione può richiedere tempo, vincolando capitali e terreni. Il biorisanamento *in situ* è già diventato pratica comune per i terreni sottostanti alle stazioni di rifornimento di carburanti, mentre è diventato possibile anche per la rimozione di solventi clorurati (e.g. tri- e tetra-cloroetilene): in generale, l'applicabilità dei metodi di biorisanamento *in situ* è - e probabilmente continuerà ad essere - vincolata ai parametri fisici del suolo. Il biorisanamento mediante l'utilizzo di piante anziché microorganismi viene detto fitorisanamento: si tratta di una tecnica già impiegata per la rimozione di contaminanti metallici da suoli e falde idriche, ed il cui impiego è attualmente allo studio per la rimozione di altre sostanze inquinanti. Una ulteriore possibilità consiste nell'uso combinato di microorganismi (in particolare batteri) e piante: certi batteri, i rizobi, vivono in stretta associazione con le radici delle piante, dalle cui escrezioni dipende il loro nutrimento, ed il loro numero è molto più elevato di quello degli altri batteri del suolo: sono in corso ricerche volte alla modificazione genetica dei rizobi in modo da renderli capaci di degradare gli inquinanti.

Rifiuti solidi. I rifiuti solidi urbani rappresentano oggi uno dei principali problemi derivanti dalla società dei consumi. Il loro smaltimento è molto costoso, ed inoltre comporta una costante sorveglianza in termini di inquinamento indotto (delle falde idriche o dell'aria). Eppure, essi sono in larga misura costituiti da sostanze organiche facilmente biodegradabili. Da questo punto di vista, i rifiuti biologici (la cosiddetta frazione "umida"), se già separati alla fonte (ovvero la pattumiera di casa), possono venire convertiti in una risorsa di valore attraverso il compostaggio oppure la digestione anaerobica. Negli ultimi anni vi sono stati notevoli sviluppi in entrambi i processi, sia in termini di *design* che di controllo. In particolare, la digestione anaerobica dei rifiuti solidi urbani in bioreattori ad alta efficienza ha guadagnato un crescente consenso presso l'opinione pubblica, poiché consente il recupero di quantità sostanziali di biogas utile e l'ottenimento di un residuo organico stabile di elevata qualità, senza dar luogo a danni ambientali. Inoltre, è in corso di sviluppo intenso ed accelerato anche la digestione anaerobica dei rifiuti solidi urbani misti (la cosiddetta frazione "indifferenziata"), che nel prossimo futuro potrebbe costituire un progresso importante nel riciclaggio di tali rifiuti ed un'alternativa all'incenerimento, sempre meno accettabile.

PREVENZIONE

Un numero sempre maggiore di imprese industriali sta sviluppando processi ad impatto ambientale ridotto, in risposta agli appelli internazionali per uno sviluppo sostenibile. Si sta sempre più diffondendo la tendenza verso prodotti e processi meno dannosi, che evitino o riducano il ricorso al trattamento dei reflui in coda di processo. Le biotecnologie risultano particolarmente adatte a fornire un contributo a sostegno di tale tendenza, e si sono già rivelate utili in molti casi, sia nello sviluppo di nuovi processi, sia nel miglioramento di quelli esistenti^(6,7).

Miglioramenti di processo. Molti processi industriali sono stati resi meno dannosi per l'ambiente mediante l'impiego di enzimi. Gli enzimi sono catalizzatori biologici ad elevata efficienza e presentano numerosi vantaggi rispetto ai catalizzatori non-biologici: sono biodegradabili e non tossici, funzionano in modo ottimale a temperature moderate ed in condizioni "miti", ed hanno - data la loro elevata specificità - meno effetti collaterali negativi rispetto ai metodi tradizionali. I metodi produttivi che impiegano enzimi sono non soltanto più puliti e sicuri rispetto ad altri metodi, ma anche più economici in termini di consumo di energia e di risorse (vedi box); tuttavia, la loro specificità fa sì che non sia sempre facile individuare l'enzima appropriato per una data applicazione. Gli enzimi sono già largamente utilizzati nell'industria da molti anni: le nuove tecniche ed i nuovi approcci al *design* di proteine ed alla modellistica molecolare rendono ora i ricercatori in grado di sviluppare nuovi enzimi attivi ad alte temperature, in solventi non acquosi ed in ambiente solido.

