



DOCUMENTO
INFORMATIVO

AGROSPAZIO E TECNOLOGIE ABILITANTI SPACE-BASED: SCENARI E INNOVAZIONE PER L'AGRICOLTURA E IL SISTEMA AGROALIMENTARE SULLA TERRA

Documento redatto dal Gruppo di Lavoro del Cluster Agrifood Nazionale CL.A.N.
coordinato dalla Dott.ssa Silvia Massa

Indice autori

Coordinatrice:

Silvia Massa – ENEA

Referenti dei Gruppi di Redazione:

Stefania De Pascale – Università degli Studi di Napoli Federico II

Stefano Bona – Università degli Studi di Padova

Luigi Galimberti – ToSeed Partners

Veronica De Micco – Università degli Studi di Napoli Federico II

Silvio Salvi – Alma Mater Università di Bologna

Stefania Ruggeri – CREA

Patrizia Fava – Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

Marco Sozzi – Università degli Studi di Padova

Giorgio Saio – TICASS

Gruppo di Redazione:

Alberto Battistelli – CNR

Marco Bietresato – Università degli Studi di Udine

Enrico Corrado Borgogno Mondino – Università degli Studi di Torino

Lorenzo Calabri – ART-ER

Matteo Caser – Università degli Studi di Torino

Vito Cerasola – Alma Mater Università di Bologna

Lorenzo Di Benedetto – ART-ER

Francesca Masino – Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

Filomena Nazzaro – CNR

Silvana Nicola – Università degli Studi di Torino

Alessandro Pantano – Confagricoltura

Enzo Perri – CREA

Cosimo Sarti – Università degli Studi di Torino; Università di Trento

Giorgia Tomarchio – Hortomio



“AGROSPAZIO E TECNOLOGIE ABILITANTI SPACE-BASED: SCENARI E INNOVAZIONE PER L’AGRICOLTURA E IL SISTEMA AGROALIMENTARE SULLA TERRA”

Executive Summary

Negli ultimi anni, l’Unione Europea ha delineato una visione strategica sempre più orientata verso un futuro più sostenibile, digitale e resiliente, nel quale sostenibilità ambientale, sicurezza alimentare, autonomia strategica e innovazione tecnologica rappresentano pilastri centrali delle politiche per gli Stati Membri. In questo scenario, il sistema agroalimentare è chiamato ad affrontare una trasformazione profonda: produrre di più consumando meno risorse, adattarsi ai cambiamenti climatici, aumentare la resilienza delle filiere e garantire qualità, tracciabilità e sicurezza alimentare.

Oggi, proprio dallo Spazio, arrivano nuove prospettive, strumenti e soluzioni per affrontare queste sfide.

L’attività spaziale globale sta vivendo una fase di accelerazione senza precedenti. Nuovi lanciatori, infrastrutture orbitali, sistemi satellitari avanzati e il ritorno delle missioni umane sulla Luna attraverso il programma ARTEMIS stanno ridefinendo la Space Economy e le sue ricadute terrestri. Il programma ARTEMIS segna un passaggio storico: dopo oltre cinquant’anni, l’esplorazione lunare non è più una prospettiva episodica, ma l’avvio di una presenza umana sostenibile oltre l’orbita terrestre.

In questo contesto, la produzione autonoma di cibo, il recupero delle risorse, la gestione circolare degli scarti e la capacità di coltivare in ambienti estremi non rappresentano più attività sperimentali marginali, ma requisiti fondamentali per la sopravvivenza e l’autonomia delle future basi lunari e, successivamente, marziane.

I Sistemi Biorigenerativi per il Supporto alla Vita (Bioregenerative Life Support Systems – BLSS), oggi sviluppati nell’ambito delle roadmap internazionali collegate ad ARTEMIS, costituiscono uno degli esempi più avanzati di integrazione tra biotecnologie, agricoltura controllata, economia circolare, sensoristica avanzata, intelligenza artificiale e gestione efficiente delle risorse. Questi sistemi sono progettati per produrre cibo, rigenerare acqua e aria, valorizzare scarti e minimizzare gli sprechi in ambienti confinati, ostili e ad alta limitazione di risorse.

Proprio per questo motivo, le tecnologie agrosenziali stanno diventando sempre più rilevanti anche sulla Terra. Le soluzioni sviluppate per l’esplorazione spaziale stanno infatti aprendo nuove prospettive per:

- agricoltura di precisione e digitale;
- coltivazioni indoor e vertical farming;
- gestione efficiente dell’acqua e dei nutrienti;
- produzione alimentare in ambienti urbani o marginali;
- monitoraggio ambientale avanzato;
- formulazione nuovi alimenti funzionali;
- valorizzazione degli scarti agroalimentari;
- resilienza delle colture agli stress climatici e ambientali.

Lo Spazio, in altre parole, rappresenta oggi un laboratorio estremo di innovazione sostenibile, capace di generare tecnologie ad elevata trasferibilità per il sistema agroalimentare terrestre.



Parallelamente, le infrastrutture spaziali stanno assumendo un ruolo sempre più strategico anche per l'agricoltura moderna. Dall'osservazione della Terra ai sistemi GNSS, (Global Navigation Satellite System) dalla sensoristica distribuita all'analisi avanzata dei dati, le tecnologie satellitari consentono oggi monitoraggi ad alta precisione di colture, suoli, consumi idrici, fenomeni climatici e fitopatologie, supportando modelli decisionali più efficienti, sostenibili e predittivi.

In questo scenario, l'Italia riveste un ruolo di assoluto rilievo. Il Paese è tra i principali attori europei della Space Economy, con una consolidata leadership industriale e scientifica che ha contribuito, tra l'altro, a circa il 40% del volume pressurizzato della Stazione Spaziale Internazionale. Parallelamente, il sistema agroalimentare italiano rappresenta uno dei principali *asset* economici nazionali, con oltre 600 miliardi di euro di valore generato lungo l'intera filiera estesa (Rapporto Federalimentare-Censis).

La convergenza tra questi due ambiti strategici – Spazio e Agroalimentare – rappresenta quindi un'opportunità unica per sviluppare nuove traiettorie di innovazione ad alto impatto tecnologico, industriale e ambientale.

Il documento “**AGROSPAZIO E TECNOLOGIE ABILITANTI SPACE-BASED: SCENARI E INNOVAZIONE PER L'AGRICOLTURA ED IL SISTEMA AGROALIMENTARE SULLA TERRA**” nasce dal lavoro congiunto del Gruppo di Lavoro Agros spazio del Cluster Agrifood Nazionale CL.A.N., composto da esperti del mondo accademico, della ricerca applicata e dell'industria, con il supporto della Segreteria Tecnica del Cluster.

L'obiettivo del documento è duplice:

- offrire una panoramica aggiornata e autorevole delle tecnologie, dei sistemi e delle strategie sviluppate per la produzione agroalimentare nello Spazio;
- evidenziare le opportunità di trasferimento tecnologico e le ricadute applicative sulla Terra, in particolare per l'agricoltura sostenibile, la digitalizzazione, la produzione in ambienti controllati e l'innovazione agroalimentare.

Il documento è articolato in cinque capitoli tematici.

Capitolo 1 – Coltivare nello Spazio: sistemi e tecnologie per la produzione extra-terrestre

Il capitolo ripercorre l'evoluzione storica della coltivazione in ambiente spaziale, dalle prime intuizioni e sperimentazioni fino alle più recenti prospettive legate al programma ARTEMIS e alle future infrastrutture lunari. Vengono analizzati i sistemi biorigenerativi, le serre spaziali, le tecnologie di controllo ambientale, la sensoristica avanzata e gli approcci di smart farming sviluppati per missioni di lunga durata.

Capitolo 2 – Piante per lo Spazio: sfide, strategie e applicazioni terrestri

Il capitolo approfondisce gli effetti delle condizioni spaziali sulle piante – microgravità, radiazioni, isolamento e stress multipli – e le strategie biotecnologiche per sviluppare colture resilienti, efficienti e adattabili. Il capitolo affronta il ruolo delle Tecniche di Evoluzione Assistita (TEA) per la selezione di varietà adatte sia allo Spazio sia agli scenari climatici terrestri futuri.

Capitolo 3 – Space Nutrition

Il capitolo esplora il tema della nutrizione spaziale come elemento centrale della salute e della performance umana nelle missioni di lunga durata. Vengono affrontati lo sviluppo di alimenti funzionali e novel food ottenuti da scarti, alle tecnologie di conservazione e packaging, fino alla gestione della sicurezza alimentare.



Capitolo 4 – Dallo Spazio alla Terra: le tecnologie abilitanti ‘space-based’

Questo capitolo evidenzia le principali applicazioni terrestri di tecnologie spaziali per il settore agroalimentare come l’osservazione della Terra, l’agricoltura di precisione, i sistemi GNSS, l’automazione, la sensoristica, la gestione dati.

Capitolo 5 - Dalle tecnologie alle competenze: costruire il futuro dell’agricoltura tra Terra e Spazio

Il capitolo affronta il tema della formazione e della diffusione delle conoscenze come fattori chiave per l’adozione delle innovazioni agrosenziali e delle tecnologie abilitanti space-based.

Il capitolo si conclude con un’appendice operativa (Annex 1 e Annex 2) che raccoglie casi studio, schede tecniche, buone pratiche e soluzioni già applicate nell’ambito delle tecnologie abilitanti space-based, oltre a una mappatura di competenze, progetti, infrastrutture e facilities presenti all’interno del network CL.A.N. L’obiettivo è favorire nuove opportunità di collaborazione, networking, trasferimento tecnologico e sviluppo progettuale tra i Soci del Cluster.

Il documento “**AGROSPAZIO E TECNOLOGIE ABILITANTI SPACE-BASED: SCENARI E INNOVAZIONE PER L’AGRICOLTURA ED IL SISTEMA AGROALIMENTARE SULLA TERRA**” si inserisce in un contesto strategico pienamente coerente con le priorità europee e internazionali, incluse le roadmap di Horizon Europe, ESA, ASI e le nuove traiettorie industriali e scientifiche accelerate dal programma ARTEMIS e dalla crescente economia cislunare. Per manager, imprese, decisori pubblici, *stakeholder* territoriali e attori dell’innovazione, il documento rappresenta:

- una guida alle tecnologie emergenti ad alto potenziale applicativo;
- uno strumento per individuare nuove opportunità progettuali, industriali e di trasferimento tecnologico;
- una base per sviluppare sinergie tra ricerca, industria, agrifood e space economy;
- un riferimento per posizionarsi in una delle frontiere tecnologiche più dinamiche dei prossimi decenni.

Lo Spazio non è più un orizzonte distante o esclusivamente esplorativo: è una piattaforma tecnologica abilitante capace di generare innovazione, sostenibilità e valore concreto per l’agricoltura e il sistema agroalimentare del presente e del futuro.

Buona lettura.

La Coordinatrice, il Gruppo di Lavoro “Agrospazio” e la Segreteria Tecnica del CL.A.N.



INDICE

Capitolo 1 - Coltivare nello Spazio: sistemi e tecnologie per la produzione extraterrestre.....	7
Paragrafo 1.1 - La storia e l'evoluzione della coltivazione di piante nello spazio nel mondo, in Europa e in Italia	7
1.1.1 Dalle intuizioni pionieristiche ai primi esperimenti spaziali	7
1.1.2 Gli anni '60 e '70: le prime missioni e i primi esperimenti di coltivazione nello spazio	7
1.1.3 Dalle alghe alle piante superiori	8
1.1.4 Anni '80 e '90: CELSS, MELiSSA e le collaborazioni internazionali	8
1.1.5 L'ISS e le salad machines	9
1.1.6 L'esperienza italiana	10
1.1.7 Prospettive future.....	11
Paragrafo 1.2 - Strategie di coltivazione e supporto alla vita nelle missioni spaziali di lunga durata.....	14
1.2.1 Tipi e componenti dei Sistemi Biorigenerativi di Supporto alla Vita (BLSS)	14
1.2.2 Tecnologie di coltivazione e ambienti controllati.....	15
1.2.3 Criteri di selezione delle colture e specie candidate	16
1.2.4 Sistemi di coltivazione, controllo ambientale, integrazione ed esigenze future	16
1.2.5 Stato dell'arte e prospettive future.....	19
1.2.6 Ricadute a Terra.....	20
Paragrafo 1.3 - Tecnologie, sensoristica, smart farming, controllo ambientale e flussi biorigenerativi sviluppati per lo Spazio.....	24
1.3.1 Fondamenti per la gestione integrata dei nutrienti in habitat spaziali	24
1.3.2 Substrati e sistemi di fissaggio.....	25
1.3.3 Impianti accessori per l'ambiente confinato in sistemi bio-rigenerativi spaziali	26
1.3.4 Flussi per la valorizzazione degli scarti	27
1.3.5 Sensori e "lab-on-chip" per il controllo sostanze volatili e patogeni	27
1.3.6 Ricadute a Terra.....	29
Capitolo 2 - Piante per lo spazio: sfide, strategie e applicazioni terrestri	31
Paragrafo 2.1 - Effetti dell'ambiente spaziale sulle piante.....	31
Paragrafo 2.2 - Selezione delle colture e Tecniche di Evoluzione Assistita (TEA) per il raggiungimento dell'ideotipo spaziale.....	37
2.2.1 Ideotipo spaziale e criteri di selezione delle colture	37
2.2.2 Implementazione dell'ideotipo tramite miglioramento genetico e TEA.....	42
2.2.3 Co-sviluppo pianta-ambiente negli habitat spaziali artificiali.....	43
2.2.4 Prospettive future della ricerca nel settore del miglioramento genetico per agricoltura nello Spazio.....	43
2.2.5 Ricadute a Terra.....	43



Capitolo 3 - Space Nutrition	48
Paragrafo 3.1 - Space Nutrition	48
3.1.1 Le condizioni nello Spazio e la salute degli astronauti	48
3.1.2 Il ruolo centrale del microbiota intestinale	48
3.1.3 Alterazione del gusto	49
3.1.4 Prevenire, contrastare e curare e migliorare la qualità della vita nello spazio	49
3.1.5 Recupero e valorizzazione degli scarti agroalimentari	51
3.1.6. Il caso studio EVOOS - Extra-Virgin Olive Oil in Space project	52
Paragrafo 3.2 – Sicurezza alimentare nello spazio	57
3.2.1 Resistenza dei microrganismi nello spazio	57
3.2.2. L'importanza del packaging	59
3.2.3 Tecnologie di conservazione e controllo della sicurezza alimentare nello spazio (Francesca Masino)	62
Capitolo 4 Dallo Spazio alla Terra - Le tecnologie abilitanti "Space-based"	67
Paragrafo 4.1 - Telerilevamento, GNSS, trasmissione dati in agricoltura terrestre e utilizzo di tecnologie spaziali su macchine agricole	67
4.1.1 Telerilevamento	67
4.1.2 Global Navigation Satellite Systems (GNSS)	68
4.1.3 Trasmissione dei dati in agricoltura	69
4.1.4 Limiti alla diffusione delle nuove tecnologie	70
Capitolo 5 - Dalle tecnologie alle competenze: costruire il futuro dell'agricoltura tra Terra e Spazio	72
5.1 - Dalla serra alla stazione spaziale: competenze per l'agricoltura oltre la Terra	72
5.2 - Dati, satelliti e decisioni: le competenze per l'agricoltura digitale del futuro	75
5.3 Materiale informativo per i Soci CL.A.N. - APPENDICI	76
ANNEX 1 Ricognizione delle competenze, delle infrastrutture, delle progettualità in ambito agros spazio	77
ANNEX 2 Telerilevamento, GNSS, trasmissione dati e utilizzo di tecnologie spaziali su macchine agricole	83
SOGGETTI INTERESSATI	87



Capitolo 1 - Coltivare nello Spazio: sistemi e tecnologie per la produzione extraterrestre

Paragrafo 1.1 - La storia e l'evoluzione della coltivazione di piante nello spazio nel mondo, in Europa e in Italia

(Stefania De Pascale – Università degli Studi di Napoli Federico II)

1.1.1 Dalle intuizioni pionieristiche ai primi esperimenti spaziali

Nel II secolo d.C. lo scrittore siriano Luciano di Samosata, nella sua opera satirica *Storia vera*, immaginava mondi extraterrestri come luoghi coltivati e rigogliosi, popolati da piante fantastiche: viti da cui sgorgano fiumi di vino o i cui tralci si trasformano in esseri antropomorfi dai tratti femminili.

Dalla fantasia letteraria alla scienza e alla tecnologia spaziale il percorso è stato lungo quasi duemila anni. Eppure, l'idea che le piante possano accompagnare l'uomo oltre la Terra costituisce uno dei fili conduttori più affascinanti della storia dell'esplorazione spaziale.

A oggi non conosciamo mondi “vivi” che assomigliano alla nostra Terra. Tuttavia, l'idea di portare con noi le piante nello spazio per sostenere la vita umana ha assunto una dimensione scientifica concreta solo con l'inizio dell'esplorazione spaziale. Sin dalle prime missioni, astronauti e scienziati compresero che, per viaggi di lunga durata, non sarebbe stato possibile contare esclusivamente su riserve di ossigeno e cibo trasportate dalla Terra. Occorreva immaginare sistemi capaci di rigenerare aria, acqua e nutrienti: in questo contesto, le piante emersero subito come candidate ideali.

Le basi di questa intuizione risalgono già al XVIII secolo, quando Joseph Priestley dimostrò sperimentalmente che una pianta di menta era in grado di ristabilire la qualità dell'aria in un ambiente chiuso, un principio che oggi riconosciamo come alla base dei processi di rigenerazione atmosferica nei Sistemi Biorigenerativi di Supporto alla Vita (BLSS).

Nel primo Novecento, il visionario scienziato russo Konstantin Tsiolkovsky elaborò i primi modelli teorici di convivenza uomo-pianta in ambienti chiusi destinati allo spazio. Negli anni Cinquanta, Jack Myers avviò i primi studi sistematici sull'impiego di organismi fotoautotrofi, in particolare microalghe verdi unicellulari come *Chlorella*, per la rigenerazione dell'aria e la produzione di biomassa¹, ponendo le basi per lo sviluppo dei moderni sistemi biorigenerativi di supporto alla vita.

1.1.2 Gli anni '60 e '70: le prime missioni e i primi esperimenti di coltivazione nello spazio

Già a partire dagli anni Sessanta furono condotti i primi esperimenti di biologia spaziale, volti a studiare gli effetti della microgravità e delle radiazioni su organismi vegetali semplici.

Parallelamente, sia negli Stati Uniti sia in Unione Sovietica prese avvio la ricerca sui sistemi biologici chiusi destinati al supporto della vita umana nello spazio. In questo contesto nacque il progetto BIOS, promosso dall'Istituto di Biofisica di Krasnoyarsk, che rappresentò uno dei primi programmi di ricerca dedicati allo sviluppo di ecosistemi artificiali chiusi per future missioni di lunga durata². Le conoscenze acquisite in questa fase pionieristica costituirono le basi per gli sviluppi successivi dei sistemi biorigenerativi di supporto alla vita. Le stazioni spaziali della serie Salyut offrirono inoltre le prime opportunità per condurre esperimenti di biologia vegetale in orbita, contribuendo ad ampliare le conoscenze sulle risposte delle piante all'ambiente spaziale.

¹ Myers, 1962

² Gitelson et al., 2003



1.1.3 Dalle alghe alle piante superiori

L'evoluzione di queste ricerche trovò una prima importante applicazione sulla stazione spaziale russa Mir, che a partire dal 1990 ospitò la serra orbitante SVET, sviluppata dalla Bulgarian Academy of Sciences sotto la guida della biologa Tatiana Ivanova. SVET rappresentò una delle prime vere serre spaziali dedicate alla coltivazione di piante superiori in microgravità e aprì la strada ai successivi sistemi di crescita vegetale impiegati sulla Stazione Spaziale Internazionale³.

Negli stessi anni, il biologo americano Jack Myers e i colleghi coinvolti nei programmi di ricerca statunitensi si dedicarono allo studio di sistemi biologici chiusi basati su microalghe, in particolare *Chlorella*, per la rigenerazione dell'aria e la produzione di biomassa⁴. Tuttavia, i limiti nutrizionali e operativi di questi organismi portarono progressivamente a orientare la ricerca verso le piante superiori, capaci non solo di produrre ossigeno e alimenti, ma anche di contribuire alla rigenerazione dell'acqua e dei nutrienti all'interno di sistemi di riciclo integrati⁵.

In questo contesto il progetto BIOS, sviluppato tra gli anni Sessanta e Ottanta sotto la guida di Josef Gitelson e Henry Lisovsky presso l'Istituto di Biofisica di Krasnoyarsk, rappresentò il primo esempio maturo di ecosistema chiuso con presenza umana. Nei diversi moduli sperimentali le piante superiori sostituirono progressivamente le alghe come principale componente biologica del sistema, fornendo ossigeno, acqua e alimenti, mentre i rifiuti venivano riciclati all'interno dell'ecosistema artificiale⁶.

L'evoluzione di queste ricerche trovò una prima applicazione in orbita con la stazione spaziale Mir, che dal 1990 ospitò la serra SVET, sviluppata dalla Bulgarian Academy of Sciences sotto la guida della biologa Tatiana Ivanova. SVET rappresentò una delle prime vere serre spaziali dedicate alla coltivazione di piante superiori in microgravità e costituì un modello di riferimento per i successivi sistemi impiegati sulla Stazione Spaziale Internazionale⁷.

1.1.4 Anni '80 e '90: CELSS, MELiSSA e le collaborazioni internazionali

A partire dagli anni Ottanta, la NASA rilanciò la ricerca sui sistemi di supporto alla vita con il programma Controlled Ecological Life Support System (CELSS). L'obiettivo era coltivare piante alimentari come grano, patata, soia, riso e lattuga in ambienti chiusi e illuminati artificialmente⁸. Le ricerche proseguirono nel Biomass Production Chamber del Kennedy Space Center e presso il Johnson Space Center. Gli esperimenti dimostrarono il potenziale delle colture vegetali nella rigenerazione delle risorse vitali dell'equipaggio, confermando la capacità delle piante di produrre ossigeno, assimilare anidride carbonica e fornire biomassa alimentare (Wheeler, 2005). In questo contesto, in Europa nacque il progetto MELiSSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative), promosso dalla European Space Agency (ESA) e basato su un modello ciclico di rigenerazione delle risorse ispirato al funzionamento degli ecosistemi naturali⁹. MELiSSA divenne la piattaforma europea di riferimento per lo studio e lo sviluppo dei sistemi biorigenerativi di supporto alla vita.

Il programma ha avuto un ruolo chiave nell'integrare competenze multidisciplinari - dall'ingegneria dei sistemi biologici alla fisiologia vegetale - e nel promuovere applicazioni terrestri dei BLSS, contribuendo allo sviluppo di soluzioni innovative in ambiti quali le colture protette, il trattamento delle acque e il riciclo dei rifiuti organici.

³ Ivanova et al., 1996

⁴ Myers, 1962

⁵ Wheeler, 2005; Wheeler, 2010

⁶ Gitelson et al., 2003

⁷ Ivanova et al., 1996

⁸ MacElroy & Bredt, 1985; Wheeler, 2005

⁹ Hendrickx et al., 2006; Lasseur et al., 2010



Le ricerche contemporanee sui BLSS, anche nell'ambito del programma MELiSSA e delle collaborazioni internazionali coordinate dall'ESA, hanno ulteriormente rafforzato l'integrazione tra componenti biologiche e ingegneristiche, con particolare attenzione alla chiusura dei cicli di carbonio, azoto e acqua in vista delle future infrastrutture cislunari e delle missioni Artemis¹⁰.

1.1.5 L'ISS e le salad machines

Con la International Space Station (ISS), realizzata alla fine degli anni Novanta, l'agricoltura spaziale è entrata in una fase pienamente operativa. La ISS ha offerto un laboratorio unico per lo studio della crescita delle piante in microgravità per periodi prolungati, consentendo di analizzare anche gli effetti delle radiazioni, della limitata disponibilità di risorse e della necessità di gestire sistemi di coltivazione chiusi.

Negli ambienti orbitanti, le piante vengono coltivate in camere di crescita compatte, a ridotto consumo energetico e progettate per funzionare in microgravità. Lo sviluppo di questi sistemi si ispira al concetto di "Salad Machine", introdotto da Kliss e MacElroy (1990), basato sulla produzione continua di ortaggi freschi e piante aromatiche destinati a integrare la dieta degli astronauti durante missioni di lunga durata. Di conseguenza, la ricerca si è concentrata prevalentemente su specie a ciclo breve, caratterizzate da esigenze contenute in termini di spazio, risorse e tempi di coltivazione, con l'obiettivo di migliorare non solo l'apporto nutrizionale, ma anche il benessere psicologico dell'equipaggio.

Nel corso degli anni, a bordo della ISS sono stati sperimentati numerosi moduli di crescita, tra cui Astroculture™ System, Plant Growth Unit, Biomass Production System, Plant Research Unit ed European Modular Cultivation System (EMCS). Questi sistemi hanno contribuito in modo significativo allo sviluppo di soluzioni innovative per l'irrigazione capillare e per il rilascio controllato dei nutrienti, inclusi dispositivi passivi come il più recente Passive Orbital Nutrient Delivery System (PONDS).

Il progetto Veggie, avviato nel 2014 dalla NASA, ha rappresentato un punto di svolta¹¹. Grazie a un sistema di illuminazione a LED nelle lunghezze d'onda rossa, blu e verde, gli astronauti Scott Kelly, Kjell Lindgren e Kimia Yui hanno coltivato e, nel 2015, consumato per la prima volta ufficialmente una lattuga romana cresciuta nello spazio a "chilometro zero", segnando un momento storico per l'agricoltura spaziale. In condizioni di microgravità sono state coltivate con successo anche altre piante alimentari, come grano, pomodori nani, barbabietola e ravanelli. Anche una specie ornamentale, la zinnia, è riuscita a completare il ciclo di fioritura a bordo della Stazione Spaziale Internazionale.

Le numerose sperimentazioni condotte su piattaforme spaziali, tra cui i più recenti esperimenti Veggie e Advanced Plant Habitat (APH), hanno confermato la piena fattibilità della coltivazione in orbita¹². L'approccio delle salad machine, proposto da Kliss e MacElroy (1990) rappresenta oggi una fase di transizione verso sistemi più complessi, concepiti per il supporto alla vita di future basi lunari e marziane.

Gli studi più recenti condotti sia sulla ISS sia in condizioni spaziali simulate hanno approfondito gli effetti della gravità alterata e delle radiazioni ionizzanti sulla morfologia e sulla fisiologia delle colture orticole, fornendo dati fondamentali per l'integrazione delle piante nei BLSS delle future missioni Artemis e delle infrastrutture cislunari¹³.

¹⁰ De Micco et al., 2023

¹¹ Massa et al., 2016

¹² Monje et al., 2020

¹³ De Francesco et al., 2025; Pagliarello et al., 2023



1.1.6 L'esperienza italiana

In questo quadro internazionale anche l'Italia ha progressivamente assunto un ruolo di primo piano nello sviluppo dei BLSS, contribuendo sia alla ricerca di base sia allo sviluppo di tecnologie per le missioni spaziali. L'Italia, attraverso università e centri di ricerca, ha fornito contributi rilevanti nel contesto dell'agricoltura spaziale, in particolare nello studio della fisiologia delle piante in ambienti controllati e nell'ottimizzazione di colture idroponiche a ciclo chiuso¹⁴. Le ricerche italiane hanno messo in evidenza l'importanza della selezione delle specie vegetali da coltivare nello spazio in funzione dell'efficienza fotosintetica, del valore nutrizionale e della capacità di contribuire alla rigenerazione delle risorse, consolidando un know-how in grado di connettere in modo virtuoso la ricerca spaziale con l'agricoltura sostenibile terrestre¹⁵.

Il contributo italiano al programma MELiSSA e alle ricerche sui BLSS si distingue per la solida integrazione tra ricerca scientifica e sviluppo tecnologico - testimoniata dalle strette collaborazioni tra il mondo accademico e l'industria nazionale - nonché per la rilevanza delle ricadute terrestri¹⁶. In questo contesto si collocano anche le Agrospace Conferences, eventi biennali organizzati a Sperlonga, che per molti anni hanno rappresentato un punto di incontro di rilievo internazionale tra i principali stakeholder del settore.

Di particolare rilievo è l'esperienza del gruppo di lavoro nazionale IBIS (Italian Bioregenerative Systems), voluto e coordinato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) a partire dalla metà degli anni Duemila, con l'obiettivo di affrontare in modo sistemico il tema dei sistemi biorigenerativi per il supporto alla vita nello spazio. Il gruppo riuniva le due principali anime della ricerca sui BLSS: quella accademica, coordinata dalla professoressa Stefania De Pascale del Dipartimento di Agraria dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, e quella industriale, sotto la responsabilità dell'ingegnere Cesare Lobascio di Thales Alenia Space.

L'esperienza IBIS ha contribuito in modo significativo alla nascita e al consolidamento di una comunità nazionale sui BLSS, composta da università, enti di ricerca e industria aerospaziale, riconosciuta in ambito ASI e caratterizzata da un forte spirito collaborativo e da relazioni scientifiche e umane che hanno lasciato un'eredità duratura nel panorama della ricerca italiana sull'agricoltura spaziale.

Nel loro insieme, i numerosi progetti realizzati testimoniano il progressivo consolidarsi del ruolo dell'Italia nell'ambito dell'agricoltura spaziale, sostenuta da una costante sinergia con le agenzie spaziali europea e nazionale, da numerose collaborazioni internazionali e dalla formazione di una nuova generazione di ricercatori specializzati nei sistemi biorigenerativi di supporto alla vita.

Negli ultimi anni, la ricerca italiana ha ulteriormente rafforzato il proprio contributo anche nell'ambito di progetti finanziati e coordinati dall'ASI, attraverso studi sulle microverdure (microgreens) come colture candidate per missioni di lunga durata¹⁷, e sull'impiego di simulanti di regolite lunare e marziana per la produzione alimentare¹⁸.

In questo quadro si inserisce anche il progetto GreenCube, una missione dimostrativa sviluppata in ambito ASI-ENEA che ha testato in orbita un sistema autonomo di coltivazione in ambiente confinato su piattaforma CubeSat, con l'obiettivo di validare soluzioni modulari per futuri sistemi biorigenerativi di supporto alla vita¹⁹.

¹⁴ De Pascale et al., 2021

¹⁵ Amitrano et al., 2023; Izzo et al., 2023

¹⁶ Lasseur et al., 2010; De Micco et al., 2023

¹⁷ Amitrano et al., 2023; Izzo et al., 2023

¹⁸ Caporale et al., 2023

¹⁹ Metelli et al., 2023



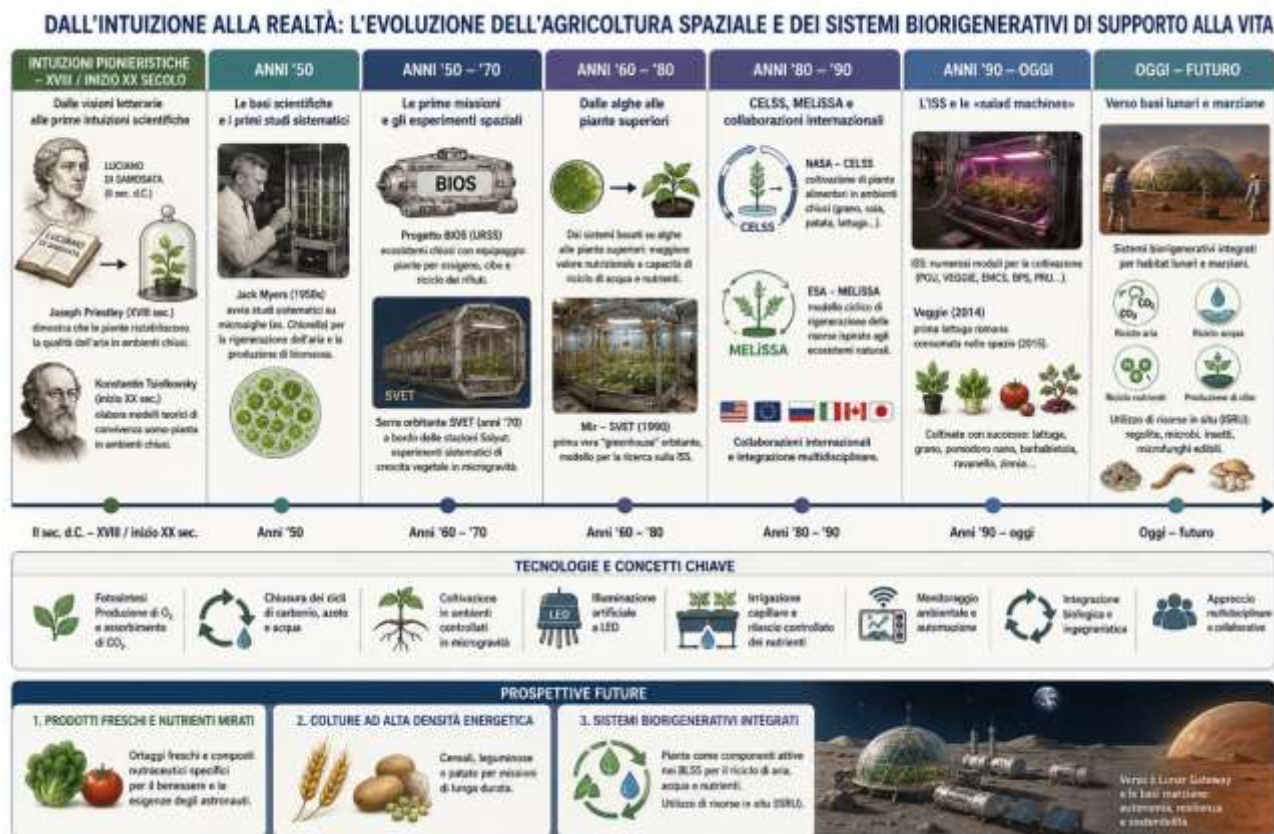


Figura 1.1.1. Schema di sintesi delle tappe principali della storia ed evoluzione della coltivazione di piante nello spazio (immagine generata con NotebookLM).

1.1.7 Prospettive future

Gli esperimenti condotti a bordo della Stazione Spaziale Internazionale e in altre missioni hanno dimostrato la fattibilità della coltivazione delle piante in ambiente spaziale e fornito informazioni fondamentali sulle condizioni ottimali per la loro crescita²⁰. Tuttavia, la ricerca è oggi chiamata a compiere ulteriori passi avanti e a raggiungere nuovi obiettivi strategici nello sviluppo delle tecnologie abilitanti.

In primo luogo, è necessario produrre ortaggi freschi a bordo delle piattaforme orbitanti - oggi la ISS, domani il Lunar Gateway, la futura stazione spaziale cislunare pianificata dalla NASA - e, in prospettiva, delle navicelle dirette verso destinazioni più lontane. Le colture dovranno garantire quantità e qualità tali da costituire una reale integrazione nutrizionale, fornendo composti nutraceutici mirati, capaci di rispondere in modo specifico alle esigenze fisiologiche, dietetiche e anche psicologiche degli astronauti²¹. Nel quadro del programma Artemis e della realizzazione del Lunar Gateway, la coltivazione spaziale è considerata una tecnologia abilitante per la permanenza umana nello spazio profondo. I sistemi vegetali saranno integrati strutturalmente nei BLSS e progettati per maggiore autonomia operativa e resilienza ambientale²².

Un secondo obiettivo riguarda la produzione di specie a maggiore densità energetica rispetto agli ortaggi a foglia, come cereali, leguminose e patate, indispensabili per sostenere missioni di lunga durata²³.

