

Agricoltura cellulare vegetale e sistemi indoor ad alta tecnologia per produzioni agroalimentari sostenibili e di qualità

Innovazioni come agricoltura cellulare e sistemi indoor ridefiniscono i modelli produttivi, integrando biotecnologie e tecnologie avanzate per una filiera alimentare sostenibile anche in contesti urbani ed estremi.

DOI 10.12910/EAI2025-061

di Silvia Massa, Luca Nardi, Elisabetta Bennici – Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali, Laboratorio Agricoltura 4.0 – ENEA

Colture cellulari vegetali: dalle applicazioni consolidate a nuove frontiere.

Le colture cellulari vegetali *in vitro* rappresentano una tecnica fondamentale della biotecnologia vegetale, consentendo la propagazione e manipolazione di cellule, tessuti o organi in condizioni sterili e controllate. Le loro basi teoriche risalgono a Schleiden e Schwann, mentre Haberlandt (1902) propose la coltivazione artificiale delle cellule vegetali, ponendo le basi di questa tecnologia. I primi successi sperimentali arrivarono negli anni '30 con White, Gautheret e Morel, seguiti dalle scoperte di Thimann e Skoog sugli ormoni vegetali (anni '40) e dal terreno di coltura MS di Murashige e Skoog (1962), ad oggi uno standard mondiale. Dagli anni '70 la tecnica è stata applicata per la micropropagazione, rigenerazione e studio di specie agronomiche e per la produzione di metaboliti bioattivi di interesse farmaceutico, nutraceutico e cosmetico.

La tecnica prevede l'isolamento di espianti vegetali, sterilizzati e col-

tivati in mezzi nutritivi con sali, vitamine, saccarosio e fitoregolatori. Grazie alla totipotenza cellulare, la composizione in fitoregolatori del terreno di coltura può indirizzare le cellule verso la formazione di callo (coltura di cellule indifferenziate) o la rigenerazione completa della pianta attraverso l'insorgenza sequenziale di tessuti ed organi specializzati come radici ed apici. Le colture di callo friabile permettono inoltre la creazione di sospensioni cellulari in mezzi liquidi in agitazione, favorendo accumulo di biomassa e di metaboliti specializzati di vario interesse commerciale (Figura 1).

Le tecniche di coltura cellulare vegetale *in vitro* hanno costituito anche la base delle moderne biotecnologie vegetali. Tecniche di evoluzione assistita (TEA) e editing genomico applicate direttamente sulle cellule vegetali consentono modifiche precise a livello di singolo nucleotide, trasferibili a piante intere grazie alle loro capacità di rigenerazione. L'ingegneria genetica applicata alle cellule vegetali ha ampliato le applicazioni del *plant mo-*

lecular farming, con successi come il biofarmaco Elelyso® (taliglucerasse alfa), prodotto in colture cellulari in sospensione di carota e approvato

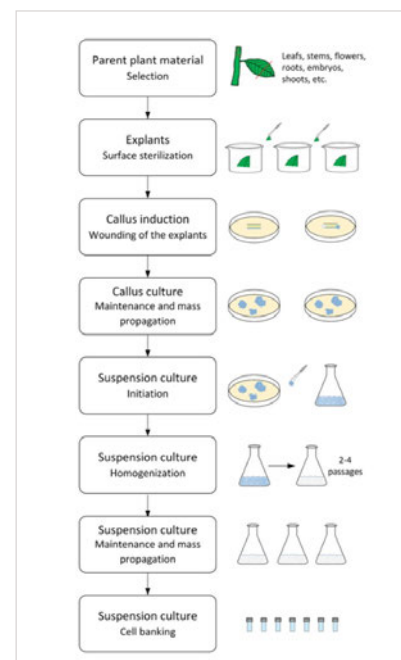


Figura 1 - Rappresentazione schematica della procedura per l'allestimento di una coltura in sospensione di cellule vegetali (Eibl et al., 2018).

dalla FDA nel 2012 anche per uso pediatrico per il trattamento della malattia di Gaucher. Le colture cellulari in sospensione rappresentano una piattaforma produttiva efficiente e sostenibile, che favorisce la conservazione della biodiversità riducendo la raccolta di piante selvatiche e consentendo la selezione di linee cellulari ottimizzate per vari scopi industriali.