Innovazioni di prodotto. Le biotecnologie possono anche consentire la produzione di nuovi manufatti con impatto ambientale ridotto rispetto ai loro analoghi fabbricati in modo tradizionale. La produzione di nuovi biomateriali, quali le bioplastiche, evita l'uso di risorse non-rinnovabili come i combustibili fossili. L'amido delle patate normalmente è costituito da amilopectina per l'80%, ma anche per il 20% da amilosio, ovvero un componente indesiderato in molte applicazioni; l'isolamento dell'amilopectina purificata richiede il consumo di grandi

Processi industriali maggiormente sostenibili mediante l'uso degli enzimi

L'industria di lavorazione del cuoio ha introdotto gli enzimi a sostituzione dei composti chimici aggressivi tradizionalmente usati per pulire i pellami. Nelle produzioni tessili, gli enzimi hanno soppiantato i loro analoghi chimici per il candeggio, incluso l'invecchiamento precoce (stone washing) dei jeans. Anche il consumo di cloro da parte dell'industria del legname e della carta potrebbe presto venire considerevolmente ridotto mediante l'uso di enzimi.

Gli enzimi digestivi di grassi e proteine nelle polveri detergenti riducono in modo significativo la quantità di detersivo occorrente per un'efficace lavaggio; inoltre, essi permettono di ridurre la temperatura di lavaggio - un abbassamento di 20°C della temperatura permette di risparmiare più di un terzo dell'energia consumata da una lavatrice. Poiché in molti Paesi dell'Europa occidentale il consumo per lavaggi ammonta fino al 5% del consumo energetico domestico, gli enzimi hanno fornito un contributo significativo alla conservazione delle risorse energetiche.

ambientale in modo elettronicamente oppure otticamente rilevabile. Diventa quindi possibile effettuare misurazioni quantitative degli inquinanti con estrema precisione o con altissima sensibilità. I sensori possono venire progettati in modo da essere molto selettivi, oppure sensibili ad una vasta gamma di composti. Ad esempio, un'ampia gamma di erbicidi può venire rilevata nelle acque fluviali utilizzando biosensori basati su alghe: gli stress inflitti agli organismi vengono misurati come cambiamenti delle proprietà ottiche della loro clorofilla.

I biosensori microbici consistono in microorganismi che generano una reazione rilevabile in seguito al contatto con la sostanza da individuare: di solito si tratta di segnali luminosi, la cui produzione cessa in seguito al contatto con sostanze tossiche per il microorganismo. Vengono impiegati microorganismi emettenti luce, sia già presenti in natura, sia appositamente sviluppati mediante opportune modifiche genetiche; difatti, si possono progettare biosensori batterici che emettono luce in seguito al contatto con un inquinante specifico. Negli Stati Uniti, un simile batterio emettente luce è stato approvato per la rilevazione di idrocarburi aromatici polialogenati nei terreni.

Gli immunosaggi utilizzano anticorpi (proteine complesse prodotte nella risposta biologica ad agenti specifici) opportunamente marcati, di solito con enzimi, per misurare i livelli di inquinanti. Se un inquinante è presente, l'anticorpo si lega ad esso, ed il marcatore rende l'inquinante rilevabile, attraverso un cambiamento di colore oppure l'emissione di fluorescenza o di radioattività. Sono stati sviluppati diversi tipi di immunosaggi per il monitoraggio continuo, automatico e poco costoso di pesticidi quali il dieldrin ed il parathion. La natura di queste tecniche, i cui risultati possono essere tanto semplici quanto un cambiamento di colore, le rende particolarmente adatte per analisi dei terreni ad elevata sensibilità, laddove il tempo e l'ingombrante attrezzatura richiesti dai test più tradizionali risultano di scarsa praticità. Tuttavia, il loro impiego è limitato agli inquinanti in grado di innescare una risposta anticorpale: se gli inquinanti sono troppo

reattivi oppure immunosoppressivi, essi distruggeranno l'anticorpo oppure ne sopprimeranno l'attività, inficiando così l'efficacia del test.

