

Giornata di studio:

Space Farming.
Un ponte tra fantascienza e realtà
dell'agricoltura del terzo millennio

Firenze, 27 gennaio 2012

NOTA DI REDAZIONE

Alla giornata di studio hanno contribuito anche il prof. Stefano Mancuso con una relazione dal titolo “Adattamento delle piante a condizioni extraterrestri” e il prof. Stefano Pallanti con una relazione dal titolo “Rilevanza della presenza di piante per l’attenuazione dello stress da permanenza prolungata in ambienti artificiali”, delle quali però i relatori non hanno consegnato il testo per la stampa.

Introduzione

L'origine della vita, la capacità di comprendere i parametri ambientali che ne hanno permesso l'evoluzione, le modalità di diffusione sia a livello planetario che interplanetario (Panspermia), abbinate alla comprensione della capacità di adattamento degli organismi viventi anche alle condizioni più estreme costituiscono l'obiettivo principale di tutti i lavori di biologia e astro-biologia. Le ricadute di tali ricerche sulla vita dell'umanità nel futuro prossimo e lontano saranno molteplici e ci permetteranno di poter meglio sfruttare le risorse naturali sia come efficienza di utilizzo sia come capacità di riciclo.

Queste tematiche stanno diventando sempre più importanti in relazione alla capacità dell'umanità di trarre sufficiente sostentamento ed energia per soddisfare la crescente domanda di una popolazione mondiale in crescita esponenziale. Il proliferare delle megalopoli e l'impossibilità di estendere all'infinito le terre coltivate renderanno il nostro mondo sempre più attanagliato da problemi di inquinamento, smaltimento dei rifiuti e drastica diminuzione della superficie agricola procapite, in pratica è come se il mondo rimpicciolisse riducendo le risorse disponibili procapite. La sfida è resa più ardua dai fenomeni indotti dal *climate change* che stanno provocando drastici cambiamenti in varie aree del mondo con notevoli ripercussioni in termini di disponibilità di risorse naturali, soprattutto idriche, di perdita di biodiversità ed erosione dei suoli. La comprensione dei meccanismi di origine e adattamento della vita risulteranno quindi di vitale importanza nello sviluppo delle future strategie del settore agro-alimentare.

L'elevato numero di tematiche coinvolte nell'evoluzione di una nuova concezione dello sfruttamento delle risorse ambientali fortemente caratterizzata

* Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente (DiSPAA)

dalla sostenibilità, tra cui il passaggio da una agricoltura intensiva e non conservativa a una agricoltura più rispettosa dell'ambiente e a esso meglio adattata, rendono tale tematica una vera "palestra delle scienze bio-geologiche".

Relativamente alla necessità di reperire adeguate risorse energetiche, idriche e di materie prime, una strategia che si sta attentamente valutando è quella legata all'esplorazione e sfruttamento di pianeti, asteroidi e anche comete ai fini di uno sfruttamento delle loro risorse minerali e idriche. A tal fine, per consentire alle previste missioni spaziali con equipaggio di poter implementare la capacità operative aumentandone la capacità di auto-sostentamento, si sono progettati sistemi di supporto vitale bio-rigenerativi basati sulle conoscenze della funzionalità degli ecosistemi naturali. In questo modo si sfrutta la capacità del suolo (componente abiotica e biotica) di riciclare rifiuti e rimettere a disposizione le materie prime e depurare l'acqua, in abbinamento con la capacità delle piante di assorbire e organizzare CO_2 producendo alimenti ed emettendo O_2 , assorbire polveri sottili e mantenere un ottimale livello di umidità dell'aria. Queste opportunità naturalmente devono essere sviluppate considerando le particolari condizioni ambientali in cui si troveranno a operare, con particolare attenzione agli effetti dell'assenza di gravità. Infatti condizioni di bassa o zero gravità rappresentano un notevole ostacolo per la fluidodinamica, gli scambi gassosi e lo smaltimento termico dei suoli e delle piante. Un altro problema è rappresentato dalla protezione dalle radiazioni ionizzanti, dalla nostra capacità di fornire un adeguato livello di illuminazione, e dalla necessità di operare efficientemente in spazi molto ristretti in modo da soddisfare le esigenze di mantenimento degli equipaggi. A questo scopo è nato il MELiSSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative), un sistema di supporto vitale biorigenerativo progettato e realizzato dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) per il completo riciclo dei rifiuti solidi, liquidi e gassosi nelle astronavi. Il sistema è basato sulle conoscenze acquisite sui meccanismi di funzionamento dei principali cicli degli elementi nel suolo, delle comunità microbiche coinvolte e sui complessi meccanismi di interazione tra suolo, microrganismi e piante. Principalmente il MELiSSA risulta suddiviso in cinque aree o bioreattori dedicati a: (i) depurazione e riciclo aria, (ii) e acqua, (iii) produzione e stoccaggio degli alimenti, (iv) trattamento dei rifiuti organici (riciclo), e (v) sicurezza equipaggio.