²⁰ Massa et al., 2016; Monje et al., 2020

²¹ Izzo et al., 2023

²² Wheeler, 2017; De Micco et al., 2023

²³ Wheeler, 2005



Infine, assume crescente rilevanza l'integrazione delle piante nei BLSS, destinati a garantire la sopravvivenza degli equipaggi nelle future basi lunari e marziane, almeno in parte impiegando delle risorse disponibili sulla Luna, su Marte o su altri corpi planetari²⁴. In tali sistemi, le colture non svolgeranno esclusivamente una funzione alimentare, ma agiranno come componenti attive nella rigenerazione delle risorse ambientali, contribuendo al riciclo dell'aria, dell'acqua e dei nutrienti all'interno di ecosistemi artificiali chiusi. In questa prospettiva, studi recenti stanno esplorando l'impiego di simulanti di regolite lunare e marziana, l'interazione tra piante e consorzi microbici, l'utilizzo di insetti per la bioconversione della sostanza organica e l'integrazione di microfunghi edibili come fonti proteiche alternative. I risultati indicano la concreta possibilità di integrare progressivamente risorse in situ (ISRU) nei futuri habitat extraterrestri²⁵. L'agricoltura spaziale non rappresenta più soltanto un settore di ricerca sperimentale, ma una tecnologia abilitante indispensabile per la permanenza umana nello spazio profondo. Le conoscenze sviluppate per Luna e Marte stanno inoltre generando importanti ricadute sulla sostenibilità dei sistemi agricoli terrestri, rafforzando il legame tra esplorazione spaziale e innovazione agroalimentare.

Bibliografia

- Amitrano, C., Paglialunga, G., Battistelli, A., De Micco, V., Del Bianco, M., Liuzzi, G., Moscatello, S., Paradiso, R., Proietti, S., Roupheal, Y. e De Pascale, S. (2023). *Defining growth requirements of microgreens in space cultivation via biomass production, morpho-anatomical and nutritional traits analysis*. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1190945. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1190945>.
- Caporale, A.G., Paradiso, R., Liuzzi, G., Palladino, M., Amitrano, C., Arena, C., Arouna, N., Verrillo, M., Cozzolino, V., De Pascale, S. e Adamo, P. (2023). *How to make the Lunar and Martian soils suitable for food production – Assessing the changes after manure addition and implications for plant growth*. *Journal of Environmental Management*, 325, 116455. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116455>.
- Chiarini, L., Filosi, L., Desiderio, A., Villani, M.E., Proietti, S., Moscatello, S., Battistelli, A., Boscheri, G., Marchitelli, G. e Tabacchioni, S. (2025). *Selection and characterization of bacterial consortia for the degradation of space organic waste*. *Life Sciences in Space Research*, 46, 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2025.05.007>.
- De Francesco, S., Amitrano, C., Vitale, E., Costanzo, G., Tinganelli, W., Pugliese, M., Arrichiello, C., Muto, P., Durante, M., De Pascale, S., Arena, C. e De Micco, V. (2025). *Radiation quality matters: Morphological and biochemical responses of Brassica rapa microgreens to X-rays, C-ions, and Fe-ions*. *Planta*, 262(5), 118. <https://doi.org/10.1007/s00425-025-04835-6>.
- De Micco, V., Amitrano, C., Mastroleo, F., Aronne, G., Battistelli, A., Carnero-Diaz, E., De Pascale, S., Detrell, G., Dussap, C.-G., Ganigué, R., Jakobsen, Ø.M., Poulet, L., Van Houdt, R., Verseux, C., Vlaeminck, S.E., Willaert, R. e Leys, N. (2023). *Plant and microbial science and technology as cornerstones to bioregenerative life support systems in space*. *npj Microgravity*, 9(1), 69. <https://doi.org/10.1038/s41526-023-00317-9>.
- Duri, L.G., Romano, I., Adamo, P., Roupheal, Y., Pannico, A., Ventorino, V., Pepe, O., De Pascale, S. e Caporale, A.G. (2025). *From Earth to space: How bacterial consortia and green compost improve lettuce growth on lunar and martian simulants*. *Biology and Fertility of Soils*, 61(7), 1145–1164. <https://doi.org/10.1007/s00374-025-01923-3>.
- Gitelson, J.I., Lisovsky, G.M. e MacElroy, R.D. (2003). *Man-Made Closed Ecological Systems*. Taylor & Francis, London.
- Hendrickx, L., De Wever, H., Hermans, V., Mastroleo, F., Morin, N., Wilmotte, A., Janssen, P. e Mergeay, M. (2006). *MELISSA: A multidisciplinary project of ESA*. *Advances in Space Research*, 31(7), 1685–1691. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00704-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00704-1).

²⁴ Hendrickx et al., 2006; De Micco et al., 2023

²⁵ Caporale et al., 2023; Chiarini et al., 2025; Duri et al., 2025



- Ivanova, T.N., Kostov, P., Sapunova, S. e Dandolov, I. (1996). Greenhouse "SVET" space program. *Advances in Space Research*, 18(4–5), 183–186. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00877-2](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00877-2).
- Izzo, L.G., El-Nakhel, C., Roupael, Y., Proietti, S., Paglialunga, G., Moscatello, S., Battistelli, A., Iovane, M., Romano, L.E., De Pascale, S. e Aronne, G. (2023). Applying productivity and phytonutrient profile criteria in modelling species selection of microgreens as space crops for astronaut consumption. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1210566. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1210566>.
- Kliss, M. e MacElroy, R.D. (1990). Salad machine: A vegetable production system for long duration missions. *SAE Technical Paper*, 901211.
- Lasseur, C., Brunet, J., De Wever, H., Dixon, M., Dussap, G., Godia, F., Leys, N. e Mergeay, M. (2010). MELISSA: The European project of closed life support system. *Gravitational and Space Research*, 23(2), 3–12.
- MacElroy, R.D. e Bredt, J. (1985). Current concepts and future directions of CELSS. *Advances in Space Research*, 5(11), 193–202. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(85\)90357-3](https://doi.org/10.1016/0273-1177(85)90357-3).
- Massa, G.D., Dufour, N.F., Carver, J.A., Hummerick, M.E., Wheeler, R.M., Morrow, R.C. e Smith, T.M. (2016). VEGGIE: A plant growth system on the ISS. *Open Agriculture*, 1(1), 33–41. <https://doi.org/10.1515/opag-2016-0006>.
- Metelli, G., Lampazzi, E., Pagliarello, R., Benvenuto, E. e Desiderio, A. (2023). Design of a modular controlled unit for the study of bioprocesses: Towards solutions for Bioregenerative Life Support Systems in space. *Life Sciences in Space Research*, 36, 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2022.10.006>.
- Monje, O., Stutte, G.W., Goins, G.D., Porterfield, D.M. e Bingham, G.E. (2020). The Advanced Plant Habitat: A plant research facility on the International Space Station. *Frontiers in Plant Science*, 11, 247. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00247>.
- Myers, J. (1962). Biological life support systems. *Science*, 137(3530), 101–108. <https://doi.org/10.1126/science.137.3530.101>.
- Pagliarello, R., Bennici, E., Di Sarcina, I., Villani, M.E., Desiderio, A., Nardi, L., Benvenuto, E., Cemmi, A. e Massa, S. (2023). Effects of gamma radiation on engineered tomato biofortified for space agriculture by morphometry and fluorescence-based indices. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1266199. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1266199>.
- Wheeler, R.M. (2005). Crop production for advanced life support systems – Observations from the Kennedy Space Center Breadboard Project. *Advances in Space Research*, 31(1), 179–186. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00663-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00663-1).
- Wheeler, R.M. (2010). Plants for human life support in space: From Myers to Mars. *Gravitational and Space Research*, 23(2), 25–35.
- Wheeler, R.M. (2017). Agriculture for space: People and places paving the way. *Open Agriculture*, 2(1), 14–32. <https://doi.org/10.1515/opag-2017-0002>



Capitolo 1 - Coltivare nello spazio: sistemi e tecnologie per la produzione extra-terrestre

Paragrafo 1.2 - Strategie di coltivazione e supporto alla vita nelle missioni spaziali di lunga durata

(Stefano Bona - Università degli Studi di Padova, Alberto Battistelli - CNR, Luigi Galimberti – ToSeed Partners, Silvia Massa - ENEA, Silvana Nicola - Università degli Studi di Torino, Cosimo Sarti - Università degli Studi di Torino; Università di Trento, Giorgia Tomarchio - Hortomio)

Le missioni spaziali di lunga durata necessitano di sistemi di supporto vitale ibridi nei quali i moduli fisico-chimici garantiscono un controllo attivo ai sistemi, mentre quelli biorigenerativi, basati su piante o microalghe e microrganismi eterotrofi, chiudono i cicli di ossigeno, anidride carbonica, acqua e cibo. Sebbene sistemi già operativi come Veggie e Advanced Plant Habitat (APH) ne dimostrino la fattibilità, le principali sfide rimangono l'automazione e la completa chiusura dei cicli.

1.2.1 Tipi e componenti dei Sistemi Biorigenerativi di Supporto alla Vita (BLSS)

Le architetture dei sistemi di supporto alla vita (Bioregenerative Life Support Systems, BLSS) per missioni di lunga durata integrano componenti biologiche (piante, animali e microrganismi) e fisico-chimiche (Figura 1.2.1).

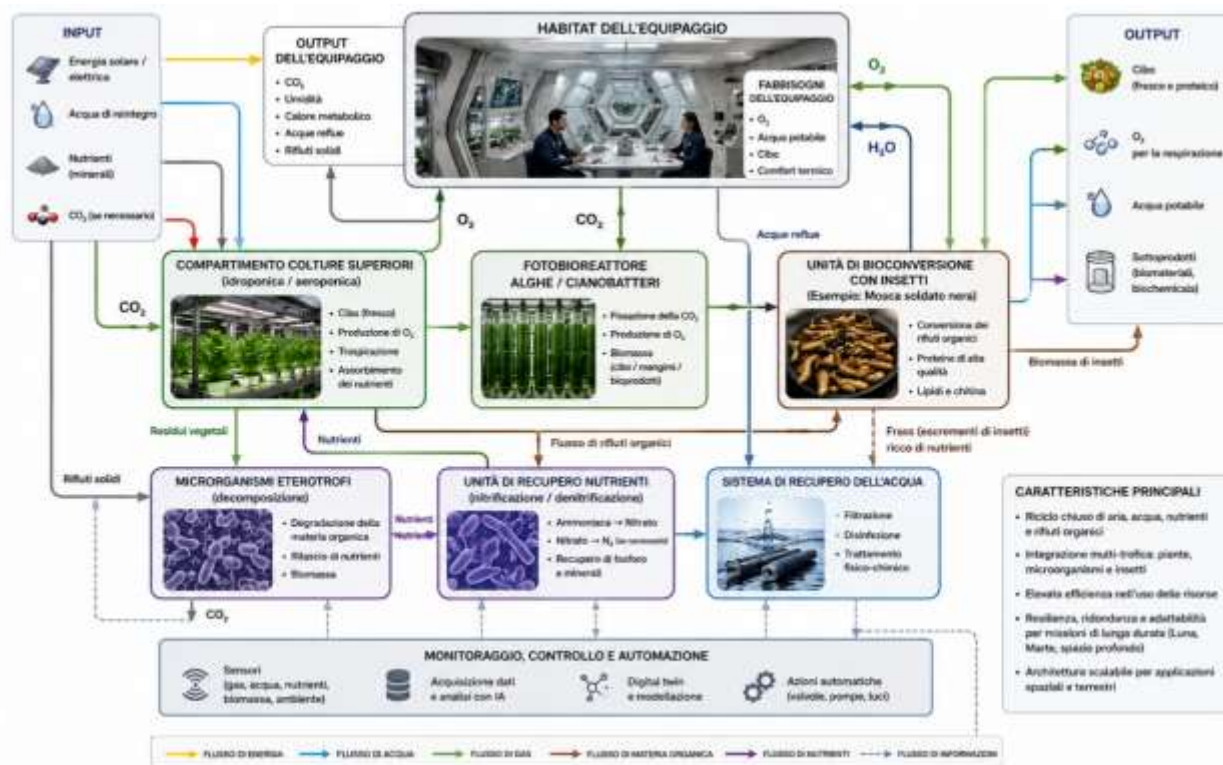


Figura 1.2.1. Schema di sistema biorigenerativo di supporto alla vita che integra piante superiori, alghe/cianobatteri, microrganismi eterotrofi e insetti per chiudere i cicli aria, acqua e nutrienti. Il sistema trasforma i rifiuti in risorse utili (alimenti, Ossigeno, acqua, sottoprodotti) riducendo la dipendenza dai rifornimenti per incrementare la sostenibilità e resilienza dei futuri habitat umani nelle missioni spaziali di lunga durata (immagine generata mediante IA).

La scelta tra le configurazioni principali (Tabella 1.2.1) determina la massa complessiva del sistema, il fabbisogno energetico e il livello di chiusura dei cicli delle risorse.



Tabella 1.2.1. Tipologie di sistemi di supporto vitale per missioni spaziali di lunga durata, con funzione, componenti e grado di chiusura dei cicli (reattori Sabatier: dispositivi che implementano la reazione di Sabatier, un processo che combina idrogeno e anidride carbonica per produrre metano e acqua; CELSS - Controlled Ecological Life Support System: Sistema di Supporto Vitale Ecologico Controllato; MELiSSA - Micro-Ecological Life Support System Alternative. Progetto di ricerca dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) che mira a sviluppare un sistema di supporto vitale rigenerativo chiuso basato su un ecosistema artificiale; EDEN - Evolution and Design of Environmentally-closed Nutrition-Sources: progetto di ricerca del Centro Aerospaziale Tedesco (DLR) che si basa sullo sviluppo di tecnologie per la produzione di cibo in ambienti chiusi e controllati per missioni spaziali).

Tipo	Funzione e Componenti	Note
Fisico-Chimico	Rigenerazione O ₂ /H ₂ O via elettrolisi, scrubber CO ₂ e reattori Sabatier.	Bassa massa biologica, alta energia. Standard attuale e backup per BLSS [Stankovic, 2018].
Biorigenerativo (BLSS/CELSS)	Riciclo di O ₂ , H ₂ O e CO ₂ via fotosintesi (piante/alghe) e bioreattori per rifiuti (CELSS).	Massima chiusura dei cicli; volumi elevati e integrazione complessa [Liu et al., 2021].
Ibrido	Integrazione di circuiti biologici e fisico-chimici con controllo automatizzato.	Approccio pragmatico per missioni Luna/Marte. Esempi: MELiSSA, EDEN, BIOLUNA.

Nel sistema, le piante rappresentano l'unità primaria di produzione della biomassa, mentre i bioreattori mineralizzano i rifiuti organici riciclando azoto e fosforo per i vegetali; i moduli fisico-chimici garantiscono ridondanza di risorse e possibilità di intervento rapido in caso di necessità e di malfunzionamenti biologici.

L'architettura complessiva del sistema comprende camere di crescita con sistemi di controllo di luce e nutrienti, controllo ambientale (composizione dell'aria, umidità), ricircolo delle risorse, sensori e automazione avanzata. L'integrazione di algoritmi di intelligenza artificiale può risultare fondamentale per ottimizzare le componenti biologiche e modulare i flussi biorigenerativi, aumentando l'efficienza e riducendo la necessità di scorte di riserva.

1.2.2 Tecnologie di coltivazione e ambienti controllati

L'agricoltura in ambiente controllato (Controlled Environment Agriculture, CEA) per applicazioni spaziali adatta camere di crescita, sistemi di illuminazione a LED e tecniche di gestione dell'apparato radicale alle condizioni di microgravità e di gravità ridotta. L'obiettivo principale è sviluppare sistemi modulari, scalabili e fortemente automatizzati, così da ridurre il carico di lavoro dell'equipaggio e aumentare l'affidabilità delle coltivazioni nel lungo periodo. Sulla Stazione Spaziale Internazionale, esperimenti come Veggie, basato su 'cuscini' di substrato per la crescita delle piante, e l'Advanced Plant Habitat (APH), caratterizzato da un elevato livello di automazione, rappresentano tappe fondamentali verso unità di coltivazione sempre più integrate e tecnologicamente avanzate²⁶.

Le diverse piattaforme di coltivazione sperimentate finora mostrano approcci complementari alla coltivazione in microgravità. Il sistema Veggie utilizza substrati modulari sotto forma di cuscini di radicazione contenenti fertilizzanti a rilascio graduale e un'irrigazione capillare passiva (Passive Orbital Nutrient Delivery System, PONDS), che richiede ancora un certo grado di intervento umano. Al contrario, APH è concepito

²⁶ Morrow et al., 2017; Nelson, 1993



come un habitat completamente controllato, in cui luce, CO₂, temperatura, umidità e sistemi di imaging sono regolati in modo automatico per consentire esperimenti di precisione in ambiente chiuso.

Altri sistemi esplorano soluzioni alternative per la distribuzione dei nutrienti in condizioni di gravità variabile: ad esempio, Omnigravity sfrutta l'idroponica capillare per fornire acqua e nutrienti senza l'uso di pompe, affrontando così alcune delle principali criticità legate all'aerazione delle radici e alla crescita delle piante in microgravità²⁷. Parallelamente alle colture superiori, sono stati sviluppati anche reattori compatti per microalghe come *Arthrospira* e *Chlorella*, che offrono un'elevata produttività di ossigeno e biomassa, ma richiedono un'integrazione complessa con i cicli di gestione dei rifiuti del sistema di supporto vitale²⁸.

Un aspetto cruciale della coltivazione spaziale riguarda l'illuminazione e il fabbisogno energetico complessivo. Il controllo spettrale dei LED è ormai lo standard per modulare fotosintesi e fotomorfogenesi, mentre nel caso delle serre planetarie si valutano attentamente i compromessi tra l'uso di luce artificiale e l'impiego della radiazione solare naturale²⁹. Infine, sperimentazioni condotte a Terra, come quelle nel contesto di HI-SEAS (Hawaii Space Exploration Analog and Simulation, svolto all'interno di un modulo abitativo a 2.500 metri di altitudine sul vulcano Mauna Loa tra il 2013 e il 2020), hanno permesso di validare sistemi come Veggie, fornendo dati fondamentali sulla gestione dell'umidità, sul ricambio d'aria e sul carico di lavoro richiesto all'equipaggio in condizioni analoghe a quelle delle missioni spaziali.

1.2.3 Criteri di selezione delle colture e specie candidate

La selezione delle specie per i sistemi spaziali (vedi Capitolo 2, Paragrafo 2.2) bilancia diversi fattori: apporto nutrizionale, efficienza delle risorse, tempi di crescita e benefici psicologici per l'equipaggio. Si privilegiano colture a ciclo breve (verdure a foglia), ad elevato contenuto calorico (tuberi e cereali), integratori proteici o funzionali (legumi e microalghe) o specie in grado di fornire specifici nutrienti legati al sostegno della salute degli astronauti³⁰. Sebbene test integrati abbiano dimostrato il contributo di queste colture alla rigenerazione dell'ossigeno, la completa autosufficienza alimentare rimane una sfida principalmente a causa della scala limitata dell'hardware attualmente disponibile.

I criteri di selezione, i profili nutrizionali e le performance specifiche delle diverse specie candidate verranno trattati in modo approfondito nel Capitolo 2.

1.2.4 Sistemi di coltivazione, controllo ambientale, integrazione ed esigenze future

I sistemi di coltivazione, inclusi idroponica, aeroponica e quelli basati sull'uso di suolo e/o regolite, cioè il materiale superficiale sciolto e frammentato che ricopre corpi planetari come Luna e Marte, o gli asteroidi, ed è costituita da polvere fine, sabbia, rocce frantumate, altri detriti con composizione variabile a seconda del corpo celeste su cui si trova), sono strettamente integrati con i controlli ambientali, tra cui luce, CO₂, temperatura e umidità, e con i circuiti dei sistemi di supporto vitale. L'ottimizzazione di questi sistemi comporta dei compromessi tra l'uso dell'acqua, la massa strutturale, l'aerazione e la compatibilità con la microgravità (Tabella 1.2.2). L'assenza di automazione avanzata e di un sistema integrato per il recupero dei rifiuti come nutrienti limita l'efficienza del ciclo chiuso, rendendo necessaria una certa dipendenza dai rifornimenti esterni.

²⁷ Wheeler, 2009

²⁸ Lobascio et al., 2008

²⁹ Fleisher et al., 2006

³⁰ Häder et al., 2018; Revellame et al., 2023; Amitrano et al., 2023; Battistelli et al., 2025



Tabella 1.2.2. Confronto dei principali sistemi di coltivazione per applicazioni spaziali, con meccanismo di somministrazione dei nutrienti, vantaggi e sfide operative.

Sistema	Meccanismo	Vantaggi	Sfide e Applicazioni
Idroponica	Nutrienti forniti mediante soluzione nutritiva o substrato inerte.	Controllo nutrienti elevato.	Gestione fluidi/aerazione in microgravità. Esempio: Cuscini Vегgie.
Aeroponica	Nebulizzazione periodica delle radici.	Consumo idrico minimo, elevata ossigenazione delle radici.	Comportamento delle gocce in microgravità; criticità sugli ugelli [Boscheri et al., 2023; Zabel et al., 2016].
Suolo/Regolite	Analoghi del suolo o regolite trattata.	Possibilità di usare risorse <i>in situ</i> (ISRU).	Chimica complessa, gestione della polvere e ritenzione idrica limitata. Fase sperimentale.

Requisiti di controllo ambientale e integrazione.

Il controllo ambientale nei BLSS è fondamentale per ottimizzare la fisiologia delle piante e allineare la produzione alle necessità dell'equipaggio, riducendo massa al lancio e buffer di sistema, aspetti affrontati nel progetto BIOLUNA³¹ attualmente in corso, finanziato da ASI e coordinato da Thales Alenia Space Italia S.p.A

Parametri come fotosintesi e traspirazione possono essere modulati in pochi minuti, mentre i contenuti nutrizionali (es. antiossidanti) variano nell’arco di ore o giorni. Data la complessità delle interazioni multispecie all’interno dei BLSS, l'integrazione di sistemi di controllo intelligente (Intelligenza Artificiale) è essenziale per acquisire dati in tempo reale e generare modelli interpretativi dinamici per ogni scenario operativo³².

Aspetti chiave del controllo ambientale

La gestione della luce e della CO₂ rappresenta uno degli aspetti più critici nei sistemi di coltivazione in ambienti chiusi. L’impiego di LED a spettro personalizzabile consente di modulare in modo preciso la qualità e l’intensità della luce, mentre l’arricchimento di CO₂ permette di ottimizzare la fotosintesi e massimizzare la produzione di O₂ in spazi confinati. È però necessario bilanciare attentamente queste strategie con i consumi energetici, che costituiscono un vincolo importante in ambienti isolati come quelli spaziali.

Il controllo di temperatura e umidità è altrettanto cruciale, perché queste variabili influenzano direttamente la crescita e lo sviluppo delle piante, oltre alla qualità del cibo prodotto. Un monitoraggio accurato permette di evitare fenomeni di condensa e la proliferazione di patogeni, migliorando la stabilità del sistema. Inoltre, la traspirazione fogliare viene sfruttata come risorsa: il vapore acqueo rilasciato dalle piante può essere recuperato dall’atmosfera attraverso condensatori dedicati, con efficienze molto elevate (95–98%), contribuendo in modo significativo al riciclo dell’acqua.

³¹ Boscheri et al., 2025

³² Boscheri et al., 2025



Infine, la chiusura del ciclo dei nutrienti è centrale per la sostenibilità del sistema. I rifiuti organici e la biomassa non commestibile vengono mineralizzati, attraverso processi microbici o fisico-chimici, permettendo di riciclare il carbonio organico e recuperare elementi essenziali come azoto (N) e fosforo (P). Questo collegamento, tra i diversi compartimenti biologici del sistema, riduce la dipendenza da apporti esterni di nutrienti³³.

Le sfide della microgravità

Le condizioni di microgravità e l'ambiente spaziale influenzano profondamente la progettazione e il funzionamento dei sistemi di coltivazione. In microgravità, la gestione della fertirrigazione è dominata dalla dinamica bifase aria-acqua: in assenza di galleggiamento, sedimentazione e drenaggio gravitazionale, la separazione tra fase liquida e gassosa non avviene spontaneamente e la distribuzione dell'acqua è governata da capillarità e tensione superficiale³⁴. Ciò rende complesso il controllo dell'umidità radicale e può determinare saturazione localizzata del substrato con conseguente ipossia o anossia, fenomeni osservati in diversi sistemi di coltivazione spaziale³⁵.

Per mitigare tali criticità, le architetture operative adottano geometrie e materiali capillary-driven, tra cui tubi porosi integrati nella matrice radicale o sistemi a stoppino³⁶. Esempi applicativi includono i cuscini di Veggie e l'irrigazione tramite tubi porosi impiegata in APH. Esperimenti più recenti, come XROOTS, hanno validato approcci soilless, sperimentando configurazioni idroponiche e aeroponiche in ambiente operativo³⁷.

In condizioni di microgravità, la convezione naturale non è sufficiente a garantire il movimento dell'aria; diventa quindi indispensabile la ventilazione forzata sia per favorire gli scambi gassosi, sia per prevenire l'accumulo di etilene, un fitormone che può interferire con lo sviluppo e il successo riproduttivo delle colture. Parallelamente, l'assenza di convezione naturale altera gli scambi di massa e calore a livello fogliare, con effetti sulla traspirazione e riducendo il raffreddamento evaporativo. Ne deriva la necessità di ventilazione forzata come requisito funzionale dei sistemi di coltivazione orbitali³⁸. L'evoluzione storica dei sistemi di coltivazione spaziali evidenzia una progressiva integrazione di sistemi di gestione termica, controllo di umidità e CO₂ e rimozione di contaminanti gassosi quali l'etilene, oltre a un crescente sviluppo di architetture di nutrient delivery controllate e integrate³⁹.

Allo stesso tempo, fattori tipici degli ambienti extraterrestri e delle future basi planetarie, come l'esposizione a livelli più elevati di radiazioni, influenzano in modo significativo la fotobiologia e le risposte allo stress delle piante. Queste condizioni ambientali incidono non solo sulla crescita, ma anche sulla resa e sulla qualità complessiva delle colture⁴⁰ e sono affrontate più estesamente nel Capitolo 2.

L'integrazione hardware

In questo contesto, l'automazione rappresenta un elemento chiave soprattutto nei sistemi di coltivazione su larga scala: l'impiego di robotica e di tecniche di machine learning è fondamentale per gestire in modo

³³ Poulet et al., 2016

³⁴ Nijhuis et al., 2022

³⁵ Zabel et al., 2016

³⁶ Zabel et al., 2016

³⁷ Wetzel et al., 2023

³⁸ Zabel et al., 2016; Monje et al., 2020; Massa et al., 2016

³⁹ Zabel et al., 2016

⁴⁰ Hessel et al., 2022



efficiente i flussi del sistema, organizzare la logistica di raccolta e ridurre il carico di lavoro dell'equipaggio, rendendo l'intero processo più sostenibile e affidabile nel lungo periodo.

Sul fronte dell'integrazione hardware, si osservano progressi costanti grazie a piattaforme già sperimentate come Veggie e APH, affiancate da progetti più ambiziosi come MELiSSA, EDEN e REBUS. EDEN (European Distributed Environmental Network) è un progetto europeo finalizzato allo sviluppo di moduli biorigenerativi integrati per missioni spaziali di lunga durata collegando i flussi di rifiuti organici con la produzione vegetale. REBUS, progetto italiano finanziato da ASI (Capofila: Università degli Studi di Napoli Federico II; Partner: CNR, ENEA, Istituto Superiore di Sanità, Thales Alenia Space, Kayser Italia, Telespazio, Università degli Studi di Roma Tor Vergata, Università degli Studi di Pavia), si è focalizzato sullo sviluppo di unità biorigenerative autonome capaci di integrare produzione alimentare, gestione dei rifiuti e riciclo dei nutrienti in spazi confinati, utilizzando sensori avanzati e algoritmi di controllo anche in condizioni di gravità alterata. Questi progetti hanno puntato a sviluppare moduli rigenerativi end-to-end capaci di collegare in modo sempre più efficiente i flussi di rifiuti con la produzione vegetale. Parallelamente, le linee di ricerca prioritarie indicano la necessità di implementare ulteriormente automazione e robotica, miglioramento genetico delle colture, e validazione sistematica della dinamica dei fluidi in tutti i regimi di gravità rilevante per le missioni spaziali⁴¹.

Un ulteriore limite riguarda la carenza di dati quantitativi utili alla progettazione fine dei sistemi. In assenza di scenari di missione chiaramente definiti, risulta complesso dimensionare correttamente le infrastrutture di coltivazione. In particolare, la mancanza di bilanci energetici su scala operativa ostacola una valutazione rigorosa dei compromessi tra fabbisogno di potenza del sistema e resa produttiva in termini di biomassa e O₂.

1.2.5 Stato dell'arte e prospettive future

Gli studi più recenti sullo stato dell'arte dei sistemi di supporto vitale mostrano progressi significativi in termini di efficienza e chiusura dei cicli. Test integrati, come quelli condotti nell'ambito del Lunar-Mars Life Support Test Project, hanno dimostrato che è possibile raggiungere livelli di recupero idrico molto elevati, compresi tra il 95% e il 98%. In questi sistemi, le piante contribuiscono efficacemente al rinnovo dell'atmosfera, contribuendo alla produzione di ossigeno e all'assorbimento di anidride carbonica; tuttavia, alle scale operative attuali il loro contributo all'apporto calorico dell'equipaggio rimane ancora marginale.

Nel confronto tra microalghe e piante superiori emergono differenze sostanziali: le microalghe garantiscono una maggiore produttività volumetrica di ossigeno e biomassa, ma comportano svantaggi logistici e operativi, poiché richiedono una maggiore massa iniziale al lancio e processi complessi per garantirne la sicurezza alimentare e l'accettabilità organolettica. Le piante, pur avendo rese inferiori per unità di volume, risultano più semplici da integrare nei sistemi di produzione alimentare destinati al consumo diretto dell'equipaggio.

Infine, la produzione di cibo in sistemi chiusi impone requisiti molto stringenti in termini di sicurezza e qualità nutrizionale. Sono necessari protocolli rigorosi di controllo microbico, analisi dei potenziali contaminanti e un monitoraggio continuo degli effetti delle radiazioni sulla qualità del cibo prodotto, aspetti che risultano cruciali per garantire la salute dell'equipaggio nelle missioni di lunga durata⁴².

I sistemi biorigenerativi di supporto alla vita rappresentano una delle principali frontiere tecnologiche per le future missioni spaziali di lunga durata verso Luna e Marte. Basati sull'integrazione di piante superiori,

⁴¹ Kamran et al., 2023

⁴² Salisbury, 1999



microalghe, microrganismi e processi di riciclo avanzato, questi sistemi mirano a chiudere i cicli di acqua, nutrienti, ossigeno e materia organica, riducendo la dipendenza dai rifornimenti esterni. Le principali prospettive di sviluppo riguardano l'automazione intelligente, l'impiego di biotecnologie avanzate, la miniaturizzazione dei sistemi e il miglioramento dell'efficienza energetica e biologica. Rimangono tuttavia importanti criticità legate alla stabilità dei consorzi biologici, alla completa chiusura dei cicli, alla gestione delle risorse in condizioni estreme e alla validazione operativa a lungo termine. Le conoscenze sviluppate in questo ambito stanno inoltre generando ricadute significative per l'agricoltura terrestre, in particolare nei sistemi produttivi ad alta efficienza, nell'agricoltura in ambiente controllato e nei modelli di bioeconomia circolare. La figura riportata sotto evidenzia i principali sviluppi futuri e le criticità legate al tema (Fig. 1.2.2).

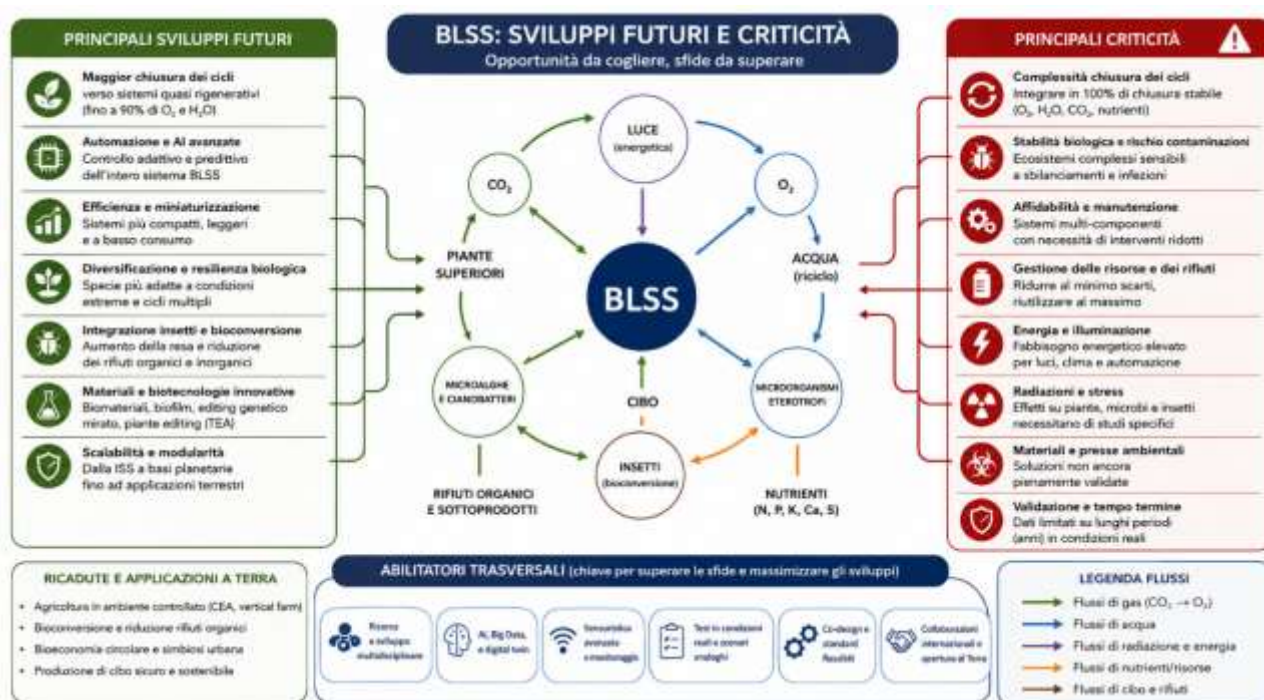


Figura 1.2.2. Schema concettuale dei principali sviluppi futuri e delle criticità associate ai sistemi biorigenerativi di supporto alla vita per missioni spaziali di lunga durata e applicazioni terrestri. Sul lato sinistro sono riportate le principali direttrici di sviluppo tecnologico; sul lato destro sono sintetizzate le principali criticità ancora aperte. La figura sottolinea inoltre il ruolo degli abilitatori trasversali nel favorire la transizione verso sistemi sostenibili e applicabili sia nello spazio sia in contesti terrestri ad alta efficienza d'uso delle risorse (immagine generata mediante IA).

1.2.6 Ricadute a Terra

L'insieme delle tecnologie sviluppate per i BLSS e le missioni spaziali di lunga durata trova applicazioni significative anche in contesti terrestri, in particolare nell'agricoltura in ambiente controllato e nei sistemi produttivi ad alta efficienza delle risorse. I sistemi di illuminazione a LED a spettro modulabile, le tecniche di coltivazione idroponica e aeroponica e le strategie di controllo fine dei parametri ambientali rappresentano oggi elementi chiave sia nelle serre spaziali sia nelle vertical farm terrestri.