Rilevazione e monitoraggio dei microorganismi impiegati nel biorisanamento.

Quando vengono introdotti nel sito da bonificare microorganismi cresciuti in laboratorio (bio-incremento), spesso occorre monitorarne la presenza e/o la proliferazione per verificare e controllare il procedere del processo di biorisanamento. Ciò vale soprattutto, e diventa anzi obbligatorio, nel caso in cui siano coinvolti microorganismi geneticamente modificati.

La tecnica tradizionale per rilevare la presenza di microorganismi nel suolo consiste nel piastrarli direttamente su mezzi di coltura selettivi; la procedura risulta molto facilitata nel caso in cui l'organismo contenga un marcatore che ne consenta la selezione. Le tecniche maggiormente innovative comprendono i metodi di marcatura già descritti per gli immunosaggi. La distribuzione spaziale di specifici microorganismi in un campione può venire determinata microscopicamente ed in modo non invasivo utilizzando l'ibridazione *in situ* fluorescente (FISH) dei microorganismi. La tecnica maggiormente sensibile e specifica, che viene usata sempre più spesso, consiste nell'isolamento diretto dal suolo e nell'amplificazione del DNA del microorganismo.

Rilevazione e monitoraggio degli effetti ecologici.

I metodi di biorisanamento hanno l'obiettivo di migliorare la qualità dell'ambiente mediante la rimozione degli inquinanti. Tuttavia, la scomparsa dell'inquinante originale non è l'unico criterio per determinare il successo di un'operazione di bonifica. Metaboliti (ancora più) tossici potrebbero venire prodotti dalla degradazione dell'inquinante di partenza, e l'agente biodegradante potrebbe causare patologie oppure produrre sostanze dannose alla flora microbica utile, alle piante, agli animali o agli esseri umani. Ovviamente, tutti questi effetti negativi vengono per quanto possibile esclusi in anticipo attraverso una conoscenza il più possibile approfondita del microorganismo da impiegare, ottenuta mediante estensive ricerche in letteratura e studi in cui il microcosmo dove deve svolgersi il processo di biorisanamento viene riprodotto in laboratorio. Per evitare effetti inaspettati, in particolare in seguito al rilascio di un elemento nuovo all'ecosistema come un organismo geneticamente modificato, può rendersi necessario il monitoraggio degli effetti ecologici di un'operazione di biorisanamento, e la questione fondamentale nella sorveglianza degli effetti ecologici è: cosa sorvegliare? Gli effetti possibili sono numerosi e diversi, però non tutti sono pertinenti, permanenti o risultanti dall'operazione di biorisanamento. I parametri da monitorare vengono di solito stabiliti caso per caso: le tecniche possono includere tutte quelle relative a rilevazione e monitoraggio descritte in precedenza.

INGEGNERIA GENETICA

La tecnologia del DNA ricombinante ha avuto ricadute sorprendenti negli ultimi anni. I biologi molecolari hanno mappato genomi interi, sono state sviluppati e resi disponibili molti nuovi farmaci, e vengono prodotte piante con nuove caratteristiche di resistenza alle patologie impossibili da ottenere mediante i metodi convenzionali di incrocio e selezione. Molti degli esempi citati in precedenza - come la patata senza amiloso oppure il batterio produttore di indaco - implicano anch'essi l'uso di organismi

quantitativi d'acqua e di energia. Un'impresa olandese ha sviluppato una patata geneticamente modificata il cui amido non contiene amiloso, e può quindi venire lavorato con minor impatto ambientale in termini di consumo di risorse e produzione di scarti. La coltivazione di piante geneticamente modificate che resistono agli insetti infestanti e/o agli agenti patogeni potrebbe consentire una considerevole riduzione nell'uso di pesticidi: ciò eviterebbe non solo il consumo di materie prime (in gran parte non-rinnovabili), energia e lavoro necessari alla produzione di pesticidi, ma anche e soprattutto una riduzione dell'impatto negativo dei loro residui nei prodotti agricoli e nell'ambiente. Le soluzioni biotecnologiche all'inquinamento sono parecchie (vedi box), e gli sviluppi futuri potrebbero coinvolgere aspetti che ora appaiono fantascienza ai più, come la sostituzione delle super-fibre prodotte chimicamente con fibre di ragnatela prodotte da microorganismi.