La necessità di sfruttare i sistemi suolo-microrganismi-piante e la conseguente possibilità di utilizzare la piante come integrazione all'alimentazione degli equipaggi ha fatto nascere ed evolvere rapidamente il concetto di *space farming*, che si è rapidamente esteso fino a essere valutato per operare anche per il mantenimento delle future basi umane su pianeti extraterrestri. A tale

fine le conoscenze sulle capacità di adattamento degli organismi viventi alle condizioni più estreme soprattutto in quei suoli che sulla terra sono considerati *planet-simulant* saranno fondamentali per definire e garantire il successo delle strategie di *space farming* da utilizzare per indurre la fertilità nei suoli extraterrestri.

In questo senso gli studi sulle prime fasi di evoluzione dei suoli periglaciali e aridi sono di estremo interesse per capire i meccanismi di adattamento delle comunità microbiche a condizioni ambientali estreme come temperature estremamente basse e scarsa disponibilità idrica. La scienza che si occupa di questa tipologia di studi è la biogeografia che attraverso la caratterizzazione e comparazione in termini di composizione e funzionalità delle comunità microbiche dei suoli ne individua quelle comuni (core) e quelle “caratteristiche”, evolute in relazione a fenomeni di adattamento ambientale (transposable), con approcci meta-genomici e trascrittomici.

Una ulteriore sfida è rappresentata dalla presenza in concentrazioni elevate e facilmente biodisponibili di elementi tossici che richiederanno sia l'applicazione di tecniche di bio-rimediazione che l'utilizzo di piante resistenti e/o iperaccumulatrici e, se il caso, anche la previsione di una successione di piante da pioniere fino a quelle utili per l'alimentazione. Sempre riguardo alla bio-rimediazione di estremo interesse sono gli studi di geomicrobiologia rivolti alla identificazione di batteri capaci di operare il bio-leaching, ossia la dissoluzione degli elementi chimici presenti nei minerali (biomining). Tale applicazione è di estremo interesse per lo *space farming* non solo in termini di remediation (bioleaching) ma anche in termini di approvvigionamento di elementi primari direttamente *in situ* dai rocce extraterrestri.

Come ricordato in precedenza di notevole interesse sono anche gli studi inerenti all'adattamento delle comunità microbiche e delle piante agli effetti della ridotta gravità sulla circolazione della soluzione tellurica acuiti dalla estrema finezza e mancanza di struttura dei suoli extraterrestri. Ulteriori elementi negativi di tali suoli sono rappresentati dalla mancanza della componente azotata unitamente alla presenza di composti salini solubili. Da considerare inoltre il basso livello di ossigeno che caratterizzerà le serre dove si opererà lo *space farming*.

L'insieme delle azioni da intraprendere per consentire l'induzione della fertilità nei suoli extraterrestri sarà di estrema utilità non solo per fornire alimenti agli abitanti della base ma, in senso più ampio, ma anche per la sopravvivenza della base in termini di approvvigionamento e riciclaggio di materie prime e fonti energetiche.