L'integrazione di sensoristica avanzata, sistemi di automazione e algoritmi di intelligenza artificiale, sviluppata per garantire stabilità e affidabilità in ambienti estremi e isolati, consente di monitorare e modulare in tempo reale i processi fisiologici delle colture, migliorando resa, qualità nutrizionale e uso efficiente di acqua, energia e nutrienti. Analogamente, i concetti di chiusura dei cicli e di riciclo delle risorse, alla base dei sistemi biorigenerativi, trovano applicazione crescente in modelli di bioeconomia circolare applicati all'agricoltura terrestre.



È tuttavia riduttivo interpretare queste ricadute in termini di un flusso unidirezionale dell'innovazione. In molti casi, infatti, le tecnologie utilizzate nei sistemi spaziali derivano da soluzioni già sviluppate in ambito terrestre — come l'idroponica, la sensoristica ambientale o i sistemi di controllo climatico — e successivamente adattate e rese più robuste per operare in condizioni estreme, quali microgravità, isolamento e forte limitazione delle risorse.

Il valore reale risiede quindi nell'interplay continuo tra ricerca spaziale e terrestre: lo spazio agisce come ambiente di validazione estrema, che impone requisiti stringenti in termini di efficienza, affidabilità e chiusura dei cicli, accelerando l'innovazione e portando a soluzioni più integrate e performanti; la Terra, al contempo, rappresenta il bacino tecnologico e applicativo da cui molte di queste soluzioni originano e verso cui ritornano, adattate e scalate.

In questo scambio bidirezionale, le tecnologie sviluppate per lo spazio diventano un banco di prova per ripensare i sistemi agricoli terrestri in chiave più resiliente, efficiente e sostenibile, mentre le esigenze e le innovazioni dell'agricoltura terrestre continuano a fornire strumenti e conoscenze fondamentali per la progettazione dei sistemi di supporto alla vita nelle future missioni di esplorazione (Fig. 1.2.3).



Figura 1.2.3. Principali scambi di innovazione spazio – terra nell'ambito delle tecnologie sviluppate per i sistemi biorigenerativi di supporto alla vita (BLSS), ed applicazioni a terra (agricoltura in ambiente controllato, uso efficiente delle risorse, bioeconomia circolare e sistemi produttivi sostenibili ad alta resilienza (immagine generata mediante IA).

Bibliografia

Amitrano, C., Paglialunga, G., Battistelli, A., De Micco, V., Del Bianco, M., Liuzzi, G., Moscatello, S., Paradiso, R., Proietti, S., Roupheal, Y., De Pascale, S., 2023. Defining Growth Requirements of Microgreens in Space Cultivation via Biomass Production, Morpho-Anatomical and Nutritional Traits Analysis. *Frontiers in Plant Science*, **14**, 1190945. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1190945>



- Battistelli, A., Proietti, S., Paglialunga, G., Mattioni, M., Nazzaro, F., Fratianni, F., Colla, G., Cardarelli, M., Del Bianco, M., Moscatello, S., 2025.** Establishing Baselines for Prebiotic Production in Controlled Environments for Applications in Space and Vertical Farming. *Heliyon*, **11**(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41674>.
- Boscheri, G., Fili, T., Pannico, A., Amitrano, C., De Micco, V., De Pascale, S., Battistelli, A., Moscatello, S., Proietti, S., Mattioni, M., Magrassi, F., Notari, M., Pepe, R., Parca, L., 2025.** BIOLUNA Project Status – Plant Biology and Artificial Intelligence for Bio-Regenerative Life Support on the Moon. *Proceedings of the 54th International Conference on Environmental Systems (ICES 2025)*, ICES-2025-53.
- Fleisher, D.H., Rodriguez, L.F., Both, A.J., Cavazzoni, J., Ting, K.C., 2006.** Advanced Life Support Systems in Space. In: *Systems Analysis and Modeling in Food and Agriculture*. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), St. Joseph, MI, USA, Chapter 5.11, p. 339. <https://doi.org/10.13031/2013.21686>.
- Häder, D.-P., Braun, M., Hemmersbach, R., 2018.** Bioregenerative Life Support Systems in Space Research. In: Häder, D.-P., Braun, M., Hemmersbach, R. (Eds.), *Gravity and Life: Space Biology*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, pp. 113–122. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93894-3_8
- Hessel, V., Tran, N.N., Asfour, T., Bertau, M., Busemeyer, L., Chaves, I., Dreschel, T.W., Fittschen, U.E.A., Gollasch, S., He, P., Hofmann, P., Kruse, O., Mauer, A., Mhamdi, A., Mollinga, P., Schwendner, P., van Loon, J.J.W.A., 2022.** Eustress in Space: Opportunities for Plant Stressors Beyond the Earth Ecosystem. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, **9**, 841211. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.841211>.
- Kamran, M., Auroux, L., Johnson, K., Lewsey, M.G., 2023.** Optimising Plant Form and Function for Controlled Environment Agriculture in Space and on Earth. *Modern Agriculture*, **1**, 86–97. <https://doi.org/10.1002/moda.20>.
- Liu, H., Yao, Z., Fu, Y., Feng, J., 2021.** Review of Research into Bioregenerative Life Support System(s) Which Can Support Humans Living in Space. *Life Sciences in Space Research*, **31**, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.09.003>
- Lobascio, C., Lamantea, M., Cotronei, V., Negri, B., De Pascale, S., Maggio, A., Maffei, M., Foti, M., Palumberi, S., 2008.** CAB: The Bioregenerative Life Support System. A Feasibility Study on the Survivability of Humans in Long-Duration Space Missions. *Acta Horticulturae*, **801**, 465–472. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.801.50>.
- Marrone, A., Billi, D., Romano, I., Bacci, G., Finotti, E., Montoneri, E., 2024.** Advancing Sustainability in Space: Innovations in Life Support Systems, Resource Utilization, and Waste Management for Long-Duration Space Missions. *AIAA ASCEND 2024 Forum Proceedings*. <https://doi.org/10.2514/6.2024-4868>
- Massa, G.D., Dufour, N.F., Carver, J.A., Hummerick, M.E., Wheeler, R.M., Morrow, R.C., Smith, T.M., 2016.** Growth Chambers on the International Space Station for Large Plants. *Acta Horticulturae*, **1134**, 215–221. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.29>.
- Monje, O., Stutte, G.W., Goins, G.D., Porterfield, D.M., Bingham, G.E., 2020.** Hardware Validation of the Advanced Plant Habitat on ISS: Canopy Photosynthesis in Reduced Gravity. *Frontiers in Plant Science*, **11**, 673. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00673>.
- Morrow, R.C., Wetzel, J.P., Richter, R.C., Crabb, T.M., 2017.** Evolution of Space-Based Plant Growth Technologies for Hybrid Life Support Systems. *Proceedings of the 47th International Conference on Environmental Systems (ICES-2017)*, Charleston, South Carolina, USA. URL: <https://ttu-ir.tdl.org/handle/2346/73075>.
- Nelson, M., 1993.** Bioregenerative Life Support for Space Habitation and Extended Planetary Missions. In: Churchill, S. (Ed.), *Space Life Sciences*. Orbit Book Company, Malabar, FL, USA, Chapter 25. URL: <https://marknelsonbiospherian.com/wp-content/uploads/2018/11/ISU-textbook-chapter.pdf>



- Nijhuis, J., Schmidt, S., Tran, N.N., Hessel, V., 2022.** Microfluidics and Macrofluidics in Space: ISS-Proven Fluidic Transport and Handling Concepts. *Frontiers in Space Technologies*, **2**, 779696. <https://doi.org/10.3389/frspt.2021.779696>.
- Poulet, L., Anderson, M.S., Gitelson, J.I., Kruijff, M., Sargusingh, M., Boulard, T., 2013.** Greenhouse Modules and Regenerative Life-Support Systems for Space. *Proceedings of the AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition*, San Diego, CA, USA. <https://doi.org/10.2514/6.2013-5398>.
- Revellame, E.D., Schubert, J., Bumbac, C., Wang, D., Holmes, W., Bassi, A., 2023.** Microalgae in Bioregenerative Life Support Systems for Space Applications. *Algal Research*, **78**, 103332. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103332>
- Salisbury, F.B., 1999.** Growing Crops for Space Explorers on the Moon, Mars, or in Space. *Advances in Space Biology and Medicine*, **7**, 131–162. [https://doi.org/10.1016/S1569-2574\(08\)60009-X](https://doi.org/10.1016/S1569-2574(08)60009-X).
- Stankovic, B., 2018.** Plants in Space. In: *Into Space: A Journey of How Humans Adapt and Live in Microgravity*. IntechOpen, London, UK. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74230>.
- Wetzel, J.P., Morrow, R.C., Richter, R.C., Crabb, T.M., Levine, H.G., Massa, G.D., 2023.** XROOTS® ISS Tech Demo of Aeroponics and Hydroponics Nutrient Delivery in Microgravity. *Proceedings of the 52nd International Conference on Environmental Systems (ICES 2023)*. URL: <https://hdl.handle.net/2346/94619>
- Wheeler, R.M., 2009.** *Roadmaps and Strategies for Crop Research for Bioregenerative Life Support Systems: A Compilation of Findings from NASA's Advanced Life Support Meetings*. NASA Technical Memorandum NASA/TM-2009-214768, NASA Biological Sciences Office, Kennedy Space Center, Florida, USA. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20230012055>.
- Zabel, P., Bamsey, M., Schubert, D., Tajmar, M., 2016.** Review and Analysis of over 40 Years of Space Plant Growth Systems. *Life Sciences in Space Research*, **10**, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2016.06.004>.



Capitolo 1 - Coltivare nello Spazio: sistemi e tecnologie per la produzione extra-terrestre

Paragrafo 1.3 - Tecnologie, sensoristica, smart farming, controllo ambientale e flussi biorigenerativi sviluppati per lo Spazio

(Luigi Galimberti – ToSeed Partners, Giorgia Tomarchio - Hortomio, Alberto Battistelli - CNR, Francesca Masino - Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Silvia Massa - ENEA)

Definiti nel Capitolo 1.2 i principi e le architetture dei BLSS, il presente capitolo analizza nel dettaglio le tecnologie alla base di questi sistemi.

Negli ultimi decenni le tecnologie agritech e le soluzioni di smart farming hanno trasformato profondamente le pratiche agricole terrestri. Nate per affrontare sfide terrestri come il cambiamento climatico, la scarsità idrica, la degradazione dei suoli e la necessità di aumentare la produttività riducendo l'impiego di risorse, queste tecnologie assumono oggi un valore che va oltre il contesto terrestre.

Immaginare il loro impiego nello spazio è un esercizio di applicazione tecnica estremamente avanzato: significa ripensare la produzione vegetale in condizioni di gravità alterata, esposizione a radiazioni elevate, disponibilità limitata di risorse e necessità di operare in sistemi confinati e completamente controllati.

1.3.1 Fondamenti per la gestione integrata dei nutrienti in habitat spaziali

Le tecnologie agritech e i sistemi di controllo avanzato sviluppati sulla Terra rappresentano oggi una base estremamente promettente per immaginare la gestione delle risorse in habitat spaziali, nonché in contesti terrestri caratterizzati da condizioni estreme o da forte scarsità di risorse. Sebbene nate per risolvere problemi terrestri, molte di queste soluzioni, opportunamente adattate, potrebbero essere applicate anche nello spazio, dove l'ambiente estremo impone un livello di precisione molto più elevato e la chiusura dei cicli.

Un elemento centrale nella chiusura dei cicli riguarda i sistemi di recupero dei nutrienti dalle deiezioni umane, già sperimentati sulla Terra attraverso processi di separazione, mineralizzazione e conversione dell'azoto.

In ambito spaziale, tali sistemi possono diventare componenti fondamentali di cicli chiusi, consentendo il recupero di nutrienti essenziali come nitrati, fosfati e microelementi in forma sterile e direttamente utilizzabile dalle colture. In condizioni di microgravità, dove la sedimentazione naturale è assente, assumono particolare rilevanza tecnologie quali membrane, reattori a flusso forzato e processi termo-chimici controllati. Parallelamente anche il recupero di sostanza organica da sistemi di depurazione e filtraggio dell'aria potrebbe assumere un ruolo strategico. L'impiego di biofiltri, scrubber e membrane attive consentirebbe non solo di purificare l'atmosfera dell'habitat, ma anche di catturare molecole organiche e biomassa microbica da reinserire nei processi di produzione agricola o nei sistemi di compostaggio accelerato, contribuendo a un metabolismo interno più efficiente e autosufficiente.

Un altro elemento fondamentale riguarda la fertirrigazione e il controllo chimico delle soluzioni nutritive, che nello spazio non rappresentano solo una criticità, ma anche un'opportunità per ripensare l'intera gestione dei nutrienti. Parametri come pH, conducibilità elettrica (EC), ossigeno disciolto (DO) e bilanciamento ionico, che sulla Terra devono continuamente compensare la variabilità dell'ambiente naturale, nello spazio possono essere controllati con elevata precisione grazie all'habitat chiuso e stabile, consentendo di progettare sistemi nutritivi che funzionano come piattaforme integrate ad altissima efficienza.

La microgravità, pur alterando il comportamento dei fluidi, apre la strada allo sviluppo di tecnologie completamente nuove. Invece di basarsi su flussi gravitazionali, la fertirrigazione può essere gestita tramite pompe a pressione differenziale o sistemi volumetrici a membrana che garantiscono una distribuzione uniforme e programmabile, completamente indipendente dall'orientamento della struttura.



I materiali capillari avanzati come fibre polimeriche ad alta tensione superficiale, substrati microstrutturati o tubi porosi consentono un rilascio mirato dell'acqua nella zona radicale, ottimizzando l'interazione tra radici e soluzione nutritiva e riducendo le dispersioni⁴³.

In un contesto di microgravità e di gravità alterata, la nebulizzazione fine assume particolare interesse: ugelli piezoelettrici o atomizzatori ultrasonici possono generare microgocce perfettamente calibrate, migliorando l'ossigenazione e favorendo un assorbimento più uniforme rispetto ai sistemi terrestri.

Anche il controllo chimico della soluzione nutritiva può beneficiare dell'applicazione di sensori ione-selettivi (ad esempio per nitrato, potassio e calcio), integrati in reti di monitoraggio ad alta frequenza permettendo di creare profili nutritivi dinamici e perfettamente adattati al ciclo di sviluppo della pianta.

Punto di massimo vantaggio è la misurazione dell'ossigeno disciolto, solitamente complessa sulla Terra a causa delle variabili atmosferiche, nello spazio può essere gestita come parametro stabile attraverso sistemi attivi di degassificazione e rimescolamento progettati *ad hoc*.

Infine, i sistemi di sterilizzazione e recupero delle soluzioni nutritive rappresentano un elemento strategico per massimizzare l'efficienza dei cicli idrici, consentendo il riutilizzo quasi completo dell'acqua. L'integrazione di tecnologie consolidate (filtrazione multistadio, trattamento UV-C, osmosi inversa e nanofiltrazione), in moduli compatti e automatizzati, permetterebbe di purificare, riequilibrare e reimmettere le soluzioni nutritive dopo ogni ciclo irriguo, eliminando patogeni, biofilm e accumuli salini. Questo approccio consentirebbe di riutilizzare la stessa acqua per centinaia di cicli colturali, raggiungendo livelli di efficienza idrica nettamente superiori a quelli delle più avanzate serre hi-tech terrestri.

1.3.2 Substrati e sistemi di fissaggio

In assenza di un riferimento di gravitazione, come nei contesti di gravità alterata, le piante non orientano fusti e foglie secondo un asse "verticale" definito, ma con un portamento principalmente guidato da stimoli fototropici. Da questo assunto è possibile immaginare un nuovo scenario agronomico, in cui il controllo e la gestione dell'architettura e del portamento della pianta è gestito tramite una "guida" luminosa e l'ausilio di strutture di supporto leggere. Questa analisi ha portato allo sviluppo, da parte della NASA, di sistemi a geometria controllata grazie ai quali è possibile evitare che la pianta "fluttui" nel substrato, garantendo il confinamento della soluzione nutritiva, ed evitando instabilità tipiche della microgravità. Tra i sistemi più noti rientrano i plant pillows, piccoli cuscini di substrato chiusi (Paragrafi 1.1 e 1.2), e i root modules, sistemi radicali rigidi e sensorizzati.

Tuttavia, si possono immaginare ancora nuovi sistemi di ancoraggio e supporto delle piante andando oltre l'adattamento delle tecnologie terrestri e iniziando a progettare soluzioni completamente nuove in grado di sfruttare le opportunità offerte dalla microgravità. In questa prospettiva, i substrati non devono più limitarsi a trattenere l'apparato radicale, ma possono diventare materiali intelligenti, capaci di modificare la propria struttura in risposta alle diverse fasi di crescita della pianta. Polimeri a memoria di forma, ad esempio, potrebbero irrigidirsi durante la radicazione per garantire stabilità e successivamente ridurre la propria resistenza meccanica, per facilitare le operazioni di raccolta senza danneggiare le radici.

Parallelamente, i sistemi di supporto, non dovendo assolvere al compito di sostenimento del peso, possono essere progettati per interagire con la luce, attraverso guide ottiche o moduli fototropici, al fine di orientare lo sviluppo vegetale in funzione della geometria e dello spazio disponibile educando la pianta a crescere come strutture spiraliformi compatte, pannelli vegetali bidimensionali ad alta fotosintesi o chiome radiali multifaccia, ottimizzate per massimizzare l'intercettazione luminosa in volumi ridotti.

⁴³ Rivera et al., 2006; Dreschel et al., 2018



I sistemi di tutoraggio potrebbero invece integrarsi con piattaforme dinamiche basate su sensori di accrescimento in grado di rilevare la posizione dei fusti e regolare automaticamente, grazie ad algoritmi, tensioni, micro-forze o direzioni luminose per mantenere la forma desiderata con un intervento minimo da parte dell'equipaggio.

In questo scenario, le operazioni di raccolta possono diventare un processo continuo: il micro-harvesting, facilitato dalla stabilità strutturale della pianta fornita dai substrati e dai tutoraggi, consente un approccio simile alla "potatura selettiva automatizzata", garantendo disponibilità costante di biomassa fresca riducendo il carico operativo e migliorando l'efficienza complessiva del sistema.

1.3.3 Impianti accessori per l'ambiente confinato in sistemi bio-rigenerativi spaziali

La produzione vegetale in ambiente confinato per missioni spaziali di lunga durata richiede sistemi accessori altamente integrati operanti all'interno di cicli bio-rigenerativi chiusi (BLSS). In tali ambienti, gli impianti accessori non svolgono solo una funzione di supporto agronomico, ma rappresentano componenti critici per la stabilità complessiva del sistema di supporto vitale (Environmental Control and Life Support Systems, ECLSS).

L'integrazione della CO₂ è strettamente legata al metabolismo umano e ai flussi respiratori dell'equipaggio, costituendo parte del ciclo chiuso carbonio-ossigeno. Studi recenti mostrano che la microgravità modifica lo strato limite fogliare (boundary layer), riducendo la diffusività dei gas e limitando gli scambi gassosi. Per ovviare a tali criticità, sono in fase di sviluppo soluzioni basate su condotti per micro-diffusione a bassa pressione, diffusori robotici adattivi e superfici permeabili progettate per massimizzare l'assorbimento di CO₂ in condizioni di scarsa convezione.

In microgravità, il controllo termo-igrometrico rappresenta un ulteriore elemento cruciale e richiede sistemi attivi di distribuzione dell'aria e gestione climatica, poiché l'assenza di convezione naturale impedisce la stratificazione dell'aria. Soluzioni come ventilazione multidirezionale, sistemi miniaturizzati a flusso di refrigerante variabile (Variable Refrigerant Flow, VRF) e deumidificazione ad alta efficienza, integrate con modelli predittivi e digital twin colturali, permettono una regolazione dinamica dei parametri climatici, riducendo lo stress idrico e le anomalie fisiologiche delle piante tipiche degli ambienti a gravità ridotta.

La gestione delle radiazioni e della luce richiede tecnologie duali. Da un lato, è necessario limitare l'esposizione alle radiazioni ionizzanti mediante materiali schermanti avanzati, quali materiali compositi ricchi di idrogeno, polimeri ad alte prestazioni o, in prospettiva, regolate locali per applicazioni su Luna e Marte. Dall'altro, il controllo della Radiazione Fotosinteticamente Attiva (PAR) è affidato a sistemi di illuminazione a spettro modulabile. Tecnologie emergenti includono pannelli ottici a modulazione dinamica dello spettro, in grado di simulare cicli di luce-alba e luce-crepuscolo necessari per mitigare la fotoinibizione in condizioni di assenza di luce naturale.

Il monitoraggio dei Composti Organici Volatili (VOC) e dei patogeni è essenziale in habitat chiusi, dove contaminazioni microbiche possono propagarsi rapidamente all'intero modulo. Sensori elettrochimici e spettrometri miniaturizzati permettono l'identificazione di VOC associati allo stress vegetale o a fenomeni di degradazione. Parallelamente, biosensori microfluidici, sensori ottici basati su risonanza plasmonica e "electronic nose" integrati in IA predittiva, consentono una diagnosi precoce di patogeni e bioaerosol anche in condizioni di gravità alterata. La correlazione dei marker VOC con modelli fisiologici vegetali permette, inoltre, di anticipare sintomi non ancora visibili a causa delle alterazioni morfologiche tipiche della gravità ridotta.



Infine, nei sistemi agricoli spaziali, le operazioni di sterilizzazione e disinfezione devono avvenire senza rilascio di residui chimici, privilegiando tecnologie fisiche come UV-C, plasma freddo e ozono controllato per il trattamento di aria e superfici. In condizioni di gravità ridotta, l'assenza di sedimentazione richiede sistemi di filtrazione ad alta efficienza (filtri HEPA), barriere a pressione differenziale, robot per la sanificazione automatizzata e l'impiego di materiali antimicrobici di rivestimento. L'integrazione di tali soluzioni in architetture di controllo unificate, supportate da intelligenza artificiale, rappresentano elementi chiave per lo sviluppo di moduli agro-bioregenerativi resilienti, scalabili e ad elevato grado di autonomia.

1.3.4 Flussi per la valorizzazione degli scarti

Progetti come il MELiSSA dimostrano come gli scarti organici generati a bordo — inclusi residui alimentari e frazioni non edibili delle colture — possano essere integrati in catene di trattamento biologico e fisico-chimico per il recupero di azoto, carbonio e minerali. In questo modo è possibile chiudere i cicli di materia e supportare la produzione rigenerativa di cibo, acqua e ossigeno⁴⁴. In tale contesto, microalghe e microrganismi emergono come vere e proprie “bio-fabbriche” per la produzione di biomassa, ossigeno e composti ad alto valore nutrizionale per lo space food e la space nutrition.

Studi condotti dalla NASA nella Biomass Production Chamber indicano che circa 20–25 m² di colture sono sufficienti a produrre l'ossigeno necessario per un individuo, mentre superfici di circa 50 m² possono coprire il fabbisogno calorico giornaliero in sistemi a ciclo chiuso. Questi dati forniscono parametri progettuali concreti per l'integrazione di unità di valorizzazione degli scarti direttamente nei moduli di coltivazione.

A partire dai residui vegetali non edibili e dai substrati esausti, i sistemi di gestione degli scarti possono combinare tecnologie già validate con soluzioni innovative adattate alla microgravità. Tra le principali direttrici tecnologiche emergono:

- micro-reattori fotobiologici basati su microalghe, anche ingegnerizzate, capaci di utilizzare CO₂ e reflui per produrre biomassa ricca di nutrienti riutilizzabile nei sistemi colturali;
- processi di trasformazione dei residui lignocellulosici, inclusa la stampa 3D, per la produzione di componenti strutturali leggeri (pannelli, contenitori), riducendo la dipendenza da materiali importati dalla Terra;
- reattori termochimici a bassa temperatura per la produzione di biochar sterilizzato, utilizzabile come ammendante nei substrati idroponici per migliorare ritenzione idrica e capacità di scambio cationico;
- sistemi biologici di nitrificazione/denitrificazione in micro-ecosistemi chiusi, ispirati all'architettura MELiSSA, per convertire l'azoto organico in forme assimilabili evitando accumuli tossici.

A queste soluzioni si affiancano approcci complementari basati sull'impiego di organismi bioconvertitori. In particolare, insetti e consorzi microbici selezionati rappresentano opzioni promettenti per la trasformazione dello space organic waste in biomassa proteica ad alto valore nutrizionale. Per una trattazione legata alla produzione di flussi generativi di alimenti, si rimanda al Capitolo 3.

Questi sistemi modulari di valorizzazione degli scarti sono destinati a diventare componenti centrali delle future infrastrutture agricole spaziali, operando come nodi chiave nei cicli biorigenerativi multifunzione.

1.3.5 Sensori e “lab-on-chip” per il controllo sostanze volatili e patogeni

Il mantenimento e il controllo dello stato fitosanitario di piante coltivate in camere di crescita compatte attraverso un approccio “salad machine”, risulta fondamentale per l'affidabilità dei sistemi biorigenerativi spaziali. Sebbene l'impiego di sementi certificate sane consenta un elevato livello di controllo alla sorgente, il rischio residuo di introduzione di patogeni all'interno di questi piccoli orti spaziali non può essere

⁴⁴ Verbeelen et al., 2021; Rai et al., 2022; Lasseur et al., 2010



considerato nullo. La salubrità delle sementi viene assicurata mediante protocolli di campionamento statistico (es. ISPM-31) che assicurano un livello di confidenza massimo del 99%. Se questo approccio può assicurare un ottimo livello di controllo per applicazioni in agricoltura convenzionale, il rischio di introduzione di patogeni, anche se con una bassissima percentuale pari all'1%, può avere effetti potenzialmente devastanti in ambienti chiusi ed estremi come l'agricoltura spaziale. Ne deriva che la possibilità di monitorare lo stato fitosanitario in questi sistemi di coltivazione, debba essere prevista.

Le caratteristiche intrinseche di questi sistemi chiusi offrono l'opportunità di sviluppare sistemi diagnostici automatizzati basati su sensori in grado di rilevare i composti volatili emessi dalle piante e/o da eventuali patogeni.

I cosiddetti nasi elettronici (electronic nose, e-nose) si basano su sensori elettrochimici che reagiscono alla presenza di molecole volatili. La loro applicazione per la caratterizzazione dei VOC emessi da organismi patogeni è di recente applicazione in campo agronomico, ma potrebbe avere pieno sviluppo nell'agricoltura spaziale. La rilevazione dei VOC, che rappresentano delle vere e proprie firme chimiche, ha infatti la potenzialità di indicare la presenza di infezioni fitopatologiche, consentendo la differenziazione tra piante sane e infette con elevata accuratezza e sensibilità. Inoltre, il monitoraggio potrebbe avvenire in un processo continuo con l'analisi costante dell'ambiente di coltivazione, consentendo un rilevamento puntuale di eventuali alterazioni sospette che possano ricondurre a presenza di fitopatogeni e dando la possibilità di mettere in atto azioni mirate e precise precoci per la loro gestione.

Accanto ai sistemi basati su VOC, un ulteriore livello diagnostico può essere garantito da piattaforme microfluidiche per l'analisi molecolare. In contesti spaziali, la disponibilità di laboratori tradizionali per la diagnostica fitopatologica è fortemente limitata da vincoli di spazio, attrezzature e competenze operative. In questo scenario, i sistemi Lab-on-Chip (LoC) rappresentano una soluzione altamente promettente.

Si tratta di sistemi diagnostici che si stanno sviluppando in ambito agronomico e possono essere utilizzati in campo. I LoC si basano su un semplice network microfluidico costituito da pozzetti realizzati in materiale biocompatibile, da accoppiare otticamente e meccanicamente a una piattaforma optoelettronica miniaturizzata, costituita da un substrato di vetro su cui sono depositati dei dispositivi di rivelazione a film sottile.

Tali sistemi consentono l'esecuzione automatizzata di analisi molecolari, inclusa l'amplificazione di DNA o RNA (mediante tecniche quali PCR o LAMP), direttamente sul campione. La piattaforma può includere riscaldatori a film sottile, sensori di temperatura e fotosensori basati su silicio amorfo (a-Si:H), oltre a filtri ottici interferenziali per la rilevazione selettiva della fluorescenza. L'impiego di coloranti intercalanti (es. SYBR Green, EvaGreen) o sonde specifiche, consente il monitoraggio in tempo reale dell'amplificazione, permettendo una diagnosi rapida e sensibile.

A complemento dei sistemi LoC, sono in sviluppo dispositivi portatili per l'estrazione degli acidi nucleici (extraction-chip), basati su microfluidica e microbeads funzionalizzate. In tali sistemi, il campione biologico viene sottoposto a lisi e successivamente processato mediante flussi controllati e campi acustici che favoriscono l'interazione tra DNA e superfici attive delle microbeads. Il materiale genetico estratto viene quindi purificato e reso disponibile per l'analisi molecolare a valle.

L'integrazione di queste tecnologie consente lo sviluppo di piattaforme diagnostiche semi-automatizzate, compatte e ad alta affidabilità, in grado di operare direttamente in ambiente spaziale senza necessità di infrastrutture di laboratorio complesse. In questo modo, è possibile ottenere diagnosi molecolari rapide a partire da campioni vegetali, migliorando significativamente la capacità di risposta del sistema a eventi fitopatologici e contribuendo alla resilienza complessiva dei sistemi biorigenerativi.



1.3.6 Ricadute a Terra

Le ricerche NASA dimostrano che, in sistemi agricoli a ciclo chiuso, superfici relativamente contenute possono contribuire in modo significativo al soddisfacimento del fabbisogno di ossigeno e alimento umano, fornendo una base quantitativa solida per il dimensionamento di moduli integrati di coltivazione e gestione delle risorse. In questo contesto, i residui vegetali e i substrati esausti non rappresentano un sottoprodotto, ma una componente strutturale del sistema: possono essere infatti reintrodotti nei cicli produttivi attraverso filiere di trattamento adattate alla microgravità, contribuendo alla chiusura dei flussi di materia e all'aumento dell'autonomia degli habitat spaziali.

Tali filiere integrano tecnologie consolidate — tra cui digestione anaerobica, recupero selettivo dei nutrienti tramite processi a membrana, elettrodialisi e precipitazione controllata di struvite — con soluzioni emergenti come bioreattori fotobiologici e processi termochimici a bassa temperatura. L'obiettivo non è soltanto la stabilizzazione degli scarti, ma la loro trasformazione in risorse utili (fertilizzanti, biomassa, substrati funzionali), riducendo drasticamente la dipendenza dai rifornimenti terrestri. In prospettiva, questi sistemi bio-rigenerativi modulari costituiscono il nucleo dei futuri ecosistemi agricoli lunari e marziani, nei quali la chiusura dei cicli biogeochimici rappresenta un requisito progettuale imprescindibile.

Lo stesso paradigma trova applicazione diretta anche in ambito terrestre. I modelli sviluppati per lo spazio si configurano, infatti, come piattaforme avanzate per la progettazione di sistemi agro-produttivi circolari ad alta efficienza, particolarmente rilevanti in contesti caratterizzati da scarsità di risorse o elevata intensità produttiva. L'integrazione delle medesime tecnologie consente di riconvertire gli scarti agricoli in fertilizzanti secondari ad elevata biodisponibilità e di valorizzare CO₂ e sottoprodotti organici in biomassa e bio-prodotti ad alto valore aggiunto.

Nel loro insieme, questi approcci delineano architetture agro-industriali integrate, capaci di ottimizzare i flussi di acqua, nutrienti e carbonio, ridurre le perdite sistemiche e migliorare l'efficienza d'uso delle risorse. Emerge un'interazione continua tra ricerca spaziale e applicazioni terrestri, in cui la progettazione per condizioni estreme accelera lo sviluppo di soluzioni robuste, scalabili e sostenibili per i sistemi alimentari del futuro (Fig.1.3.1).

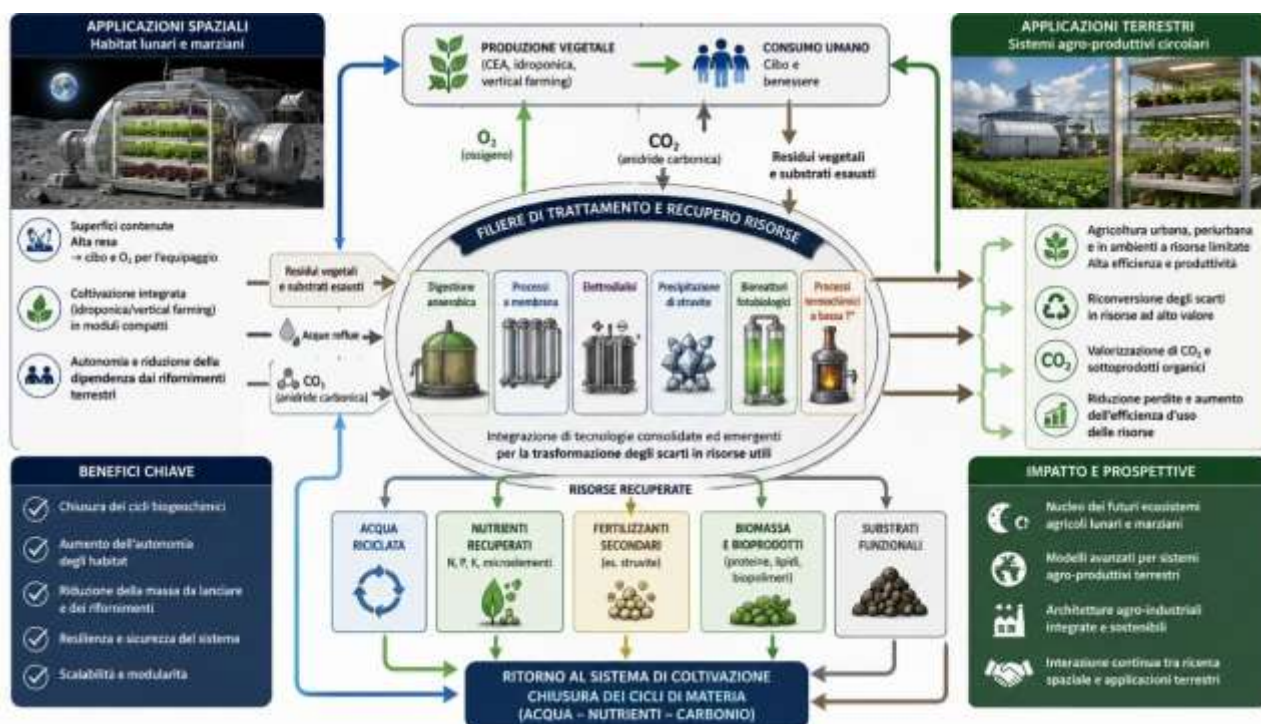


Figura 1.3.1. Sistema bio-rigenerativo integrato per la produzione alimentare e il recupero delle risorse. I residui organici generati dalla coltivazione e dal consumo umano vengono convertiti mediante processi biologici, fisico-chimici e termochimici in nutrienti, acqua, biomassa e fertilizzanti riutilizzabili, consentendo la chiusura dei cicli di carbonio, azoto e minerali. Originariamente sviluppato per supportare habitat spaziali autonomi, questo paradigma trova applicazione anche nei sistemi agroalimentari terrestri ad alta efficienza, favorendo la circolarità delle risorse e la riduzione della dipendenza da input esterni (immagine generata mediante IA).

Bibliografia

Dreschel, T., Nugent, M., Monje, O., Spencer, L., 2018. Hydroponics for Food Production in Space: History and Current Efforts. NASA Kennedy Space Center Technical Report, KSC-E-DAA-TN59371. National Aeronautics and Space Administration (NASA). URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20180005362.pdf>

Lasseur, C., Brunet, J., De Wever, H., Dixon, M., Dussap, G., Godia, F., Leys, N., Mergeay, M., Van Der Straeten, D., 2010. MELiSSA: The European Project of Closed Life Support System. *Gravitational and Space Research*, 23(2), 3–12.