In ogni caso, non va dimenticato che l'incremento nell'impiego di sistemi biologici nell'industria dovrebbe essere accompagnato da adeguati livelli di addestramento e protezione dei lavoratori che maneggiano tali sistemi.

RILEVAZIONE E MONITORAGGIO

Rilevazione e monitoraggio degli inquinanti. È già in uso un'ampia gamma di metodi biologici per rilevare inquinamenti accidentali e per il monitoraggio continuo degli inquinanti. Le misure già consolidate comprendono la conta delle specie animali, vegetali e microbiche, e la conta degli individui di tali specie oppure l'analisi dei livelli di ossigeno, metano o altri composti nelle acque. Più recente è lo sviluppo di metodi biologici di rilevazione basati su biosensori ed immunosaggi, che stanno ora facendo il loro ingresso sul mercato.

La maggior parte dei biosensori consiste in una combinazione di meccanismi biologici ed elettronici, spesso innestati su un microchip. La componente biologica può essere semplicemente un enzima oppure un anticorpo, o anche una colonia di batteri, una membrana, un neurorecettore oppure un organismo intero; se immobilizzati su un supporto, le loro proprietà mutano in risposta ad un qualche effetto

Soluzioni biotecnologiche all'inquinamento

Maiali e polli non sono in grado di utilizzare i fosfati derivanti dai fitati presenti nei mangimi, che quindi finiscono nelle loro deiezioni. Mediante l'aggiunta dell'enzima fitasi nei mangimi, la quantità di fosfati escreti da questi animali può venire ridotta di più del 30%.

In Sudafrica vengono impiegati batteri nell'isolamento dell'oro dal minerale d'estrazione. Questa tecnica cosiddetta biomineraria consente il risparmio di enormi quantità d'energia nel processo di separazione, e genera una quantità inferiore di scarti.

La produzione di indaco - la tintura usata per i blue-jeans - per sintesi chimica richiede un processo in otto stadi, comporta l'uso di composti molto tossici, nonché speciali misure di protezione sia per gli operatori che per l'ambiente. La produzione di indaco per via biotecnologica - che impiega un batterio geneticamente modificato che esprime gli enzimi adatti - si svolge in tre soli stadi, ha luogo in ambiente acquoso a partire da materie prime semplici come zuccheri e sali, e produce, oltre all'indaco, solamente anidride carbonica e biomassa biodegradabile.

geneticamente modificati mediante la tecnologia del DNA ricombinante; anche molti enzimi vengono ormai abitualmente prodotti da organismi geneticamente modificati.

Data la travolgente diversità di specie viventi, biomolecole e vie metaboliche presenti sul nostro pianeta, in linea di principio l'ingegneria genetica può rappresentare un potente strumento per la creazione di alternative più "amiche dell'ambiente" a quei processi e prodotti che attualmente lo inquinano, o che ne esauriscono le risorse non-rinnovabili. Spetterà poi alla politica, all'economia ed alla società nel suo complesso la decisione ultima nel determinare quali possibilità scientifiche diverranno realtà concrete.

Attualmente, agli organismi possono venire conferiti caratteri addizionali in termini di capacità di degradazione di contaminanti specifici, nel caso in cui quelli presenti in natura non siano in grado di farlo in maniera adeguata o con sufficiente rapidità. Attraverso la combinazione di diverse capacità metaboliche in uno stesso microorganismo si possono aggirare le difficoltà insite nelle bonifiche ambientali, anche se finora tale possibilità non è stata attuata in maniera significativa. Il motivo principale risiede nel fatto che nella maggior parte dei casi è possibile rinvenire o selezionare microorganismi naturali dotati delle capacità di biodegradazione desiderate per il disinquinamento di un determinato sito. Vi sono diversi esempi di batteri del suolo che hanno sviluppato nuove proprietà in risposta al contatto con sostanze xenobiotiche (ovvero composti chimici di sintesi che normalmente non si trovano in natura); in alcuni casi, le nuove proprietà appaiono persino acquisite da altre specie. Negli Stati Uniti sono stati approvati alcuni batteri geneticamente modificati per scopi di biorisanamento, ma non si hanno ancora notizie circa loro applicazioni su larga scala. In Europa, finora sono stati autorizzati unicamente rilasci controllati a scopo sperimentale.