Da non dimenticare infine l'estrema utilità dell'effetto antistress dovuto

alla presenza delle piante in ambienti chiusi.

Relativamente al soddisfacimento delle esigenze alimentari, di estremo interesse sono gli studi di sfruttamento delle piante geneticamente modificate, di insetti, funghi, alghe e batteri come substrato alimentare in grado di completare una dieta prevalentemente vegetariana in termini di amminoacidi, di acidi grassi essenziali e di vitamine.

Di estrema rilevanza saranno inoltre gli studi per la valutazione del grado di deriva genetica delle comunità di organismi in relazione all'isolamento delle basi extraterrestri e come gestire tale fenomeno.

Per la gestione dei rifiuti delle future basi si attingerà agli studi di impatto ambientale e gestione delle discariche e alle tecniche di smaltimento dei reflui organici, come il bio-compostaggio tramite batteri iper-termofili aerobi, che permette di utilizzare substrati estremamente poveri e di arricchire successivamente il compost con plant growth promoting bacteria e antagonisti di eventuali patogeni.

Tali conoscenze si trasformeranno presto in informazioni utili per migliorare le nostre capacità di sfruttamento ecosostenibile delle risorse terrestri, rendendo possibile progettare nuove e più efficienti strategie bio per l'estrazione e/o lo sfruttamento delle risorse locali. Queste capacità, combinate con lo sfruttamento delle risorse dei pianeti extraterrestri, ripagheranno abbondantemente i costi sostenuti per la colonizzazione dei pianeti extraterrestri.

L'intento di questa breve e certamente non esaustiva disamina delle difficoltà e delle conseguenti sfide dello *space farming* è di rappresentare alcune delle difficoltà e soprattutto le potenzialità di questa sfida, che inizialmente saranno one way per poi trasformarsi, una volta attivate in una preziosa fonte di informazioni per migliorare l'efficienza delle pratiche agricole sia in campo che nelle serre e permettere anche di ipotizzare il recupero alle pratiche agricole di suoli estremi quali quelli desertici. In conclusione, parafrasando un noto detto popolare, si potrebbe definire questa sfida inizialmente come “dalle stalle alle stelle” e successivamente “dalle stelle alle stelle”, naturalmente con un significato diverso da quello comunemente attribuito a tale definizione.

RIASSUNTO

Riguardo al sostentamento degli equipaggi delle future basi su pianeti extraterrestri le odierne tecnologie sviluppate per le basi orbitali e per possibili viaggi interplanetari non risultano adeguate a causa della loro bassa capacità di auto sostentamento. L'unica possibilità è rappresentata dalla nostra capacità 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.

Tale capacità è legata alla caratteristica dei soli terrestri di degradare praticamente tutto tramite la mineralizzazione in modo da riciclare i principali elementi, di purificare le acque e di immagazzinare biossido di carbonio attraverso il processo di umificazione. Questa capacità del suolo di permettere e di sostenere la vita è definita *fertilità* ed è generata dal contributo paritetico dagli organismi che abitano nel suolo e dalla sua matrice litologica. Le modalità di induzione della fertilità possono variare con le condizioni pedo-climatiche e sono definite con il termine di *funzionalità* che conferiscono al suolo la capacità di mantenere (*resistenza*) e/o di ripristinare (*resilienza*) la *fertilità* anche in presenza di situazioni ambientali sfavorevoli. Tale capacità è il risultato di milioni di anni di evoluzione della vita sulla terra.

In questi termini con la definizione di agricoltura spaziale (space farming) dobbiamo intendere l'induzione e mantenimento della fertilità nei suoli extraterrestri per il sostentamento degli equipaggi delle basi su pianeti extraterrestri tramite l'utilizzo delle piante in modo da creare un sistema verde (green system) capace di riciclare i rifiuti organici, purificare le acque e l'aria, producendo ossigeno e trasformando il biossido di carbonio in sostanza organica tramite gli organismi foto sintetizzanti, ingenerando la catena alimentare.

