

GIACOMO PIETRAMELLARA*, JUDITH ASCHER*,
MARIA TERESA CECCHERINI*, ANNA LAVECCHIA**

Induzione e mantenimento della fertilità nei suoli extraterrestri

INTRODUZIONE

La sfida più importante che l'agricoltura deve affrontare e vincere in questo primo secolo del terzo millennio è soddisfare le richieste alimentari della crescente popolazione umana, considerando le problematiche ambientali ingenerate dai cambiamenti climatici e dall'inquinamento di aria, acqua e suolo. Un'altra sfida di estremo interesse è l'attivazione di una nuova tipologia di agricoltura, definita *space farming*, per la colonizzazione di pianeti extraterrestri quali, nelle previsioni, Luna e Marte. La sua realizzazione richiederà il concorso di varie discipline diventando una "palestra delle scienze biologiche" che finalizza gli studi sulla *funzionalità* dei suoli estremi all'induzione e mantenimento dei principali cicli dei nutrienti nei suoli extraterrestri in modo da renderli coltivabili. La ridotta gravità e pressione atmosferica, la possibile presenza di gas tossici, l'assenza di ossigeno, le basse temperature e la presenza di radiazioni ionizzanti e ultraviolette (UV), che caratterizzano i pianeti extraterrestri, confinano lo *space farming* in strutture protette paragonabili alle serre (Cockell, 2010). L'eccessiva finezza dei sedimenti assieme alla prevalente microporosità, l'assenza della frazione azotata e di acqua allo stato liquido, la frequente presenza di sali solubili ed elementi tossici quali metalli pesanti, cloruri e superossidi (Yen et al., 2000) rendono l'induzione della *fertilità* nei suoli extraterrestri una vera sfida scientifico-tecnologica, le cui ricadute potranno aiutare a soddisfare il crescente fabbisogno alimentare della popolazione umana con soluzioni più eco-sostenibili.

* Università di Firenze, DiPSA

** Università di Bari "Aldo Moro"

Da considerare infine la nostra scarsa conoscenza dei suoli extraterrestri in termini di rappresentatività delle tipologie presenti sui singoli pianeti e la mancata utilizzazione di procedure standardizzate di campionamento, di conservazione e di studio (Chevrier et al., 2007; Vaniman et al., 2004; Certini and Scalenghe, 2010).

INDUZIONE DELLA FERTILITÀ NEI SUOLI EXTRATERRESTRI

L'induzione della *fertilità* avviene attraverso l'attivazione dei principali cicli dei nutrienti in modo da consentire al suolo di svolgere il suo ruolo di bioreattore che degrada e rimette a disposizione gli elementi necessari al mantenimento della vita. Questo è reso possibile dalla induzione di una buona *fertilità chimico-fisica* del suolo che permetta la sopravvivenza della componente biotica, con conseguente esplicitazione delle sue funzioni di degradare la sostanza organica (*fertilità biologica*). Un primo passaggio per l'induzione della *fertilità* nei suoli extraterrestri è la progressiva aggiunta nelle serre dei principali componenti necessari per riprodurre le condizioni ambientali terrestri ottenuti dalle attrezzature di supporto presenti sulle astronavi. Tali attrezzature sono costituite da bioreattori utilizzati in serie per la degradazione dei reflui solidi e liquidi, la loro desalinizzazione, la purificazione di acqua e aria e l'ottenimento degli elementi nutritivi primari da riciclare (Hendrickx et al., 2006; Hendrickx and Mergeay, 2007; Yamashita et al., 2005).

Induzione della fertilità chimico-fisica

Alla base della formazione di un suolo ci sono i processi pedogenetici che prevedono l'alterazione della roccia madre (*weathering*) tramite l'azione congiunta nel tempo del clima e della componente biotica, rappresentata dagli organismi che vivono nel suolo e dalle piante, regolata dalla topografia del luogo (Certini and Scalenghe, 2010). Tale sinergia permette poi la strutturazione del suolo attraverso l'unione dei vari componenti minerali e organici che lo caratterizzano in aggregati con la formazione di una micro e macroporosità con vantaggi sulla circolazione dell'acqua e dei gas che consente al suolo di trattenere acqua, ma non in eccesso, e di avere una buona diffusione dei gas (ossigenazione). L'induzione della strutturazione nei suoli extraterrestri consentirebbe di attenuare gli effetti negativi ingenerati dalla bassa gravità (1/6 e 1/3 di quella terrestre sulla Luna e su Marte, rispettivamente)