Rai, I., Ahirwar, A., Rai, A., Varjani, S., Vinayak, V., 2022. Biowaste Recycling Strategies for Regenerative Life Support System: An Overview. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53(Part B), 102525. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102525>

Rivera, C.M., Battistelli, A., Moscatello, S., Proietti, S., Rouphael, Y., Cardarelli, M., Colla, G., 2006. Influence of simulated microgravity on growth, yield, and quality of leafy vegetables: lettuce and rocket. *European Journal of Horticultural Science*, 71(1), 45–51. <https://doi.org/10.1079/ejhs.2006/102798>

Verbeelen, T., Leys, N., Ganigué, R., Mastroleo, F., 2021. Development of Nitrogen Recycling Strategies for Bioregenerative Life Support Systems in Space. *Frontiers in Microbiology*, 12, 700810. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.700810>



Capitolo 2 - Piante per lo spazio: sfide, strategie e applicazioni terrestri

Paragrafo 2.1 - Effetti dell'ambiente spaziale sulle piante

(Veronica De Micco - Università degli Studi di Napoli Federico II, Silvia Massa - ENEA)

Sulla Terra, le piante, in quanto organismi fotosintetizzanti, costituiscono i principali organismi “produttori” all'interno delle reti trofiche o catene alimentari essendo in grado di sintetizzare sostanza organica a partire da molecole inorganiche grazie all'energia solare. In questo modo, le piante innescano il flusso di energia negli ecosistemi, rendendola disponibile ai livelli trofici superiori.

Le piante svolgeranno il ruolo di produttori anche negli ecosistemi artificiali per lo spazio⁴⁵, essendo organismi chiave per la rigenerazione delle risorse, contribuendo alla produzione di ossigeno, alla fissazione della CO₂ e alla generazione di biomassa alimentare⁴⁶.

La realizzazione dei sistemi per la coltivazione delle piante nello spazio si basa necessariamente sui requisiti di coltivazione definiti sulla base del “comportamento” delle piante sulla Terra⁴⁷. Tale comportamento è il risultato di un complesso processo evolutivo, sviluppatosi nel corso di milioni di anni, e che ha portato a un progressivo aumento della complessità delle strutture e delle vie metaboliche, guidato dai fattori ambientali, tra cui la forza di gravità e la radiazione solare, che hanno avuto un ruolo fondamentale.

Nello spazio, non solo l'uomo, ma anche le piante dovranno affrontare nuove sfide, acclimatandosi e adattandosi ad un ambiente ostile⁴⁸. La biologia vegetale spaziale, o “astrobotanica”, studia i meccanismi attraverso cui le piante crescono e si riproducono in ambiente spaziale con finalità che rientrano in due ambiti principali di ricerca. Il primo, con obiettivi di ricerca di base, mira a comprendere i meccanismi fondamentali con cui le piante rispondono ai fattori ambientali spaziali, utilizzando gli ambienti extraterrestri, come speciali laboratori, che permettono di comprendere meglio anche alcuni processi di crescita sulla Terra come il gravitropismo e gli altri tropismi⁴⁹. Il secondo, di carattere applicativo e multidisciplinare, è orientato a garantire la produttività delle piante per l'uomo nei futuri outpost spaziali. In questo caso, la ricerca si concentra sulla quantificazione dell'effetto dei fattori spaziali e del controllo ambientale (necessario in ambito spaziale), sui processi di crescita e riproduzione, per valutarne il possibile impatto sui requisiti di coltivazione nei BLSS, sulla capacità rigenerativa delle piante e sul valore nutrizionale degli organi edibili⁵⁰.

Tutti gli organismi, comprese le piante, nello spazio sono esposti a tre tipologie di fattori ambientali:

1. fattori presenti anche sulla Terra, ma caratterizzati da livelli completamente diversi e variabili nei diversi scenari di missione, spesso incompatibili con la vita delle piante. Tra questi rientrano la disponibilità di acqua libera, la temperatura, la composizione dell'atmosfera o dell'esosfera locale, la durata dei cicli luce-buio, la pressione e l'intensità del campo magnetico;
2. fattori presenti con intensità e caratteristiche così diverse da quelli terrestri da essere considerati fattori “nuovi” primari, come la gravità alterata e la radiazione cosmica (o radiazione ionizzante);
3. fattori “nuovi” ma secondari, poiché generati dall'azione dei fattori primari. Tra questi si includono, ad esempio, l'alterazione della dinamica dei fluidi causata dall'assenza di moti convettivi in condizioni

⁴⁵ Sistemi Biorigenerativi di Supporto alla Vita – BLSS, rif. Cap. 1

⁴⁶ Gòdia et al., 2002; De Micco et al., 2023a; Cockell et al., 2024

⁴⁷ Amitrano et al., 2023

⁴⁸ Fountain et al., 2026

⁴⁹ De Micco et al., 2023b

⁵⁰ Wheeler, 2009; De Micco et al., 2023b



di gravità alterata, con conseguenti effetti sui flussi idraulici e sugli scambi gassosi nelle piante; oppure l'assenza di un microbiota nel suolo/substrato di coltivazione.

Tra i diversi fattori ambientali, la gravità alterata e la radiazione cosmica (radiazione ionizzante) sono riconosciute come i principali limiti alla crescita delle piante in ambiente extraterrestre.

La ricerca in biologia vegetale spaziale si è storicamente concentrata soprattutto sugli effetti della gravità alterata. Durante il lancio e alcune fasi del volo, in particolare durante l'uscita dal campo magnetico terrestre o il raggiungimento di piattaforme che orbitano intorno alla Terra, materiali e organismi sono esposti a ipergravità, una condizione in cui la forza di accelerazione supera la normale gravità terrestre. A bordo delle piattaforme orbitanti (per esempio satelliti come il Foton, la stessa Stazione Spaziale Internazionale – ISS e i CubeSat), si instaurano condizioni di milli- o micro-gravità. Infine, su piattaforme lunari o planetarie la gravità è inferiore a quella terrestre ma non nulla. Tale condizione è nota come gravità frazionaria e dipende dal corpo celeste (per esempio è pari a 0,37 *g* su Marte e 0,17 *g* sulla Luna).

La ricerca in astrobotanica ha visto negli ultimi due decenni un crescente interesse verso lo studio degli effetti della radiazione ionizzante, considerata il principale showstopper per le missioni spaziali di lunga durata (Narici et al., 2026). Al di fuori del campo magnetico e dell'atmosfera terrestre — che sulla Terra attenuano drasticamente le radiazioni — la radiazione cosmica rappresenta infatti un fattore critico per tutti gli organismi viventi, incluse le piante. La radiazione cosmica è in larghissima misura ionizzante, ossia è dotata di energia sufficiente a rimuovere elettroni dagli atomi o dalle molecole con cui interagiscono, generando ioni. Nelle missioni di lunga durata, tutta la materia (anche vivente) sarà esposta per lunga durata a livelli di radiazione ionizzante molto più elevati che sulla Terra.

Questa radiazione è composta da particelle ad alta energia in grado di ionizzare la materia, ovvero di rimuovere elettroni da atomi e molecole generando ioni. La componente primaria, variabile nel tempo e nello spazio, deriva principalmente dai Galactic Cosmic Rays (GCR) e dai Solar Particle Events (SPE), ed è costituita prevalentemente da protoni (oltre l'85%), nuclei di elio (particelle α) e ioni pesanti. Quando tali particelle interagiscono con la materia — inclusi i materiali strutturali dei veicoli spaziali — si generano anche radiazioni secondarie, caratterizzate da uno spettro diverso che include neutroni, fotoni (raggi gamma) e altre particelle.

Sia la gravità alterata che l'esposizione alle radiazioni ionizzanti determinano negli organismi viventi cambiamenti nell'espressione genica, nella proliferazione e differenziazione cellulare, nei processi fisiologici e biochimici, con conseguente comparsa di alterazioni strutturali e funzionali a livello dell'intero organismo⁵¹. Inoltre, poiché questi cambiamenti cellulari e molecolari sono rilevati nelle prime fasi dello sviluppo, ci si aspetterebbe che siano indotte anche alterazioni dello sviluppo. Tuttavia, anche nelle piante si verifica un fenomeno, segnalato per la prima volta nei moscerini della frutta (*Drosophila melanogaster*) e definito come “un apparente paradosso”: i cambiamenti nell'espressione genica e nelle prime fasi di proliferazione e differenziazione cellulare non sono sempre seguiti da alterazioni rilevabili a livello macroscopico nelle fasi successive dello sviluppo morfologico⁵². Di fatto, in molti esperimenti di crescita delle piante nello spazio, non sono state osservate aberrazioni nell'organizzazione dei tessuti, nell'organogenesi e nel funzionamento degli organi, e ci sono evidenze del completamento del ciclo “seed-to-seed” anche se con produzione di semi di minore qualità o con ritardi nello sviluppo embrionale. Nei primi esperimenti spaziali, molte aberrazioni nella crescita delle piante (come ridotta germinazione, crescita rallentata o mancato completamento del ciclo riproduttivo) sono state inizialmente attribuite alla microgravità, per essere poi ricondotte a problemi nel controllo ambientale delle camere di crescita a bordo o alla dinamica alterata dei fluidi, che hanno

⁵¹ De Micco et al., 2023b

⁵² Marco et al., 2003



determinato fenomeni quali ad esempio l'accumulo di etilene, eccesso di umidità o ridotti livelli di anidride carbonica⁵³. In generale, la maggior parte degli studi sugli effetti della microgravità sulle piante si è concentrata sui meccanismi di gravi-percezione e sulla proliferazione cellulare con evidenze di alterazioni nel normale svolgimento del ciclo cellulare, nella genesi dei ribosomi, nella condensazione della cromatina, talvolta collegati a fenomeni di *downregulation* di geni specifici o controllo epigenetico. Ci sono anche evidenze, talvolta contrastanti, degli effetti della microgravità sulla sintesi e distribuzione di auxine e citochinine che regolano i rapporti tra proliferazione e differenziamento cellulare. Durante il processo di differenziamento cellulare, la microgravità può anche determinare alterazioni nei fenomeni di formazione delle pareti cellulari, legate a disordini nell'organizzazione del citoscheletro che guida la deposizione delle fibrille di cellulosa. Nel corso del ciclo riproduttivo, sono state evidenziate anche alterazioni in diversi stadi come la formazione del polline o lo sviluppo dei gametofiti, con conseguenze sulla formazione dei semi e frutti.

Gli effetti della radiazione sulle piante possono essere classificati in diretti e indiretti. I primi derivano dall'interazione della radiazione con macromolecole biologiche come DNA e proteine, e con elementi cellulari e subcellulari, compromettendo divisione cellulare, crescita e organogenesi, nonché il normale svolgimento dei processi metabolici. Gli effetti indiretti si manifestano, invece, come alterazioni fenotipiche conseguenti ad aberrazioni genetiche, mutazioni cromosomiche e/o danni mediati dalla formazione di radicali liberi, i quali reagiscono con proteine, lipidi e acidi nucleici, amplificando le conseguenze sullo sviluppo, sulla riproduzione e sulla capacità di acclimatazione e adattamento delle piante. La risposta delle piante alle radiazioni ionizzanti non è ancora del tutto compresa. Una parte delle conoscenze disponibili derivano da esperimenti condotti con finalità differenti dall'esplorazione spaziale, come l'impiego delle radiazioni per la decontaminazione delle derrate alimentari, gli studi di radio-ecologia in zone colpite da contaminazione nucleare e l'utilizzo di radiazioni nei programmi di miglioramento genetico (mutagenesi indotta in programmi di mutation breeding).

Esperimenti space-oriented sono stati condotti sia nello spazio che a terra con space analogues, utilizzando esposizioni acute o croniche di specifiche tipologie di radiazioni, su un numero ridotto di specie che comprendono specie-modello come *Arabidopsis thaliana* o colture di famiglie botaniche di interesse alimentare. Questi esperimenti hanno dimostrato che la risposta delle piante alla radiazione può essere estremamente variabile perché dipendente da numerosi fattori relativi alle proprietà sia della radiazione stessa che della pianta. Relativamente alla radiazione, gli effetti dipendono da una proprietà nota come Trasferimento Lineare di Energia (Linear Energy Transfer, LET), dalla dose e dal tipo di esposizione (acuta o cronica). È accettato che le radiazioni ad alto LET (per es. ioni pesanti) provocano danni più gravi anche a dosi più basse rispetto alla radiazione a basso LET (per es. raggi X, utilizzati negli studi come radiazione di riferimento, e raggi gamma)⁵⁴.

Relativamente ai fattori intrinseci della pianta, c'è una variabilità di risposta legata alla specie, alla cultivar nell'ambito di ciascuna specie, dello stadio di sviluppo al momento dell'esposizione alla radiazione, con tessuti in attiva crescita più vulnerabili rispetto a tessuti e organi che hanno terminato l'accrescimento. In generale, si può dire che le piante sono molto più resistenti degli animali alla radiazione ionizzante, e che nelle piante si verifica un fenomeno noto come ormesi per cui dosi basse (tuttavia già letali per gli animali) possono addirittura stimolare e favorire alcuni fenomeni come la germinazione, la crescita, fotosintesi e respirazione, la sintesi di molecole come clorofille, carotenoidi, composti antiossidanti di natura enzimatica e non, composti fenolici, utili per contrastare l'azione dei ROS (Reactive Oxygen Species), con effetti positivi anche sul valore nutrizionale degli organi eduli. In questo contesto si inseriscono approcci di miglioramento

⁵³ De Micco et al., 2014; Vandenbrink & Kiss, 2016

⁵⁴ De Micco et al., 2022



genetico mirati ad aumentare la resilienza delle piante agli stress spaziali. Ad esempio, ENEA ha sviluppato una linea di pomodoro nano biofortificato capace di accumulare antocianine sia nei tessuti vegetativi sia nei frutti attraverso la regolazione della loro biosintesi. Questo intervento non ha comportato penalizzazioni significative nei parametri vegetativi e produttivi rispetto ai controlli wild type. In condizioni simulate rappresentative di diversi scenari di coltivazione spaziale, le linee biofortificate hanno mostrato stabilità nei livelli di pigmenti antiossidanti, mantenimento dell'efficienza fotosintetica, un *habitus* più compatto e assenza di variazioni rilevanti nei parametri morfologici e produttivi, a differenza dei controlli. I frutti hanno, inoltre, evidenziato una maggiore capacità di risposta allo stress ossidativo, suggerendo un potenziale valore nutraceutico e una maggiore idoneità come alimento fresco per missioni spaziali di lunga durata (Figura 2.1.1)⁵⁵.

Tuttavia, all'aumentare della dose anche nelle piante compaiono effetti negativi come ridotta germinazione, crescita rallentata, riduzione della fotosintesi, perdita della dominanza apicale con alterazioni nella morfogenesi, alterazioni nell'organizzazione dei tessuti e senescenza precoce.

Infine, esistono evidenze di interazione tra microgravità e radiazione, e tra questi ed altri fattori ambientali e colturali⁵⁶. Ad esempio, è stato dimostrato che l'effetto di dosi crescenti di radiazione su semi in fase di germinazione può determinare l'aumento o la diminuzione di alcune molecole ad azione antiossidante in funzione della qualità della luce a cui i germinelli sono esposti nel corso della crescita dopo i trattamenti di irraggiamento⁵⁷. La comprensione di tali interazioni tra fattori è di fondamentale importanza, poiché la modulazione dei fattori ambientali durante la coltivazione nei BLSS potrebbe mitigare gli effetti negativi dei fattori spaziali.

⁵⁵ Pagliarello et al., 2023a, Pagliarello et al., 2023b

⁵⁶ De Micco et al., 2023b

⁵⁷ De Micco et al., 2021



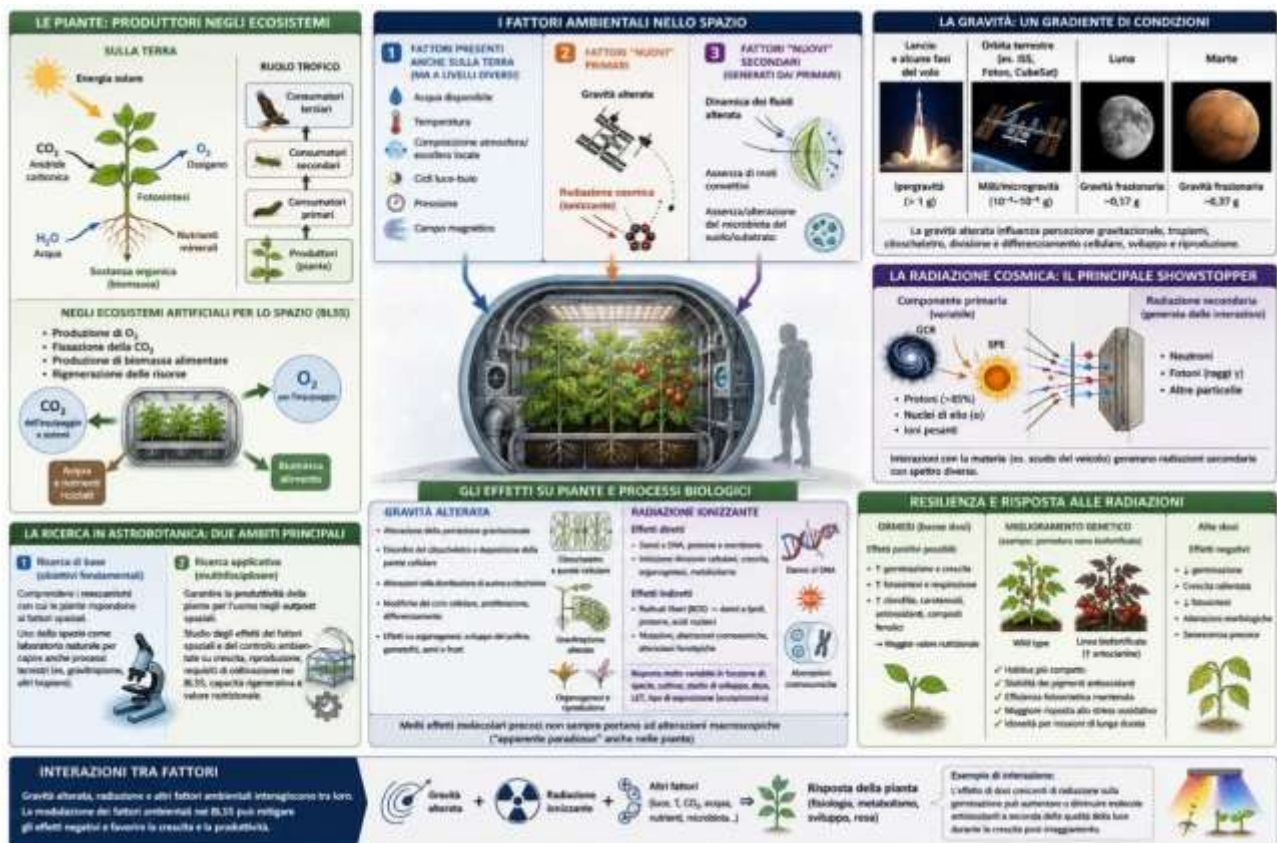


Figura 2.1.1. Schema concettuale che illustra i principali fattori ambientali extraterrestri — gravità alterata, radiazione ionizzante e condizioni fisico-chimiche estreme — e i loro effetti sui processi cellulari, fisiologici e riproduttivi delle piante. La figura mostra inoltre le strategie di mitigazione basate sul controllo ambientale e sul miglioramento genetico, finalizzate a garantire la produzione di ossigeno, biomassa alimentare e rigenerazione delle risorse nei futuri habitat lunari e marziani (immagine generata mediante IA).

Bibliografia

Amitrano, C., Pagliarunga, G., Battistelli, A., De Micco, V., Del Bianco, M., Liuzzi, G., Moscatello, S., Paradiso, R., Proietti, S., Roupheal, Y., De Pascale, S., 2023. Defining growth requirements of microgreens in space cultivation via biomass production, morpho-anatomical and nutritional traits analysis. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1190945. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1190945>

Cockell, C.S., Green, D.A., Caplin, N., Grenouilleau, J., McDonald, F.E., Calvaruso, M., Billi, D., Cullen, D.C., Davey, M.P., De Micco, V., Elsaesser, A., Etheridge, T., Gläßer, C., Hellweg, C.E., Ilea, C.S., Lecocq, A., Leys, N., Martin-Torres, J., Nazarious, M., Pacelli, C., Przybyla, C., Rabbow, E., Robson Brown, K., Soria-Salinas, A., Szewczyk, N., Tinganelli, W., Tranfield, E.M., de Vera, J.-P., Verseux, C., 2024. BioMoon: a concept for a mission to advance space life sciences and astrobiology on the Moon. *Discover Space*, 5, 128. <https://doi.org/10.1007/s11038-024-09558-4>

De Micco, V., Amitrano, C., Mastroleo, F., Aronne, G., Battistelli, A., Carnero-Diaz, E., De Pascale, S., Detrell, G., Dussap, C.G., Ganigué, R., Jakobsen, Ø.M., Poulet, L., Van Houdt, R., Verseux, C., Vlaeminck, S.E., Willaert, R., Leys, N., 2023. Plant and microbial science and technology as cornerstones to Bioregenerative Life Support Systems in space. *npj Microgravity*, 9, 69. <https://doi.org/10.1038/s41526-023-00317-9>

De Micco, V., Amitrano, C., Vitaglione, P., Ferracane, R., Pugliese, M., Arena, C., 2021. Effect of light quality and ionising radiation on morphological and nutraceutical traits of sprouts for astronauts' diet. *Acta Astronautica*. 185: 188-197. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.05.007>

- De Micco, V., Arena, C., Di Fino, L., Narici, L., 2022.** Radiation environment in exploration-class space missions and plants' responses relevant for cultivation in Bioregenerative Life Support Systems. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1001158. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1001158>
- De Micco, V., Aronne, G., Caplin, N., Carnero-Diaz, E., Herranz, R., Horemans, N., Legué, V., Medina, F.J., Pereda-Loth, V., Schiefloe, M., De Francesco, S., Izzo, L.G., Le Disquet, I., Kittang Jost, A.I., 2023.** Perspectives for plant biology in space and analogue environments. *npj Microgravity*, 9, 67. <https://doi.org/10.1038/s41526-023-00315-x>
- De Micco, V., De Pascale, S., Paradiso, R., Aronne, G., 2014.** Microgravity effects on different stages of higher plant life cycle and completion of the seed-to-seed cycle. *Plant Biology*, 16(S1), pp. 31–38. <https://doi.org/10.1111/plb.12098>
- Fountain, L.L., Gilliam, M., Amitrano, C., Arouna, N., Barker, R.J., Böhmer, M., Braun, M., Brereton, N.J.B., Brocato, R.L., Bunchek, J.M., Canaday, E.L.J., Caplin, N., Castaño, P., Decourteix, M., Del Bianco, M., De Micco, V., Doherty, C., Escobar, C., Franke, M.F., Fuentes, S., Gilroy, S., Harrison, L., Hasenstein, K.H., Hauslage, J., Herranz, R., Iyer-Pascuzzi, A., Izuma, D.S., Junya, K., Kiss, J.Z., Legué, V., Lloyd, J.P.B., Massa, G.D., Maffei, M.E., Meyers, A.D., Perera, I.Y., Poulet, L., Roychoudry, S., Sena, G., Shippen, D., Stoochnoff, J., Takahashi, H., Wyatt, S.E., Blancaflor, E.B., 2026.** Expanding frontiers: harnessing plant biology for space exploration and planetary sustainability. *New Phytologist*, 249(2), pp. 656–669. <https://doi.org/10.1111/nph.70662>
- Gòdia, F., Albiol, J., Montesinos, J.L., Pérez, J., Creus, N., Cabello, F., Mengual, X., Montras, A., Lasseur, C., 2002.** MELISSA: a loop of interconnected bioreactors to develop life support in space. *Journal of Biotechnology*, 99(3), pp. 319–330. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(02\)00222-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(02)00222-5)
- Marco, R., Husson, D., Herranz, R., Mateos, J., Medina, F.J., 2003.** *Drosophila melanogaster* and the future of 'evo-devo' biology in space: challenges and problems in the path of an eventual colonization project outside the Earth. *Advances in Space Biology and Medicine*, 9, pp. 41–81.
- Narici, L., Boscheri, G., Cenci, G., De Micco, V., Fraboni, B., La Tessa, C., Ottolenghi, A., Patera, V., Pugliese, M., Rea, G., Rizzo, A.M., Tabocchini, M.A., Tagliaferri, L., Tinganelli, W., Cotronei, V., Del Bianco, M., Ferranti, F., Pacelli, C., Vagelli, V., 2026.** Radiation risk mitigation in human space exploration: a primer, a vision, and the state of the art. *The European Physical Journal Plus*, 141, 100. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-025-07199-8>
- Pagliarello, R., Bennici, E., Cemmi, A., Di Sarcina, I., Spelt, C., Nardi, L., Del Fiore, A., De Rossi, P., Paolini, F., Koes, R., Quattrocchio, F., Benvenuto, E., Massa, S., 2023.** Designing a novel tomato ideotype for future cultivation in space manned missions. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9, 1040633. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.1040633>
- Pagliarello, R., Bennici, E., Di Sarcina, I., Villani, M.E., Desiderio, A., Nardi, L., Benvenuto, E., Cemmi, A., Massa, S., 2023.** Effects of gamma radiation on engineered tomato biofortified for space agriculture by morphometry and fluorescence-based indices. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1266199. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1266199>
- Vandenbrink, J.P., Kiss, J.Z., 2016.** Space, the final frontier: a critical review of recent experiments performed in microgravity. *Plant Science*, 243, pp. 115–119. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.12.003>
- Wheeler, R.M., 2009.** Roadmaps and strategies for crop research for Bioregenerative Life Support Systems: a compilation of findings from NASA's Advanced Life Support meetings. *NASA Technical Memorandum*, TM-2009-214768. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20230012055>



Capitolo 2 - Piante per lo Spazio: Sfide, Strategie e Applicazioni terrestri

Paragrafo 2.2 - Selezione delle colture e Tecniche di Evoluzione Assistita (TEA) per il raggiungimento dell'ideotipo spaziale

(Silvio Salvi – Alma Mater Università di Bologna, Silvia Massa - ENEA, Cosimo Sarti - Università degli Studi di Torino; Università di Trento, Matteo Caser - Università degli Studi di Torino, Silvana Nicola - Università degli Studi di Torino, Alberto Battistelli - CNR, Lorenzo Di Benedetto ART-ER)

L'esplorazione umana dello spazio profondo e la prospettiva di missioni di lunga durata richiedono sistemi di produzione vegetale altamente affidabili, efficienti e resilienti. In questo quadro, la coltivazione di piante a fini alimentari rappresenta un elemento chiave dei Sistemi Biorigenerativi di Supporto alla Vita (BLSS), contribuendo alla rigenerazione di ossigeno, al riciclo della CO₂, alla gestione dei reflui e alla produzione di alimenti freschi, con benefici nutrizionali e psicologici per gli equipaggi⁵⁸.

Numerosi esperimenti condotti su ISS e in altri contesti di microgravità hanno dimostrato la fattibilità della coltivazione di specie-modello o di interesse alimentare (*Arabidopsis*, lattuga, frumento, patata), pur evidenziando limiti fisiologici e produttivi legati alle condizioni ambientali non terrestri⁵⁹. Come in ogni sistema agrario sulla Terra, anche nello Spazio la disponibilità di specie e cultivar adeguate è un prerequisito essenziale: nel contesto spaziale, tuttavia, tale requisito assume un carattere ancora più stringente, data l'estrema limitazione di spazio, risorse e possibilità di intervento correttivo.

Il miglioramento genetico assume quindi un ruolo strategico, non solo per adattare le colture alle condizioni extraterrestri, ma anche per integrare in modo coerente genetica vegetale, sistemi di Agricoltura in Ambiente Controllato (CEA) e vincoli ingegneristici della missione.

2.2.1 Ideotipo spaziale e criteri di selezione delle colture

L'ideotipo di una coltura agraria è un modello concettuale che descrive l'insieme di tratti morfologici, fisiologici e fenologici ottimali per massimizzare la performance di una coltura in un ambiente e che aiuta a focalizzare gli obiettivi del miglioramento genetico⁶⁰. L'ideotipo di una coltura per lo Spazio include una sintesi di tratti che consentono la coltivazione efficiente in ambienti confinati, con risorse limitate e fattori abiotici peculiari (tra gli altri, microgravità o gravità ridotta, radiazioni ionizzanti, atmosfera e illuminazione controllate, restrizioni volumetriche).

Le colture attualmente disponibili non risultano ancora sufficientemente produttive, né economicamente efficienti per un impiego nei sistemi agricoli spaziali. Per questo motivo, è stata proposta una strategia definita Whole-Body Edible and Elite Plant (WBEEP, Figura 2.2.1) per il miglioramento delle colture destinate allo Spazio. Basata su approcci di biotecnologia vegetale, tale strategia mira allo sviluppo di colture caratterizzate da una maggiore frazione edibile, un contenuto nutrizionale più elevato, rese superiori e una maggiore efficienza nell'uso dei nutrienti minerali, in funzione delle esigenze dei sistemi agricoli spaziali. Ad esempio, lo sviluppo di patate interamente edibili per lo Spazio potrebbe contemplare la riduzione del contenuto di solanina, tramite modifiche biosintetiche e regolatorie, che consentirebbe di rendere edibili anche fusti, foglie e bacche. L'ottimizzazione delle vie metaboliche permetterebbe di aumentare il contenuto di composti benefici (come flavonoidi, carotenoidi, acidi grassi essenziali). Un incremento della resa potrebbe

⁵⁸ De Pascale et al., 2021

⁵⁹ Mortimer and Gilliam 2022; Nie et al. 2025

⁶⁰ Donald, 1968



essere ottenuto migliorando tuberizzazione, efficienza fotosintetica e regolazione epigenetica. L’efficienza nell’uso dei nutrienti potrebbe essere migliorata attraverso il controllo dell’assorbimento, la distribuzione e il metabolismo dei nutrienti e l’ottimizzazione dell’architettura radicale⁶¹.

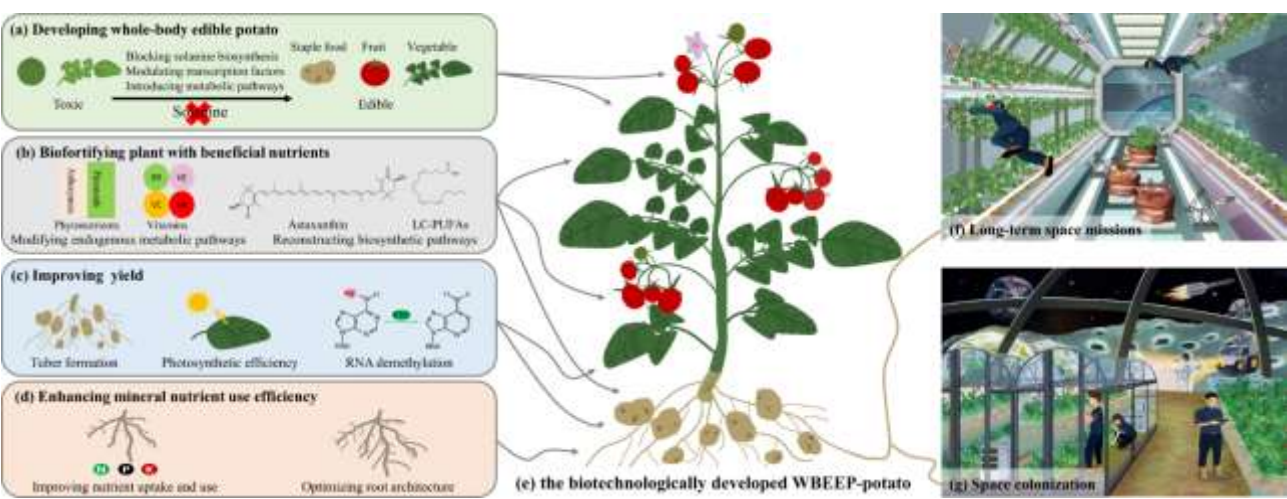


Figura 2.2.1. Esempio di patata WBEEP (Whole-Body Edible and Elite Plant. Fonte: Liu et al. 2021).

Le caratteristiche chiave dell’ideotipo spaziale sono brevemente illustrate nella Tabella 2.2.1. I principali protocolli di sviluppo in questa direzione e le prove sperimentali privilegiano le specie a ciclo breve e ad alta frazione commestibile, oltre a includere integratori proteici e calorici e nutraceutici⁶². I requisiti fisiologici, morfologici e ambientali sono riassunti nelle Tabelle 2.2.1 e 2.2.2.

Tabella 2.2.1 Caratteristiche chiave dell’ideotipo spaziale, con i requisiti fisiologici e morfologici generali

Ciclo breve e produttività elevata: cicli seed-to-seed o tuber-to-tuber rapidi e tempo ridotto al primo raccolto; dove possibile si preferiscono sistemi a raccolta ripetuta (cut-and-come-again). Architettura compatta e alto Harvest Index (HI): piante di bassa statura e limitato volume, con elevato rapporto biomassa commestibile-digeribile/biomassa totale. Riduzione dei residui, di polline e semi: scarsa produzione di detriti (foglie o semi che cadono, polline), preferenza per piante glabre per limitare la dispersione di particolato nelle camere pressurizzate, limitato contenuto di lignina. Elevata efficienza d’uso delle risorse (es. acqua e nutrienti), elevato rendimento fotosintetico con ridotto consumo energetico ed efficiente risposta al controllo ambientale. Elevato profilo nutrizionale e conservabilità
--

⁶¹ Liu Y et al., 2021

⁶² Nie et al. 2025

Tabella 2.2.2 Requisiti dell'ideotipo specifici per l'ambiente spaziale

Fattore Ambientale/ Vincolo Spaziale	Requisiti di Robustezza e Resilienza delle Colture
Atmosfera CEA	Capacità di crescere in atmosfera con CO ₂ elevata (2000 - 3000 ppm, fino a 5000 - 7000 ppm) e RH moderatamente bassa (38 - 44%), mantenendo crescita stabile e bassa incidenza di fisiopatie.
Stress Idrico / Ambientale	Tolleranza a sotto- e sovra-irrigazione; capacità di interrompere la crescita in condizioni sub-ottimali e riprenderla senza danni significativi. Importante in idroponica/aeroponica a gravità alterata.
Recupero da Eventi Anomali (Resilienza)	Rapida ripresa post-stress (es. stress idrico, attacchi fungini, danni meccanici o alterazioni ambientali). I residui di coltivazione possono compensare le perdite del raccolto.
Microgravità e Gravità Alterata	Capacità di mantenere orientamento, morfogenesi radicale e funzionalità fisiologiche in microgravità, 1/6 G (Luna), 3/8 G (Marte).
Radiazioni Ionizzanti	Mantenimento di vitalità, stabilità genetica e qualità nutrizionale in condizione di esposizione continua a bassa dose e particelle ad alto LET (<i>Linear Energy Transfer</i>).
Resilienza del Sistema (Diversità Funzionale)	Necessità di utilizzare almeno 3 famiglie botaniche diverse per nutrienti critici, per prevenire la perdita totale del sistema in caso di attacco di patogeno o <i>failure</i> colturale.
Germinazione e Propagazione	Germinazione affidabile in condizioni controllate; uniformità di emergenza e crescita. Adattabilità a coltura <i>in vitro</i> e micropropagazione per la produzione di propaguli omogenei in condizioni asettiche e con elevata densità (implementazione operativa richiesta in termini di automazione dei sistemi e gestione dell'asepsi)
Pressione e Temperatura Operativa	Funzionamento stabile a pressioni tipiche dei veicoli spaziali (56.5 -101 kPa) e temperature 16 - 28 °C.
Stress Abiotici Generali (luce, calore, nutrienti)	Tolleranza a stress luminosi (LED intensi o fotoperiodi estesi), transienti termici e variazioni nella disponibilità di nutrienti.