In pratica si tratta di indurre e mantenere la fertilità nei suoli extraterrestri in modo da coltivarci piante in ambienti protetti (indoor) considerando tutti i fattori ambientali avversi che caratterizzano tali suoli e in generale l'ambiente sui pianeti extraterrestri. Un esempio di tali difficoltà è rappresentato dall'azione combinata di condizioni di bassa gravità e di microporosità sulle proprietà idrauliche e la funzionalità biogeochimica che caratterizzano i suoli extraterrestri, con effetti sulla diffusione di ossigeno ed il trasporto dei nutrienti. Tali condizioni possono portare a condizioni di anaerobiosi con rischi di soffocamento della comunità microbica aerobica e delle radici con produzione di gas tossici. Altre caratteristiche negative presenti nei suoli extraterrestri sono rappresentate da valori estremi di pH, dalla eccessiva finezza degli orizzonti superficiali, dall'assenza di azoto e di acqua disponibile. Inoltre sono da considerare anche la possibile contaminazione da elevate concentrazioni di metalli pesanti e sali ad elevata igroscopicità. In fine la presenza di radiazioni ionizzabili ad elevato contenuto energetico possono indurre la formazione di superossidi sulla superficie esposte dei minerali.

In alcuni casi è possibile trovare delle condizioni pedo-ambientali idonee a consentire il reperimento *in situ* di alcuni elementi primari. Per esempio nel caso di Marte è possibile il reperimento di biossido di carbonio e tracce di azoto nella sua atmosfera, oltre a potassio e fosforo nella matrice litologica.

In conclusione possiamo affermare che l'agricoltura spaziale è possibile ma la sua realizzazione richiederà un notevole sforzo da parte degli esperti. Tale sforzo sarà soprattutto indirizzato ad ottimizzare le sinergie delle complesse interazioni che caratterizzano microorganismi e piante nel suolo in modo da ingenerare la *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 not self-sustaining, resulting thus inappropriate. In this context, soil, which is the universal substratum for 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 permit to 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 dioxide by humification processes. This capacity to sustain life is defined “fertility” and is generated by the equal contribution of both soil biological components, mainly represented by soil inhabiting organisms, and mineral components. The pathway to obtain fertility 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.

We have thus to consider space farming as the smart soil-plant management for human extraterrestrial base sustainability in order to create a green system, able to recycle organic waste, purify water and air, producing oxygen and transforming carbon dioxide in organic compounds by photosynthesizing organisms, ingenerating the food chain. Moreover, this green systems will play a fundamental beneficial role on the crew’s psyche, representing a comfortable area to reduce the mental stress induced by the confined, oppressing environment of the bases.

Practically we have to induce and maintain fertility in extraterrestrial soils in order to start planning indoor cultivation in planetary bases, considering the several negative aspects that characterize the extraterrestrial soil environment. An example is represented by the combined effects of low gravity and microporosity on the hydraulics and biogeochemical functioning of soil systems that will affect oxygen diffusion and nutrient transport in the liquid and gaseous phases. These conditions could lead to suffocation of aerobic microorganisms and roots, and emissions of toxic gases, both induced by the development of anaerobic conditions. Other negative characteristics are the extreme pH values, the presence of an unstructured top layer of fine dust sediments, the practically absence of nitrogen and available water (drought condition). Moreover it has to be considered the possible contamination by high concentration of toxic elements such as heavy metals and highly hygroscopic salts. Finally, extremely dangerous is the presence of ionizable radiations that could also induce the superoxides formation on the surfaces of exposed minerals.

In some cases it is also hypothesized to find some elements *in situ* in relation to the extraterrestrial environmental characteristics. In the case of Mars habitation, it will be possible to find carbon dioxide and a trace amount of nitrogen in atmosphere; potassium and phosphor in minerals.

In conclusion we can say that space farming it 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.