relativamente alla eccessiva finezza, alla microporosità e conseguente bassa diffusione di acqua e gas. La presenza dell'acqua e soprattutto la sua libera circolazione sono requisiti fondamentali per la formazione del suolo (*weathering*) e per l'induzione e il mantenimento della *fertilità*, essendo il principale vettore di traslocazione di materia ed energia e il mezzo dove avvengono la maggior parte delle reazioni chimiche e biochimiche nel suolo (Certini and Scalenghe, 2010). A tale riguardo Maggi and Pallud (2010) hanno simulato su di un suolo terrestre gli effetti della bassa gravità combinati con la microporosità, caratterizzante i suoli marziani, relativamente alle necessità irrigue e di concimazione azotata per la coltivazione del pomodoro. I risultati hanno evidenziato una forte riduzione del *soil leaching* assieme a un incremento della concentrazione di soluti nella soluzione circolante del suolo con conseguente incremento della biomassa microbica e del suo livello di attività. Interessanti sono anche i dati relativi alla concimazione azotata a base di nitrati. Infatti, a fronte di una maggiore concentrazione dovuta alla lenta circolazione dell'acqua nel suolo, non si è evidenziato un pari aumento del tempo di disponibilità dei nitrati per le piante espresso come tempo di residenza nella rizosfera. Questo a causa della minore circolazione dell'acqua che, in seguito all'elevata attività della comunità microbica, ha portato all'instaurazione di condizioni anaerobiche con trasformazione dei nitrati in forme azotate gassose. Le conseguenze agronomiche di tali risultati consistono in minori richieste d'irrigazione dei suoli marziani (circa 40-70% meno), accompagnate da minori richieste di fertilizzazione azotata (inferiore del 30-50%).

La scelta del luogo dove insediare la base deve considerare l'esposizione (irraggiamento), le caratteristiche del suolo, quali matrice litologica, tessitura e struttura (presenza di argille e livello di finezza), la presenza e concentrazione di sali, di eventuali inquinanti, la presenza di fonti di acqua e la sua qualità.

Nel caso di limitato spessore del suolo e di necessità di reperire e concentrare gli elementi nutritivi, quali cationi essenziali (Ca, Mg, Fe, K) e microelementi (Cu, Mo, Zn) è possibile prevedere un primo intervento di *weathering* biologico delle rocce attraverso un reattore caratterizzato dalla presenza di un selezionato inoculo batterico di specie capaci di operare il *biomining*, cioè la degradazione delle rocce con liberazione dei costituenti e formazione di una frazione caratterizzata da una tessitura più fine. Questo passaggio può essere convenientemente abbinato alla possibilità di ottenere anche energia sotto forma di elettricità attraverso la trasformazione del reattore per il *biomining* in una *Microbial Fuel Cell* (MFC). Questo è possibile posizionando nel bioreattore un catodo e un anodo e rivestendo la superficie del catodo con un biofilm di batteri anaerobi capaci di operare il trasferimento degli elettroni,

ottenuti dall'utilizzazione dei substrati minerali liberati dal *biomining* e dalla eventuale aggiunta di sostanza organica, al catodo (Cockell, 2010; Olosson-Francis and Cockell, 2010). Una ulteriore alternativa consiste nell'utilizzo di organismi pionieri quali i licheni (simbionti derivanti dall'associazione di un cianobatterio o un'alga con un fungo) che possono degradare la roccia madre creando suolo, rendendo biodisponibili i micro e macro nutrienti presenti nelle rocce, ad aumentando il contenuto di sostanza organica e azoto tramite gli essudati radicali e successivamente le loro spoglie (Yamashita et al., 2005).

Relativamente alla eccessiva finezza dei suoli è possibile operare un miglioramento attraverso la formazione di una crosta superficiale utilizzando inoculi di cianobatteri anaerobi fotosintetizzanti e alghe capaci di formare biofilm attraverso l'estrusione di sostanze esopolimeriche (EPS). Tali sostanze, costituite da un mix di esopolisaccaridi, acidi nucleici e altri acidi organici, sono capaci di agire a livello degli interstizi aggregando le varie particelle di suolo con formazione di una crosta organo-minerale e conseguente riduzione della finezza del suolo (Viles, 2008). Questo processo, sebbene limitato all'orizzonte più superficiale, rappresenta anche un primo passo verso la formazione degli aggregati e quindi di una struttura del suolo che permetta di incrementare il livello di macroporosità necessario in condizioni di bassa gravità a migliorare la circolazione dei soluti e dei gas nel suolo. Un'ulteriore opportunità consiste nell'aggiungere al suolo sostanza organica compostata in modo da favorire i fenomeni di aggregazione e quindi di strutturazione del suolo. In questo caso è fortemente consigliata l'adozione di tecniche di compostaggio aerobiche ipertermofile per eliminare i rischi di diffusione di patologie dell'apparato gastro-intestinale legate alla forte carica coliforme che caratterizza i reflui organici da feci (Yamashita et al., 2005). Infine, Dejbhi-mon e Wada (2005) hanno suggerito la possibilità di utilizzare l'alcool polivinilico (PVA) come agente strutturante.

Relativamente all'utilizzo dei residui organici umani è da considerare la loro ricchezza in sali sodici che risulta particolarmente accentuata nelle urine, assieme a una forte componente azotata. Sarà quindi necessario prevedere un trattamento separato per i reflui liquidi ricorrendo a piante marine quali le alghe (*Ulva lactuca*) capaci di trattenere alte concentrazioni di sodio (Na) a seguito della capacità di assimilare elevate quantità di potassio (K) in modo da mantenere costante il rapporto Na/K intracellulare (Yamashita et al., 2009). Da considerare anche l'opportunità di utilizzare le *MFC* che, oltre a essere fonte di energia (elettricità e idrogeno) e di acqua (da idrogeno e ossigeno), possono anche desalinizzare i reflui organici (Cao et al., 2009; Shaposhnik and Kesore, 1997; Mehanna et al., 2010).