Un aspetto trasversale ai criteri dell'ideotipo riguarda la propagazione e la gestione di materiale vegetale sano e uniforme. Tecniche di coltura *in vitro* e micropropagazione consentono la produzione di propaguli omogenei in condizioni asettiche e con elevata densità di propaguli per unità di volume di coltura (Nhut et al., 2022), e possono costituire una piattaforma sperimentale per lo screening di risposte a microgravità simulata e stress in ambiente controllato. La loro implementazione operativa in missione richiede tuttavia ulteriori sviluppi in termini di automazione dei sistemi e gestione dell'asepsi (Tabella 2.2.2).



Un ulteriore aspetto centrale è la diversità funzionale: per garantire la resilienza del sistema BLSS, è necessario includere più specie appartenenti a famiglie botaniche diverse, in modo da ridurre il rischio di fallimenti sistemici legati a patogeni o stress specifici e ridurre la monotonia alimentare (Tabella 2.2.2). Per questo motivo, la NASA propone l’adozione di un paniere di oltre 30 colture per integrare la dieta⁶³. Per valutare in modo sistematico lo stato di maturità delle colture candidate è stato introdotto il Crop Readiness Level (CRL), come riportato in Tabella 2.2.3, una scala ispirata ai Technology Readiness Levels (TRL) dell’ingegneria aerospaziale⁶⁴.

Tabella 2.2.3 Framework Crop Readiness Level (CRL)

CRL1	Identificazione della coltura (SIN)	Identificazione della coltura candidata a livello di cultivar. Include la valutazione preliminare di morfologia, resa consumabile, germinazione e applicazione alla missione.
CRL2	Screening della cultivar	Valutazione dettagliata delle dimensioni massime della pianta, identificazione dei requisiti di impollinazione e germinazione, e quantificazione dell'indice di raccolta (harvest index).
CRL3	Test ambientali rilevanti	Test in condizioni ambientali simulate di volo spaziale, attualmente rilevanti per la ISS. Le colture sono selezionate per prestazioni robuste o assenza di risposte fisiologiche avverse.
CRL4	Microbiologia di base	Caratterizzazione microbiologica di base e della sicurezza alimentare condotta in condizioni simili al volo. I criteri includono lo screening per patogeni e il conteggio di batteri, lieviti e muffe.
CRL5	Chimica e accettabilità sensoriale	Test nutrizionali ed elementari condotti in condizioni simili al volo. L'analisi sensoriale (test del gusto) valuta sapore, consistenza, aspetto, ecc. Per l’approvazione le colture devono ottenere un punteggio medio di accettabilità di almeno 6 su una scala edonica di nove punti.
CRL6	Sanitizzazione del seme	Identificazione di protocolli accettabili per la sterilizzazione superficiale dei semi o la sanitizzazione dei propaguli vegetali, mantenendo un alto tasso di germinazione (es. >60%).
CRL7	Test simili al volo	Test in hardware di volo o analoghi (come Veggie o APH a terra) utilizzando i setpoint ambientali di volo per valutare le prestazioni nella configurazione hardware.
CRL8	Coltivata nello spazio	La coltura è coltivata con successo nello spazio fino al punto finale pianificato (ad esempio, la maturazione completa).
CRL9	Consumata nello spazio	Buona crescita nello spazio e consumo effettivo da parte dell'equipaggio con accettabilità.

⁶³ Fritsche et al., 2024
⁶⁴ Fountain et al 2026; Fritsche et al., 2024



Le principali specie candidate per sistemi aerospaziali sono:

- **Verdure a foglia verde** (lattuga, spinaci, rucola) — ciclo breve, elevata percentuale commestibile; rappresentano l'alimento base per gli esperimenti sui cibi freschi sulla ISS.
- **Cereali** (frumento, varietà nane) — crescita consolidata e grande biomassa, ma presentano problemi di riproduzione ed etilene in microgravità; il frumento ha fornito una quantità significativa di O₂ nei test integrati⁶⁵.
- **Colture a radice/tubero** (patate, cicoria) — candidato ad alto contenuto calorico per unità di superficie nella pianificazione dei sistemi ALS.
- **Legumi/soia** — fonte proteica prevista nelle roadmap dei sistemi ALS.
- **Specie dedicate alla produzione di specifici nutrienti** - ad esempio microgreens per la produzione di acido ascorbico e antiossidanti, cicoria per la produzione di prebiotici.
- **Microalghe** (*Arthrospira*, *Chlorella*) — compatte, ad alta produttività proteica e con elevata produzione di O₂ per volume del reattore; considerate come integratori più che come unico alimento base, a causa della palatabilità e delle esigenze di gestione dei nutrienti⁶⁶.

Le sperimentazioni condotte con Veggio e APH hanno già portato alcune colture a CRL 9, come riportato in tabella 2.2.4.

Tabella 2.2.4 Colture validate a CRL 9 (NASA)

Nome scientifico	Cultivar	Famiglia
<i>Lactuca sativa</i> L.	'Outredgeous'	Asteraceae
<i>Lactuca sativa</i> L.	'Waldmann's Green'	Asteraceae
<i>Brassica rapa</i> var. <i>nipposinica</i>	Mizuna	Brassicaceae
<i>Brassica juncea</i> (L.) Czern.	'Wasabi'	Brassicaceae
<i>Brassica carinata</i> A. Braun	'Amara'	Brassicaceae
<i>Brassica napus</i> var. <i>pabularia</i>	'Red Russian'	Brassicaceae
<i>Brassica rapa</i> subsp. <i>chinensis</i>	'Extra Dwarf' Pak Choi	Brassicaceae
<i>Raphanus sativus</i> L.	'Cherry Belle'	Brassicaceae
<i>Capsicum annuum</i> L.	'Española Improved'	Solanaceae

Per missioni più lunghe e fasi di insediamento stabile, l'attenzione si sposta verso "staple crops" (grano, patata, patata dolce, soia), in grado di fornire macronutrienti e quota significativa di energia alimentare. Tuttavia, queste colture richiedono processi di trasformazione post-raccolta più complessi (trebbiatura,

⁶⁵ Häder et al., 2018

⁶⁶ Revellame et al., 2023



macinazione, estrazione dell'olio), che hanno impatti rilevanti sulla progettazione di habitat e logistica di bordo.

In questo quadro, le tecniche di miglioramento genetico operano quindi su un set di colture che ha già superato un filtro di idoneità tecnico-operativa definito dai criteri e dal framework CRL.

2.2.2 Implementazione dell'ideotipo tramite miglioramento genetico e TEA

Il miglioramento genetico tradizionale, basato su selezione fenotipica, ibridazione e mutagenesi casuale ha fornito strumenti fondamentali per l'ottimizzazione delle colture terrestri, ma potrebbe risultare meno efficace per lo sviluppo di piante adatte a condizioni non terrestri. Gli avanzamenti nella genomica funzionale e nella fenotipizzazione ad alta precisione consentono oggi un approccio più razionale alla selezione delle cultivar adatte allo Spazio. Tuttavia, è con l'introduzione delle Tecniche di Evoluzione Assistita (TEA, in Europa note anche come New Genomic Techniques, NGT) — comprendenti mutagenesi mirata o editing genomico mediante CRISPR/Cas e cisgenesi — che diventa possibile intervenire su tratti specifici con accuratezza, rapidità e prevedibilità, accelerando in modo significativo la generazione di linee vegetali con caratteristiche desiderate⁶⁷. Queste ultime, rendendo possibile favorire tolleranza a stress spaziali e caratteristiche agronomiche ottimali, saranno utili anche per lo Spazio⁶⁸. Settori di prolifica attività di ricerca in questo ambito sono elencati di seguito:

- controllo dell'architettura della pianta attraverso la modulazione di geni che regolano meristemi, internodi e portamento, riducendo l'ingombro volumetrico⁶⁹;
- ottimizzazione dell'apparato radicale per sistemi idroponici, aeroponici o substrati artificiali (es. accrescimento della radice in assenza di gravità ma in presenza di stimoli luminosi, oppure idrotropismo⁷⁰;
- incremento dell'efficienza d'uso di acqua e nutrienti tramite regolazione di aquaporine, trasportatori ionici e apertura stomatica⁷¹;
- riallocazione della partizione source–sink per aumentare la frazione di biomassa alimentare rispetto alla biomassa totale⁷²;
- accorciamento dei cicli colturali mediante la manipolazione dei regolatori della fioritura⁷³;
- strategie di bioconfinamento genetico per limitare la dispersione di polline e semi in microgravità (es. sterilità indotta, controllo tessuto-specifico dell'espressione riproduttiva, riproduzione vegetativa)⁷⁴;
- potenziamento delle vie antiossidanti e dei meccanismi di riparazione del DNA per aumentare la tolleranza alle radiazioni cosmiche⁷⁵;
- biofortificazione e ingegneria metabolica per migliorare il contenuto di vitamine, micronutrienti e composti funzionali e ridurre quello di composti indesiderati⁷⁶.

⁶⁷ Gilbertson et al., 2025

⁶⁸ Fountain et al., 2026

⁶⁹ Mohanta et al., 2021

⁷⁰ Nie et al. 2025

⁷¹ Mohanta et al., 2021

⁷² Burgess et al., 2024

⁷³ Mohanta et al., 2021

⁷⁴ Burgess et al., 2024

⁷⁵ Mohanta et al., 2021; Pagliarello et al., 2023 a,b

⁷⁶ Burgess et al., 2024; Massa et al., 2022; Mohanta et al., 2021; Pagliarello et al., 2023 a,b



Questi interventi risultano fortemente specie- e sistema-specifici e devono essere sviluppati in stretta integrazione con il sistema di coltivazione previsto.

2.2.3 Co-sviluppo pianta–ambiente negli habitat spaziali artificiali

Negli habitat spaziali, genetica vegetale e sistema di coltivazione costituiscono un unico sistema in co-sviluppo⁷⁷(vedi Fig. 2.2.2). La scelta del substrato (idroponica, aeroponica, idrogel, regolite), del regime di illuminazione LED e della composizione atmosferica influisce direttamente sui tratti da selezionare. Per esempio, studi preliminari indicano che la coltivazione su regolite lunare o marziana induce stress nutrizionali e richiede trattamenti chimici, fertilizzanti e consorzi microbici dedicati. Analogamente, l'illuminazione LED può essere modulata per massimizzare non solo la biomassa, ma anche la produzione di metaboliti secondari di interesse nutraceutico. Anche la concentrazione di CO₂ rappresenta una variabile critica da integrare nei programmi di miglioramento genetico⁷⁸. La capacità delle piante di rispondere in modo funzionale alle variazioni delle condizioni ambientali rappresenta un requisito fondamentale per la loro integrazione nei sistemi biorigenerativi ad alto controllo ambientale⁷⁹.

2.2.4 Prospettive future della ricerca nel settore del miglioramento genetico per agricoltura nello Spazio

Come descritto sopra, le tecniche per implementare modifiche genetiche mirate sono essenzialmente già disponibili grazie ai recenti sviluppi nel campo della selezione assistita dalla genomica, dell'ingegneria genetica e dell'editing genomico (ie. TEA). I limiti all'efficacia di questi approcci risiedono principalmente oggi nella conoscenza dei meccanismi cellulari di base e di fisiologia e sviluppo della pianta, ovvero dei geni da modificare. L'applicazione delle più recenti tecniche genomiche, tra cui la trascrittomica a singola cellula e la trascrittomica (ovvero studio dell'espressione genica) in 3D, all'interno di tessuti e organi), consentiranno una migliore descrizione delle risposte molecolari e cellulari alla microgravità ed agli altri stress da viaggi spaziali, per esempio riguardo al funzionamento dei meristemi. I progressi in biologia sintetica consentiranno di comprendere quali siano i meccanismi fisiologici e di sviluppo della pianta da modificare per ottenere le cultivar più aderenti all'ideotipo spaziale, ovvero cultivar compatte, a rapida crescita, capaci di uso efficiente delle risorse idriche, di luce e fertilizzanti, e con caratteristiche nutrizionali ottimizzate per l'integrazione della dieta nei viaggi spaziali.

2.2.5 Ricadute a Terra

Le stesse strategie genetiche e di selezione sviluppate per lo spazio trovano applicazione diretta nei sistemi terrestri, migliorando efficienza d'uso delle risorse, stabilità produttiva e qualità nutrizionale, con minori input e migliore adattamento ai cambiamenti climatici. Le conoscenze derivate dal co-sviluppo pianta–ambiente sono direttamente trasferibili ai sistemi di Controlled Environment Agriculture (CEA) terrestri, migliorando l'efficienza energetica e la qualità dei prodotti.

Le innovazioni sviluppate per l'agricoltura spaziale costituiscono un banco di prova estremo per l'ottimizzazione genetica e sistemica delle colture e generano ricadute tecnologiche immediatamente trasferibili ai sistemi agricoli terrestri ad alta intensità di conoscenza. L'ideotipo spaziale coincide con i

⁷⁷ SharathKumar et al. 2020; Mortimer and Gilliam. 2022.

⁷⁸ Hasenstein and Miklave 2024; Paul, Elardo, and Ferl 2022; Avercheva et al. 2016

⁷⁹ Boscheri, G., et al., 2025



requisiti emergenti dell'agricoltura in condizioni di cambiamento climatico e crescente pressione sulle risorse.

Le strategie di miglioramento genetico e TEA finalizzate alla modulazione di geni regolatori di meristemi, portamento, fioritura e partizione source–sink consentono di sviluppare cultivar ottimizzate per sistemi basati sulla Controlled Environment Agriculture (CEA), vertical farming e serre a elevata automazione, dove la massimizzazione della produttività per unità di volume e per unità di energia consumata, rappresenta un parametro critico. L'ingegnerizzazione di apparati radicali adattati a idroponica e aeroponica, inclusa la regolazione di idrotropismo, plasticità radicale e trasportatori ionici, può trovare applicazione diretta nei sistemi fuori suolo terrestri, migliorando stabilità produttiva e precisione fertirrigua.

L'incremento dell'efficienza fotosintetica in condizioni di elevata CO₂ e illuminazione LED modulata (ottimizzazione di spettri rosso/blu/far-red e dinamica del fotoperiodo) permette di ridurre l'intensità energetica dei sistemi indoor, migliorando il rapporto output calorico/proteico per kWh consumato. Analogamente, la selezione per tolleranza a stress multipli (es. idrico, termico, ossidativo ed altri) e per potenziamento delle vie antiossidanti e dei meccanismi di riparazione del DNA, rafforza la resilienza delle colture in scenari terrestri caratterizzati da ondate di calore, siccità intermittenti e aumento della radiazione UV.

Le ricerche su biofortificazione e ingegneria metabolica, volte ad aumentare micronutrienti, vitamine e composti funzionali, riducendo metaboliti indesiderati, sono direttamente applicabili alla produzione di alimenti ad alto valore nutrizionale.

Infine, l'approccio sistemico di co-sviluppo pianta-ambiente (che integra genetica, sensoristica avanzata, fenotipizzazione ad alta precisione e controllo dinamico dei parametri colturali), rappresenta un modello avanzato di agricoltura data-driven. Tale paradigma è coerente con le traiettorie dell'agricoltura di precisione e dell'economia circolare, favorendo la chiusura dei cicli di acqua e nutrienti, la riduzione degli input chimici e l'aumento della resilienza complessiva dei sistemi produttivi terrestri (Figura 2.2.2).





Figura 2.2.2. Prospettive future del miglioramento genetico per l'agricoltura spaziale (box a sinistra) e ricadute sui sistemi agricoli terrestri (box a destra). L'integrazione di genomica avanzata, editing genomico (TEA), biologia sintetica e fenotipizzazione di precisione consentirà lo sviluppo di ideotipi vegetali ottimizzati per i Sistemi Biorigenerativi di Supporto alla Vita, e caratterizzati da elevata efficienza nell'uso delle risorse, resilienza agli stress e qualità nutrizionale migliorata. Le stesse innovazioni sono trasferibili all'agricoltura terrestre, contribuendo all'evoluzione di sistemi produttivi sostenibili, data-driven e ad alta efficienza (immagine generata mediante IA).

Bibliografia

Avercheva, O.V., Berkovich, Y.A., Konovalova, I.O., Radchenko, S.G., Lapach, S.N., Bassarskaya, E.M., Kochetova, G.V., Zhigalova, T.V., Yakovleva, O.S., Tarakanov, I.G., 2016. Optimizing LED lighting for space plant growth unit: joint effects of photon flux density, red-to-white ratios and intermittent light pulses. *Life Sciences in Space Research*, **11**, pp. 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2016.08.001>.

Boscheri, G., Fili, T., Pannico, A., Amitrano, C., De Micco, V., De Pascale, S., Battistelli, A., Moscatello, S., Proietti, S., Mattioni, M., Magrassi, F., Notari, M., Pepe, R., Parca, L., 2025. BIOLUNA Project Status – Plant Biology and Artificial Intelligence for Bio-Regenerative Life Support on the Moon. *Proceedings of the 54th International Conference on Environmental Systems (ICES 2025)*, ICES-2025-53.

Burgess, A.J., Escribà-Gelonch, M., Pranggono, R., Hessel, V., 2024. Biofortification for space farming: Maximising nutrients using lettuce as a model plant. *Future Foods*, **9**, Article 100317. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100317>.

De Pascale, S., Arena, C., Aronne, G., De Micco, V., Pannico, A., Paradiso, R., Rouphael, Y., 2021. Biology and crop production in space environments: Challenges and opportunities. *Life Sciences in Space Research*, **29**, pp. 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.02.006>.

Donald, C.M., 1968. The breeding of crop ideotypes. *Euphytica*, **17**(3), pp. 385–403. <https://doi.org/10.1007/BF00056241>.



Fountain, L.L., Gilliam, M., Amitrano, C., Arouna, N., Barker, R.J., Böhmer, M., Braun, M., Brereton, N.J.B., Brocato, R.L., Bunchek, J.M., Canaday, E.L.J., Caplin, N., Castaño, P., Decourteix, M., Del Bianco, M., De Micco, V., Doherty, C., Escobar, C., Franke, M.F., Fuentes, S., Gilroy, S., Harrison, L., Hasenstein, K.H., Hauslage, J., Herranz, R., Iyer-Pascuzzi, A., Izuma, D.S., Junya, K., Kiss, J.Z., Legué, V., Lloyd, J.P.B., Massa, G.D., Maffei, M.E., Meyers, A.D., Perera, I.Y., Poulet, L., Roychoudry, S., Sena, G., Shippen, D., Stoochnoff, J., Takahashi, H., Wyatt, S.E., Blancaflor, E.B., 2026. Expanding frontiers: harnessing plant biology for space exploration and planetary sustainability. *New Phytologist*, 249(2), pp. 656–669. <https://doi.org/10.1111/nph.70662>.

Fritsche, R., Haveman, N., Massa, G., Mickens, M., Smith, T., Wheeler, R., Link, B., Spencer, L., 2024. Space Crop Considerations for Human Exploration. NASA Technical Memorandum NASA/TM-20250001897. National Aeronautics and Space Administration (NASA), Kennedy Space Center, FL, USA. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20250001897>.

Gilbertson, L., Puchta, H., Slotkin, R.K., 2025. The future of genome editing in plants. *Nature Plants*, 11(4), pp. 680–685. <https://doi.org/10.1038/s41477-025-01956-4>.

Häder, D.-P., Braun, M., Hemmersbach, R., 2018. Bioregenerative life support systems in space research. In: Hemmersbach, R., Braun, M. (Eds.), *Gravity and Life in Space*. Springer, Cham, pp. 113–122. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93894-3_8.

Hasenstein, K.H., Miklave, N.M., 2024. Hydroponics for plant cultivation in space – a white paper. *Life Sciences in Space Research*, 43, pp. 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2024.06.004>.

Liu, Y., Xie, G., Yang, Q., Ren, M., 2021. Biotechnological development of plants for space agriculture. *Nature Communications*, 12(1), Article 5998. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26238-3>.

Massa, S., Pagliarello, R., Cemmi, A., Di Sarcina, I., Bombarely, A., Demurtas, O.C., Diretto, G., Paolini, F., Petzold, H.E., Blik, M., Bennici, E., Del Fiore, A., De Rossi, P., Spelt, C., Koes, R., Quattrocchio, F., Benvenuto, E., 2022. Modifying anthocyanins biosynthesis in tomato hairy roots: a test bed for plant resistance to ionizing radiation and antioxidant properties in space. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 830931. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.830931>.

Mohanta, T.K., Mishra, A.K., Mohanta, Y.K., Al-Harrasi, A., 2021. Space breeding: the next-generation crops. *Frontiers in Plant Science*, 12, Article 771985. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.771985>.

Mortimer, J.C., Gilliam, M., 2022. SpaceHort: redesigning plants to support space exploration and on-earth sustainability. *Current Opinion in Biotechnology*, 73, pp. 246–252. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2021.08.018>.

Nhut, D.T., Tung, H.T., Yeung, E.C. (eds.), 2022. *Plant Tissue Culture: New Techniques and Application in Horticultural Species of Tropical Region*. Springer, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-6498-4>

Nie, H., Zhou, W., Zheng, Z., Deng, Y., Zhang, W., Zhang, M., Jiang, Z., et al., 2025. Exploring plant responses to altered gravity for advancing space agriculture. *Plant Communications*, 6(6), Article 101370. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2025.101370>.

Pagliarello, R., Bennici, E., Cemmi, A., Di Sarcina, I., Spelt, C., Nardi, L., Del Fiore, A., De Rossi, P., Paolini, F., Koes, R., Quattrocchio, F., Benvenuto, E., Massa, S., 2023. Designing a novel tomato ideotype for future cultivation in space manned missions. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9, 1040633. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.1040633>

Pagliarello, R., Bennici, E., Di Sarcina, I., Villani, M.E., Desiderio, A., Nardi, L., Benvenuto, E., Cemmi, A., Massa, S., 2023. Effects of gamma radiation on engineered tomato biofortified for space agriculture by morphometry and fluorescence-based indices. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1266199. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1266199>



Paul, A.-L., Elardo, S.M., Ferl, R.J., 2022. Plants grown in Apollo lunar regolith present stress-associated transcriptomes that inform prospects for lunar exploration. *Communications Biology*, 5(1), Article 382. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03334-8>.

Revellame, E.D., Schubert, J., Bumbac, C., Wang, D., Holmes, W., Bassi, A., 2023. Microalgae in Bioregenerative Life Support Systems for Space Applications. *Algal Research*, 78, 103332. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103332>.

SharathKumar, M., Heuvelink, E., Marcelis, L.F.M., 2020. Vertical farming: moving from genetic to environmental modification. *Trends in Plant Science*, 25(8), pp. 724–727. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.05.012>.



Capitolo 3 - Space Nutrition

Paragrafo 3.1 - Space Nutrition

(Stefania Ruggeri - CREA, Enzo Perri - CREA, Francesca Masino - Università di Modena e Reggio Emilia, Luigi Galimberti – ToSeed Partners, Giorgia Tomarchio - Hortomio)

3.1.1 Le condizioni nello Spazio e la salute degli astronauti

Le condizioni associate alla permanenza nello Spazio, tra cui la gravità ridotta, l'esposizione alle radiazioni, l'isolamento/confinamento e lo stress, determinano molte alterazioni biochimiche e fisiologiche con danni multisistemici sulla salute degli astronauti.

L'integrazione dei dati, ottenuti dai voli spaziali reali con modelli di microgravità simulata, ha dimostrato che la microgravità altera in modo sistemico la funzione digestiva attraverso ridistribuzione dei fluidi, stress fisiologico e cambiamenti emodinamici, con conseguenze nella riduzione dell'assorbimento di micronutrienti e alterazioni del microbiota intestinale. Sono state osservate alterazioni del metabolismo di macronutrienti (metabolismo glucidico e proteico) e micronutrienti come calcio, magnesio, fosforo, zinco, squilibri ormonali, anche con insorgenza dell'insulino-resistenza, aumento dello stress ossidativo con relativo aumento delle Specie Reattive dell'Ossigeno (ROS) e modifiche dell'attività mitocondriale. A queste si associano ulteriori effetti sistemici come il decondizionamento cardiovascolare, i disturbi neuro-oculari e la riduzione dell'attività del sistema immunitario⁸⁰, con alterazioni dell'immunità innata e adattativa. In quest'ambito, un effetto clinicamente rilevante è la riattivazione di virus latenti, indicativa di una ridotta immunosorveglianza e di disfunzioni immunitarie anche persistenti, osservabili anche dopo il rientro sulla Terra (Jacob et al., 2023). Dal punto di vista neurobiologico, il volo spaziale è associato a modificazioni strutturali e funzionali del cervello, documentate da studi di neuroimaging, tra cui lo spostamento del tessuto cerebrale, riduzione del volume di specifiche aree corticali e sottocorticali (in particolare talamo e regioni frontali), e alterazioni di alcune connettività funzionali, caratteristiche associate anche all'insorgenza di stati depressivi sulla Terra⁸¹. Oltre alle alterazioni della fisiologia, contribuiscono all'insorgenza della depressione anche la perturbazione dei ritmi circadiani, l'isolamento e il confinamento⁸².

3.1.2 Il ruolo centrale del microbiota intestinale

Le ricerche degli ultimi anni hanno confermato il ruolo del microbiota intestinale nell'insorgenza dell'inflammaging (stati infiammatori latenti), associati ad un aumento del rischio di patologie cronico-degenerative, a danni al sistema immunitario e depressione. In questo contesto, l'intestino viene descritto come il "motore della disfunzione multiorgano". Studi condotti in microgravità simulata sull'uomo e su modelli animali, hanno dimostrato alterazioni diffuse delle funzioni degli organi gastrointestinali e, in particolare, l'insorgenza di una marcata disbiosi, caratterizzata dalla riduzione delle specie eubiotiche e della popolazione batterica totale con perdita di biodiversità microbica, accompagnate da un aumento della virulenza batterica. Questi fenomeni determinano un'alterazione dell'integrità delle tight junctions intestinali e conseguente aumento della permeabilità intestinale (leaky gut cioè intestino permeabile)⁸³. La disbiosi indotta da microgravità è causa di un aumento infiammazione, e disfunzione immunitaria sistemica. Tuttavia, una dieta adeguata può modulare la composizione del microbiota intestinale, favorendo il ripristino dell'eubiosi.

⁸⁰ Dakkumadugula et al., 2023; Chalaoulaku et al., 2022

⁸¹ Zwart et al., 2021

⁸² Dakkumadugula et al., 2023

⁸³ Yang et al., 2020



3.1.3 Alterazione del gusto

Ultimo, ma non meno importante effetto fisiologico, è l'alterazione della percezione sensoriale degli alimenti in condizioni di gravità alterata che causa conseguenze sul benessere psicologico e nutrizionale degli astronauti. Dall'analisi di sedici studi condotti durante missioni spaziali reali emerge un quadro coerente di attenuazione della percezione gustativa, con alimenti spesso descritti dal gusto "blando" o poco appetibili. Parallelamente, è stata osservata una maggiore preferenza per sapori intensi, in particolare speziati, pungenti e umami, e un aumento dell'uso di condimenti come senape, rafano e salse piccanti. Le alterazioni sensoriali sono attribuite soprattutto agli spostamenti dei fluidi corporei in microgravità, che causano congestione nasale e riduzione dell'olfatto retronasale, più che a una vera perdita della funzione gustativa⁸⁴.

3.1.4 Prevenire, contrastare e curare e migliorare la qualità della vita nello spazio

Al di là dell'interesse mediatico, l'alimentazione degli astronauti e la sicurezza nutrizionale e sensoriale dei cibi che consumano, rappresentano oggi un ambito di ricerca di primaria importanza. L'alimentazione non risponde solo a esigenze di sopravvivenza, ma incorpora dimensioni come il piacere, la convivialità e la protezione della salute, rappresentando una contromisura per contrastare le alterazioni fisiologiche e i danni all'organismo causati da microgravità, radiazioni, isolamento/confinamento e lo stress durante le missioni spaziali.

Le diete degli astronauti sono migliorate nel tempo sia in termini di apporto nutrizionale sia di qualità degli alimenti. Negli ultimi anni è stato, ad esempio, incrementato l'apporto calorico per contrastare la perdita di peso involontaria durante le missioni e le diete progettate con un maggior apporto di alcuni micronutrienti per contrastare gli squilibri nell'assorbimento e nel metabolismo⁸⁵. Per rendere l'esperienza del pasto più piacevole sono stati inseriti nei "menu spaziali", piatti gourmet come bonus alimentare per ridurre "la menu fatigue" e far sentire gli astronauti "a casa". Alcuni studi riportano diete costituite per il 55% da carboidrati, per il 30% da grassi e per il 15% da proteine, organizzate in menu ciclici settimanali di 4–6 giorni⁸⁶. Inoltre, evidenze sperimentali indicano che un regime nutrizionale ad alto contenuto proteico può migliorare le prestazioni, in particolare in combinazione con l'esercizio, suggerendone un potenziale impiego in missioni spaziali di lunga durata⁸⁷.

Le diete degli astronauti sono oggi comunque sempre più personalizzate e studiate per rispondere alle singole esigenze; tuttavia è necessario, soprattutto in vista delle future missioni di esplorazione su Luna e Marte, riuscire a costruire un vero e proprio sistema alimentare in grado non solo di garantire la copertura dei deficit nutrizionali e subclinici, ma anche di agire in prevenzione delle alterazioni fisiologiche e dei danni sulla salute e di contribuire alla mitigazione di specifiche condizioni, come lo squilibrio del microbiota intestinale, deficit del sistema immunitario, la perdita ossea e muscolare, lo stress ossidativo.

Tra i nutrienti chiave rientrano vitamine (es. A, D, C, E, K), minerali (es. Ca, Fe, Zn, Cu), acidi grassi Omega 3, composti bioattivi (es. polifenoli, antocianine), prebiotici e probiotici di nuova generazione⁸⁸. Insieme alla progettazione di menu ad alto valore salutistico e ad alta palatabilità, un'altra delle sfide della "Space Nutrition" sarà progettare nuovi alimenti funzionali e nutraceutici, con contenuto nutrizionale potenziato, elevate caratteristiche sensoriali, pochi additivi al fine di preservare il microbiota intestinale e ricchi di composti bioattivi ad attività salutistica. In questo scenario, la progettazione di sistemi di space farming per produrre alimenti freschi coltivati *in situ*, pensati per sostenere la salute degli astronauti sarà fondamentale per migliorare il benessere psicologico degli astronauti.⁸⁹

Il cibo spaziale non dovrà quindi garantire solo un adeguato apporto nutrizionale, ma dovrà configurarsi come un sistema funzionale personalizzato per sostenere la salute fisiologica, prevenire stati fisiologici alterati e mantenere la salute psicologica degli astronauti. In questa prospettiva, lo space food rappresenta una parte

⁸⁴ Prabodha et al., 2025

⁸⁵ Chaloulakou et al. 2022

⁸⁶ Tang et al., 2021; Baba et al., 2020

⁸⁷ Vanhooover et al., 2021

⁸⁸ Chalaoulaku et al., 2022; Bharindawi et al. 2023

⁸⁹ Battistelli, et al., 2025



fondamentale del life support system, dove la qualità delle materie prime, la sicurezza nutrizionale, la varietà, la palatabilità, il peso, il volume e la shelf-life, dovranno essere considerati sin dalle fasi di design (progettazione) dell'intero sistema. Parallelamente, la possibilità di coltivare e prendersi cura di piante vive assume un ruolo rilevante anche dal punto di vista: il contatto con organismi viventi e la responsabilità legata alla loro crescita favoriscono infatti il senso di connessione, la riduzione dello stress e l'incremento del benessere emotivo, aspetti fondamentali in un ambiente isolato e confinato come quello spaziale.

La ricerca nel campo della nutraceutica mirata alle alterazioni causate dalla microgravità, radiazioni e stress nelle missioni spaziali sarà quindi fondamentale. I primi risultati di studi sperimentali su modelli murini in hindlimb suspension model⁹⁰ hanno dimostrato l'efficacia del trattamento con ginsenosidi del ginseng nella riduzione dei danni istologici delle cellule intestinali, nel rimodellamento del microbiota con aumento dei batteri benefici e nel miglioramento dell'integrità della barriera intestinale. Qualora tali risultati vengano confermati, questi composti potranno essere utilizzati per la formulazione di nuovi alimenti funzionali per lo Spazio.

Parallelamente, lo sviluppo di probiotici e prebiotici di nuova generazione adatti alle condizioni peculiari del microbiota in ambiente spaziale, sarà fondamentale per contrastare le alterazioni significative dell'eubiosi intestinale, mantenere in equilibrio l'asse intestino-cervello, migliorare l'attività del sistema immunitario, proteggere dalla depressione e ridurre lo stato di infiammazione latente. Risultati promettenti emergono dallo studio di Bharindawi et al. (2023), che ha evidenziato le potenzialità delle spore di *Bacillus subtilis*, caratterizzate da elevata stabilità durante l'esposizione a radiazioni, lunghi periodi di conservazione e transito gastrointestinale simulato, rendendole un probiotico candidato per le missioni di lunga durata.

Un ulteriore punto centrale riguarda lo sviluppo di nuove tecnologie di conservazione degli alimenti, dove l'innovazione del processo potrà contribuire a ridurre l'uso di additivi e al miglioramento della texture dei cibi e della loro shelf-life e sarà necessario rafforzare la ricerca nell'ambito delle scienze sensoriali, spesso trascurate nella progettazione dei cibi per lo spazio. A tal fine, alcuni autori propongono test sensoriali standardizzati, portabili e compatibili con l'ambiente spaziale, insieme a strategie di food design adattivo (ad esempio, modulazione del rilascio retronasale degli aromi e stimolazione trigeminali controllata) con l'obiettivo di mantenere il piacere del cibo e il benessere complessivo nelle missioni di lunga durata⁹¹.

Nel complesso, emerge la necessità di sviluppare un nuovo paradigma per l'alimentazione nello Spazio: un sistema nutrizionale non più limitato alla prevenzione delle carenze, ma concepito come strumento attivo di protezione della salute fisica e mentale, di supporto alle performance cognitive e di mantenimento della qualità della vita.

⁹⁰ (Wang et al., 2025

⁹¹ Prabodha et al., 2025





Figura 3.1.1. Effetti delle condizioni spaziali sulla salute degli astronauti e ruolo della nutrizione come contromisura integrata. Microgravità, radiazioni, isolamento e stress inducono alterazioni fisiologiche, metaboliche, immunitarie e neurocognitive, associate a disbiosi intestinale e riduzione del benessere generale. Strategie di *Space Nutrition* basate su alimenti funzionali, nutraceutici, prebiotici, probiotici e produzioni fresche in situ possono contribuire al mantenimento dell'eubiosi intestinale, della funzione immunitaria e della qualità della vita durante missioni spaziali di lunga durata (immagine generata mediante AI).

3.1.5 Recupero e valorizzazione degli scarti agroalimentari

Negli ultimi anni numerosi studi hanno mostrato che gli scarti dell'industria agroalimentare possono diventare una risorsa preziosa. Invece di essere eliminati, queste risorse possono essere trasformate in ingredienti funzionali, molecole bioattive e nuovi materiali, utilizzando approcci di bioraffineria e tecnologie di estrazione green. Questo tipo di processi si inserisce nel quadro della bioeconomia circolare e offre spunti concreti per progettare sistemi alimentari chiusi, pensati anche per l'esplorazione e la permanenza nello spazio⁹².

