

Soluzioni di Biotecnologie Microbiche in Agricoltura

Tecnologie avanzate basate sull'uso di microrganismi benefici per ridisegnare la produzione alimentare, dai campi agricoli agli ambienti più estremi.

DOI 10.12910/EAI2025-062

di Annamaria Bevivino – Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali, Divisione Sistemi Agroalimentari Sostenibili - ENEA

Negli ultimi decenni, l'agricoltura ha affrontato sfide sempre più complesse dovute al cambiamento climatico, al degrado del suolo, alla scarsità d'acqua e alla necessità di ridurre l'uso di pesticidi e fertilizzanti chimici. In questo contesto, le **biotecnologie microbiche** rappresentano una soluzione innovativa e sostenibile, capace di migliorare la produttività agricola e ridurre l'impatto ambientale. Grazie al loro potenziale rigenerativo, le biotecnologie microbiche si stanno affermando come strumenti chiave per affrontare le sfide dell'agricoltura del futuro, conciliando produttività, sostenibilità e tutela dell'ambiente. Il suolo rappresenta una vera e propria banca della diversità microbica da cui una pianta preleva selettivamente il suo microbioma¹ per soddisfare le sue esigenze. Esso è una preziosa risorsa naturale che ospita hotspot microbici che svolgono un ruolo importante nella crescita e sviluppo delle piante, e nella salute del suolo; inoltre, forniscono alla pianta un genoma

secondario che offre funzioni ecologiche chiave e favoriscono l'ospite, influenzano la salute delle piante e la produttività e sono fondamentali per garantire la qualità e la sicurezza della produzione primaria delle piante⁽¹⁾. Migliorare produttività, qualità e sostenibilità delle produzioni alimentari utilizzando il "microbioma" è stato il principale obiettivo del progetto SIMBA² che ha portato allo sviluppo di soluzioni *microbiome-based* con conseguente riduzione degli input chimici, ed aumento della qualità e sicurezza dei raccolti, incrementando allo stesso tempo la fornitura di funzioni ecosistemiche benefiche per l'ambiente e la salute umana. I microrganismi benefici del suolo e associati alle piante – tra cui batteri, funghi e micorrize – vengono impiegati per promuovere la crescita delle piante, migliorare la fertilità del suolo, proteggere le colture da patogeni e ridurre l'uso di input chimici. Questi microrganismi, noti come **PGPM** (*Plant Growth-Promoting Microorganisms*), sono in grado di interagire

positivamente con le piante, sia a livello della rizosfera (zona del suolo adiacente alle radici) sia come endofiti (all'interno dei tessuti vegetali). Essi agiscono attraverso molteplici meccanismi, sia diretti che indiretti, contribuendo in modo significativo alla crescita, alla nutrizione e alla salute delle colture, fissano l'azoto atmosferico, solubilizzano il fosforo, producono fitormoni e rafforzano la resistenza delle piante agli stress biotici e abiotici. L'inoculo microbico con consorzi opportunamente selezionati, composti da microrganismi con funzioni complementari⁽²⁾, consente non solo di ridurre l'uso di fertilizzanti e pesticidi chimici, ma anche di promuovere la biodiversità microbica del suolo e migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse. In fase di produzione dei consorzi microbici, viene utilizzato un substrato derivato da scarti agro-industriali per la crescita microbica in bioreattori su scala pilota, riducendo l'impatto ambientale del processo⁽³⁾. Inoltre, l'integrazione con micorrize, con sostanze bioattive di origine ve-

¹ La parola microbioma deriva dal greco *micro* che significa "piccolo" e *bios* che significa "vita". Con questo termine, secondo la recente definizione di un gruppo di esperti internazionali nell'ambito del Microbiome Support Action (Berg et al., 2020. *Microbiome definition re-visited: old concepts and new challenges*. *Microbiome* 8, 103) non ci riferiamo soltanto ad una caratteristica comunità di microrganismi viventi o microbiota (composta prevalentemente da batteri, archaea, funghi, virus) che occupano un ambiente ben definito o habitat, con proprietà distinte, ma anche al loro teatro di attività, che comprende il loro patrimonio genetico, proteine/peptidi, lipidi, polisaccaridi, metaboliti microbici.