SERGIO MUGNAI*

Programmi di esplorazione spaziale promossi dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA)

I. IL PASSATO DELL'ESPLORAZIONE SPAZIALE

Nel corso della storia l'interesse e lo studio dello spazio extraterrestre da parte umana risale a epoche remote e difficilmente identificabili. Fin dalle prime testimonianze relative a epoche preistoriche l'uomo ha osservato e rappresentato elementi celesti, ma solamente dalla seconda metà del XX secolo, con l'evoluzione delle tecnologie aerospaziali, si è potuto fisicamente allontanare dall'atmosfera terrestre, e con uomini o mezzi automatici iniziare l'esplorazione spaziale. Le motivazioni all'origine dei viaggi spaziali e dell'astronautica sono comunque state le più molteplici, e variabili. Un potente motore allo sviluppo tecnologico necessario a effettuare i primi viaggi spaziali partì dalla ricerca del prestigio internazionale e dalla necessità di supremazia tecnologica da parte di alcuni Stati (USA, URSS), motivi per cui nacque la corsa all'esplorazione dello spazio a partire dagli anni Cinquanta del XX secolo.

Il primo oggetto lanciato in orbita attorno alla Terra è stato lo Sputnik 1 nel 1957 da parte dell'allora Unione Sovietica. Gli strumenti a bordo dello Sputnik 1 rimasero funzionanti per 21 giorni. Alla fine, la navicella bruciò durante la fase di rientro in atmosfera il 3 gennaio 1958 dopo circa 1.400 orbite e 70.000.000 km. Seguirono a esso i primi voli con equipaggi animali. La celebre cagnetta Laika, lanciata nello spazio nel secondo volo orbitale terrestre il 3 novembre 1957, divenne il primo essere vivente a entrare in orbita, o comunque il primo essere vivente superiore, considerando il fatto che lo Sputnik 1 alloggiava sicuramente microorganismi.

* HSO-USB, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands

Nella storia dell'esplorazione spaziale alcune date rappresentano le pietre miliari di questa avventura e descrivono benissimo il cammino dell'uomo nello Spazio:

– *12 aprile 1961*: il cosmonauta Yuri Gagarin fu il primo essere umano a volare nello spazio esterno alla Terra. Il volo dell'allora maggiore Yuri Gagarin iniziò il 12 aprile 1961, alle ore 9:07 di Mosca, all'interno della navicella Vostok 1 (Oriente 1), del peso di 4,7 tonnellate: Gagarin pronunciò la celebre espressione «*поехали!*» (*pojechali*, “andiamo!”) al decollo per il volo spaziale. Compì un'intera orbita ellittica attorno alla Terra, raggiungendo un'altitudine massima (apogeo) di 302 km e una minima (perigeo) di 175 km, viaggiando a una velocità di 27.400 km/h. Per tale missione Gagarin aveva scelto il soprannome Кедр “Kedr” (“cedro”), usato durante il collegamento via radio. Dopo 88 minuti di volo intorno al nostro pianeta, senza avere il controllo della navicella spaziale ma guidato da un computer controllato dalla base, la capsula frenò la sua corsa accendendo i retrorazzi, in modo da consentire il rientro nell'atmosfera terrestre. Il volo terminò alle 10:20 ora di Mosca. Sul sito www.firstorbit.org, una collaborazione fra l'ESA e l'equipaggio della ISS, è possibile visionare un film che ritrae ciò che Gagarin vide nel suo viaggio nello spazio. Facendo collimare il percorso orbitante della ISS con quello della navicella Vostok-1, e filmando la stessa visuale della Terra, è stato possibile “ricreare” lo stesso viaggio. A rendere affascinante il filmato è l'aver sovrapposto le immagini con i commenti originali di Gagarin.