Agricoltura cellulare vegetale: una possibile rivoluzione alimentare

La *cell agriculture* utilizza colture cellulari di batteri, microalghe, cellule vegetali o animali per produrre alimenti (Rischer et al., 2020). Le colture cellulari vegetali in bioreattori offrono una fonte innovativa di biomassa alimentare, ricca di proteine (14–19%), fibre (21–37%), zuccheri (18–33%), lipidi di qualità e metaboliti bioattivi (Nordlund et al., 2018; Wells et al., 2017). Fresche o liofilizzate, possono avere profili nutrizionali pari o superiori al materiale vegetale di partenza, con elevato contenuto di aminoacidi essenziali, acidi grassi polinsaturi, fitosteroli e composti antiossidanti.

Studi su bacche artiche, cacao e carota dimostrano che le colture cellulari possono superare i frutti originari in polifenoli, antociani, proteine e acidi grassi essenziali (Eibl et al., 2018; Gubser et al., 2021). Colture cellulari di cacao hanno permesso la produzione di cioccolato sperimentale con profili aromatici fruttati e alti livelli di polifenoli (6,69 g/kg), ma ridotti livelli di caffeina e teobromina; analogamente, sostituti del caffè sono stati ottenuti da colture cellulari in sospensione di *Coffea arabica*, liofilizzate e tostate, con note aromatiche più affumicate del caffè tradizionale (Aisala et al., 2023).

Il progetto ENEA NUTRI3D (MaNU-facTuRIng 3D di alimenti vegetali di nuova generazione per la nutrizione sana) ha creato snack stampabili in

3D, utilizzando cellule vegetali vive e sottoprodotti agroalimentari, ottenendo prodotti personalizzabili per composizione, sapore e texture. Gli alimenti così ottenuti sono risultati ricchi di antiossidanti e sensorialmente gradevoli. Il progetto ENEA VEG4FUN (Cellule vegetali per la produzione di alimenti ad alto valore nutrizionale) ha studiato le colture cellulari vegetali come ingredienti funzionali, valutando anche l'accettabilità sociale di questi novel food. I consumatori hanno mostrato interesse per alimenti innovativi che siano salutari, sostenibili e trasparenti nei processi. Questa tecnologia è particolarmente promettente in contesti con risorse naturali limitate: le colture cellulari possono essere coltivate in bioreattori chiusi, anche senza luce, utilizzando spazio e risorse minime, e offrendo una produzione scalabile e continua di nutrienti ad alto valore biologico. Inoltre, la standardizzazione della qualità, l'assenza di patogeni e la possibilità di personalizzazione del contenuto nutrizionale le rendono ideali per supportare la dieta in diversi contesti.

La sicurezza alimentare degli alimenti derivati da colture cellulari vegetali può essere garantita dall'uso controllato di fitoregolatori, naturali o sintetici, nei terreni di coltura. Pur essendo alcuni sintetici soggetti a regolamentazioni, la loro presenza residua è minima, con tossicità comparabile al materiale di partenza (Hakkinen et al., 2020). Dal punto di vista economico e ambientale, la sostituzione parziale (75–83%) del saccarosio (la componente più costosa dei terreni di coltura vegetale in vitro) con sottoprodotti lattiero-caseari (es. caseina) non compromette la crescita o la qualità nutrizionale delle colture, riducendo i costi di produzione. L'analisi del ciclo di vita (LCA) su colture di *Rubus chamaemorus* (mora

artica) ha evidenziato un elevato impatto ambientale in termini di Global Warming Potential, Fossil Energy Use Potential, Terrestrial Acidification Potential (82–93%), principalmente dovuto all'elevato consumo elettrico dei bioreattori. L'adozione di energie rinnovabili, come quella eolica, può ridurre tale impatto tra il 34% e l'81%, mentre miglioramenti nell'efficienza energetica e riduzione dei tempi di coltura possono apportare ulteriori riduzioni del 4–47% (Hakkinen et al., 2020). In confronto ad altri novel food, l'impatto ambientale delle colture cellulari vegetali è paragonabile a quello degli alimenti da microalghe, con potenziale di miglioramento grazie ai progressi tecnologici (Kobayashi et al., 2022).