Poiché l'ingegneria genetica consente di ottenere nuovi organismi che non avrebbero mai potuto avere origine per mutazione spontanea o in seguito alla pressione selettiva dell'evoluzione, vi sono preoccupazioni circa l'imprevedibilità delle loro possibili interazioni con l'ecosistema. Tra questi, gli organismi geneticamente modificati mantenuti entro i confini degli impianti in cui esplicano le loro applicazioni produttive generano ovviamente assai meno preoccupazioni rispetto a quelli destinati ad un rilascio nell'ambiente, come le piante resistenti a patogeni oppure i batteri del suolo da impiegare in operazioni di biorisanamento.

I possibili effetti ecologici dei batteri del suolo geneticamente modificati sono ancora più difficili da determinare, poiché è ben noto che essi effettuano frequentemente scambi di materiale genetico, anche tra specie batteriche differenti. Questa loro caratteristica, unita al fatto che vi sono scarse conoscenze circa la grande maggioranza delle specie batteriche che abitano i suoli, rende quasi impossibile prevedere il destino di ogni copia del DNA che conferisce un carattere inserito *ex-novo* in un batterio del suolo. d'altro canto, se il DNA inserito proviene da un altro batterio del suolo, sarebbe ragionevole obiettare che il batterio geneticamente modificato avrebbe anche potuto evolversi spontaneamente un giorno o l'altro, in seguito ai frequenti scambi di materiale genetico che hanno luogo tra le varie popolazioni che compongono la flora microbica dei suoli.

LEGISLAZIONE

Le normative volte a garantire l'impiego nell'ambiente di microrganismi nuovi o modificati in condizioni di sicurezza sono molto importanti, anche dal punto di vista del mantenimento della fiducia da parte dell'opinione pubblica. L'Unione Europea si è dotata di due Direttive^(1,2), concernenti l'uso confinato di microorganismi (90/219/CEE) ed il rilascio deliberato nell'ambiente di organismi geneticamente modificati (90/220/CEE), che sono state recepite nella legislazione nazionale di quasi tutti gli Stati membri dell'UE. Tra le disposizioni vi è l'approvazione da parte delle autorità competenti designate di un dettagliato protocollo sperimentale, che comprenda una valutazione dei potenziali rischi, quale requisito per ogni rilascio ambientale di un organismo geneticamente modificato. In alcuni Stati membri viene richiesta la pubblicazione sulla stampa locale della natura del rilascio e, talvolta, perfino dell'ubicazione del sito. Dopo diversi anni di esperienza nell'applicazione delle Direttive, le procedure previste vanno riviste anche alla luce di un adeguamento al progresso tecnico: mentre è tuttora in corso - a livello dell'UE - la revisione della Direttiva sul rilascio deliberato, quella della Direttiva sull'uso confinato è giunta a compimento nel dicembre 1998, con l'adozione di una nuova Direttiva (98/81/CE, che di fatto sostituisce la 90/219/CEE). L'obiettivo della Commissione Europea è il mantenimento della competitività globale dell'UE, sia nella ricerca sia nelle applicazioni commerciali, senza che ciò vada a scapito della sicurezza.