² Progetto SIMBA, Sustainable Innovation of MicroBiome Applications in Food System, finanziato dal programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione Europea, Grant agreement N. 818431 (<https://simbaproject.eu>).

getale che consentono di migliorare la shelf-life degli inoculi microbici, e con biochar rappresenta una strategia avanzata per potenziare l'efficacia delle biosoluzioni ⁽⁴⁾. Il biochar, grazie alla sua struttura porosa e alla capacità di trattenere acqua e nutrienti, agisce come un supporto ideale per la colonizzazione microbica, proteggendo i microrganismi benefici e favorendone la sopravvivenza e l'attività nel suolo. Il biochar funzionalizzato con PGPM contribuisce a migliorare la fertilità e la struttura del suolo, promuovere la crescita delle piante e aumentare la resilienza delle colture agli stress ambientali. Questo approccio integrato risulta particolarmente efficace in condizioni agricole estreme, come suoli degradati, poveri di nutrienti o ambienti semi-aridi, offrendo una soluzione sostenibile e rigenerativa per l'agricoltura del futuro. Le biotecnologie microbiche, grazie al loro potenziale rigenerativo, si stanno affermando come strumenti chiave per affrontare le sfide dell'agricoltura del futuro, conciliando produttività, sostenibilità e tutela dell'ambiente. L'impiego di consorzi microbici, biofertilizzanti e biostimolanti microbici contribuisce a migliorare la salute del suolo, l'efficienza nell'uso delle risorse e la resilienza delle colture agli stress ambientali, come siccità o attacchi patogeni. In questo contesto, le biotecnologie microbiche si inseriscono pienamente all'interno dei principi della **bioeconomia circolare**, favorendo un modello agricolo rigenerativo e a basse emissioni..

Come selezionare un opportuno inoculo microbico: sviluppo di consorzi microbici benefici

Negli ultimi anni è emerso con chiarezza il ruolo cruciale del microbioma per la salute e la produttività delle piante, portando allo sviluppo di soluzioni microbiologiche sostenibili per

l'agricoltura. Tuttavia, l'efficacia dei PGPM in condizioni di campo è spesso ostacolata da fattori ambientali variabili e dalla difficoltà di sopravvivenza e competizione con la microflora autoctona. Per affrontare queste criticità, la ricerca si sta orientando verso la formulazione di consorzi microbici multi-specie, che possano agire in modo sinergico o complementare, superando i limiti dei tradizionali inoculi a ceppo singolo. Tra queste, due strategie principali sono state adottate per sviluppare consorzi microbici benefici: i **SynComs** (consorzi microbici sintetici), ottenuti tramite l'assemblaggio artificiale di ceppi selezionati con caratteristiche funzionali diverse, e i **NatComs** (consorzi naturali), basati sull'impiego di comunità microbiche complesse direttamente isolate da ambienti naturali ⁽⁶⁾. I SynComs, composti generalmente da almeno tre ceppi batterici non appartenenti a comunità naturali preesistenti, sono progettati in modo razionale grazie anche all'integrazione di tecnologie genomiche avanzate e analisi bioinformatiche che permettono di selezionare tratti funzionali rilevanti (come la produzione di fitormoni, la resistenza agli antibiotici, la stimolazione immunitaria delle piante, ecc.). Le **collezioni microbiche** conservate in centri di ricerca, università o biobanche mettono a disposizione microrganismi già isolati e caratterizzati dal punto di vista fenotipico e genotipico ⁽⁵⁾. Queste collezioni rappresentano una risorsa fondamentale per l'assemblaggio di consorzi funzionali, in quanto consentono di selezionare ceppi complementari tra loro, valutare la loro compatibilità e prevedere le potenziali interazioni all'interno del consorzio e con la pianta ospite. Al contrario, i NatComs offrono comunità microbiche più ricche e rappresentative, derivate direttamente dal suolo e capaci