In questo contesto, bioconversioni che impiegano funghi, microalghe e insetti per trasformare scarti alimentari e sottoprodotti in nuova biomassa combustibile rappresentano modelli di waste-to-food particolarmente interessanti per missioni di lunga durata, grazie all'elevata efficienza di conversione, alla densità nutrizionale e alla compattezza degli impianti⁹³.

Gli scarti organici generati a bordo, inclusi quelli alimentari e frazioni non edibili delle colture, possono essere integrati in catene di trattamento biologico e fisico-chimico per il recupero di azoto, carbonio e minerali, chiudendo i cicli di materia e supportando la produzione rigenerativa di cibo, acqua e ossigeno⁹⁴. Studi recenti mostrano che microalghe e altri microrganismi possono agire come vere e proprie "bio-fabbriche" per lo Space Food e la Space Nutrition.

⁹² Yadav et al., 2024; Pal et al., 2024; Montevecchi et al., 2021; Hadj Saadoun et al., 2020; Cifuni et al., 2023

⁹³ Girotto e Piazza, 2022; Mannaa et al., 2024

⁹⁴ Verbeelen et al., 2021; Rai et al., 2022; Lasseur et al., 2010

Le possibilità di reimpiego degli scarti agricoli nello Spazio possono oggi poggiare su basi scientifiche solide: gli studi della NASA condotti nella Biomass Production Chamber hanno dimostrato che circa 20–25 m² di colture sono sufficienti a produrre l'ossigeno necessario per un individuo, mentre 50 m² coprono il fabbisogno calorico giornaliero di una persona in sistemi a ciclo chiuso. Questi dati forniscono un quadro concreto per progettare impianti di valorizzazione degli scarti direttamente integrati nei moduli di coltivazione. A partire dai residui vegetali non edibili e dai substrati esausti, un sistema di gestione e trattamento degli scarti di produzione potrebbe combinare processi già sperimentati con nuove soluzioni adattate alla microgravità. Parallelamente, il recupero dei nutrienti può oggi basarsi su ricerche consolidate. A queste tecnologie si possono affiancare nuove idee:

- micro-reattori fotobiologici popolati da alghe ingegnerizzate che consumano CO₂ e producono biomassa ricca di nutrienti, integrabile nei substrati di crescita;
- stampaggio 3D dei residui lignocellulosici per produrre pannelli, vaschette o componenti strutturali leggeri, riducendo il fabbisogno di materiali importati dalla Terra;
- reattori termochimici a bassa temperatura per trasformare gli scarti in biochar sterilizzato, utile come additivo strutturale nei substrati idroponici, aumentando la ritenzione idrica e la capacità di scambio cationico;
- cicli di nitrificazione/denitrificazione in micro-ecosistemi chiusi, ispirati al programma MELiSSA dell'ESA, per convertire l'azoto organico in forme direttamente assimilabili dalle piante senza accumulo di sostanze tossiche.

L'integrazione di queste tecnologie permetterebbe non solo di stabilizzare gli scarti, ma di trasformarli in flussi utili. Inoltre, gli scarti della produzione, così come le deiezioni, potrebbero essere valorizzati come risorse per rigenerare e coltivare il terreno arido delle serre lunari, contribuendo alla creazione di un ciclo chiuso che renda possibile la progressiva fertilizzazione dei suoli extraterrestri. In prospettiva, tali sistemi modulabili potrebbero costituire il cuore dei futuri ecosistemi agricoli lunari e marziani, operando come veri e propri cicli bio-rigenerativi multifunzione.

Utilizzando reflui e rifiuti organici come fonte di nutrienti, questi organismi sono in grado di produrre biomassa alimentare, generare ossigeno e, in prospettiva, anche biopolimeri⁹⁵.

Katayama et al., (2008) esplora insetti come soluzione per space farming, soprattutto per la loro capacità di convertire rifiuti organici in biomassa ad alto contenuto proteico in spazi ridotti. Parallelamente, lo sviluppo di consorzi batterici selezionati per la degradazione del cosiddetto "space organic waste" e la proposta di includere insetti come ulteriori convertitori di rifiuti organici in proteine ad alta qualità, completano il quadro di un sistema alimentare spaziale realmente circolare, in cui gli scarti agroalimentari non sono più un problema di smaltimento, ma un elemento strutturale del design dei BLSS⁹⁶.

3.1.6. Il caso studio EVOOS - Extra-Virgin Olive Oil in Space project

L'olio extra vergine di alta qualità Made in Italy è un alimento funzionale e nutraceutico ideale per le diete degli astronauti per le future e più lunghe missioni nello Spazio. Tra il 2023 e il 2024, è stato realizzato un esperimento innovativo e originale, frutto dell'Accordo Quadro stipulato tra CREA ed ASI e della collaborazione con ESA, Coldiretti, Unaprol, Telespazio e la società Eat Freedom, che ha permesso all'Italia di essere la prima nazione a studiare la shelf-life degli oli d'oliva extravergine di oliva nella Stazione Sperimentale Internazionale (ISS).

⁹⁵ Mussagy et al., 2024

⁹⁶ Chiarini et al., 2025



Gli equipaggi delle future missioni spaziali di lunga durata dovranno assumere alimenti ricchi di antiossidanti e composti antinfiammatori per contrastare gli effetti negativi dell'ambiente spaziale. Contemporaneamente, è necessario studiare la stabilità di tali composti e degli alimenti, che è influenzata anche dalle condizioni spaziali, oltre che dalle condizioni di conservazione.

Le proprietà benefiche dei composti, contenuti nell'olio extravergine di oliva, in particolare dei fenoli, sono state evidenziate in diversi studi⁹⁷. Molti studi recenti indicano effetti protettivi dei fenoli dell'olio extravergine di oliva (OEVO) anche contro l'aterosclerosi, il diabete, l'obesità e molte altre malattie croniche. L'Autorità Europea per la Sicurezza Alimentare (EFSA) ha affermato che "i polifenoli dell'olio d'oliva contribuiscono alla protezione dei lipidi nel sangue dallo stress ossidativo". L'obiettivo del progetto EVOOS è stato quello di studiare l'impatto dell'esposizione a condizioni di microgravità e radiazioni a bordo della ISS sull'olio extravergine di oliva per utilizzare, in futuro, l'OEVO come contromisura alimentare per le missioni di lunga durata⁹⁸.

Obiettivi sperimentali

Il progetto ha avuto come obiettivi lo studio della variazione dei principali parametri relativi alle caratteristiche qualitative dell'OEVO, in particolare la composizione degli acidi grassi e dei metaboliti secondari dell'OEVO, come fenoli e tocoferoli (vitamina E) e le variazioni delle caratteristiche organolettiche, dopo l'esposizione alle condizioni spaziali nella permanenza a bordo della ISS, per raccogliere nuove informazioni sulla conservabilità dell'OEVO.

Piano sperimentale

Tre campioni di olio extravergine di oliva italiano di alta qualità, appartenenti al bonus food di Samantha Cristoforetti, sono stati lanciati e stivati a bordo della ISS. I campioni di OEVO sono stati esposti all'ambiente della navicella spaziale e scaricati a intervalli di sei mesi. Al ritorno, sono stati confrontati con campioni di riferimento, mantenuti sulla Terra in condizioni di temperatura simili.

Le analisi dei campioni sono state effettuate:

- all'imbottigliamento (campione t-1);
- al caricamento (campione t0);
- al download 1 (incremento di 6 mesi, t1);
- al download 2 (incremento di 12 mesi, t2);
- al download 3 (incremento di 18 mesi, t3).



Figura 3.1.2. Obiettivi e piano sperimentale del caso studio EVOOS

⁹⁷ Altomare C. et al. 2025; Sabatini et al. 2018; Lupinacci et al., 2017

⁹⁸ Altomare et al., 2025; Sabatini, et al., 2018; Lupinacci, et al., 2017; EFSA Panel on Nutrition, 2025



Sono state determinate le caratteristiche fisiche, chimiche, organolettiche e nutrizionali iniziali dell'olio extravergine di oliva dei campioni selezionati, come stabilito dal Regolamento Delegato (UE) 2022/2104 della Commissione, ad eccezione di biofenoli e α -tocoferoli, determinati rispettivamente con i metodi COI/T.20/Doc. n. 29/Rev.2 e ISO 9936:2016.

Risultati e conclusioni dello studio

1. Il tempo di conservazione dell'olio extravergine di oliva a bordo della Stazione Spaziale Internazionale e sulla Terra è molto simile.
2. In questo primo esperimento, l'olio extravergine di oliva ha mantenuto le sue proprietà e la categoria merceologica di olio extravergine di oliva nell'ambiente spaziale fino a 12 mesi;
3. Nelle condizioni di questo primo esperimento è verosimile ritenere che gli equipaggi delle future missioni spaziali di lunga durata potranno consumare l'olio extravergine di oliva come alimento ricco di antiossidanti e composti antinfiammatori, grazie alla presenza dei biofenoli, degli acidi grassi e dei tocoferoli naturalmente presenti nell'olio di oliva, per almeno un anno.
4. Le sperimentazioni future dovranno indagare la durata di conservazione di oli più ricchi di biofenoli e contenuti in recipienti più protettivi rispetto all'attività ossidante dell'ossigeno.

Bibliografia

Altomare, C., Macrì, R., Serra, M., Ussia, S., Ritorto, G., Maiuolo, J., Muscoli, C., Perri, E. e Mollace, V. (2025). The Potential of Nutraceutical Supplementation in Counteracting Cancer Development and Progression: A Pathophysiological Perspective. *Nutrients*, 17, 2354. <https://doi.org/10.3390/nu17142354>.

Baba, S., Smith, T., Hellmann, J., Bhatnagar, A., Carter, K., Vanhoover, A., Caruso, J., 2020. Space flight diet-induced deficiency and response to gravity-free resistive exercise. *Nutrients*, 12, 2400. <https://doi.org/10.3390/nu12082400>.

Battistelli, A., Proietti, S., Paglialunga, G., Mattioni, M., Nazzaro, F., Fratianni, F., Colla, G., Cardarelli, M.T., Del Bianco, M., Moscatello, S., 2025. Establishing baselines for prebiotic production in controlled environments for applications in space and vertical farming. *Heliyon*, 11(2), e42112. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42112>.

Bharindawi, S., Goswami, N., Jha, P., Pandey, S., Jobby, R., 2023. Prospective use of probiotics to maintain astronaut health during spaceflight. *Life*, 13(3), 727. <https://doi.org/10.3390/life13030727>.

Chaloulakou, S., Poulia, K.A., Karayiannis, D., 2022. Physiological alterations in relation to space flight: The role of nutrition. *Nutrients*, 14(22), 4896. <https://doi.org/10.3390/nu14224896>.

Chiarini, L., Filosi, L., Desiderio, A., Villani, M.E., Proietti, S., Moscatello, S., Battistelli, A., Boscheri, G., Marchitelli, G., Tabacchioni, S. (2025). Selection and characterization of bacterial consortia for the degradation of space organic waste. *Life Sciences in Space Research*, 46, 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2025.05.007>.

Cifuni, G.F., Claps, S., Morone, G., Sepe, L., Caparra, P., Benincasa, C., Pellegrino, M. & Perri, E., 2023. Valorization of olive mill byproducts: recovery of biophenol compounds and application in animal feed. *Plants*, 12, 3062. <https://doi.org/10.3390/plants12173062>.

Dakkumadugula, A., Pankaja, L., Alqahtani, A.S., Ullah, R., Ercisli, S., Murugan, R., 2023. Space nutrition and the biochemical changes caused in astronauts' health due to space flight: A review. *Food Chemistry: X*, 20, 100875. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100875>.

EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA). (2025). Olive oil polyphenols and the maintenance of normal HDL-cholesterol concentrations: Evaluation of a health claim pursuant to Article 13(5) of Regulation (EC) No 1924/2006. *EFSA Journal*, 23, e9372. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2025.9372>.



- Giroto, F. & Piazza, L., 2022.** Food waste bioconversion into new food: a mini-review on nutrient circularity in the production of mushrooms, microalgae and insects. *Waste Management & Research*, 40(1), pp. 47–53.
- Hadj Saadoun, J., Montevecchi, G., Zanasi, L., Bortolini, S., Macavei, L., Masino, F., Maistrello, L. & Antonelli, A., 2020.** Lipid profile and growth of black soldier flies (*Hermetia illucens*, Stratiomyidae) reared on by-products from different food chains. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(9), pp. 3648–3657.
- Jacob, P., Oertlin, C., Baselet, B., Westerberg, L.S., Fripiat, J.P., Baatout, S., 2023.** Next generation of astronauts or ESA astronaut 2.0 concept and spotlight on immunity. *npj Microgravity*, 9, 51. <https://doi.org/10.1038/s41526-023-00294-z>.
- Katayama, N., Ishikawa, Y., Takaoki, M., Yamashita, M., Nakayama, S., Kiguchi, K., Kok, R., Wada, H. & Mitsuhashi, J., 2008.** Entomophagy: a key to space agriculture. *Advances in Space Research*, 41(5).
- Lasseur, C., Brunet, J., de Weever, H., Dixon, M., Dussap, G., Godia, F., Leys, N., Mergeay, M. & Van Der Straeten, D., 2010.** MELISSA: the European project of a closed life support system. *Gravitational and Space Biology*, 23(2).
- Lupinacci, S., Totada, G., Vizza, D., Perri, A., Benincasa, C., Mollica, A., La Russa, A., Gigliotti, P., Leone, F., Lofaro, D., Bonofiglio, M., Perri, E. e Bonofiglio, R. (2017).** Active compounds extracted from extra virgin olive oil counteract mesothelial-to-mesenchymal transition of peritoneal mesothelium cells exposed to conventional peritoneal dialysate: in vitro and in vivo evidences. *Journal of Nephrology*, 30(6), 841–850. <https://doi.org/10.1007/s40620-016-0368-4>.
- Mannaa, M., Mansour, A., Park, I., Lee, D.-W. & Seo, Y.-S., 2024.** Insect-based agri-food waste valorization: agricultural applications and roles of insect gut microbiota. *Environmental Science and Ecotechnology*, 17, 100287.
- Montevecchi, G., Macavei, L., Masino, F., D'Arco, S., Cancelli, U., Gammaitoni, M., Marchesini, T., Maistrello, L. & Antonelli, A., 2021.** Black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae processing as a strategy for solid waste reduction. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Sustainable Solid Waste Management*, Thessaloniki, Greece, 23–26 June 2021.
- Mussagy, C.U., Pereira, J.F.B. & Pessoa, A., 2024.** Microbial products for space nutrition. *Trends in Biotechnology*, 42(7), pp. 810–814.
- Pal, P., Singh, A.K., Srivastava, R.K., Rathore, S.S., Sahoo, U.K., Subudhi, S., Sarangi, P.K. & Prus, P. (2024).** Circular Bioeconomy in Action: Transforming Food Wastes into Renewable Food Resources. *Foods*, 13(18), 3007. <https://doi.org/10.3390/foods13183007>.
- Pathare, N.N., Fayet-Moore, F., Fogarty, J.A., Jacka, F.N., Strandwitz, P., Strangman, G.E., Donoviel, D.B., 2023.** Nourishing the brain on deep space missions: Nutritional considerations. *Frontiers in Neural Circuits*, 17, 1170395. <https://doi.org/10.3389/fncir.2023.1170395>.
- Prabodha, T., Danner, L., Iles, G.N., Heer, M., Mack, I., Brennan, C., Low, J., 2025.** Initiating sensory science research in space conditions—Current practices and future perspectives. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24, e70241. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70241>.
- Rai, I., Ahirwar, A., Rai, A., Varjani, S. & Vinayak, V., 2022.** Biowaste recycling strategies for regenerative life support system: an overview. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102525.
- Sabatini, N., Perri, E. e Rongai, D. (2018).** Olive Oil Antioxidants and Aging. In *Food Quality: Balancing Health and Disease (Handbook of Food Bioengineering, Chapter 4*, pp. 145–157). Academic Press.
- Tang, H., Rising, H.H., Majji, M., Brown, R.D., 2022.** Long-term space nutrition: A scoping review. *Nutrients*, 14(1), 194. <https://doi.org/10.3390/nu14010194>.



- Vanhoover, A., McEnroe, B., Gray, D., O'Brien, I., Kozerski, A., Selimovic, E., Carter, K., Stumbo, J., Caruso, J., 2021.** A high protein diet improves exercise performance outcomes to workouts completed on gravity-independent hardware. *Journal of Exercise and Nutrition*, **4**(2), Article 2.
- Verbeelen, T., Leys, N., Ganigué, R. & Mastroleo, F., 2021.** Development of nitrogen recycling strategies for bioregenerative life support systems in space. *Frontiers in Microbiology*, **12**, 700810.
- Wang, Y., Chen, T., Shi, Z., Dong, L., Li, M., Peng, B., Li, Q., Pan, R., Xiao, S., Yang, Q., Jiang, N., Liu, X., Hu, Q., Chen, Y., 2025.** Ginsenoside Reshapes Intestinal Microecology to Alleviate Microgravity Stress. *Drug Design, Development and Therapy*, **19**, pp. 1289–1303. <https://doi.org/10.2147/DDDT.S486371>.
- Yadav, S., Malik, K., Moore, J.M., Kamboj, B.R., Malik, S., Malik, V.K., Arya, S., Singh, K., Mahanta, S. & Bishnoi, D.K., 2024.** Valorisation of agri-food waste for bioactive compounds: recent trends and future sustainable challenges. *Molecules*, **29**(9), 2055.
- Yang, N., Jiang, Z.P., Song, G.L., Chen, Z.Y., Li, B.B., Chai, S.B., Lu, S.Y., Yan, H.F., Sun, P.M., Zhang, T., Sun, H.W., Yang, J.W., Zhou, J.L., Yang, H.M., Ci, Y., 2020.** The effects of microgravity on the digestive system and the new insights it brings to the life sciences. *Life Sciences in Space Research*, **27**, pp. 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2020.08.009>.
- Zwart, S.R., Mulavara, A.P., Williams, T.J., George, K., Smith, S.M., 2021.** The role of nutrition in space exploration: Implications for sensorimotor, cognition, behavior and the cerebral changes due to the exposure to radiation, altered gravity, and isolation/confinement hazards of spaceflight. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, **127**, pp. 307–331. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.04.026>.



Capitolo 3 - Space nutrition

Paragrafo 3.2 – Sicurezza alimentare nello spazio

(Patrizia Fava - Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Francesca Masino - Università di Modena e Reggio Emilia, Filomena Nazzaro - CNR)

3.2.1 Resistenza dei microrganismi nello spazio

Quali sono i limiti della vita in condizioni extraterrestri estreme e come i microrganismi possono sfidare tali condizioni? L'analisi dei microrganismi in ambienti spaziali è una frontiera interdisciplinare che integra microbiologia, astrobiologia, biologia molecolare e tecnologie spaziali. Le condizioni estreme dello Spazio, come microgravità, radiazioni ionizzanti e ultraviolette, vuoto o bassa pressione, ampie escursioni termiche ed elevata concentrazione di CO₂ in ambienti chiusi, richiedono agli organismi adattamenti o strategie di sopravvivenza diversi da quelli osservati sulla Terra.

Numerosi studi hanno dimostrato che alcuni microrganismi presentano una resistenza significativa alle condizioni spaziali. Il programma EXPOSE, gestito dall'European Space Agency a bordo dell'International Space Station, ha sottoposto semi, spore batteriche e comunità microbiche a gravità ridotta, radiazione solare diretta, vuoto spaziale e condizioni simili a quelle della superficie marziana. In questi esperimenti, la sopravvivenza di spore e comunità microbiche, anche dopo esposizioni prolungate, è stata osservata soprattutto quando protette da materiali schermanti o all'interno di biofilm⁹⁹. Uno studio EXPOSE ha rivelato che il 45% delle spore batteriche è sopravvissuto a un'esposizione continua di 18 mesi nello Spazio aperto, confermando ulteriormente la robustezza di questi microrganismi. Un altro aspetto rilevante riguarda la resistenza agli antimicrobici e la comparsa di geni di resistenza in ambienti spaziali. Studi, tra cui quelli del progetto GEARS (Genomic Enumeration of Antibiotic Resistance in Space) finanziato dalla NASA, hanno evidenziato che la comunità microbica nello Spazio può sviluppare varianti genetiche associate alla resistenza e che l'ambiente spaziale può selezionare ceppi con comportamenti diversi da quelli terrestri¹⁰⁰.

Le cause della resistenza o dell'adattamento dei microrganismi in ambiente spaziale sono molteplici:

- Microgravità che altera la crescita, l'adesione e la formazione di biofilm batterici¹⁰¹.
- Radiazioni dirette e indirette che causano danni al DNA e alle membrane, richiedendo risposte di riparazione e la presenza di antiossidanti molto più robusti¹⁰². Inoltre, la sinergia tra diversi tipi di stress, come la radiazione e l'essiccamento, può innescare percorsi di riparazione del DNA unici, consentendo ai microrganismi di affrontare condizioni che altrimenti sarebbero letali. Questo fenomeno di stress combinato mette in luce la complessità delle risposte adattative dei microrganismi in contesti spaziali.
- Condizioni di stress combinato, come essiccamento, temperature estreme e bassi livelli di nutrienti, favoriscono l'induzione di stati di quiescenza o dormienza nei microrganismi;
- La formazione di biofilm o aggregati cellulari che offrono protezione ai singoli microrganismi dagli stress spaziali¹⁰³.

Numerosi esperimenti condotti a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (ISS) e su piattaforme esterne, come ESA-EXPOSE, hanno dimostrato che diversi microrganismi possono sopravvivere e, in alcuni casi, adattarsi alle condizioni estreme dello Spazio. Mentre le spore di *Bacillus subtilis* hanno mostrato una notevole capacità di resistere alle radiazioni ultraviolette, alla disidratazione e al vuoto spaziale, soprattutto

⁹⁹ Rabbow, et al., 2009

¹⁰⁰ Lin, et al., 2025

¹⁰¹ Koehle, et al., 2023

¹⁰² Horneck et al., 1994

¹⁰³ Su, et al., 2013



quando incorporate in matrici protettive come biofilm o particelle minerali¹⁰⁴, *Deinococcus radiodurans*, noti per l'eccezionale tolleranza alle radiazioni ionizzanti, ha mantenuto vitalità e integrità genomica dopo esposizioni prolungate nello Spazio aperto¹⁰⁵. Il contrasto tra la durabilità delle spore di *Bacillus subtilis* e la stabilità genomica di *Deinococcus radiodurans* evidenzia la diversificazione delle strategie di adattamento dei microrganismi, suggerendo che diversi tassoni possono sviluppare adattamenti distinti per sopravvivere negli stessi ambienti ostili.

Tra i funghi, specie come *Aspergillus niger* sono state isolate e coltivate a bordo dell'ISS, dimostrando adattabilità alla microgravità e un aumento della produzione di melanina, che può rappresentare un meccanismo di protezione contro le radiazioni¹⁰⁶. Inoltre, lieviti come *Saccharomyces cerevisiae* sono impiegati come modelli per analizzare gli effetti della microgravità sull'espressione genica, sul metabolismo ossidativo e sulla stabilità del DNA¹⁰⁷.

Questi risultati mostrano che molti microrganismi terrestri non solo sopravvivono, ma possono anche adattare la loro fisiologia e il comportamento della comunità, ad esempio formando biofilm per resistere all'ambiente spaziale. Queste osservazioni sono rilevanti per la microbiologia spaziale e per la biotecnologia applicata alle missioni di lunga durata. Le conoscenze derivanti da questi studi hanno un impatto diretto anche sulla Terra. Un esempio emblematico di questa traduzione tecnologica è rappresentato dai dati sui biofilm raccolti a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (ISS): tale ricerca ha infatti permesso di sviluppare nuove strategie per migliorare la sicurezza alimentare sulla Terra, riducendo i rischi di contaminazione microbica negli alimenti. Esperimenti condotti sulla ISS, come quelli su *Pseudomonas aeruginosa*, hanno evidenziato modificazioni morfologiche e funzionali dei biofilm in microgravità, fornendo modelli utili allo sviluppo di nuove strategie di controllo microbico e di materiali antimicrobici più efficaci¹⁰⁸. L'analisi dei meccanismi di adattamento microbico in condizioni estreme, come quelle osservate nello Spazio, offre nuovi modelli per ottimizzare la conservazione e la sterilizzazione dei materiali. Tali risultati contribuiscono allo sviluppo di strategie antimicrobiche più efficaci e alla progettazione di biotecnologie resilienti per ambienti terrestri ostili, come deserti, regioni polari o impianti industriali. Inoltre, la comprensione delle risposte microbiche a microgravità e radiazioni può favorire progressi nella medicina rigenerativa, nella sicurezza alimentare e nel controllo delle infezioni ospedaliere, rafforzando così il legame tra ricerca spaziale e innovazione biotecnologica terrestre.

Le conoscenze acquisite sullo studio della resistenza microbica nello Spazio hanno importanti ricadute anche sulla Terra. I meccanismi di adattamento sviluppati in condizioni di microgravità e radiazione estrema, come la formazione di biofilm, la riparazione del DNA, la modulazione dei sistemi antiossidanti e la sopravvivenza in stati di dormienza, offrono nuovi modelli per comprendere la resilienza microbica in ambienti terrestri ostili, tra cui deserti, regioni polari e impianti industriali sterili¹⁰⁹. Queste conoscenze possono essere applicate allo sviluppo di strategie innovative per il controllo della contaminazione microbica, la conservazione di alimenti e materiali in condizioni estreme. Anche la bioremediation di ambienti degradati e la progettazione di biotecnologie resilienti, utili nei settori medico, agroalimentare ed energetico, ne beneficiano.

Dal punto di vista applicativo, la comprensione di questi meccanismi è fondamentale per:

- garantire la biosicurezza nelle missioni spaziali (controllo della contaminazione microbica, rischio per gli astronauti, per i sistemi di vita a bordo);
- progettare habitat spaziali, veicoli e strumenti che siano microbiologicamente sicuri e resilienti;

¹⁰⁴ Horneck, et al., 1994; Davis, et al., 2025

¹⁰⁵ Ott, et al., 2020

¹⁰⁶ Cortesão, et al., 2020

¹⁰⁷ Fukuda, et al., 2021

¹⁰⁸ Flores, et al., 2024

¹⁰⁹ Koehle et al., 2023



- valutare i possibili usi biotecnologici di microrganismi spazializzati (bioremediation, produzione biologica in microgravità, supporto alla vita fuori dalla Terra);
- comprendere la possibilità di trasporto interplanetario di microrganismi e i limiti della vita terrestre in ambienti extraterrestri. Inoltre, è importante considerare le linee guida sulla protezione planetaria, volte a prevenire la contaminazione biologica dei corpi celesti e della Terra, un aspetto cruciale dal punto di vista etico e normativo.

La resistenza dei microrganismi negli ambienti spaziali evidenzia strategie di adattamento che rappresentano opportunità per la biotecnologia spaziale e sfide per la salute umana e la protezione planetaria. La capacità di alcuni microrganismi di mantenere funzioni metaboliche attive in condizioni di microgravità e di radiazione apre nuove prospettive per il loro impiego in processi biotecnologici nello Spazio, come la produzione di composti bioattivi, la bioconversione dei rifiuti, la sintesi di nutrienti e materiali e lo sviluppo di biosistemi di supporto alla vita nelle missioni interplanetarie future. La ricerca continua in questo ambito promette di migliorare la sicurezza delle missioni spaziali e di offrire nuovi spunti per la microbiologia terrestre, in particolare nello studio dell'antibiotico-resistenza, dei biofilm e delle condizioni di dormienza e sopravvivenza in ambienti estremi.



Figura 3.2.1. I microrganismi nello spazio mostrano straordinarie capacità di sopravvivenza e adattamento a condizioni estreme come microgravità, radiazioni e vuoto, determinando importanti direttrici per la ricerca astrobiologica e per le relative applicazioni biotecnologiche (immagine generata mediante IA).

3.2.2. L'importanza del packaging

Il confezionamento gioca sempre un ruolo fondamentale nel preservare/garantire, in primo luogo, la sicurezza dei prodotti alimentari e la loro qualità in senso lato (nutrizionale/sensoriale), consentendo di raggiungere shelf-life adeguate al contesto di consumo o al target di consumatori di riferimento. Inoltre,



quando il consumo degli alimenti avviene in condizioni definibili estreme, il packaging (inteso come contenitore) deve affrontare altre sfide: convenienze (facilità d'uso), leggerezza, volumi ridotti, riduzione del rifiuto di imballaggio¹¹⁰.

Gli alimenti per lo Spazio devono racchiudere alcune caratteristiche: elevato contenuto nutrizionale ed energetico, che si traduce in porzioni di piccole dimensioni (no space waste) a lunga conservabilità.

La durata crescente delle missioni (per lo spazio da percorrere o per i lunghi tempi di permanenza a bordo) richiede l'adozione di tecnologie di stabilizzazione che garantiscano lunghe shelf-life (data la difficoltà o impossibilità di prevedere approvvigionamenti in quota) a cui va sempre affiancato un packaging adeguato. Due sono le macroaree di interesse: a) le prestazioni richieste ai materiali e alle confezioni (Materiali e Oggetti a Contatto con Alimenti - MOCA) in ambiente ostile e per il prolungamento della shelf-life; b) le prestazioni necessarie per il trattamento stabilizzante degli alimenti.

Testing dei materiali in laboratorio

Fatto salvo il principio della idoneità al contatto degli alimenti dei MOCA, quelli destinati allo Spazio devono garantire stabilità alle molteplici e specifiche sollecitazioni ambientali. I MOCA sono quindi testati per definire la resistenza meccanica, che comprende classiche prove di comportamento alla trazione e compressione, di tenuta delle saldature, resistenza alla punturazione, a cui si aggiunge la valutazione della capacità di sopportare sollecitazioni alle vibrazioni in test di simulazione della fase di lancio dei veicoli spaziali. Sempre nella fase iniziale di valutazione, i MOCA devono superare test di stabilità termica, in particolare il comportamento a esposizione agli sbalzi termici, che potrebbero aumentare la fragilità del materiale causando microfratture con perdita di integrità delle confezioni finali (oltre alla produzione di frammenti che potrebbero danneggiare filtri e sistemi di funzionamento del veicolo e/o della ISS). I test di compatibilità con l'ambiente spaziale devono verificare invece l'assenza di rilascio, da parte di composti organici volatili, di solventi residui e adesivi che potrebbero, ancora una volta, compromettere la qualità dell'atmosfera della ISS. Altre valutazioni eseguite "a terra" riguardano specificatamente la resistenza dei MOCA alle radiazioni e il loro comportamento in microgravità, tramite la valutazione della fragilità e della variazione delle proprietà meccaniche post-esposizione. Capitolo importante è quello della barriera ai gas (Oxygen Transmission Rate - OTR; Water Vapor Transmission Rate – WVTR), prestazioni strettamente legate alla conservabilità degli alimenti della razione spaziale: tipici valori di OTR e di WVTR ricercati sono molto prossimi allo zero analitico delle strumentazioni oggi in uso, ma in ogni caso mai superiori a $0.5 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ 24h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ (25°C) e a $0.5 \text{ g m}^{-2} \text{ 24h}^{-1}$ (38°C – 90%UR), rispettivamente¹¹¹.

Materiali per il trattamento stabilizzante degli alimenti

I materiali impiegati per la realizzazione dei contenitori destinati agli alimenti per lo Spazio devono anche garantire l'applicazione di tecnologie di stabilizzazione solitamente definibili come post-sterilizzazione, ovvero trattamenti applicati ad alimenti già confezionati che garantiscono la sicurezza (safety), impedendo il reinquinamento e suddivisibili in trattamenti convenzionali (innalzamento della temperatura al cuore del prodotto fino a valori ottimali e il mantenimento della stessa per il tempo necessario a ottenere la sterilità) e non convenzionali, in cui la sterilità viene raggiunta con mezzi fisici, quali alte pressioni idrostatiche (HPP), irraggiamento con raggi gamma o raggi X. A queste si aggiungono i sistemi misti, quali PATS (Pressure Assisted Thermal Sterilization) e MATS (Microwave-Assisted Thermal Sterilization). Quale sia il trattamento scelto, il materiale/la confezione deve garantire adeguate:

¹¹⁰ Douglas et al., 2020; Evans, 2023; Jamal et al., 2025a; Jamal et al., 2025b

¹¹¹ Cooper et al., 2011



1. trasmissione di calore (retorting);
2. trasmissione della pressione (HPP; PATS);
3. trasmissione delle radiazioni (irradiazione);
4. trasparenza alle microonde (MATS).

I materiali e le confezioni devono garantire la loro propria stabilità, se utilizzati nei trattamenti elencati. Nel caso specifico, e riportato a titolo di esempio, del trattamento con radiazioni ionizzanti (gamma, X) si ricorda che la dose assorbita dagli alimenti definisce il livello di stabilità microbiologica raggiunto. Trattamenti che vanno da una dose assorbita non superiore a 10 kGy (radicidazione e radurizzazione, definite pastorizzazioni a freddo) fino a 60 kGy della radappertizzazione (sterilizzazione) hanno crescente effetto sugli alimenti, ma ovviamente anche sugli imballaggi, che possono subire degradazioni inaspettate, come frammentazioni del polimero, con aumentato rilascio di molecole potenzialmente migrabili, di molecole volatili, alterazione delle loro prestazioni di barriera. Pertanto, ogni nuovo materiale che si intenda utilizzare in tali trattamenti deve sottostare a un testing preliminare per la verifica della stabilità e del livello di radiazioni sopportabili, come indicato chiaramente anche dalla FDA¹¹².

Prospettive future

Ad oggi, i materiali utilizzati per il confezionamento degli alimenti per lo Spazio sono ancora quelli convenzionali a elevata/elevatissima barriera¹¹³, realizzati con materiali da fonti non rinnovabili e multistrato, spesso laminati con alluminio. In un'ottica di sostenibilità, alcune soluzioni differenti sono allo studio, tra cui l'utilizzo di materiali biodegradabili e/o compostabili (da utilizzare come ammendanti in previsione dello space farming), che attualmente però non offrono le richieste proprietà di barriera ai gas e al vapor d'acqua essenziali per le lunghe conservazioni. Tali materiali potrebbero tuttavia beneficiare di tecnologie di inclusione inorganica, proprio per aumentare la barriera, riducendo tuttavia in parte la sostenibilità. Un'altra soluzione potrebbe essere lo sviluppo di materiali biopolimerici attivi, ovvero additivati con molecole antimicrobiche e antiossidanti, a compensazione delle modeste prestazioni.

Ricadute a Terra

L'intensa attività di progettazione e di testing legate ai materiali per lo space food può rappresentare un'interessante opportunità per i centri di ricerca e i produttori di materiali per il confezionamento italiani, spesso eccellenze a livello mondiale, aprendo loro scenari molto particolari in cui allocare delle specialties, con ricadute economiche che andranno valutate, ma che si ritengono possano essere importanti.

¹¹²[https://wayback.archive-](https://wayback.archive-it.org/7993/20170722145710/https://www.fda.gov/Food/IngredientsPackagingLabeling/IrradiatedFoodPackaging/ucm081399.htm)

[it.org/7993/20170722145710/https://www.fda.gov/Food/IngredientsPackagingLabeling/IrradiatedFoodPackaging/ucm081399.htm](https://www.fda.gov/Food/IngredientsPackagingLabeling/IrradiatedFoodPackaging/ucm081399.htm)

¹¹³ Kumar and Gaikwad, 2023





Figura 3.2.2. Principali requisiti e funzioni del packaging per gli alimenti destinati alle missioni spaziali. Oltre a garantire sicurezza, qualità e lunga conservabilità degli alimenti, i materiali di confezionamento devono resistere a condizioni estreme, supportare i trattamenti di stabilizzazione e ridurre peso, volume e rifiuti. Le future innovazioni puntano verso materiali più sostenibili e funzionali, con importanti ricadute tecnologiche anche per le applicazioni terrestri (immagine generata mediante IA).