Riguardo alla composizione elementare dei suoli extraterrestri (Luna e Marte) le diverse missioni hanno fornito sufficienti informazioni ma pochi sono i dati relativi alla eventuale composizione chimica della soluzione del suolo. Dati, questi ultimi, di estrema utilità in relazione alla loro rilevanza nei processi biologici del suolo legati all'attività degli organismi che vi abitano o che da esso traggono sostentamento (Hecht et al., 2009). Diretta conseguenza della composizione chimica della soluzione del suolo è il valore di pH che varia a seconda delle caratteristiche pedologiche da posto a posto. In terreni dominati da jarosite si hanno pH acidi, mentre in altri caratterizzati dalla presenza di carbonati, soprattutto se sodici, si hanno valori di pH alcalini. Un sistema proposto per la neutralizzazione dei suoli troppo acidi è quello di applicare sostanza organica derivante dalla parte edibile di piante salino-tolleranti e iperaccumulatrici in modo da contrastarne l'acidità. Nel caso invece di suoli affetti da alcalinità si può provvedere con l'aggiunta di polveri di rocce acide quali l'olivina o prevedere l'addizione di torba che con il loro pH acido possono contrastare l'alcalinità dei suoli (Yamashita et al., 2005).

La possibile presenza in concentrazioni elevate e biodisponibili di elementi tossici, quali i metalli pesanti, possono richiedere l'applicazione di tecniche di biorimediazione basate sull'utilizzo della componente biotica e abiotica. Relativamente alla componente biotica di interesse sono le piante resistenti e/o iperaccumulatrici e la componente microbica. Di estrema utilità a questo riguardo sono gli studi di biogeografia e di geomicrobiologia, rivolti alla identificazione di comunità microbiche caratteristiche dei suoli estremi e alla successiva identificazione tra queste di batteri capaci di operare la dissoluzione (*bioleaching* e/o *biomining*) e/o la degradazione degli elementi tossici presenti nel suolo. Nel primo caso però la ridotta percolazione dell'acqua nei suoli extraterrestri, con conseguente aumento del tempo di persistenza (biodisponibilità) e di concentrazione dei soluti tossici, obbliga l'applicazione di tali tecniche *ex situ* in appositi bioreattori. Relativamente alla degradazione si riporta ad esempio la scoperta nei suoli desertici di Atacama di particolari batteri anaerobi capaci di degradare i sali perclorici, caratterizzati da una elevata idrofilia e da sospetta attività ossidante (Hecht et al., 2009; Thrash et al., 2010a, b; Wu et al., 2001). Tali studi permettono inoltre di implementare la nostra capacità di sfruttare le risorse locali, definita *in situ resources utilization* (ISRU) (Sridhar et al., 2000), per il reperimento di elementi primari utilizzando la tecnica del *biomining* e/o *bioleaching* (Crockell, 2010). Relativamente all'acqua che può essere contenuta nelle rocce è da considerare l'eventualità che risulti ricca in sali quali carbonati, solfati e cloruri che oltre a renderla non potabile ne compromettono l'utilizzo per scopi colturali. A questo riguardo

di estrema utilità può essere pretrattare le acque utilizzando le stesse tecniche applicate per la gestione dei reflui organici liquidi, ricchi di sali sodici, basate sul bio-filtraggio con alghe marine della specie *Ulva lactuca* (Kanazawa et al., 2008; Oshima et al., 2007; Yamashita et al., 2006), o sull'utilizzo delle *MFC* (Cao et al., 2009; Shaposhnik and Kesore, 1997; Mehanna et al., 2010).

Induzione della fertilità biologica

Per l'induzione dei cicli degli elementi nutritivi un contributo determinante è atteso dai microrganismi fotosintetizzanti come primi produttori di carbonio organico da CO_2 con induzione del ciclo del carbonio nel suolo. Candidati per tale funzione sono i cianobatteri (*Arthrospira platensis*), microrganismi fotosintetizzanti anaerobi capaci di sopportare condizioni ambientali estreme come temperature basse, scarsa disponibilità idrica e assenza di ossigeno (Letho et al., 2006), anche se molti sono caratterizzati dal produrre in alcune fasi del ciclo vitale la cianotosina, sostanza tossica (Horneck et al., 2003; Letho et al., 2006).

Relativamente alla componente microbica, essenziale per l'attivazione dei cicli degli elementi nutritivi, di notevole importanza è la procedura di preparazione in termini di selezione e rappresentatività dell'inoculo da utilizzare e delle modalità di applicazione al suolo.