di mantenere interazioni ecologiche preesistenti, spesso fondamentali per l'emergere di proprietà comunitarie complesse. Il trapianto dell'intero microbioma rizosferico (RMT, *Rhizobiome Microbiome Transplant*) rappresenta una strategia emergente per trasferire comunità microbiche "protettive" da piante resistenti a piante suscettibili, con risultati incoraggianti nel controllo di patologie come l'avvizzimento batterico del pomodoro e la fusariosi del grano. Altre esperienze mostrano come, partendo da un unico campione ambientale, sia possibile isolare ceppi coesistenti e assemblare consorzi che conservano tratti emergenti come la produzione di biofilm e la tolleranza alla siccità. Questi consorzi, pur meno controllabili, riflettono meglio la complessità microbica naturale e potrebbero risultare più efficaci e stabili in campo, soprattutto se conservati e propagati attraverso tecniche di purificazione diretta da suolo naturale. In conclusione, i consorzi microbici offrono approcci promettenti per promuovere un'agricoltura più sostenibile e resiliente. I SynComs permettono una maggiore standardizzazione e prevedibilità, utili per applicazioni industriali e formulazioni commerciali, mentre i NatComs offrono una biodiversità più ampia e adattabilità all'ambiente. Entrambi gli approcci hanno mostrato potenziale nel migliorare la crescita delle colture, aumentare la fertilità del suolo, controllare fitopatogeni e ridurre l'uso di agrochimici, contribuendo così allo sviluppo di un'agricoltura più sostenibile e resiliente, sebbene siano necessari ulteriori studi per ottimizzare la formulazione, applicazione e conservazione di questi inoculi microbici in campo. L'integrazione di questi due approcci, unita all'uso di tecnologie omiche e di strumenti di modellazione ecologica, rappresenta una via promettente per

lo sviluppo di consorzi microbici benefici adatti alle sfide dell'agricoltura del futuro.

Impatti ambientali ed economici dell'uso di biofertilizzanti microbici ed aspetti normativi

L'utilizzo di inoculanti microbici in agricoltura rappresenta una delle soluzioni più promettenti per promuovere una produzione alimentare sostenibile, migliorare la salute del suolo e ridurre l'impiego di fertilizzanti e pesticidi chimici. Tuttavia, l'introduzione deliberata di microrganismi nel suolo o sulle colture solleva importanti questioni legate alla sicurezza ambientale, alla salute umana e alla regolamentazione del loro impiego. È pertanto fondamentale disporre di strumenti adeguati alla valutazione dell'impatto ambientale e di un solido quadro normativo che ne disciplini l'uso. È stato stimato che un'azienda agricola convenzionale che sostituisce i fertilizzanti convenzionali con biofertilizzanti e biochar può risparmiare $9.4 \text{ Mg CO}_2\text{-eq ha}^{-1}$, mentre un'azienda biologica può risparmiare $8.4 \text{ Mg CO}_2\text{-eq ha}^{-1}$ ⁽⁷⁾. La valutazione dell'impatto ambientale degli inoculanti microbici si concentra sull'analisi dei potenziali effetti diretti e indiretti che tali prodotti possono esercitare sull'ecosistema, includendo suolo, acqua, piante, microfauna e microbioma autoctono. L'introduzione di microrganismi esogeni, anche se benefici, può alterare l'equilibrio microbico del suolo, generare interazioni competitive indesiderate con le comunità microbiche native, provocare effetti non intenzionali su organismi non target (insetti, lombrichi, microrganismi simbiotici), portare ad un trasferimento genetico orizzontale con altri microrganismi (ad es. geni di resistenza agli antibiotici) ⁽⁸⁾. Per valutare l'impatto ambientale, vengono utilizzati approcci multidisciplinari



Figura 1 - Le biotecnologie microbiche: la rivoluzione rigenerativa per un'agricoltura sostenibile e la neutralità climatica in agricoltura.