3.2.3 Tecnologie di conservazione e controllo della sicurezza alimentare nello spazio (Francesca Masino)

Nel corso delle missioni spaziali, la concezione del cibo destinato allo Spazio è passata da soluzioni estremamente semplici, come puree liofilizzate e cubetti compressi, a prodotti tecnologicamente complessi, formulati per garantire stabilità microbiologica e chimica, adeguato valore nutrizionale e buona accettabilità sensoriale. Questa evoluzione risponde alla necessità di sostenere l'organismo degli astronauti, sottoposto a microgravità, radiazioni, stress e confinamento¹¹⁴. L'attuale offerta alimentare sulla ISS riflette tali esigenze e comprende prodotti diversificati e idonei all'ambiente spaziale, come illustrato da Mandal et al. (2024). L'intero sistema del "food space" nasce dall'integrazione tra vincoli operativi. Da un lato, è necessario minimizzare la presenza di briciole e liquidi liberi mediante alimenti adeguatamente formulati e confezioni leggere e ad alta barriera; dall'altro occorre garantire sicurezza microbiologica a lungo termine, elevata densità nutrizionale e sufficiente varietà per mantenere appetibilità e benessere durante la missione. Questi vincoli conducono alla necessità ottimizzare tecnologie già esistenti (essiccazione, liofilizzazione, trattamenti termici in busta flessibile) e sperimentare soluzioni emergenti (irradiazione, processi ad alta pressione combinati, sterilizzazione a microonde, stampa 3D, sistemi biorigenerativi e space farming).

¹¹⁴ Bychkov et al., 2021

Le tecnologie convenzionali di conservazione

Le tecniche tradizionali, come essiccamento e disidratazione osmotica, riducono l'acqua disponibile e producono alimenti leggeri e stabili a temperatura ambiente, facilmente gestibili in microgravità¹¹⁵. La liofilizzazione in imballaggi plastici ad alta barriera, impiegata per zuppe, stufati, uova strapazzate, cereali e alcuni prodotti speciali, permette una buona conservazione ma talvolta rende difficile il consumo per la texture delle preparazioni¹¹⁶. I trattamenti termici in busta flessibile garantiscono una stabilità microbiologica di circa due anni e risultano pratici perché non richiedono acqua aggiuntiva e permettono una rapida preparazione, sebbene possano compromettere vitamine termolabili e qualità sensoriale (irrancidimento, perdita di sapore e texture)¹¹⁷. L'irradiazione, tramite raggi gamma, elettroni o raggi X, consente di ottenere alimenti sicuri a temperatura ambiente e oggi viene utilizzata soprattutto per carne e pane, mentre sono in sviluppo prodotti come barrette, noodles e kimchi e bevande. Questa tecnologia, soprattutto se combinata con liofilizzazione o cottura, rappresenta una delle prospettive più promettenti per missioni di lunga durata grazie al buon equilibrio tra sicurezza microbiologica, nutrizione e qualità sensoriale¹¹⁸.

Tecnologie di conservazione emergenti

Le sole tecnologie convenzionali non assicurano però le shelf-life richieste per missioni come quelle dirette a Marte. In tale contesto assume particolare rilevanza l'approccio hurdle technology, che combina differenti barriere microbiologiche, incluse le funzionalità del packaging, per migliorare sicurezza e durata dei prodotti. Nelle missioni di lunga durata la sola sicurezza non è sufficiente, poiché il gusto, la consistenza e la varietà alimentare rivestono un ruolo essenziale nel benessere psicologico dell'equipaggio e nell'adeguato apporto energetico. Inoltre, la gestione delle risorse impone vincoli severi su massa, volume e disponibilità energetica, riducendo la possibilità di ricorrere ad alimenti freschi.

In letteratura emergono come promettenti l'High Pressure Processing e la sterilizzazione a microonde¹¹⁹. La HPP applica elevate pressioni per inattivare microrganismi vegetativi e prolungare la conservazione, pur rimanendo più efficace per prodotti refrigerati¹²⁰. Secondo studi NASA, la variante PATS, che combina pressione e calore, ha mostrato un potenziale rilevante per la conservazione di frutti fino a cinque anni. L'innovazione "drop-in" del Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), l'agenzia nazionale australiana per la ricerca scientifica, che integra trattamenti ad alta temperatura nei sistemi HPP, potrà ulteriormente ampliare le possibilità applicative una volta validata. La sterilizzazione a microonde, eseguita in confezioni polimeriche immerse in acqua pressurizzata, rappresenta un'altra soluzione capace di inattivare patogeni e spore e di mantenere una shelf-life di 3-5 anni, migliorando anche la qualità nutrizionale e sensoriale¹²¹.

Tra le innovazioni più rilevanti figura la stampa 3D, che prevede l'utilizzo di polveri alimentari di origine vegetale o animale da reidratare ed estrarre in orbita per ottenere pasti personalizzati, nutrienti e relativamente vari, riducendo allo stesso tempo volume di stoccaggio e necessità di imballaggi¹²². Anche il packaging assume un ruolo strategico: materiali leggeri e ad alta barriera, imballaggi attivi capaci di rilasciare

¹¹⁵ Pandith et al., 2023

¹¹⁶ Nowak & Jakubczyk, 2020; Watkins et al., 2022

¹¹⁷ Pandith et al., 2023

¹¹⁸ Jiang et al., 2020a; Liu et al., 2020; Mandal et al., 2024; Raj Xavier et al., 2025

¹¹⁹ Cooper et al., 2011; Watkins et al., 2022; Pandith et al., 2023

¹²⁰ Jiang et al., 2020

¹²¹ Liu et al., 2020

¹²² Watkins et al., 2022



antimicrobici o assorbire umidità e ossigeno, e imballaggi intelligenti dotati di sensori di freschezza contribuiscono a una migliore gestione delle scorte e riducono il rischio di deterioramento, particolarmente utile in un ambiente in cui non è possibile eseguire verifiche sensoriali dirette.

Conclusioni e prospettive future

Lo sviluppo del food space, basato su tecnologie avanzate di conservazione, trasformazione e produzione (inclusi sistemi biorigenerativi e stampa 3D), sta ridefinendo il modo di garantire cibo sicuro, nutriente e personalizzato in condizioni estreme. Questo ambito si configura come un laboratorio per soluzioni che puntano a maggiore autonomia dai rifornimenti, integrazione tra processi, packaging intelligenti e coltivazioni *in situ*, con ricadute dirette anche sui sistemi alimentari terrestri.

Ricadute a Terra

Le tecnologie di conservazione sviluppate per lo Spazio hanno un impatto sostanziale anche sulla filiera alimentare terrestre. Il miglioramento di liofilizzazione, trattamenti termici, irradiazione e processi innovativi come HPP e sterilizzazione a microonde consente di ottenere alimenti più sicuri, con shelf-life più lunga e minori perdite nutrizionali e sensoriali. L'approccio integrato (*hurdle technology*) e l'impiego di packaging attivi e intelligenti rafforzano il controllo microbiologico e la gestione delle scorte, contribuendo alla riduzione degli sprechi. Nel complesso, il food space rappresenta un laboratorio di innovazione che accelera lo sviluppo di sistemi alimentari più resilienti, efficienti e sostenibili sulla Terra.



Figura 3.2.3. Evoluzione e principali tecnologie di conservazione degli alimenti per lo spazio. Dalle tecniche convenzionali, come essiccazione, liofilizzazione e trattamenti termici, alle soluzioni innovative quali HPP, sterilizzazione a microonde, stampa 3D e packaging intelligenti, il food space integra sicurezza microbiologica, qualità

nutrizionale e sostenibilità per supportare le missioni di lunga durata e generare innovazioni trasferibili ai sistemi alimentari terrestri (immagine generata mediante IA).

Bibliografia

Bychkov, A., Reshetnikova, P., Bychkova, E., Podgorbunskikh, E. e Koptev, V. (2021). *The current state and future trends of space nutrition from a perspective of astronauts' physiology. International Journal of Gastronomy and Food Science*, 24, 100324. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100324>

Cooper, M., Douglas, G. e Perchonok, M. (2011). Developing the NASA Food System for Long-Duration Missions. *Journal of Food Science*, 76(2). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01982.x>.

Cortese, M., De Haas, A., Unterbusch, R., Fujimori, A., Schütze, T., Meyer, V. e Moeller, R. (2020). *Aspergillus niger spores are highly resistant to space radiation. Frontiers in Microbiology*, 11, 560. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00560>

Davis, G.M., Greenhill, A.R., Munro, T.W., Horner, J., Marsden, S.C. e Carter, B.D. (2025). *Partial protection of Bacillus subtilis spores on simulated Martian media enhances survival against UV radiation. Discover Space*, 129(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s11038-025-09563-1>

Douglas, G.L., Zwart, S.R. e Smith, S.M. (2020). Space Food for Thought: Challenges and Considerations for Food and Nutrition on Exploration Missions. *The Journal of Nutrition*, 150(9), 2242–2244. <https://doi.org/10.1093/jn/nxaa188>.

Evans, R. (2023). Space food packaging: A review of its past, present and future materials and technologies. *Packaging Technology and Science*, 36, 617–627. <https://doi.org/10.1002/pts.2752>.

Flores, P., Luo, J., Mueller, D.W., Mücklich, F., Zea, L. e Muecklich, F. (2024). *Space biofilms – An overview of the morphology of Pseudomonas aeruginosa biofilms grown on silicone and cellulose membranes on board the ISS. Biofilm*, 7, 100182. <https://doi.org/10.1016/j.biofilm.2024.100182>

Fukuda, A.P.M., de Lima Camandona, V., Francisco, K.J.M., Rios-Anjos, R.M., do Lago, C.L. e Ferreira-Junior, J.R. (2021). *Simulated microgravity accelerates aging in Saccharomyces cerevisiae. Life Sciences in Space Research*, 28, 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2020.12.003>

Horneck, G., Bücker, H. e Reitz, G. (1994). *Long-term survival of bacterial spores in space. Advances in Space Research*, 14(10), 41–45. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(94\)90448-0](https://doi.org/10.1016/0273-1177(94)90448-0)

Jamal, T., Gang, C., Lingyan, Z., Hong, D., Muhammad, M., Raheela, J. e Habib, K.N. (2025a). Innovative Food Packaging Techniques for Space Exploration: Ensuring Safety and Sustainability. *Food Engineering Reviews*, 17, 549–572. <https://doi.org/10.1007/s12393-025-09405-w>.

Jiang, J., Zhang, M., Bhandari, B. e Cao, P. (2020). *Current processing and packing technology for space foods: A review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(21), 3573–3588. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1700348>

Jiang, J., Zhang, M., Bhandari, B. e Cao, P. (2020a). *Development of Chinese yam/chicken semi-liquid paste for space foods. LWT*, 125, 109251. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109251>.

Koehle, A.P., Brumwell, S.L., Seto, E.P., Lynch, A.M. e Urbaniak, C. (2023). *Microbial applications for sustainable space exploration beyond low Earth orbit. NPJ Microgravity*, 9(1), 47. <https://doi.org/10.1038/s41526-023-00285-0>

Kumar, L. e Gaikwad, K.K. (2023). Advanced food packaging systems for space exploration missions. *Life Sciences in Space Research*, 37, 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2023.01.005>.

Lin, K., Ma, J., Ji, X., Xu, K., Zhang, L. e Huang, Y. (2025). *Impact of microgravity on space microbes and application prospects. Acta Astronautica*, 236, 1115–1129. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.07.064>



- Liu, W., Barr, M., Pearson, A.L., Chambers, T., Pfeiffer, K.A., Smith, M. e Signal, L. (2020). *Space-time analysis of unhealthy food advertising: New Zealand children's exposure and health policy options*. *Health Promotion International*, 35(4), 812–820. <https://doi.org/10.1093/heapro/daz083>
- Mandal, O., Sinha, G. e Makwana, J. (2024). *Space Foods: Technological Developments and Challenges*. *The Agriculture Magazine*, 3(4), 59–62.
- Nowak, D. e Jakubczyk, E. (2020). *The freeze-drying of foods, the characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials*. *Foods*, 9, 1488. <https://doi.org/10.3390/foods9101488>
- Ott, E., Kawaguchi, Y., Kölbl, D., Rabbow, E., Rettberg, P., Mora, M., Milojevic, T. et al. (2020). *Molecular repertoire of Deinococcus radiodurans after 1 year of exposure outside the International Space Station within the Tanpopo mission*. *Microbiome*, 8(1), 150. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00927-5>
- Pandith, J.A., Neekhra, S., Ahmad, S. e Sheikh, R.A. (2023). *Recent developments in space food for exploration missions: A review*. *Life Sciences in Space Research*, 36, 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2022.09.007>
- Rabbow, E., Horneck, G., Rettberg, P., Schott, J.U., Panitz, C., L'Afflito, A., Reitz, G. et al. (2009). *EXPOSE, an astrobiological exposure facility on the International Space Station: from proposal to flight*. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 39(6), 581–598. <https://doi.org/10.1007/s11084-009-9173-6>
- Raj Xavier, J., Prakash Chauhan, O., Hevlin Shashikumar, S., Nagaraj, R. e Dutt Semwal, A. (2025). *Food technologies for space missions*. *Life Sciences in Space Research*, 46, 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2025.04.007>
- Su, L., Chang, D. e Liu, C. (2013). *The development of space microbiology in the future: the value and significance of space microbiology research*. *Future Microbiology*, 8(1), 5–8. <https://doi.org/10.2217/fmb.12.127>
- Watkins, P., Hughes, J., Gamage, T.V., Knoerzer, K., Ferlazzo, M.L. e Banati, R.B. (2022). *Long term food stability for extended space missions: A review*. *Life Sciences in Space Research*, 32, 79–95. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.12.003>



Capitolo 4 Dallo Spazio alla Terra - Le tecnologie abilitanti “Space-based”

Paragrafo 4.1 - Telerilevamento, GNSS¹²³, trasmissione dati in agricoltura terrestre e utilizzo di tecnologie spaziali su macchine agricole.

(Marco Sozzi - Università degli Studi di Padova, Alessandro Pantano – Confagricoltura, Lorenzo Di Benedetto ART-ER, Lorenzo Calabri – ART-ER, Marco Bietresato - Università degli Studi di Udine, Stefano Bona - Università degli Studi di Padova, Vito Cerasola - Alma Mater Università di Bologna, Enrico Corrado Borgogno Mondino - Università di Torino, Giorgio Saio – TICASS)

4.1.1 Telerilevamento

L'adozione delle tecniche di Agricoltura 4.0, basate sulla gestione puntuale della variabilità spaziale e temporale, ha reso indispensabile l'impiego di strumenti di mappatura su larga scala. In questo contesto, i sensori di telerilevamento, integrati su piattaforme satellitari, aeree (droni) o terrestri, si sono rivelati fondamentali¹²⁴. In particolare, i sistemi satellitari hanno ottenuto un ampio successo grazie all'equilibrio tra risoluzione geometrica, costi contenuti (spesso nulli) e ridotti tempi di rivisitazione. In Italia e in Europa, il settore ha beneficiato significativamente dello sviluppo delle costellazioni Sentinel (ottiche e radar), i cui dati open-access e ready-to-use hanno agito da catalizzatori. Parallelamente, l'interesse del mercato ha stimolato il lancio di costellazioni private in orbita bassa (Low Earth Orbit - LEO) equipaggiate, parimenti, con sensori ottici multispettrali, iperspettrali e radar, capaci di fornire acquisizioni con risoluzione temporale, anche giornaliera. Sul fronte della ricerca, piattaforme iperspettrali come PRISMA, EnMAP, la storica PROBA-1 CHRIS e la programmata CHIME di Copernicus, aprono nuove prospettive per l'identificazione di tratti spettrali specifici delle colture, possibilmente correlabili a parametri agronomici utili alla gestione quali-quantitativa delle produzioni.

Le principali applicazioni attualmente praticate riguardano: (i) la classificazione delle colture (soprattutto in ambito dei controlli PAC); (ii) il riconoscimento preventivo di stress vegetativi delle colture con conseguente emissione di alert agli agricoltori; (iii) la zonazione dei campi di colture estensive per la gestione della fertilizzazione o del diserbo a rateo variabile; (iv) la mappatura dell'umidità del suolo e la stima dei fabbisogni irrigui delle colture; (v) la stima dei danni da eventi calamitosi (atmosferici e fitopatologici); (vi) la stima preventiva delle rese produttive; (vii) la gestione differenziata del raccolto sulla base del grado di maturazione/livello qualitativo del frutto.

Molti di questi processi sfruttano indici spettrali derivati per sintesi matematica delle bande native fornite sotto forma di immagini ottiche multi/iper-spettrali e radar, e spesso richiedono l'utilizzo di serie multitemporali.

Tra questi, l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), sebbene sia lo standard per individuare stati di sofferenza della vegetazione, non permette di isolarne la causa specifica. Indici più evoluti, d'altronde, risultano spesso più adatti al monitoraggio territoriale che a piccoli appezzamenti. Al contrario, gli indici legati alla Riflettanza nel Vicino Infrarosso (Near-Infrared Reflectance - NIR) trovano ampia applicazione nella distribuzione sito-specifica dei fertilizzanti azotati (specialmente per interventi in copertura), permettendo una gestione mirata della variabilità colturale. Parallelamente ai sensori ottici, l'impiego di sensori SAR (Synthetic Aperture Radar), come quelli a bordo della missione Sentinel-1, ha aperto nuove prospettive per la determinazione dell'Umidità Superficiale del Suolo (Surface Soil Moisture - SSM). A differenza dei sensori ottici, i segnali radar sono in grado di penetrare la coltre nuvolosa e sono estremamente sensibili alla costante dielettrica del terreno, che varia in funzione del contenuto d'acqua. Ciò garantisce un monitoraggio continuo

¹²³ Global Navigation Satellite System

¹²⁴ Bietresato et al., 2016; Sozzi et al., 2021a



e su larga scala, fondamentale per l'ottimizzazione delle strategie irrigue e la gestione delle risorse idriche a livello aziendale e comprensoriale.

L'impiego degli indici vegetazionali risale agli anni '70, in concomitanza con le prime missioni di osservazione della Terra dallo Spazio, quando i satelliti erano dotati di sensori ottici sensibili a un numero limitato di lunghezze d'onda. Il calcolo degli indici vegetazionali è rapidamente divenuto uno standard nel monitoraggio delle colture e, ancora oggi, trova larga applicazione nell'ottimizzazione degli input agronomici, quali ad esempio i fertilizzanti azotati¹²⁵. Tuttavia, i recenti progressi nell'ambito dell'intelligenza artificiale hanno aperto nuove prospettive applicative. L'avvento delle piattaforme iperspettrali consente, infatti, di esplorare nuove regioni dello spettro di riflettanza o, in alternativa, di sfruttare l'informazione spettrale nella sua interezza mediante approcci full-spectrum per la stima di parametri colturali di interesse agronomico, come la biomassa colturale, o le asportazioni di azoto¹²⁶. Per valorizzare appieno l'elevato numero di bande che caratterizza i dati iperspettrali, è necessario ricorrere a metodologie di analisi che vadano oltre il semplice calcolo degli indici vegetazionali, ma che siano invece in grado di individuare relazioni non lineari e pattern complessi in contesti ad alta dimensionalità dei dati. In questo scenario, le tecniche di intelligenza artificiale, in particolare il machine learning e il deep learning, si stanno affermando come strumenti di grande supporto.

4.1.2 Global Navigation Satellite Systems (GNSS)

L'integrazione dei sistemi GNSS ha rappresentato il vero acceleratore dell'Agricoltura 4.0: a partire dalla metà degli anni Novanta, la messa a disposizione dei segnali GNSS per usi civili ha permesso di georeferenziare i dati agronomici, di automatizzare la guida dei mezzi e di trasformare la variabilità di campo in informazione gestibile. Oggi, l'impiego sinergico di costellazioni globali, come l'americana GPS e l'europea Galileo, supportato da sistemi di correzione satellitare (EGNOS) o basi a terra (RTK), consente di raggiungere un'accuratezza centimetrica nel posizionamento di trattori e robot agricoli. Questa precisione estrema permette di operare lungo linee di guida predefinite, riducendo drasticamente le sovrapposizioni, i tempi di manovra e il consumo di input. Inoltre, l'adozione di tali tecnologie favorisce l'implementazione del Controlled Traffic Farming (CTF), una strategia che confina il transito dei mezzi su percorsi permanenti per minimizzare l'area interessata dal compattamento del suolo, preservandone così la struttura fisica e la fertilità nel tempo. In generale, l'uso del sistema GNSS in agricoltura trova diversi campi di applicazione, riconducibili a due macrocategorie di interventi: gestione sito-specifica e navigazione. Nella prima rientrano le attività che comportano l'acquisizione di dati per produrre documentazione legata alle numerose tipologie di attività agricole (campionamento del suolo, monitoraggio delle colture, mappatura delle produzioni, etc.). La seconda, di contro, comprende esclusivamente azioni nelle quali sono coinvolte le macchine agricole, singole o in flotta. Nel primo caso, rientrano le attività di navigazione verso un obiettivo mentre, nel caso di gestione di una flotta, il GNSS permette di monitorare e coordinare il cantiere di lavoro fino ad arrivare a una possibile automazione delle operazioni mediante robot di campo. A tutt'oggi, la tecnologia GNSS non solo garantisce affidabilità, precisione e flessibilità nel soddisfare le necessità delle diverse attività agricole, ma rappresenta anche una vera e propria infrastruttura informativa capace di associare alle operazioni di campo dei dati certificati utili per il controllo di gestione e a orientare le decisioni strategiche finalizzate a migliorare la sostenibilità imprenditoriale e la pianificazione di lungo termine.

¹²⁵ Cerasola et al., 2025a

¹²⁶ Cerasola et al., 2025b





Figura 4.1.1. Tecnologie Space-based per l'agricoltura 4.0: integrazione tra telerilevamento satellitare, sensori multispettrali e radar, sistemi GNSS e strumenti di intelligenza artificiale per il monitoraggio delle colture, la gestione sito-specifica degli input e il supporto alle decisioni agronomiche. Queste tecnologie consentono di migliorare produttività, sostenibilità ed efficienza nell'uso delle risorse agricole (immagine generata mediante IA).

4.1.3 Trasmissione dei dati in agricoltura

L'utilizzo di tecnologie legate all'Agricoltura di Precisione si è basato, storicamente, sui trasferimenti di dati mediante supporti di memoria fisica. Negli ultimi anni, sistemi connessi a cloud hanno permesso il trasferimento di dati mediante connessione Internet, accorciando e semplificando la catena logistica del dato. Tuttavia, la copertura internet nelle aree rurali basata su connessioni dati è limitata, rendendo difficile la connessione a sistemi cloud e la trasmissione di segnali di correzione nRTK¹²⁷. Più recentemente, la connettività in aree rurali sta trovando nuove soluzioni grazie ai satelliti in orbita bassa (LEO), che garantiscono una copertura anche nelle zone più remote. Alcuni grandi fornitori di macchine e tecnologie agricole si sono affidati a sistemi di connessione a Internet basati su satelliti in orbita bassa, come quelli dell'americana Starlink. A livello europeo, la piattaforma Eutelsat promette di garantire connessione a Internet anche nelle aree più remote.

Il tema della trasmissione dei dati in agricoltura non può prescindere dalla standardizzazione del dato. Sebbene questo aspetto riguardi solo secondariamente le tecnologie satellitari, è importante sottolineare come la disponibilità di uno standard comune semplifichi la comunicazione e la trasmissione dei dati tra sistemi diversi. Iniziative come l'Agricultural Interoperability Network di AEF (Agricultural Industry Electronics Foundation) mirano proprio a questo, vale a dire ad avere uno standard comune di condivisione di dati tra OEMs, data hub, FMIS (Farm Management Information Systems) e fornitori di servizi.

¹²⁷ Sozzi et al., 2021 b



4.1.4 Limiti alla diffusione delle nuove tecnologie

Gli obiettivi che l'Agricoltura di Precisione persegue riguardano, prima di tutto, un utilizzo sapiente e controllato delle risorse e dei mezzi di produzione attraverso processi che tengano conto della variabilità spaziale e temporale dei fattori stessi. L'adozione di queste tecnologie, tuttavia, non è priva di sfide. I costi iniziali, la mancanza di competenze digitali, la resistenza al cambiamento, ma anche la scarsa interoperabilità e l'effettiva aderenza delle tecnologie ai fabbisogni reali, che a volte viene trascurata, rappresentano ostacoli significativi, soprattutto per le piccole e medie aziende. Inoltre, la gestione dei dati e la privacy richiedono un quadro normativo chiaro e condiviso. Per superare queste barriere, è fondamentale un impegno congiunto tra istituzioni, associazioni agricole e aziende tecnologiche, che venga promosso attraverso incentivi pubblici di lungo termine, programmi di formazione mirati e partenariati pubblico-privato che rendano accessibili queste innovazioni a tutti gli attori della filiera. Nonostante le numerose cause note della mancata diffusione dell'Agricoltura di Precisione a livello nazionale, si tende comunque a sottovalutare il reale peso di tali barriere.

Prima ancora che sul piano tecnico-economico, infatti, il problema deve essere affrontato con un approccio culturale e sociale. L'incapacità di gestire adeguatamente tutte le informazioni necessarie, la cui complessità è da ricercarsi nella natura sia quantitativa, sia qualitativa delle stesse, rappresenta il primo vero ostacolo. Tale approccio dovrebbe tenere conto dei potenziali benefici, anche in termini di profitti, che deriverebbero da una gestione informatizzata del processo produttivo. In conclusione, il problema non è di semplice soluzione e impone di essere inquadrato e affrontato con rigore quantomeno sul piano metodologico; la realizzazione dell'Agricoltura di Precisione è un punto di arrivo che comporta una modificazione delle strategie di gestione e un nuovo tipo di rapporto con il ruolo della gestione dell'informazione aziendale.

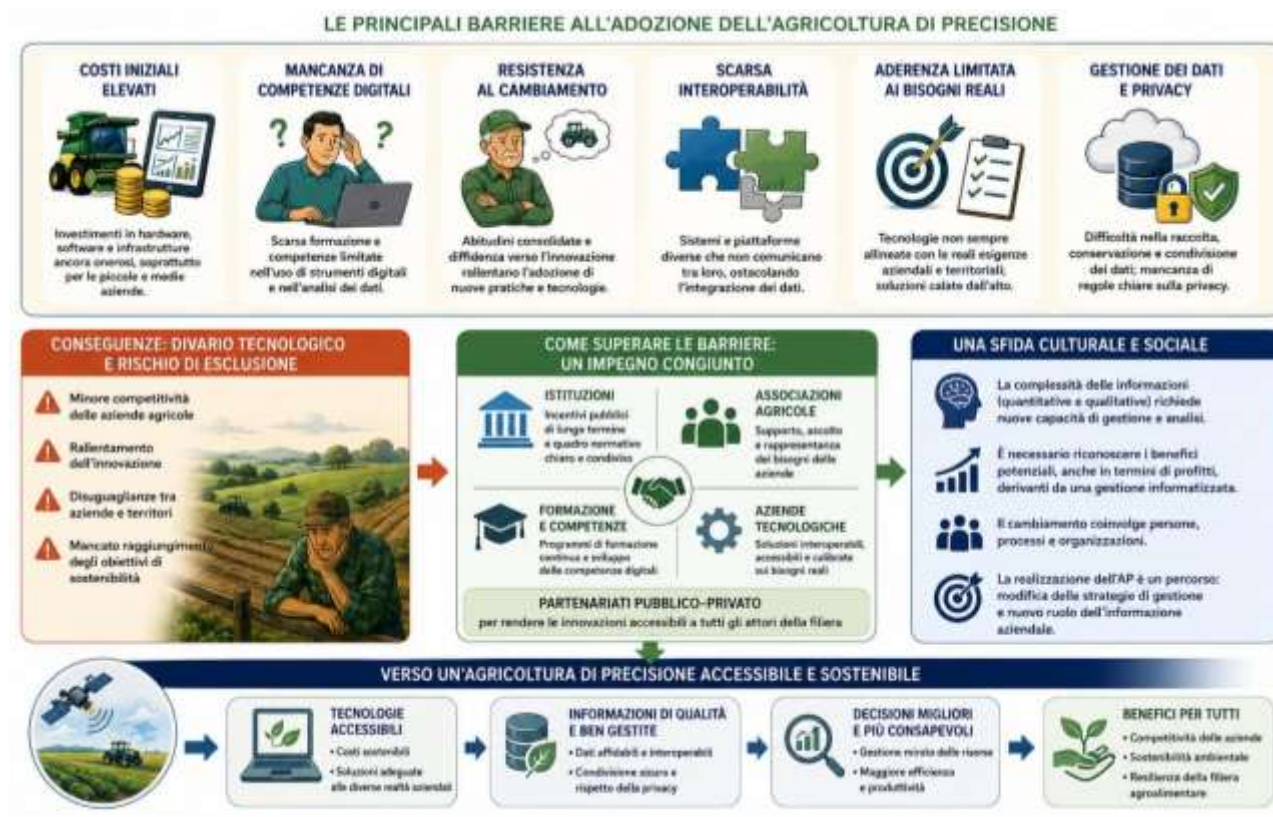


Figura 4.1.2. Principali barriere alla diffusione dell'Agricoltura di Precisione e possibili strategie di superamento. Il superamento di tali ostacoli richiede un approccio integrato che combini innovazione tecnologica, formazione, supporto istituzionale e una maggiore cultura della gestione dell'informazione aziendale (immagine generata mediante IA).

BIBLIOGRAFIA

Bietresato, M., Carabin, G., Vidoni, R., Gasparetto, A. & Mazzetto, F. (2016). Evaluation of a LiDAR-based 3D-stereoscopic vision system for crop-monitoring applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.03.017>.

Cerasola, V.A., Bona, S., Borsato, D., Gavioli, L., Moretti, G., Manfrini, L., Pennisi, G., Orsini, F., Buscaroli, E., Sambo, P. & Gianquinto, G. (2025a). Exploring dynamic nitrogen (N) fertigation guided by multispectral sensors: a sustainable optimization of N fertilization in processing tomato. *Scientia Horticulturae*, 345, 114124.

Cerasola, V.A., Orsini, F., Pennisi, G., Moretti, G., Bona, S., Mirone, F., Verrelst, J., Berger, K. & Gianquinto, G. (2025b). Hyperspectral imaging for precision nitrogen management: A comparative exploration of two methodological approaches to estimate optimal nitrogen rate in processing tomato. *Smart Agricultural Technology*, 10, 100802.

Sozzi, M., Kayad, A., Gobbo, S., Cogato, A., Sartori, L. & Marinello, F. (2021a). Economic comparison of satellite, plane and UAV-acquired NDVI images for site-specific nitrogen application: observations from Italy. *Agronomy*, 11(11), 2098.

Sozzi, M., Kayad, A., Ferrari, G., Zanchin, A., Grigolato, S. & Marinello, F. (2021b). Connectivity in rural areas: A case study on internet connection in the Italian agricultural areas. In *2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*, 466–470. IEEE. <https://doi.org/10.1109/MetroAgriFor52389.2021.9628493>.



Capitolo 5 - Dalle tecnologie alle competenze: costruire il futuro dell'agricoltura tra Terra e Spazio

5.1 - Dalla serra alla stazione spaziale: competenze per l'agricoltura oltre la Terra

(Luigi Galimberti – ToSeed Partners, Giorgia Tomarchio - Hortomio, Silvia Massa - ENEA)

L'evoluzione delle tecnologie agritech verso applicazioni in ambienti spaziali estremi evidenzia come il progresso tecnologico, in assenza di adeguate competenze specialistiche, non sia sufficiente a garantire la stabilità e l'affidabilità dei sistemi biorigenerativi. La progettazione e gestione di cicli chiusi dei nutrienti, substrati funzionalizzati, impianti accessori integrati e moduli di valorizzazione degli scarti richiedono capitale umano dotato di competenze interdisciplinari avanzate. Tali competenze devono integrare agronomia, ingegneria dei processi, chimica ambientale, scienza dei materiali, automazione e data science, con una comprensione approfondita delle dinamiche fisiche e biochimiche che regolano sistemi viventi e flussi di materia in condizioni di microgravità e confinamento. A queste si affiancano competenze emergenti nell'ambito dell'intelligenza artificiale, dell'analisi e gestione dei big data, sempre più rilevanti nello sviluppo delle future infrastrutture agrosenziali.

La formazione assume pertanto una funzione strutturale nella costruzione di ecosistemi tecnologici affidabili. La stessa deve essere concepita come un percorso progressivo, avviato già nei contesti scolastici mediante l'introduzione ai principi dei cicli biogeochimici, dell'Agricoltura 4.0 e della sostenibilità dei sistemi chiusi e consolidato in ambito universitario attraverso programmi interdisciplinari orientati alla progettazione di sistemi complessi. Percorsi formativi che integrano scienze agrarie, ingegneria industriale e ambientale, biotecnologie e analisi dei dati risultano fondamentali per formare profili professionali in grado di operare su piattaforme agro-biorigenerative ad alta intensità tecnologica.

In questa prospettiva, assumono particolare rilevanza anche le iniziative di formazione tecnico-scientifica e trasferimento delle competenze presso gli istituti tecnici e i percorsi di alta specializzazione tecnologica (inclusi gli ITS Academy), finalizzate a favorire lo sviluppo di competenze nelle filiere dell'innovazione agroalimentare, della sostenibilità e delle tecnologie avanzate per rafforzare il collegamento tra ricerca, formazione e sistema produttivo. Tali percorsi contribuiscono alla formazione di nuove figure professionali altamente specializzate, in grado di operare all'interfaccia tra agricoltura, tecnologie digitali, bioeconomia circolare e sistemi di supporto alla vita per applicazioni terrestri e spaziali. Tra queste figure emergono nuove professionalità quali specialisti dei sistemi agro-bioregenerativi, esperti di agricoltura in ambiente controllato, data scientist applicati all'agritech e figure capaci di operare all'interfaccia tra agricoltura, Spazio e tecnologie digitali.

Parallelamente, l'aggiornamento continuo e la diffusione strutturata dell'informazione scientifica costituiscono condizioni necessarie per garantire trasferimento tecnologico, standardizzazione operativa e riduzione del rischio sistemico. In un contesto caratterizzato da una rapida evoluzione delle tecnologie, la formazione deve essere intesa come un processo continuo (lifelong learning), capace di accompagnare l'intero percorso professionale degli operatori e di favorire l'adattamento alle continue evoluzioni tecnologiche, normative e organizzative del settore. L'adozione di protocolli basati su evidenze sperimentali e l'implementazione di sistemi di monitoraggio avanzati favoriscono l'adattamento dinamico delle soluzioni sviluppate per lo Spazio ai contesti terrestri.

Le ricadute applicative risultano particolarmente rilevanti nei sistemi agricoli ad ambiente controllato, quali vertical farm e serre idroponiche avanzate, dove l'ottimizzazione dei flussi di nutrienti, il recupero delle risorse e la gestione predittiva dei parametri chimico-fisici rappresentano leve strategiche per incrementare l'efficienza d'uso delle risorse e la resilienza produttiva. In questo processo assumono crescente importanza



living lab, demo farm, infrastrutture dimostrative e piattaforme sperimentali, che consentono di validare tecnologie, favorire il trasferimento dell'innovazione e accelerarne l'adozione da parte del sistema produttivo.