La selezione delle specie con cui comporre l'inoculo si deve basare sui principali indici che caratterizzano le comunità microbiche del suolo e cioè ricchezza (*richness*), rappresentatività (*evenness*), ridondanza funzionale (*redundancy*) e capacità di consorzio (*microbial consortium*). Particolare attenzione deve essere posta a quelle reazioni di trasformazione garantite da un ridotto numero di specie microbiche, per questo definite *key stone species*, che vanno senz'altro inserite nell'inoculo. Di estrema rilevanza anche considerare il ruolo delle specie rare, di estrema difficoltà da rilevare, isolare e coltivare, ma essenziali nel garantire alla comunità microbica del suolo plasticità funzionale (Zengler et al., 2002). Un ulteriore fattore da valutare è il rapporto tra microrganismi specialisti e generalisti (*r-strategy/k-strategy*) (Panikov, 1999) tenendo presente che le comunità microbiche tendono a privilegiare i generalisti (*r-strategy*) nelle prime fasi di colonizzazione, per poi favorire gli specialisti (*k-strategy*). L'estrema rilevanza ecologica di tali parametri è esplicitata dal fatto che permettono alla comunità microbica del suolo di mantenere le sue funzioni attive anche cambiando la composizione in termini di presenza/assenza e di *richness* e *redundancy* in conseguenza di mutate condizioni

ambientali (pH, umidità, temperatura, salinità, alcalinità). Un fondamentale contributo è atteso dagli studi di biogeografia che, attraverso approcci *meta-omici* (*metagenomici*, *metascrittomici* e *metabolomici*), compara le comunità microbiche di suoli diversi per composizione e funzionalità, distinguendo quelle comuni (*core*) da quelle caratteristiche (*transposable*) evolutesi in relazione ai fenomeni di adattamento ambientale (Fierer and Jackson, 2006).

Nella preparazione degli inoculi, ma anche nella previsione della evoluzione dell'ecosistema isolato nelle serre dello *space farming* (vedi Mantenimento della fertilità nei suoli extraterrestri) rilevante è il contributo atteso dagli studi sulle strategie di adattamento delle comunità microbiche basate sulla diversificazione del rischio (*risk-spreading*) per sopperire alla inefficienza dei "normali" meccanismi di regolazione genetica che richiedono tempo. Il *risk-spreading* punta su una popolazione geneticamente identica, ma che differisce nella capacità di adattarsi ai cambiamenti ambientali in modo da garantire sempre la sopravvivenza della specie rispondendo più velocemente ai cambiamenti importanti che avvengono nell'ambiente. I batteri capaci di operare il *risk-spreading* sono definiti *bet hedging* e il loro vantaggio evolutivo aumenta quanto più drastici e imprevedibili sono i cambiamenti delle condizioni ambientali. Questa strategia è stata recentemente dimostrata in *Pseudomonas fluorescens*, un batterio che si trova comunemente nel suolo e nell'acqua, alcuni ceppi del quale sono coinvolti nella protezione delle piante dai parassiti (Beaumont et al., 2009).

Nella preparazione dell'inoculo o degli inoculi da utilizzare sequenzialmente per indurre la fertilità nei suoli extraterrestri è infine importante considerare anche le caratteristiche dei microrganismi selezionati per resistere alle condizioni di viaggio, rimanere inattivi per lungo tempo e successivamente alla riattivazione dimostrare un'adeguata *soil competence* in termini di resistenza alle condizioni ambientali del luogo di rilascio e alla capacità di competere con altri microrganismi (Cockell, 2010).

MANTENIMENTO DELLA FERTILITÀ NEI SUOLI EXTRATERRESTRI

Nella successiva fase di mantenimento della fertilità è fondamentale la capacità di gestire i processi evolutivi a cui l'ecosistema suolo andrà inevitabilmente incontro. Indicazioni utili sono attese dagli studi inerenti l'evoluzione dinamica delle comunità microbiche in ambienti estremi e isolati, caratterizzati da un limitato numero di specie e da parametri ambientali simili a quelli attesi nei suoli extraterrestri destinati allo *space farming*. I risultati fino a ora ottenuti

evidenziano come la stabilità del biosistema dipende dal tasso di mutazione adattativa (*adaptive mutation rate*) e soprattutto dal trasferimento genetico (*gene transfer*), ritenuto in ambienti estremi il fattore dominante. Tale dominanza è dovuta alla diminuita attività ed efficienza del sistema di riparazione del DNA (*mismatch repair system*) indotta nei microrganismi dalle condizioni ambientali dei suoli estremi con conseguente incremento tasso di mutazione. In proposito è utile ricordare che la riparazione del DNA è un processo che opera costantemente nelle cellule ed è essenziale alla sopravvivenza in quanto protegge il genoma da danni e mutazioni, spesso nocive. Tale eventualità si tradurrebbe in un incremento del rateo di speciazione e quindi di insorgenza di nuove specie con variazione del rapporto tra specie promiscue e ipervariabili, originatesi rispettivamente dalla ricombinazione di genotipi diversi o divergenti per mutazione adattativa. In assenza di stress ambientali la presenza di specie promiscue si aggira intorno allo 0,01% della comunità (Roberts et al., 2004).