– *20 luglio 1969*: nell'ambito del programma Apollo gli astronauti Neil Armstrong e Buzz Aldrin, nel 1969, furono i primi uomini ad atterrare sulla Luna e camminare sulla sua superficie. In seguito, altri dieci uomini compirono lo stesso gesto nel periodo compreso tra il 1969 e il 1972. Sei ore e mezza dopo aver toccato il suolo, alle 2:57 UTC (4:57 italiane), Armstrong discese sulla superficie e fece il suo *grande passo per l'umanità*. Aldrin lo seguì, e i due astronauti trascorsero 2 ore e 31 minuti a fotografare la superficie lunare e a raccogliere campioni di roccia. Dopo più di 21 ore e mezza sulla superficie lunare, si ricongiunsero a Collins sul “Columbia” con 20,87 kg di rocce lunari e rientrarono sulla Terra il 24 luglio.

– *12 aprile 1981*: lo Space Transportation System (abbreviazione: “STS”), comunemente noto come Space Shuttle, è stato un sistema di lancio riutilizzabile e di navette spaziali della NASA, l'ente governativo statunitense responsabile dei programmi spaziali. Lanciato in orbita per la prima volta il 12 aprile 1981, ha portato a termine la sua ultima missione il 21 luglio 2011.

2. IL PRESENTE DELL'ESPLORAZIONE SPAZIALE: LA STAZIONE SPAZIALE INTERNAZIONALE (ISS)

La Stazione Spaziale Internazionale (International Space Station o ISS) è una stazione spaziale modulare dedicata alla ricerca scientifica che si trova in orbita terrestre bassa (LEO, Low Earth Orbit), gestita come progetto congiunto da cinque diverse agenzie spaziali: la statunitense NASA, la russa RKA, l'europea ESA, la giapponese JAXA, la canadese CSA. Viene mantenuta a un'orbita compresa tra i 278 km e i 460 km di altitudine e viaggia a una velocità media di 27.743,8 km/h, completando 15,7 orbite al giorno. È abitata ininterrottamente dal 2 novembre 2000; l'equipaggio, da allora, è stato sostituito più volte, variando da due a sei astronauti o cosmonauti.

Costruita a partire dal 1998, è stata completata nel 2012; dovrebbe restare in funzione almeno fino al 2020 ma più probabilmente la sua vita sarà estesa al 2028. Il suo obiettivo, come è stato definito da ESA, è quello di sviluppare e testare tecnologie per l'esplorazione spaziale, sviluppare tecnologie in grado di mantenere in vita un equipaggio in missioni oltre l'orbita terrestre e acquisire esperienze operative per voli spaziali di lunga durata, nonché servire come un laboratorio di ricerca in un ambiente di microgravità, in cui gli equipaggi conducono esperimenti di biologia, chimica, medicina, fisiologia e fisica e compiono osservazioni astronomiche e meteorologiche.

La struttura della ISS, con i suoi oltre cento metri di intelaiatura, copre un'area maggiore di qualsiasi altra stazione spaziale precedente, tanto da renderla visibile dalla Terra a occhio nudo. Le sezioni di cui è composta sono gestite da centri di controllo missione a terra, resi operativi dalle agenzie spaziali che partecipano al progetto.

La stazione viene servita periodicamente da navicelle *Soyuz*, navette *Progress*, *Space X Dragon* e dall'*ATV* (Automated Transfer Vehicle) dell'ESA, ed è stata visitata da astronauti e cosmonauti provenienti da più di 15 paesi diversi.

3. IL PROGRAMMA ELIPS NELLE SCIENZE DELLA VITA E NELLA BIOLOGIA VEGETALE

L'attività di ricerca promossa dall'ESA sulla ISS è essenzialmente guidata dal Programma Europeo per le Scienze della Vita e per la Fisica (ELIPS). ELIPS assicura che l'investimento dell'Europa nello sviluppo e nella utilizzazione dell'ISS produca i migliori risultati scientifici possibili. Per raggiungere questo scopo, ELIPS promuove la cooperazione globale dei ricercatori, una *peer*