In questo contesto, il contributo delle imprese innovative, degli enti di ricerca e delle infrastrutture dimostrative assume un ruolo fondamentale nel trasformare la ricerca in applicazioni concrete, favorendo il trasferimento tecnologico, la diffusione delle competenze e la creazione di ecosistemi territoriali dell'innovazione.

In questo quadro si inserisce l'impegno di Hortomio, azienda specializzata nella progettazione di soluzioni agritech, che promuove attivamente questo modello di formazione e da anni porta nelle scuole strumenti abilitanti e percorsi professionalizzanti. Attraverso laboratori, sistemi di coltivazione fuori suolo e programmi didattici strutturati, l'azienda contribuisce a trasferire competenze tecniche, cultura dell'innovazione e capacità operative necessarie per affrontare le sfide della transizione agroalimentare.

Analogamente, le collaborazioni tra enti di ricerca, università, imprese e organismi nazionali ed europei rappresentano un elemento essenziale per costruire ecosistemi dell'innovazione capaci di valorizzare le opportunità offerte dalle iniziative internazionali, dalle roadmap dell'ESA, di Horizon Europe e dalle prospettive aperte dal programma Artemis.

La sinergia tra ricerca applicata, tecnologia e formazione rappresenta quindi un elemento strategico per costruire ecosistemi produttivi più efficienti, sostenibili e capaci di adattarsi ai cambiamenti ambientali e socioeconomici.

Le tecnologie agrosenziali richiedono infatti non solo nuovi strumenti, ma anche una vera e propria cultura professionale orientata all'approccio sistemico, alla sostenibilità, alla digitalizzazione e all'economia circolare, favorendo la costruzione delle competenze necessarie per affrontare le sfide dell'agricoltura del futuro, sulla Terra e oltre.



Figura 5.1.1. Lezione sulle tecniche di produzione fuori suolo durante una giornata di orientamento presso la Fondazione Polo Universitario Grossetano (Fonte: HortoMio 2024, Foto di Proprietà di HortoMio).



Figura 5.1.2. Lezione pratica di piantumazione su substrato inerte presso l'IIS Pellegrini di Sassari (Fonte: HortoMio 2025, Foto di proprietà di HortoMio).



Figura 5.1.3. Visita di una delle facilities di 'Controlled Environment Agriculture' per lo spazio del C.R. ENEA Casaccia e prova di 'gaming' per l'apprendimento di operazioni di coltivazione e mantenimento di colture fuori suolo (edizione 2025 della Notte Europea dei Ricercatori; fonte: ENEA 2025). I visitatori si trovano presso la tenda gonfiabile utilizzata per missioni analoghe spaziali.

5.2 - Dati, satelliti e decisioni: le competenze per l'agricoltura digitale del futuro

(Marco Sozzi - Università degli Studi di Padova, Alessandro Pantano - Confagricoltura, Lorenzo Di Benedetto – ART-ER, Lorenzo Calabri – ART-ER, Marco Bietresato - Università degli Studi di Udine, Stefano Bona - Università degli Studi di Padova, Vito Cerasola – Alma Mater Università di Bologna, Enrico Corrado Borgogno Mondino - Università degli Studi di Torino, Alberto Battistelli - CNR)

L'agricoltura pensata per lo Spazio evidenzia il ruolo della conoscenza nello sviluppo dei sistemi agricoli, un'esigenza sempre più pressante anche a livello terrestre. Quando si parla di tecnologie spaziali applicate all'agricoltura, spesso si pensa a satelliti, sensori e macchine intelligenti. C'è però un elemento altrettanto cruciale, se non più determinante: le persone. Senza una formazione adeguata e un'informazione chiara, anche la tecnologia più avanzata rischia di rimanere un'opportunità persa.

La rapida evoluzione delle tecnologie richiede, infatti, un cambiamento culturale e un aggiornamento costante delle competenze da parte degli operatori del settore. Per introdurre efficacemente le tecnologie spaziali in agricoltura, è necessario partire da chi lavora la terra ogni giorno.

Gli ambiti sono diversi:

- Interpretazione dei dati satellitari.
Non basta avere una mappa del campo accompagnata da alcuni indici di vegetazione (come l'NDVI), bisogna sapere anche come usare queste informazioni per prendere decisioni consapevoli: quando irrigare, dove intervenire con i fertilizzanti, come prevenire le malattie.
- Utilizzo di piattaforme digitali.
Strumenti come i Farm Management Information System (FMIS) o le app di Agricoltura 4.0 devono diventare parte della routine quotidiana, non un optional per pochi.
- Gestione delle macchine agricole e dei sistemi colturali CEA (Controlled Environment Agriculture) connessi.
I trattori equipaggiati con guida automatica, droni per il monitoraggio, le serre ad alto controllo ambientale o le strutture di vertical farming, i sensori IoT sono strumenti potenti, ma richiedono competenze specifiche per essere usati al meglio.
- Comprensione dei benefici economici e ambientali.
Non si tratta solo di saper usare la tecnologia, ma di comprendere come questa possa ridurre i costi, aumentare la resa di raccolta e migliorare la sostenibilità globale dell'azienda e contribuire allo sviluppo economico e sociale dei territori rurali.

Appare evidente, dunque, l'importanza del ruolo della formazione del mondo produttivo e dell'informazione dei consumatori.

Pertanto, senza un'adeguata formazione, il rischio è che le innovazioni rimangano appannaggio di pochi, limitandone l'impatto sulla competitività e sulla sostenibilità dell'agricoltura italiana. D'altra parte, occorre considerare anche il mutato spettro dei fabbisogni dei consumatori che, oltre alla qualità e salubrità dei prodotti, sono sempre più attenti agli aspetti legati alla sostenibilità ambientale ed etica.

La gestione dei dati, e ancor di più delle informazioni che da essi possono essere estrapolate, rappresenta un vero e proprio nuovo fattore produttivo in agricoltura. Tali dati e informazioni possono essere utilizzati da un lato per migliorare le attività di campo, dall'altro per garantire la qualità e la tracciabilità dei prodotti e di ogni operazione.

Così come è indispensabile prevedere incentivi di medio-lungo termine che consentano agli imprenditori agricoli di programmare gli investimenti in azienda, allo stesso modo è necessario sviluppare programmi di



formazione che insegnino agli agricoltori e ai tecnici come utilizzare le tecnologie digitali, diffondendo le best practice e sensibilizzando anche su temi delicati come la proprietà dei dati.

Le associazioni agricole e gli enti pubblici devono promuovere la collaborazione tra gli attori della filiera, definendo standard aperti e protocolli comuni per l'interoperabilità delle soluzioni. Solo attraverso una visione condivisa e un impegno collettivo si può superare la frammentazione del settore e accelerare la transizione digitale.

Guardando al futuro, la strada è tracciata. Secondo gli ultimi dati dell'Osservatorio Smart Agrifood del Politecnico di Milano, il 37% degli agricoltori italiani intende investire in macchinari connessi e il 34% in sistemi di monitoraggio, segnale di un interesse crescente verso la digitalizzazione. L'IA è destinata a giocare un ruolo chiave, entro il 2030 metà delle decisioni agronomiche sarà supportata da algoritmi di Intelligenza Artificiale e tecnologie come la blockchain diventeranno sempre più diffuse.

Per arrivare preparati a questo scenario, il settore agricolo italiano deve agire oggi, investendo in formazione, infrastrutture digitali e collaborazione.

In sintesi, l'Agricoltura 4.0 non è un traguardo, ma un percorso che richiede impegno, visione e collaborazione. La digitalizzazione, se ben gestita, può rappresentare la chiave per una agricoltura più resiliente, sostenibile e competitiva, capace di rispondere alle esigenze di un mercato in continua evoluzione. In questo contesto, il ruolo della formazione e dell'informazione diventa fondamentale per accompagnare gli agricoltori in questa transizione, garantendo che nessuno venga lasciato indietro.

5.3 Materiale informativo per i Soci CL.A.N. - APPENDICI

Il Gruppo di Lavoro ha anche realizzato un'attività di ricognizione finalizzata alla produzione, a complemento del documento principale, di un primo strumento di orientamento rivolto ai Soci CL.A.N. Le due appendici (Annex 1 e Annex 2) raccolgono rispettivamente una mappatura delle infrastrutture, delle piattaforme tecnologiche e dei progetti in ambito agrosapaziale (20 schede predisposte da altrettanti Soci) e una raccolta di casi studio sulle tecnologie abilitanti space-based per l'agricoltura di precisione (11 schede).

L'obiettivo è valorizzare e condividere le competenze, le infrastrutture e le esperienze già presenti nella rete CL.A.N., favorendo la nascita di nuove collaborazioni, attività di networking e progettualità congiunte.

Le appendici costituiscono inoltre uno strumento di orientamento per i Soci interessati ad avvicinarsi a questi ambiti innovativi, offrendo una panoramica delle risorse disponibili e delle esperienze già sviluppate all'interno dell'Associazione.

Gli Annex e i relativi link di accesso sono concepiti non come semplici allegati statici, ma come uno strumento dinamico e in continuo aggiornamento, vivo e destinato a crescere nel tempo e finalizzato ad arricchire progressivamente il patrimonio di relazioni, competenze e opportunità di collaborazione della rete CL.A.N. negli ambiti delineati dal presente documento.



ANNEX 1 Ricognizione delle competenze, delle infrastrutture, delle progettualità in ambito agros spazio

Introduzione

La presente indagine, promossa dal Gruppo di Lavoro Agros spazio del Cluster Agrifood Nazionale CL.A.N., rappresenta un'attività di analisi e mappatura dell'ecosistema riferibile all'agros spazio presente all'interno del network dei Soci del Cluster. L'obiettivo è fornire una **ricognizione strutturata delle competenze, delle infrastrutture, delle progettualità e degli asset tecnologici disponibili**, al fine di rafforzare le sinergie tra gli attori dell'ecosistema e favorire lo sviluppo di iniziative collaborative, attività di ricerca e percorsi di trasferimento tecnologico nell'ambito dell'agros spazio.

L'indagine, condotta tramite questionario strutturato, ha consentito di raccogliere informazioni sistematiche da un ampio spettro di attori – università, enti pubblici di ricerca, imprese, consorzi e organismi intermedi – al fine di caratterizzare in modo organico:

- le competenze e i domini tecnologici di riferimento;
- le esperienze progettuali pregresse e in corso;
- i prodotti, servizi e asset di proprietà intellettuale;
- la disponibilità di infrastrutture sperimentali (facilities);
- il livello di maturità tecnologica (Technology Readiness Level, TRL) e il grado di coinvolgimento nell'ambito agros spaziale)

L'attività di mappatura è stata concepita come uno strumento operativo a supporto della collaborazione tra i Soci CL.A.N., favorendo l'identificazione di competenze complementari, opportunità di partenariato, progettualità condivise e possibili percorsi di trasferimento tecnologico.

I risultati completi dell'indagine sono raccolti in un repository dedicato, accessibile al seguente link:

https://drive.google.com/drive/folders/18EpEWYVyzfYyERtkez_oMYpXSWOP7uU1?usp=sharing

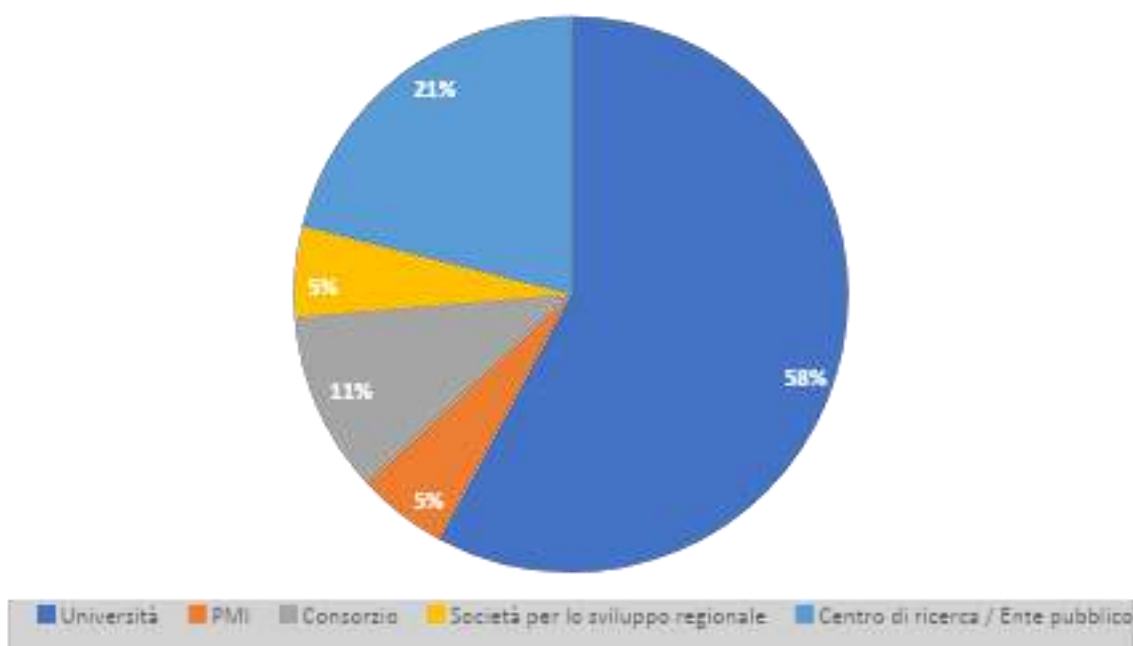
La cartella contiene 20 schede descrittive relative ai soggetti partecipanti e include informazioni su expertise, infrastrutture, facilities, progetti, brevetti, prodotti e servizi disponibili nell'ambito dell'agros spazio.

1. Una comunità multidisciplinare per l'innovazione agros spaziale

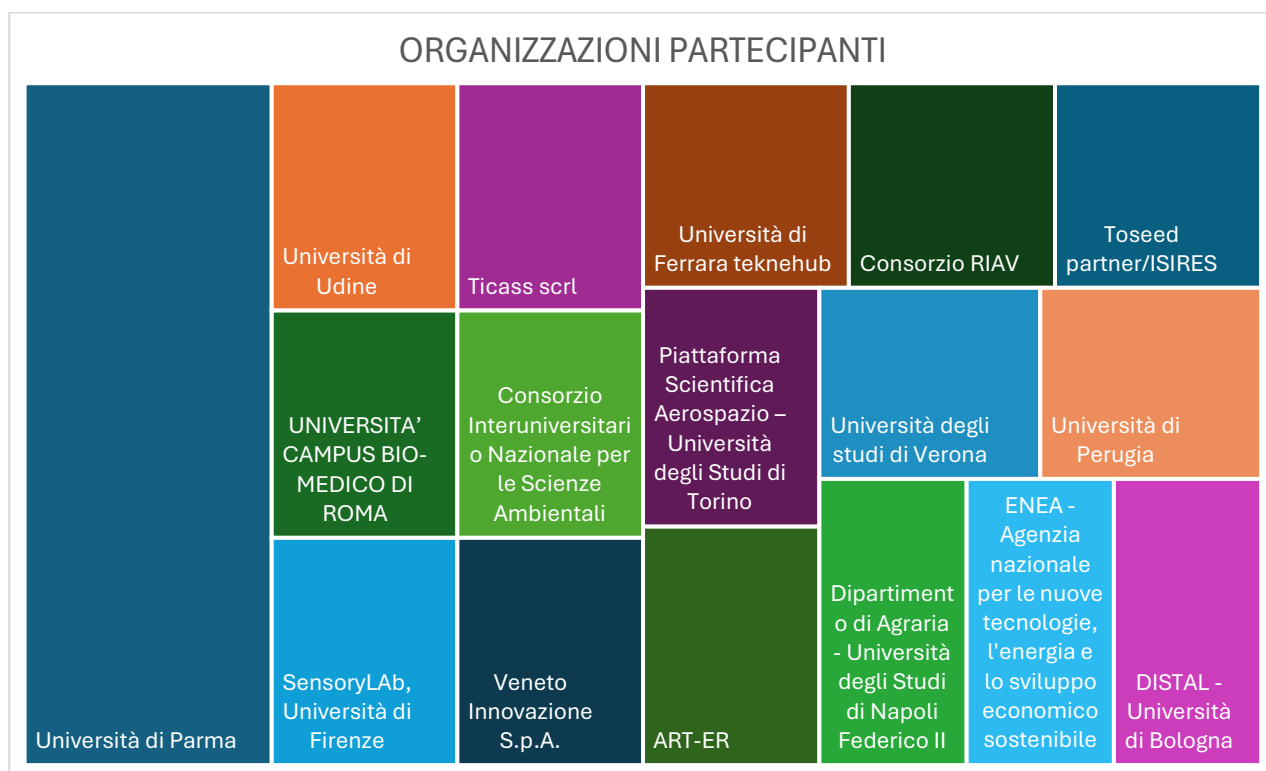
La mappatura evidenzia la presenza di una comunità ampia e multidisciplinare composta da università, enti pubblici di ricerca, imprese innovative, consorzi e organismi intermedi attivi o potenzialmente impiegabili lungo l'intera catena del valore dell'innovazione agros spaziale.



TIPOLOGIA ORGANIZZAZIONI PARTECIPANTI



ORGANIZZAZIONI PARTECIPANTI



Il quadro risultante si caratterizza per un elevato grado di multidisciplinarietà, con competenze che spaziano dalle scienze agrarie e biologiche alle biotecnologie, dall'ingegneria dei materiali alla sensoristica avanzata, fino alla modellistica computazionale e all'intelligenza artificiale.

Questa convergenza di competenze rappresenta una base strategica per affrontare le sfide legate sia all'esplorazione spaziale sia alla transizione sostenibile dei sistemi agroalimentari terrestri.



2. Ambiti tecnologici prevalenti

Le competenze censite coprono le principali direttrici scientifiche e tecnologiche oggi considerate strategiche per lo sviluppo dell'agospazio.

- agricoltura di precisione e digitalizzazione dei sistemi colturali;
- sistemi di coltivazione in ambiente controllato (Controlled Environment Agriculture – CEA);
- sistemi biorigenerativi di supporto alla vita (BLSS) e tecnologie MELISSA;
- studio degli effetti dell'ambiente spaziale sulle piante (microgravità, radiazioni, cicli luce-buio);
- sviluppo di materiali avanzati e soluzioni di packaging per applicazioni spaziali;
- sicurezza alimentare e shelf-life in condizioni estreme;
- biotecnologie vegetali e tecniche di evoluzione assistita (TEA);
- applicazioni di intelligenza artificiale, modellistica e analisi avanzata dei dati.

AREE DI ATTIVITÀ IN AMBITO AGROSPAZIO



L'eterogeneità degli ambiti rappresentati è funzionale alla crescente integrazione tra tecnologie spaziali e innovazione agroalimentare, con ricadute applicative sia per le future missioni di lunga durata sia per i sistemi produttivi terrestri.



3. Progettualità e maturità tecnologica

Il repository documenta un patrimonio significativo di progettualità, infrastrutture e asset tecnologici già disponibili all'interno del network CL.A.N. Le iniziative censite coprono differenti livelli di maturità tecnologica, dalla ricerca di base fino a dimostratori e applicazioni prossime al trasferimento industriale.

Le esperienze progettuali includono:

- progetti finanziati da agenzie spaziali (ASI, ESA), programmi europei e iniziative nazionali;
- attività di ricerca su space farming, sistemi BLSS, monitoraggio da osservazione della Terra e sviluppo di alimenti per missioni di lunga durata;
- collaborazioni consolidate tra attori pubblici e privati, spesso in contesti internazionali.

Indichi eventuali esperienze pregresse in collaborazioni spaziali

19 risposte



È tuttavia rilevante la presenza di organizzazioni che, pur manifestando un elevato interesse, risultano ancora in una fase iniziale di coinvolgimento operativo, evidenziando potenziali margini di crescita del settore.

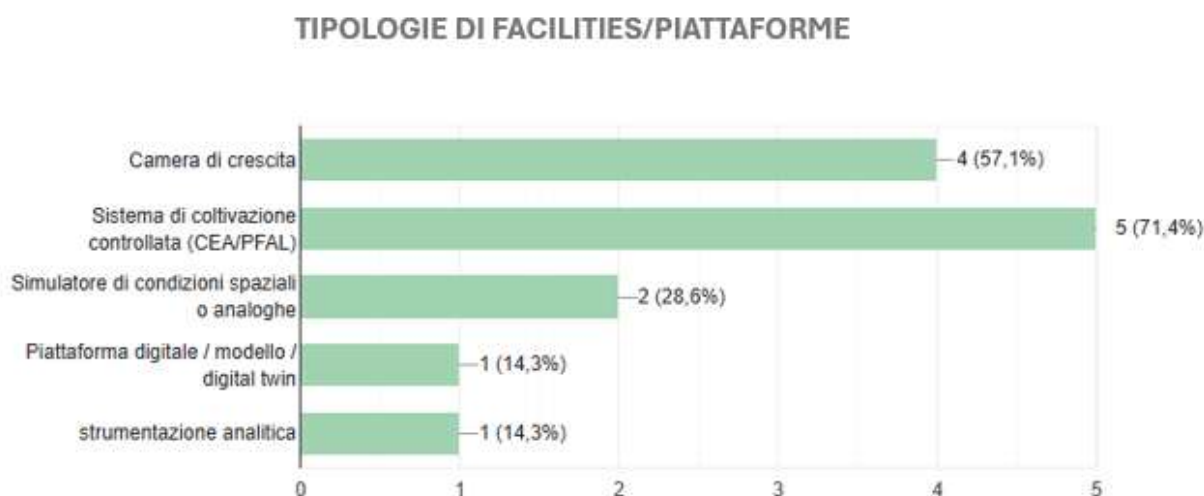
4. Infrastrutture e facilities

L'indagine ha messo in evidenza la disponibilità di un insieme articolato di infrastrutture sperimentali a supporto dello sviluppo tecnologico, tra cui:

- camere di crescita e sistemi avanzati di coltivazione controllata;
- piattaforme per la simulazione di microgravità e condizioni extraterrestri;
- infrastrutture di telerilevamento, integrazione dati e digital twin;
- laboratori per analisi omiche, fenotipizzazione, sensoristica e materiali avanzati;
- facility su larga scala per la simulazione di ambienti complessi e condizioni estreme.



La disponibilità di tali infrastrutture rappresenta una risorsa strategica per la realizzazione di attività sperimentali collaborative e per la costruzione di nuove progettualità multidisciplinari.



Tali infrastrutture supportano attività sperimentali lungo l'intera catena del valore della ricerca e dell'innovazione, sebbene il grado di accessibilità a terzi risulti ancora eterogeneo.

5. Output tecnologici e innovazione

L'ecosistema analizzato presenta una produzione significativa di risultati applicativi, tra cui:

- prototipi di sistemi di coltivazione e piattaforme integrate;
- soluzioni avanzate per packaging, nutrizione e sicurezza alimentare;
- strumenti digitali basati su sensoristica, IoT e intelligenza artificiale;
- brevetti e tecnologie proprietarie nei settori delle biotecnologie, dei materiali e dei sistemi digitali.

La maggior parte degli output si colloca ancora in fase di sviluppo o dimostrazione, indicando un ecosistema dinamico ma non completamente maturo dal punto di vista industriale.

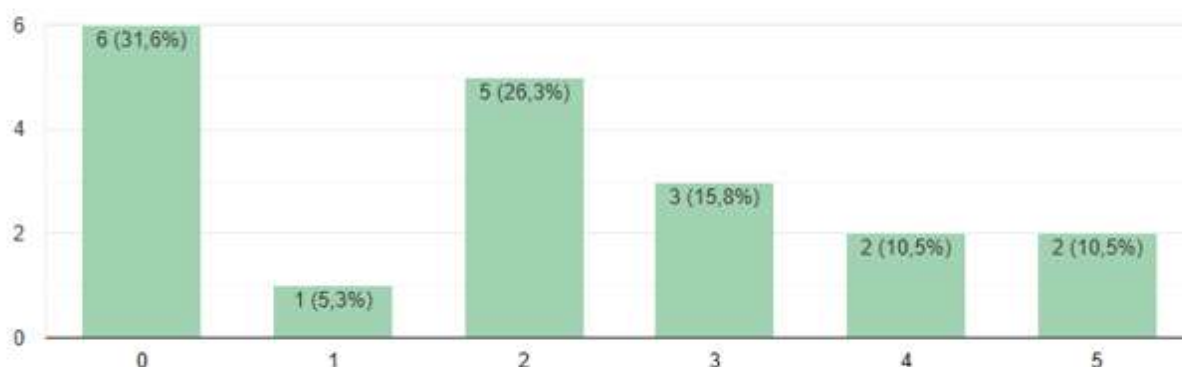
6. Livello di coinvolgimento e prospettive future

Uno dei principali risultati dell'indagine riguarda la forte disponibilità manifestata dai soggetti coinvolti a partecipare a iniziative collaborative. In particolare, emergono opportunità per:

- attori altamente specializzati e già integrati in programmi spaziali;
- organizzazioni con competenze rilevanti ma ancora in fase di posizionamento strategico.



LIVELLO DI COINVOLGIMENTO ATTUALE IN INIZIATIVE AGROSPAZIALI



L'elevato interesse manifestato e la disponibilità a partecipare a iniziative collaborative – incluse progettualità congiunte, partenariati pubblico-privati e condivisione di infrastrutture – rappresentano un elemento chiave per il consolidamento dell'ecosistema.

In questa prospettiva il repository rappresenta non soltanto una mappatura delle risorse esistenti, ma uno strumento operativo a disposizione dei Soci CL.A.N. per favorire networking, progettazione condivisa e sviluppo di nuove collaborazioni.

Conclusioni

L'indagine restituisce l'immagine di un ecosistema nazionale dell'agospazio caratterizzato da elevata qualità scientifica, forte interdisciplinarietà e significativo potenziale di sviluppo.

In particolare, emergono:

- una base di competenze ampia e diversificata;
- la presenza di infrastrutture sperimentali di rilevanza strategica;
- un portafoglio di progettualità in crescita, con integrazione crescente nel contesto europeo e internazionale;
- una diffusa disponibilità alla collaborazione tra ricerca, imprese e istituzioni.

Permangono tuttavia alcune criticità, tra cui la frammentazione delle iniziative, la limitata maturità tecnologica media e la necessità di rafforzare i meccanismi di coordinamento e trasferimento tecnologico.

La valorizzazione di tali risorse e il rafforzamento delle connessioni tra gli attori dell'ecosistema rappresentano elementi chiave per consolidare il ruolo dell'Italia nei programmi nazionali e internazionali dedicati all'agricoltura spaziale, ai sistemi biorigenerativi e alle tecnologie agroalimentari del futuro.

Per il dettaglio delle competenze, delle facilities, dei progetti, dei brevetti e degli asset tecnologici censiti si rimanda al repository dedicato disponibile al link sopra riportato.



ANNEX 2 Telerilevamento, GNSS, trasmissione dati e utilizzo di tecnologie spaziali su macchine agricole

Il presente annesso tecnico è il risultato di un lavoro collaborativo sviluppato nell'ambito delle attività del Cluster Agrifood Nazionale CL.A.N., con il contributo coordinato di soggetti appartenenti al mondo della ricerca, dell'innovazione e dell'industria.

I contenuti del documento sono stati elaborati attraverso la raccolta e sistematizzazione di casi studio proposti direttamente dai seguenti soggetti:

- **Università degli Studi di Torino** – contributo metodologico e applicativo in ambito Earth Observation (caso POMOCLIMA);
- **TICASS** – coordinamento e contributo a casi studio su telerilevamento, digital twin e tecnologie GNSS (olivo Navarra, WADIT, FAIR);
- **Darts Engineering** – sviluppo e applicazione di soluzioni di agricoltura di precisione basate su dati satellitari (OLIWA, monitoraggio basilico);
- **Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)** – contributo scientifico su sistemi avanzati agospaziali e intelligenza artificiale (BIOLUNA);
- **ART-ER** – raccolta e sistematizzazione di casi studio relativi a DSS, piattaforme data-driven, Big Data e applicazioni di telerilevamento (Horta DSS, FAO PLAN-T, AGRO.BIG.DATA.SCIENCE, gestione emergenze alluvionali).

Le schede sono disponibili al seguente link:

<https://drive.google.com/drive/folders/1JNHBgZUCfuS1J2JEY2NdOIHb92umZ0Pm?usp=sharing>

Il coordinamento scientifico e l'impostazione metodologica dell'annesso tecnico sono stati sviluppati sotto la guida di TICASS, con il coordinamento di Giorgio Saio, in collaborazione con ART-ER e con il contributo scientifico di esperti accademici e della ricerca, tra cui Marco Bietresato (Università di Udine), Marco Sozzi (Università di Padova), Cosimo Sarti (Università di Torino e Trento) e Silvana Nicola (Università di Torino). Tale lavoro congiunto ha consentito di definire un quadro metodologico condiviso, finalizzato a garantire coerenza, comparabilità e robustezza tecnico-scientifica dei contenuti, valorizzando al contempo il contributo dei diversi attori coinvolti nel trasferimento tecnologico "dallo spazio alla Terra".

Introduzione

Il presente annesso tecnico raccoglie e sistematizza una selezione di casi studio rappresentativi inerenti all'impiego di tecnologie spaziali e di abilitazione digitale nel settore agroalimentare, nell'ambito del Capitolo 4 – *Dallo Spazio alla Terra*, con specifico riferimento al sottocapitolo dedicato a telerilevamento, GNSS, trasmissione dati e utilizzo di tecnologie spaziali su macchine agricole.

All'iniziativa hanno contribuito soggetti appartenenti al mondo della ricerca, dell'innovazione e dell'industria, che hanno proposto direttamente i casi studio analizzati. In particolare, i contributi provengono da università e enti di ricerca, quali l'Università di Torino e il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), nonché da organismi di innovazione e trasferimento tecnologico come TICASS e ART-ER, e da imprese e PMI innovative, tra cui Darts Engineering. I casi studio presentati coprono un ampio spettro applicativo, includendo soluzioni basate su osservazione della Terra, sistemi di supporto alle decisioni, piattaforme data-driven, tecnologie GNSS



avanzate e applicazioni di intelligenza artificiale, confermando il ruolo centrale di un ecosistema multi-attore nella promozione del trasferimento tecnologico “dallo spazio alla Terra” nel settore agroalimentare.

I contributi raccolti sono stati strutturati attraverso una scheda standardizzata, finalizzata a descrivere in modo omogeneo progetti, tecnologie utilizzate (sia spaziali sia terrestri), attori coinvolti e risultati conseguiti. Tale approccio consente di delineare un quadro comparabile delle principali applicazioni “dallo spazio alla Terra”, evidenziando le modalità di trasferimento tecnologico e il grado di integrazione tra dati satellitari, sistemi intelligenti e pratiche agronomiche avanzate.

Sintesi dei casi studio raccolti

L’analisi dei casi studio evidenzia un ecosistema applicativo ampio e articolato, caratterizzato dall’integrazione di tecnologie di osservazione della Terra, sensoristica distribuita, modelli predittivi e sistemi di supporto decisionale, sviluppato attraverso la collaborazione tra università, centri di ricerca, imprese, agenzie spaziali e organismi pubblici.

1. Integrazione multi-sorgente dei dati

Un elemento ricorrente è l’uso combinato di:

- dati satellitari (es. Copernicus Sentinel, Landsat, PRISMA);
- rilievi da drone ad alta risoluzione;
- sensori in situ e reti IoT;
- dati meteorologici e modelli agro-ambientali.

Tale integrazione multi-scala consente di ottenere informazioni ad alta frequenza temporale e risoluzione spaziale, migliorando il monitoraggio dello stato delle colture, dello stress idrico e delle condizioni ambientali.

2. Applicazioni per l’agricoltura di precisione e resilienza climatica

Diversi casi studio dimostrano l’impiego delle tecnologie spaziali per:

- ottimizzazione dell’irrigazione e della nutrizione colturale;
- gestione dello stress idrico e degli effetti del cambiamento climatico;
- monitoraggio fitosanitario e supporto alla difesa integrata;
- pianificazione delle pratiche agronomiche in funzione delle condizioni locali.

In particolare, l’utilizzo di indici vegetazionali (es. NDVI, NDMI) e modelli predittivi consente di supportare decisioni operative in modo tempestivo e sito-specifico.

3. Sviluppo di sistemi di supporto alle decisioni (DSS) e piattaforme data-driven

Numerosi progetti, sviluppati da centri di ricerca e imprese tecnologiche (es. Horta S.r.l., CRPV/RINOVA, SISTEMA, Darts Engineering), evidenziano la crescente centralità di piattaforme digitali avanzate basate su:

- algoritmi di machine learning e deep learning;
- modelli di bilancio idrico e simulazione agro-climatica;
- sistemi cloud e infrastrutture big data;



- interfacce web per la visualizzazione e l'accesso ai dati.

Questi strumenti trasformano i dati eterogenei in informazioni operative, rendendo possibile una gestione più efficiente e sostenibile delle colture.

4. Innovazioni in GNSS e automazione agricola

Alcuni casi studio, sviluppati anche in collaborazione con imprese specializzate (es. Gter, Spacearth) e programmi ESA, mettono in evidenza applicazioni avanzate di posizionamento satellitare (GNSS), con particolare riferimento:

- alla navigazione autonoma dei mezzi agricoli;
- al miglioramento della robustezza del segnale in condizioni operative complesse;
- allo sviluppo di algoritmi per la mitigazione degli errori e l'aumento della continuità del servizio.

Tali sviluppi risultano fondamentali per l'evoluzione verso sistemi agricoli automatizzati e ad alta precisione.

5. Digital twin, modellistica e gestione delle risorse

Emergono applicazioni orientate alla creazione di modelli digitali (digital twin), sviluppate da consorzi pubblico-privati e distretti tecnologici (es. DTA, CNR, università), in particolare per:

- la gestione delle risorse idriche a scala territoriale;
- la pianificazione agricola basata su scenari climatici;
- la valutazione degli impatti ambientali e produttivi.

Queste soluzioni supportano decisioni strategiche a livello di sistema, coinvolgendo stakeholder istituzionali e autorità di gestione.

6. Applicazioni trasversali e gestione delle emergenze

Le tecnologie spaziali, anche tramite programmi europei come Copernicus e con il coinvolgimento di enti territoriali e consorzi di bonifica, trovano applicazione in ambiti trasversali, tra cui:

- monitoraggio e gestione di eventi estremi (es. alluvioni);
- analisi dell'uso del suolo e degli impatti sulle filiere agricole;
- supporto alle attività di protezione civile e pianificazione territoriale.

Conclusione

Nel complesso, i casi studio analizzati, sviluppati attraverso un'ampia rete di attori, confermano il ruolo centrale delle tecnologie spaziali come fattore abilitante per l'innovazione del settore agroalimentare, evidenziando:

- una crescente integrazione tra dati satellitari, sensoristica e modelli intelligenti;
- lo sviluppo di soluzioni operative per l'agricoltura di precisione e la resilienza climatica;
- il progressivo avvicinamento tra ricerca spaziale e applicazioni terrestri ad alto impatto.



Tali evidenze rafforzano la rilevanza strategica del paradigma “dallo spazio alla Terra”, configurando ambiti chiave per l’innovazione sostenibile e la competitività delle filiere agroalimentari.



SOGGETTI INTERESSATI

Francesca Alfano – Coldiretti

Alina Bisag – ART-ER

Angelo De Bortoli – Clonit S.r.l.

Maria Cristina Di Domizio – Federalimentare

Giulia Galli – Fondazione per il Clima e la Sostenibilità

Francesco Marinello – Università degli Studi di Padova

Roberto Mazzei – Coldiretti

Giai Petit – Università degli Studi di Padova, Dip. Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Nicoletta Piccardo – TICASS

Gennaro Sanzone – Coldiretti

Severino Segato – Università degli Studi di Padova

Antonio Tiberini – CREA

Marco Vieri – Accademia dei Georgofili