Sistemi di produzione agricola indoor ad alta tecnologia

I sistemi di produzione agricola indoor mirano a coltivare prodotti ad alto valore, ottimizzando resa, qualità e uso efficiente delle risorse (energia, acqua, illuminazione, fertilizzanti, substrati). L'emergere delle Fattorie Verticali (*Vertical Farms*) con illuminazione artificiale ha aperto nuove prospettive per l'agricoltura urbana e periurbana, offrendo soluzioni ai problemi legati ai cambiamenti climatici e alla disponibilità di suolo (Bantis et al., 2024). Progressi tecnologici e ricerche approfondite in ambiente controllato hanno permesso la creazione di moduli produttivi efficienti e indipendenti dal clima, capaci di integrare anche sistemi di colture in vitro (Srivastav et al., 2025; Hati et al., 2021).

La domanda dei consumatori per prodotti freschi, genuini, sostenibili e tracciabili ha guidato, negli ultimi dieci anni, lo sviluppo di sistemi locali per la produzione di cibo fresco, in alternativa ai sistemi convenzionali. Questi sistemi adottano un design

modulare con coltivazione su più livelli, ottimizzando lo spazio disponibile anche all'interno degli edifici urbani (Figura 2).

Le colture vengono realizzate con tecniche idroponiche e/o aeroponiche, in cui la soluzione nutritiva mantiene il substrato umido e fornisce i nutrienti necessari per completare il ciclo di crescita. La scelta del fertilizzante dipende dalla specie vegetale e dal tipo di coltivazione, mentre il sistema di distribuzione varia in base alle caratteristiche del modulo.

La dimensione degli impianti varia da micro-unità (Micro-PFAL Plant factory with Artificial Lighting, 0,03-1 m³) collocabili sopra o sotto il piano di lavoro domestico, a unità medio-grandi (2-38 m³, mini-medie PFAL), container farm (38-76 m³ ISO20/ISO40) e vertical farm (100-13.000 m³; Kozai et al., 2019).

Nei sistemi indoor si impiegano LED avanzati in grado di modulare spettro, intensità e fotoperiodo in funzione delle esigenze delle piante.

Algoritmi di controllo in tempo reale consentono regolazioni rapide (<2 s) e precise (>97%), con incrementi di produttività fino al 15% e riduzione dei consumi energetici del 20-28% rispetto a modelli statici (Kharraz et al., 2025).

L'integrazione di sensori e tecniche diagnostiche non distruttive permette di monitorare parametri vitali come temperatura, umidità, concentrazione di nutrienti e stress delle piante, consentendo una gestione smart e personalizzata. I dati raccolti vengono elaborati da sistemi intelligenti che modulano luce, acqua e nutrienti in tempo reale, creando vere e proprie "ricette di coltivazione" (Figura 3)