OPINIONE PUBBLICA, DIALOGO E DIBATTITO

Nonostante il fatto che le biotecnologie tradizionali siano già di grande aiuto nelle applicazioni di biorisanamento, mentre quelle innovative potrebbero ulteriormente ampliarne le possibilità, non vi sono dati recenti sull'opinione dei cittadini dell'Unione Europea circa le biotecnologie per l'ambiente. In termini generali, secondo il sondaggio più recente condotto dalla Commissione Europea⁽³⁾, gli europei tendono ad assumere un punto di vista "ottimista" per quanto riguarda gli sviluppi che si attendono dalle biotecnologie avanzate; purtroppo, il sondaggio non prevedeva un'indagine sull'atteggiamento specifico nei confronti delle biotecnologie ambientali. L'unica domanda relativa all'ambiente richiedeva un assenso o un dissenso circa l'ipotesi di una sostanziale riduzione dell'inquinamento ambientale grazie alle

biotecnologie moderne, ottenendo l'assenso del 47% degli europei. Resta tuttora da verificare se questa fiducia fosse o meno un pio desiderio. In definitiva, per una completa accettazione delle biotecnologie ambientali occorrerà passare per la dura prova costituita dall'imporsi di parametri ambientali più esigenti.

Sono stati tenuti dibattiti pubblici, conferenze, seminari e tavole rotonde volti a riunire comuni cittadini e membri dell'industria, della scienza, dei governi e di organizzazioni ambientaliste per discutere le questioni critiche. Tali vivaci dibattiti non portano sempre al consenso, però possono fornire un quadro più completo di tutti gli aspetti di una particolare questione, facilitando una miglior comprensione dei problemi coinvolti. Un esempio recente è rappresentato dal *workshop* organizzato dall'EFB sui modi in cui le biotecnologie possono portare benefici all'ambiente⁽⁴⁾.

Informazioni al pubblico volte al progresso di dialogo e dibattito vengono fornite da diverse organizzazioni: un loro elenco si trova nel manuale delle fonti di informazione⁽⁵⁾ pubblicato dal Gruppo di Lavoro sulla Percezione delle Biotecnologie da parte dell'Opinione Pubblica dell'EFB, a cui si può farne richiesta.

CONCLUSIONI

Le biotecnologie ambientali vantano una "carriera" che data fin dal secolo scorso. Man mano che viene meglio apprezzata l'esigenza di passare a modelli di attività economica meno distruttivi, pur mantenendo il miglioramento delle condizioni sociali nonostante la crescita della popolazione, cresce il ruolo delle biotecnologie come strumenti di bonifica e di produzione industriale sostenibile. Queste tecnologie sono già state sperimentate in molti campi, e gli sviluppi futuri promettono di allargarne gli orizzonti applicativi. Alcune delle nuove tecniche attualmente sotto esame fanno uso di organismi geneticamente modificati progettati in modo da eseguire in modo efficiente compiti specifici. Vi sono delle preoccupazioni, come in tutte le situazioni in cui si ha l'introduzione nell'ambiente di una nuova tecnologia. Le biotecnologie rappresentano comunque un rilevante potenziale per la protezione e la bonifica dell'ambiente, e sono perciò in ottima posizione rispetto alle esigenze di sviluppo sostenibile, che diventa di importanza sempre più vitale, man mano che ci avviciniamo al prossimo millennio, con la continua crescita di popolazione, urbanizzazione ed industrializzazione.

Riferimenti Bibliografici

- 1 Council Directive on the Contained Use of Genetically Modified Micro-organisms. 1990, 90/219/EEC
- 2 Council Directive on the Deliberate Release into the Environment of Genetically Modified Organisms. 1990, 90/220/EEC
- 3 Eurobarometer 46.1, *The Europeans and modern biotechnology*, CEC DG XII, 1997
- 4 *How can Biotechnology benefit the Environment* (1997) Report of a Workshop organized by the EFB Taskgroup on Public Perceptions of Biotechnology and The Green Alliance on 13 January 1997 at the Science Museum in London, ISBN 90 76110 02 6.
- 5 *Biotechnology for non-specialists, a handbook of information sources*. (1997) EFB Taskgroup on Public perceptions of Biotechnology. ISBN 90-76110-01-8
- 6 *Biotechnology for a clean environment*. (1994) OECD. ISBN 92-64-14257-6
- 7 *Biotechnology for clean industrial products and processes: Towards industrial sustainability*. (1998) OECD. ISBN 92-64-16102-3