Relativamente alle strategie adattative degli organismi gli studi sulle successioni ecologiche hanno individuato due principali strategie evolutive definite in relazione alla convenienza di una specie a diventare dominante (*positive frequency dependent selection*) oppure a ridurre la sua presenza a livello di specie rara (*negative frequency dependent selection*) al variare delle condizioni ambientali e del livello di competizione tra le specie. Importante è considerare il rapporto tra funzionalità dell'ecosistema e biodiversità che può risultare non dipendente dalla *richness* (*null hypothesis*), oppure dipendente dalla *richness* (*rivet hypothesis*). Nel caso della *rivet hypothesis* si devono inoltre differenziare i casi in cui la diminuzione della *richness* (*biodiversity erosion*) non altera la funzionalità dell'ecosistema fino a un livello soglia di riduzione (*redundant species hypothesis*) o l'opposto (*negative frequency dependent selection*), oppure non risulta prevedibile (*idiosyncratic hypothesis*) (Roberts et al., 2004).

Come conseguenza pratica si deve quindi considerare la necessità di monitorare continuamente sia gli ambienti dedicati allo *space farming* sia gli ambienti adibiti a ospitare i coloni spaziali. In particolare si dovrà porre attenzione all'eventualità che per *gene transfer* un microrganismo si trasformi in patogeno e anche all'eventualità che, a seguito della ridotta capacità di difesa per stress ambientali sia delle piante che degli uomini, si possa avere un incremento di infezioni da patogeni opportunisti, cioè normalmente non virulenti (Kozyrowska et al., 2006). A tale proposito potrebbero essere di estrema utilità le tecniche di bio-compostaggio che, tramite l'aggiunta al compost di *plant growth promoting bacteria* e di antagonisti naturali di eventuali patogeni presenti nel suolo possono aumentare la capacità di mantenimento della fertilità dei suoli.

Da considerare inoltre l'eventualità descritta dagli studi di stechiogenomica (*stoichiogenomic*) sulla insorgenza di variazioni nella composizione delle principali molecole che compongono gli acidi nucleici a seguito di variazioni nella disponibilità dei nutrienti (N, P). Tali variazioni inizialmente non sembrano causare variazioni nella funzionalità degli organismi, che però potrebbero insorgere nel tempo esercitando così un effetto evolutivo (Elser et al., 2011).

Come indicazione generale possiamo dire che aumentando la *richness* sia dell'inoculo che successivamente dell'ecosistema si diminuiscono i rischi di insorgenza di mutazioni e/o di invasione da specie aliene a seguito della elevata competizione ambientale. Inoltre, tale requisito garantisce al sistema una migliore capacità adattativa agli stress ambientali che si traduce in una maggiore capacità di resistere (*resistence*) e di ripristinare le funzioni (*resilience*) dopo uno stress mantenendo a livelli accettabili sia la *richness* (*persistence*) che la *evenness* delle popolazioni dominanti (Roberts et al., 2004).

Esiste infine la possibilità di inquinamento genetico delle possibili forme di vita indigene, che può essere drasticamente ridotto evitando di disperdere nell'ambiente i rifiuti della base (Kozyrowska et al., 2006; Fajardo-Cavazos et al., 2010; Olosson-Francis and Cockell, 2010). Il *planetary protection concept* proposto dal Committee on Space Research (COSPAR) riguarda esplicitamente la prevenzione di possibili eventi di inquinamento biologico con appositi interventi da pianificare specificamente sul profilo di ogni missione e sulle caratteristiche ambientali del pianeta interessato (Rummel, 1989; DeVincenzi, 1992). A tale proposito è interessante citare i lavori di Fajardo-Cavazos et al. (2007), Friedberg (2003), Friedberg et al. (2006), e Schuerger (2006), relativi alla sopravvivenza di batteri e molecole di DNA extracellulare presenti sulle superfici di una astronave terrestre atterrata su Marte, e sul connesso rischio di inquinamento dell'eventuale microflora autoctona del pianeta. Di estrema attualità è l'articolo di Bianciardi et al. (2012) che, dalla rielaborazione dei dati degli esperimenti eseguiti dalle sonde Viking sul suolo marziano alla ricerca di forme di vita, ipotizza la presenza di vita microrganica nei suoli del pianeta rosso.

CONCLUSIONI

Allo stato attuale delle nostre conoscenze e possibilità tecnologiche l'induzione della fertilità nei suoli extraterrestri e più in generale lo *space farming*

appare un obiettivo difficile da raggiungere ma non impossibile. Questo relativamente ai pianeti extraterrestri caratterizzati da suoli geologicamente e pedologicamente simili a quelli terrestri, seppure estremi. Tali suoli infatti hanno tutte le potenzialità per diventare fertili presentando come principale ostacolo la marcata finezza con prevalente microporosità, la presenza di sali e di composti tossici (superossidi). Una delle principali cause di incertezza è poi dovuta alla nostra capacità di reperire *in situ* risorse fondamentali quali acqua, ossigeno ed elementi nutritivi quali cationi essenziali e microelementi. Questo in considerazione della limitata capacità di riciclare le risorse primarie evidenziata fino a oggi da tutti i sistemi di supporto vitale progettati e utilizzati sulle basi spaziali. Da rilevare infine che al momento non sono disponibili dati di coltivazione *in situ* su suoli extraterrestri ma solo dati di coltivazioni nelle stazioni spaziali orbitali utilizzando substrati artificiali, oppure di simulazioni di coltivazioni in condizioni extraterrestri utilizzando suoli terrestri.