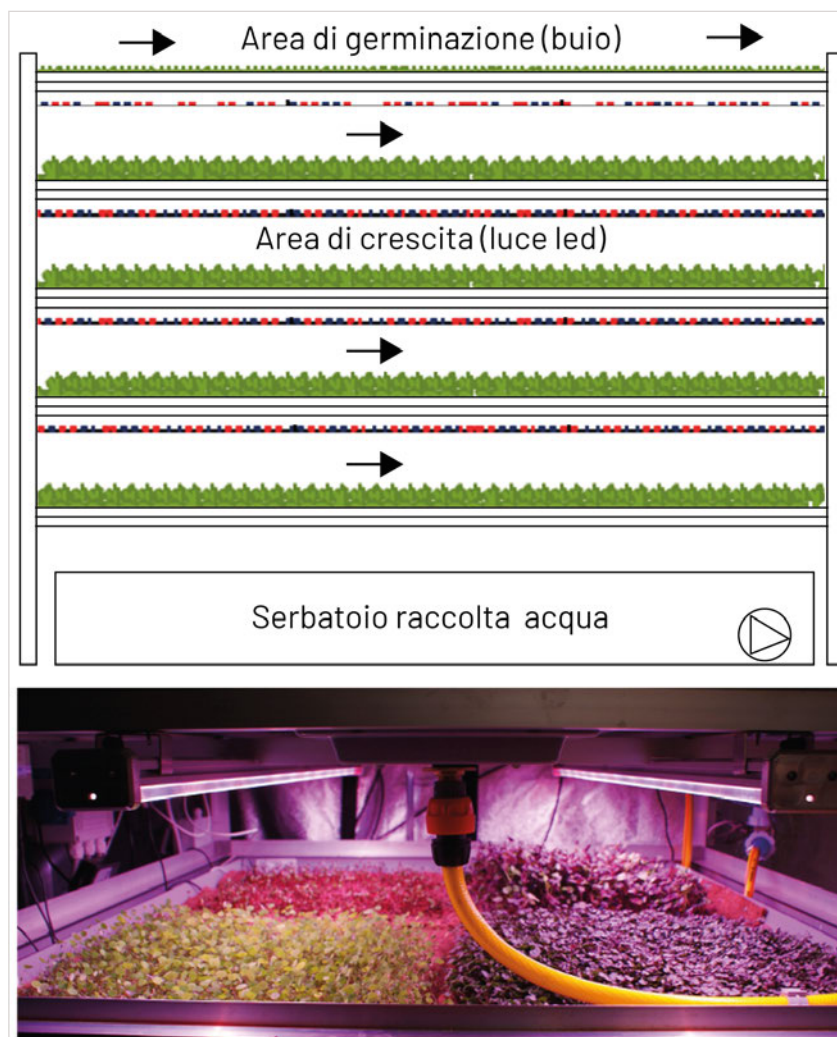


Figura 2 - Tipico sistema di coltivazione idroponico multilivello per vertical farming (sopra) dettaglio di una coltivazione idroponica di microverdure con illuminazione LED.

Questo approccio favorisce pratiche sostenibili, producendo alimenti freschi, nutrienti e pronti al consumo, a km zero, con ridotta impronta ecologica e privi di trattamenti chimici, grazie al contenimento che impedisce l'ingresso di parassiti e patogeni. I sistemi indoor di ultima generazione conciliano produttività,

qualità e sostenibilità, trasformando la coltivazione in ambienti controllati e stimolando l'innovazione nel settore agroalimentare (Kozai et al., 2019).