che includono analisi metagenomiche e metatranscrittomiche, per monitorare i cambiamenti nelle comunità microbiche del suolo; valutazione della funzionalità del suolo, inclusi parametri come attività enzimatica, mineralizzazione dell'azoto e stabilità della sostanza organica. L'efficacia e la sicurezza di un inoculo devono essere verificate sia in condizioni controllate (laboratorio e serra) sia in condizioni di campo, su scala reale. Gli inoculanti microbici per uso agricolo rientrano in una categoria regolatoria complessa, che varia a seconda della funzione dichiarata (biofertilizzante, biostimolante, biopesticida) e del tipo di microrganismo impiegato. A partire dal 16 luglio 2022, il Regolamento (UE) 2019/1009 ha introdotto nuove regole comuni per la commercializzazione dei prodotti fertilizzanti UE, includendo per la prima volta una categoria dedicata ai prodotti contenenti microrganismi (Categoria Funzionale Componenti - CMC 7). I microrganismi ammessi devono appartenere alle seguenti specie: *Azotobacter spp.*, *Azospirillum spp.*, *Rhizobium spp.*, *Arbuscular mycorrhizal fungi*, *Bacillus spp.* Essi devono essere non patogeni, ben caratterizzati, e documentati per la funzione dichiarata. Inoltre,

devono rispettare criteri di purezza e limiti di contaminanti microbiologici e chimici. In Italia, i prodotti a base di microrganismi sono disciplinati anche dal D.lgs. 75/2010, che regola i fertilizzanti a uso nazionale. Per i prodotti non conformi al regolamento UE (es. contenenti microrganismi diversi o in combinazione non prevista), è necessario ottenere un'autorizzazione nazionale da parte del Ministero dell'Agricoltura (MASAF), con obbligo di fornire dati su efficacia, sicurezza e qualità. Qualora l'inoculante microbico abbia finalità di controllo biologico di fitopatogeni o insetti, rientra nella categoria dei prodotti fitosanitari e deve essere autorizzato secondo il Regolamento (CE) 1107/2009. In tal caso, è necessaria una valutazione di rischio ambientale più rigorosa, che include dossier tossicologici, ecotossicologici e ambientali. Nonostante il crescente interesse verso i microrganismi benefici in agricoltura, permangono diverse sfide normative e scientifiche, quali l'assenza di standard internazionali armonizzati per la valutazione dell'impatto ambientale; la lentezza delle procedure di autorizzazione per nuovi ceppi microbici o consorzi complessi; la difficoltà nella classificazione

dei prodotti (fertilizzanti, biostimolanti, pesticidi), spesso ambigui nei meccanismi d'azione; la necessità di validare strumenti di monitoraggio per la tracciabilità e la stabilità ecologica degli inoculanti.

La ricerca futura dovrà puntare a sviluppare linee guida armonizzate per la valutazione del rischio ambientale dei consorzi microbici, incentivare la creazione di banche dati pubbliche sui ceppi autorizzati, e promuovere modelli normativi flessibili, che valorizzino l'innovazione senza compromettere la biosicurezza.

Conclusione

L'utilizzo di inoculanti microbici rappresenta una strategia chiave per una transizione agroecologica sostenibile, e richiede una valutazione attenta del loro impatto sull'ambiente e un solido inquadramento normativo. Solo attraverso un approccio integrato tra scienza, regolamentazione e innovazione sarà possibile garantire la sicurezza, l'efficacia e l'accettabilità di questi strumenti biologici nel contesto agricolo moderno. Sebbene dal punto di vista economico l'adozione di biofertilizzanti microbici risulti attualmente più onerosa rispetto ai metodi convenzionali, i vantaggi ambientali sono significativi: drastica

riduzione dell'impronta di carbonio, miglioramento della qualità del suolo e mantenimento della biodiversità microbica, eliminazione dei pesticidi senza perdita di produttività, riduzione dei rischi di eutrofizzazione e inquinamento delle acque, potenziale monetizzazione attraverso i crediti di carbonio. In una visione a medio-lungo termine, l'adozione di queste pratiche può favorire la transizione verso un'agricoltura più sostenibile, resiliente e conforme agli obiettivi europei per la neutralità climatica.