Doveroso però constatare che le previste ricadute delle tecniche agronomiche adottate nello *space farming* permetteranno un più efficiente sistema di coltivazione che potrebbe consentire, in un prossimo futuro, la messa a coltura di terre marginali, fornendo così un prezioso contributo al soddisfacimento delle crescenti richieste di alimenti da parte della popolazione terrestre. Queste tecnologie di coltivazione indoor forniranno inoltre un prezioso contributo allo sviluppo delle serre verticali, strumento fondamentale di agricoltura urbana per soddisfare le esigenze alimentari delle future megalopoli. In conclusione, parafrasando un noto detto popolare, la sfida tecnologica rappresentata dallo *space farming* si potrebbe definire inizialmente come “dalle stalle alle stelle” per poi trasformarsi, grazie alle ricadute tecnologiche sulle attività di *resource managing* sulla terra, in “dalle stelle alle stalle” ma con significato, si spera, decisamente opposto!

RIASSUNTO

Riguardo al sostentamento degli equipaggi delle future basi su pianeti extraterrestri le odierne tecnologie sviluppate per le basi orbitali e per i possibili viaggi interplanetari non risultano adeguate a causa della loro caducità. L'unica possibilità è di indurre nei suoli extraterrestri la *fertilità* in modo da ingenerare in tali suoli la capacità di sostenere la vita che caratterizza i suoli terrestri. La *fertilità* di questi ultimi è legata alla capacità di degradare praticamente tutto tramite la mineralizzazione in modo da riciclare i principali elementi nutritivi, di purificare le acque e di immagazzinare carbonio attraverso il processo di umificazione. Le modalità di induzione della *fertilità* possono variare con le condizioni pedo-climatiche e sono definite con il termine di *funzionalità*. La *funzionalità* conferisce al suolo la capacità di mantenere (*resistenza*) e/o di ripristinare (*resilienza*) la

fertilità a seguito di situazioni ambientali sfavorevoli, anche persistenti nel tempo, ed è il risultato di milioni di anni di evoluzione della vita sulla terra.

Lo *space farming* consiste nell'indurre e mantenere la *fertilità* nei suoli extraterrestri in modo da coltivarci piante nonostante i fattori ambientali avversi che li caratterizzano quali la ridotta diffusione dei gas e dei soluti, dovuta all'azione combinata della bassa gravità e della microporosità, i valori estremi di pH, la finezza degli orizzonti superficiali, l'assenza di azoto e di acqua disponibile, la possibile contaminazione da metalli pesanti, la presenza di sali a elevata igroscopicità e di radiazioni a elevata energia (ionizzabili e ultraviolette).

In conclusione possiamo affermare che l'agricoltura spaziale è possibile ma la sua realizzazione richiederà un notevole sforzo da parte degli esperti per ottimizzare le sinergie delle complesse interazioni che caratterizzano microrganismi e piante nel suolo in modo da ingenerare fertilità nei suoli extraterrestri, ambienti totalmente differenti da quelli terrestri dove essi si sono sviluppati e vivono.

ABSTRACT

Concerning the life maintenance of a crew on extraterrestrial planetary bases, the technologies currently used in space ships are characterized by caducity, resulting thus inappropriate. In this context, soil, which is the universal substratum sustaining the growth of autotrophic organisms on Earth, shall necessarily be used to permit the life maintenance of human colonies on extraterrestrial planets.

The main functions of soil that sustain life on Earth, are represented by its capacity to degrade almost everything by mineralization, thus recycling the principal elements, to purify water and to store carbon by humification processes. This capacity is defined *fertility* and the pathway to obtain it is termed *functionality* and could change in relation to the environmental conditions, conferring to soil an impressive capacity of resistance and resilience, as the results of billion of years of life evolution.

Space farming consist in the induction and maintenance of *fertility* to crop extraterrestrial soils considering their negative environmental characteristics such as the low gas and water diffusion due to the combined effects of low gravity and microporosity, the extreme pH values, the presence of a dusty top layer, the practically absence of nitrogen and available water, the possible contamination by heavy metals, the presence of highly hygroscopic salts, superoxides and highly energetic radiations.

In conclusion, *space farming* will be possible but the experts of the complex interactions between soil, plant, and microorganisms have certainly to work hard for optimizing their synergy in order to degrade, recycle and utilize nutrients in extraterrestrial soils, that represent physical systems different from those they presently live in.

BIBLIOGRAFIA

- BEAUMONT H.J., GALLIE J., KOST C., FERGUSON G.C. AND RAINEY P.B. (2009): *Experimental evolution of bet hedging*, «Nature», 462, pp. 90-93.
- BIANCIARDI G., MILLER J.D., STRAAT P.A., GILBERT V. LEVIN G.V. (2012): *Complexity Analysis of the Viking Labeled Release Experiments*, «International Journal of Aeronautical and Space Sciences», 13 (1), pp. 14-26.