per info: silvia.massa@enea.it

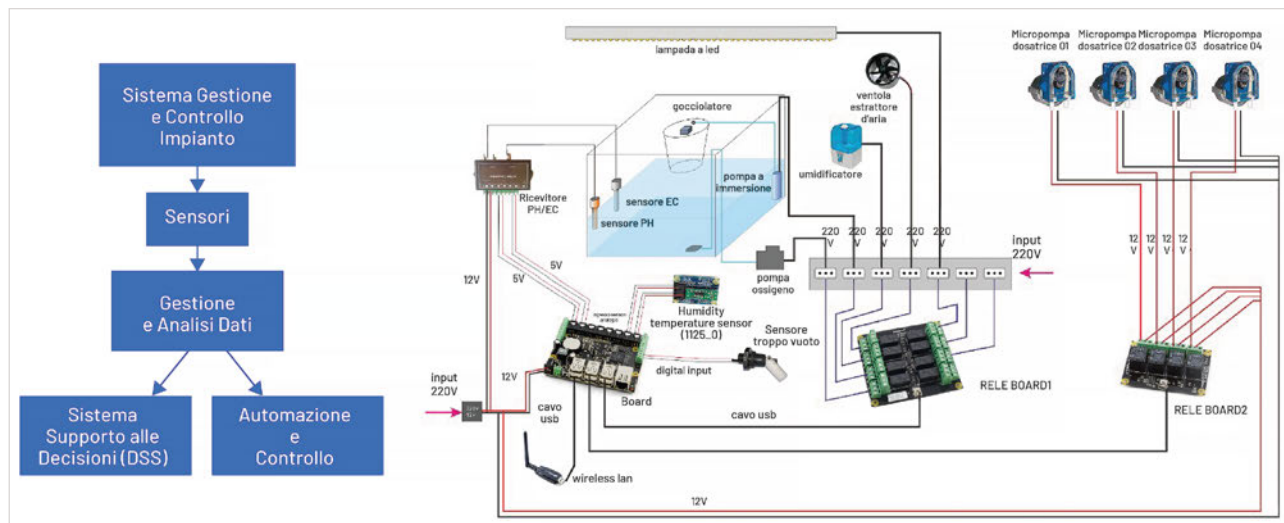


Figura 3 - Sistema di gestione e controllo collegato ad un impianto di coltivazione idroponica integrato di sensori ed attuatori.

Bibliografia

- Bantis F., Chatzigeorgiou I. M., M. Sismanis, G. K. Ntinis, and A. Koukounaras (2024) "Vegetable Production in PFALs: Control of Micro-Environmental Factors, Principal Components and Automated Systems," Agriculture, 14(4), 642 doi: 10.3390/agriculture14040642.
- Efferth, T. (2019). Biotechnology applications of plant callus cultures. Engineering, 5, 50-59.
- Eibl, R., Meier, P., Eibl-Schindler, M., Peuker, M., & Eibl, D. (2018). Plant cell culture technology in the cosmetics and food industries: Current state and future trends. Applied Microbiology and Biotechnology, 102(18), 8015-8021.
- Gubser, G., Vollenweider, S., Eibl, D., & Eibl, R. (2021). Food ingredients and food made with plant cell and tissue cultures: State-of-the-art and future trends. Engineering in Life Sciences, 21(2), 87-98.
- Hati, A. J., & Singh, R. R. (2021). Smart Indoor Farms: Leveraging Technological Advancements to Power a Sustainable Agricultural Revolution. AgriEngineering, 3(4), 728-767. <https://doi.org/10.3390/agriengineering3040047>
- Kharraz, N., Revoly, A., & Szabó, I. (2025). IoT-Based Adaptive Lighting Framework for Optimizing Energy Efficiency and Crop Yield in Indoor Farming. Journal of Sensor and Actuator Networks, 14(3), 59. <https://doi.org/10.3390/jsan14030059>
- Kobayashi, Y., Kärkkäinen, E., Häkkinen, S. T., Nohynek, L., Ritala, A., Rischer, H., & Tuomisto, H. L. (2022). Life cycle assessment of plant cell cultures. Science of The Total Environment, 808, 152158.
- Aisala, H., Kärkkäinen, E., Jokinen, I., Seppänen-Laakso, T., & Rischer, H. (2023). Proof of concept for cell culture-based coffee. Journal of Agricultural and Food Chemistry.
- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (Eds.). (2019). Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production. Academic press.
- Nordlund, E., Lille, M., Silventoinen, P., Nygren, H., Seppänen-Laakso, T., Mikkelsen, A., Aura, A.-M., Heiniö, R.-L., Nohynek, L., Puupponen-Pimiä, R., & Rischer, H. (2018). Plant cells as food – A concept taking shape. Food Research International, 107, 297-305.
- Rischer, H., Szilvay, G., & Oksman-Caldentey, K. (2020). Cellular agriculture – Industrial biotechnology for food and materials. Current Opinion in Biotechnology, 61, 128-134.
- Srivastav, A. K. and Das, P. (2025). Biotechnology and iot in agriculture and food production.. <https://doi.org/10.1007/979-8-8688-1469-3>
- Wells, M. L., Potin, P., Craigie, J. S., Raven, J. A., Merchant, S. S., Helliwell, K. E., Smith, A. G., Camire, M. E., & Brawley, S. H. (2017). Algae as nutritional and functional food sources: Revisiting our understanding. Journal of Applied Phycology, 29(2), 949-982.