per info: annamaria.bevivino@enea.it

Riferimenti bibliografici

1. A. Bevivino, A. Sonnino, A. Rossi (2020), "Il microbioma dell'agro-ecosistema al servizio della produzione primaria", *Accademia dei Georgofili*, vol. 17, No. Supplemento, 357-374, Firenze, ISSN: 0367-4134, <https://www.georgofili.net/articoli/laccademia-per-il-post-covid-19/7873>
2. S. Tabacchioni, S. Passato, P. Ambrosino, L. Huang, M. Caldara, C. Cantale, J. Hett, A. Del Fiore, A. Fiore, A. Schlüter, A. Sczyrba, E. Maestri, N. Marmiroli, D. Neuhoof, J. Nesme, S. Sørensen, G. Aprea, C. Nobili, O. Presenti, G. Giovannetti, C. Giovannetti, A. Pihlanto, A. Brunori, A. Bevivino (2021), "Identification of beneficial microbial consortia and bioactive compounds with potential as plant biostimulants for a sustainable agriculture. *Microorganisms*", 19;9(2):426. doi: 10.3390/microorganisms9020426.
3. R.A. Magarelli, M. Trupo, A. Ambrico, V. Larocca, M. Martino, S. Palazzo, R. Balducchi, V. Joutsjoki, A. Pihlanto, A. Bevivino (2022) "Designing a waste-based culture medium for the production of plant growth promoting microorganisms based on cladodes juice from *Opuntia ficus-indica* pruning", *Fermentation*, 8, 225, <https://doi.org/10.3390/fermentation8050225>
4. M. Gulli, L. Cangili, S. Frusciante, S. Graziano, M. Caldara, A. Fiore, A.M. Klonowski, E. Maestri, A. Brunori, A. Mengoni, A. Pihlanto, G. Di Retto, N. Marmiroli, A. Bevivino (2025), "The relevance of biochar and co-applied SynComs on maize quality and sustainability: Evidence from field experiments", *Science of The Total Environment*, volume 968, 178872, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178872>.
5. M. Moretti, J. Tartaglia, G.P. Accotto, M.S. Beato, V. Bernini, A. Bevivino, M.B. Boniotti, M. Budroni, P. Buzzini, S. Carrara, F. Cerino, C.E. Cocuzza, R. Comunian, S. Cosentino, A. D'Acerno, P. De Dea, L. Garzoli, M. Gullo, S. Lampis, A. Moretti, A. Natale, G. Perrone, A.M. Persiani, I. Perugini, M. Pitti, A. Poli, A. Pollio, A. Reale, A. Ricciardi, C. Sbarra, L. Selbmann, L. Settani, S. Tpsio, B. Turchetti, P. Visconti, M. Zotti, G.C. Varese (2024) "Treasures of Italian microbial culture collections: an overview of preserved biological resources, offered services and know-how, and management", *Sustainability* 16, 3777. <https://doi.org/10.3390/su16093777>
6. E. Clagnan, M. Costanzo, A. Visca, L. Di Gregorio, S. Tabacchioni, E. Colantoni, F. Sevi, F. Sbarra, A. Bindo, L. Nolfi, R.A. Magarelli, M. Trupo, A. Ambrico, A. Bevivino (2024) "Culturomics- and metagenomics-based insights into the soil microbiome preservation and application for sustainable agriculture", *Frontiers in Microbiology* 15:1473666. doi: 10.3389/fmicb.2024.1473666
7. S. Graziano, M. Caldara, M. Gulli, S. Cornali, I. Vassura, I. Coralli, L. Pagano, M. Marmiroli, M. Donati, A. Bevivino, E. Maestri, A.A. Keller, N. Marmiroli (2025) "Improving the sustainability of tomato production with biochar and biofertilizers in Emilia-Romagna, Italy. *Soil Use and Management*. 41:e70091; <https://doi.org/10.1111/sum.70091>
8. A. Visca, L. Di Gregorio, E. Clagnan, A. Bevivino (2024) "Sustainable strategies: Nature-based solutions to tackle antibiotic resistance gene proliferation and improve agricultural productivity and soil quality". *Environmental Research* 248:118395. doi: 10.1016/j.envres.2024.118395.

Finanziamenti

- Progetto SIMBA - GA n. 818431 <https://sostenibilita.enea.it/projects/simba>
- Progetto DELISOIL - GA n. 101112855 <https://agrifood.sostenibilita.enea.it/projects/delisoil>
- Progetto MULTISOIL - GA n.101218951 <https://sostenibilita.enea.it/projects/multisoil>
- Progetto SUS-MIRRI.IT - codice N° IR00000005 <https://sostenibilita.enea.it/projects/sus-mirriit>
- Progetto SOILHUB2 - CUP C87G24001420001 <https://sostenibilita.enea.it/projects/soilhub2>