- CAO X., HUANG X., LIANG P., XIAO K., ZHOU Y., ZHANG X. AND LOGAN B.E. (2009): *A new method for water desalination using microbial desalination cells*, «Environ. Sci. Technol.», 43(18), pp. 7148-7152.
- CERTINI G. AND SCALENGHE R. (2010): *Do soils exist outside Earth?*, «Planetray and Space Science», 58, pp. 1767-1770.
- CHEVRIER V., POULET P., BIBRING J.-P. (2007): *Early geochemical environment of Mars as determined from thermodynamics of phyllosilicates*, «Nature», 448, pp. 60-63.
- COCKELL C.S. (2010): *Geomicrobiology beyond Earth: microbe-mineral interactions in space exploration and settlements*, «Trends in Microbiology», 18, pp. 308-314.
- DE VINCENZI D.L. (1992): *Planetary protection issues and the future of exploration of Mars*, «Advances in Space Research», 12 (4), pp. 121-128.
- DEJBHIMON K. AND WADA H. (2005): *Improvement of the saline soil in the northeast Thailand using polyvinyl alcohol (PVA)*, in *Proceeding of tropical sandy soil for sustainable agriculture, a holistic approach for sustainable development of problem soils in the Tropics*, Khon Kaen, Thailand 27th nov.-2nd dic., pp. 123-128.
- ELSER J.J., ACQUISTI C., AND KUMAR S. (2011): *Stoichiogenomics: the evolutionary ecology of macromolecular elemental composition*, «Trends in Ecology and Evolution», 26 (1), pp. 38-44.
- FAJARDO-CAVAZOS P., SCHUERGER A.C. AND NICHOLSON W.L. (2010): *Exposure of DNA and bacillus subtilis spores to simulated martian environments: use of quantitative PCR to measure inactivation rates of DNA to function as a template molecule*, «Astrobiology», 10, pp. 403-410.
- FAJARDO-CAVAZOS P., SCHUERGER A.C., AND NICHOLSON W.L. (2007): *Testing interplanetary transfer of bacteria by natural impact phenomena and human spaceflight activities*, «Acta Astronaut.», 60, pp. 534-540.
- FIERE N., AND JACKSON R.B. (2006): *The diversity and biogeography of soil bacterial communities*, «Proceeding of the national Academi of Sciences», 103 (3), pp. 626-663.
- FRIEDBERG E.C. (2003): *DNA damage and repair*, «Nature», 421, pp. 436-440.
- FRIEDBERG E.C., WALKER G.C., SIEDE W., WOOD R.D. AND SCHULTZ R. (2006): *DNA Repair and Mutagenesis*, 2nd Edition, ASM Press, Washington DC. ISBN 978-1-55581-319-2.
- HECHT M.H., KOUNAVES S.P., QUINN R.C., WEST S.J. YOUNG S.M., MING D.W., CATLING D.C., CLARK B.C., BOYNTON W.V., HOFFMAN J., DEFLORES L.P., GOSPODINOVA, K., KAPIT J., SMITH P.H. (2009): *Detection of Perchlorate and the Soluble Chemistry of Martian Soil at the Phoenix Lander Site*, «Science», 325, pp. 64-67.
- HENDRICKX L., DE WEVER H., HERMANS V., MASTROLEO F., MORIN N., WILMOTTE A., JANSSEN P., MERGEAY M. (2006): *Microbial ecology of the closed artificial ecosystem MELiSSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative): Reinventing and compartmentalizing the Earth's food and oxygen regeneration system for long-haul space exploration missions*, «Research in Microbiology», 157, pp. 77-86.
- HENDRICKX L., MERGEAY M. (2007): *From the deep sea to the stars: human life support through minimal communities*, «Curr. Opin. Microbiol.», 10, pp. 231-237.
- HORNECK G., FACIUS R., REICHERT M., RETTBERG P., SEBOLDT W., MANZEY D., COMET B., MAILLET A., PREISS H., SCHAUER L., DUSSAP C.G., POUGHON L., BELYAVIN A., REITZ G., BAUMSTARK-KHAN C., GERZER R. (2003): *HUMEX, a study on the survivability and adaptation of humans to long-duration exploratory missions*, ESA SP 1264, ESA-ESTEC Noordwijk.

- KANAZAWA S., ISHIKAWA Y., TOMITA-YOKOTANI K., HASHIMOTO H., KITAYA Y., YAMASHITA M., NAGATOMO M., OSHIMA T., WADA H. (2008): *Space agriculture for habitation on Mars with hyper-thermophilic aerobic composting bacteria*, «Advances in Space Research», 41, pp. 696-700.
- KOZYROVSKA N.O., LUTVYNENKO T.L., KORNIICHUK O.S., KOVALCHUK M.V., VOZNYUK T.M., KONONUCHENKO O., ZAETZ I., ROGUTSKYY I.S., MYTROKHYN O.V., MASHKOVSKA S.P., FOING B.H., KORDYUM V.A. (2006): *Growing pioneer plants for a lunar base*, «Advances in Space Research», 37, pp. 93-99.
- LEHTO K.M., LEHTO H.J., KANERVO E.A. (2006): *Suitability of different photosynthetic organisms for an extraterrestrial biological life support system*, «Research in Microbiology», 157, pp. 69-76.
- MAGGI F. AND PALLUD C. (2010): *Space agriculture in micro- and hypo-gravity: A comparative study of soil hydraulics and biogeochemistry in a cropping unit on Earth, Mars, the Moon and the space station*, «Planetary and Space Science», 58, pp. 1996-2007.
- MEHANNA M., SAITO T., YAN J., HICKNER M., XIAOXIN C., HUANG X. AND LOGAN B.E. (2010): *Using microbial desalination cells to reduce water salinity prior to reverse osmosis*, «Energy Environmental Science», 3 (8), pp. 1114-1120.
- OLOSSON-FRANCIS K., COCKELL C.S. (2010): *Experimental methods for studying microbial survival in extraterrestrial environments*, «Journal of Microbiological Methods», 80, pp. 1-13.
- OSHIMA T., MORIYA T., KANAZAWA S., YAMASHITA M. (2007): *Proposal of hyperthermophilic aerobic composting bacteria and their enzymes in space agriculture*, «Biological Science in Space», 21, pp. 121-123.
- PANIKOV N.S. (1999): *Understanding and prediction of soil microbial community dynamics under global change*, «Applied Soil Ecology», 11, pp. 161-176.
- ROBERTS M.S., GARLAND J.L. AND MILLS A.L. (2004): *Microbial Astronauts: Assembling Microbial Communities for Advanced Life Support Systems*, «Microbial Ecology», 47, pp. 137-149.
- RUMMEL J.D. (1989): *Planetary protection policy overview and application to future missions*, «Advances in Space Research», 9 (6), pp. 181-184.
- SCHUERGER A.C., RICHARDS J.F., NEWCOMBE D.A., VENKATESWARAN K. (2006): *Rapid inactivation of seven Bacillus spp. under simulated Mars UV irradiation*, «Icarus», 181, pp. 52-62.
- SHAPOSHNIK V.A. AND KESORE K. (1997): *An early history of electrodialysis with permselective membranes*, «J. Membr. Sci.», 136 (1), pp. 35-39.
- SRIDHAR K.R., FINN J.E., AND KLISS M.H. (2000): *In situ resources utilization technologies for mars life support system*, «Advances in Space Research», 25, pp. 249-255.
- THRASH J.C., AHMADI S., TOROK T., COATES J.D. (2010a): *Magnetospirillum bellicus sp. Nov., a novel dissimilatory perchlorate reducing alphaproteobacterium isolated from a bioelectrical reactor*, «Applied and Environmental Microbiology», 76, pp. 4730-4737.
- THRASH J.C., POLLOCK J.S., TOROK T., COATES J.D. (2010b): *Description of the novel perchlorate-reducing bacteria Dechlorobacter hydrogenophilus gen. nov., sp. nov. and Propionivibrio militaris, sp. nov.*, «Applied Microbiology and Biotechnology», 86, pp. 335-343.
- VANIMAN D.T., BISH D.L., CHIPERA S.J., FIALIPS C.I., CAREY J.W., FELDMAN W.C. (2004): *Magnesium sulphate salts and the history of water on Mars*, «Nature», 431, pp. 663-665.
- VILES H.A. (2008): *Understanding Dryland Landscape Dynamics: Do Biological Crusts Hold the Key?*, «Geography Compass», 2-3, pp. 899-919.

- WU J., UNZ R.F., ZHANG H., LOGAN B.E. (2001): *Persistence of perchlorate and the relative numbers of perchlorate and chlorate respiring microorganisms in natural waters, soils, and wastewater*, «Bioremediation Journal», 5, pp. 119-130.
- YAMASHITA M., ISHIKAWA Y., NAGATOMO M., OSHIMA T., WADA H. AND SPACE AGRICULTURE TASK FORCE (2005): *Space agriculture for manned space exploration on mars*, «Journal of Space technology Sciences», 21 (2), pp. 1-10.
- YAMASHITA M., HASHIMOTO H., WADA H. (2009): *On-site resources availability for space agriculture on Mars*, in Badescu, V. (Ed.), *Mars: Prospective Energy and Material Resources*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 517-542.
- YAMASHITA M., ISHIKAWA Y., KITAYA Y., GOTO E., ARAI M., HASHIMOTO H., TOMITA-YOKOTANI K., HIRAFUJI M., OMORI K., SHIRAISHI A., TANI A., TOKI K., YOKOTA H., FUJITA O. (2006): *An overview of challenges in modeling heat and mass transfer for living on Mars*, «Annals of New York Academy of Sciences», 1077, pp. 232-243.
- YEN A.S., KIM S.S., HECHT M.H., FRANT M.S., MURRAY B. (2000): *Evidence that the reactivity of the martian soil is due to superoxide ions*, «Science», 28, pp. 1909-1912.
- ZENGLER K., TOLEDO G., RAPPE M., ELKINS J., MATHUR E.J., SHORT J.M. AND KELLER M. (2002): *Cultivating the uncultured*, «Proceeding of National Academy of Science», 99 (24), pp. 15681-15686.