review internazionale delle proposte presentate, e il coordinamento europeo dello sviluppo dei payload e dell'utilizzo delle risorse. ELIPS copre una vasta gamma di discipline scientifiche, dalla fisica, alla chimica, biologia, fisiologia, psicologia. ELIPS è attualmente finanziato da 15 stati membri dell'ESA (Austria, Belgio, Danimarca, Francia, Germania, Grecia, Irlanda, Italia, Norvegia, Paesi Bassi, Regno Unito, Repubblica Ceca, Romania, Svezia, Svizzera) insieme al Canada come membro esterno cooperante. L'unicità di questo programma è che il suo orientamento è basato sugli input derivanti dalle comunità scientifiche e industriali che lo rendono di altissima qualità. Il programma non si limita esclusivamente all'utilizzo della ISS, ma prevede anche l'uso delle altre *facilities* ESA a terra per la ricerca in microgravità quali voli parabolici, drop tower e sounding rocket. In termini di argomenti di ricerca, il programma ELIPS è organizzato in *research cornerstones*. Nel campo di scienze della vita, in particolare nell'ambito della biologia, questi argomenti si focalizzano sull'effetto della gravità nei processi fisiologici e metabolici fondamentali delle cellule animali e vegetali. Da questa ricerca i risultati mirano a capire in maniera migliore l'adattamento cellulare a un ambiente ostile che può in seguito venire utilizzato a fini medici e biotecnologici, come ad esempio lo studio del sistema immunitario, l'osteoporosi o la produzione di cibo.

In particolare, la ricerca in biologia vegetale copre diverse aree, dalla biologia dello sviluppo, alla biologia molecolare. La ricerca nella biologia vegetale in ambiente spaziale viene portata avanti ormai da decenni. Una delle aree principali è lo studio del meccanismo di risposta gravitropica, grazie al quale le piante percepiscono la gravità, e come questo meccanismo viene alterato in sua assenza. Questo fattore viene considerato di assoluta importanza per le future missioni spaziali esplorative dove un altissimo grado di autosufficienza rispetto alla produzione e alla disponibilità di cibo viene richiesta agli equipaggi. Per questa ragione, non è soltanto vantaggioso determinare il meccanismo di percezione, ma anche determinare quali specie (o cultivar della stessa specie) hanno maggiori capacità di adattamento a tale ambiente, caratterizzato sia da totale assenza di gravità che da gravità minore, come sulla Luna o su Marte. Oltre all'impatto che questa ricerca può avere sul futuro delle missioni spaziali, è importante sottolineare come l'incremento di conoscenza nell'ambito dei processi vegetali di crescita e come questi vengono alterati da condizioni ambientali differenti possa avere un impatto positivo sui processi produttivi terrestri.

Molti fisiologi vegetali hanno condotto esperimenti per valutare la percezione della gravità nelle piante rispetto alla minima accelerazione che conduce a una risposta misurabile, la minima durata di gravità costante per stimolare

una risposta e la minima durata di stimoli gravitazionali ripetuti. L'esperimento Gravi-2, condotto sulla ISS nel 2007 (Driss-Ecole et al., 2008), aveva lo scopo di studiare il limite minimo di gravità necessario per la risposta gravitropica di semenzali di *Lens culinaria*. Nella prima parte dell'esperimento i semenzali erano stati fatti germinare e crescere in assenza di gravità per 15 ore. Successivamente i semenzali venivano centrifugati per quasi 14 ore a livelli di gravità fra 0.003g e 0.01g. Nella seconda parte dell'esperimento i semenzali venivano lasciati crescere per 21.5 ore in assenza di gravità, seguiti da 9 ore di gravità indotta dalla centrifuga a livelli compresi fra 0.012g e 0.2 g (il controllo a 0g era ovviamente sempre in assenza di gravità). L'analisi dell'immagine (venivano scattate foto ai semenzali a intervallo predefinito e costante) ha mostrato come le radici embrionali curvavano in direzione opposta ai cotiledoni per poi raddrizzarsi dopo 17-30 ore dall'idratazione. Grazie a questo raddrizzamento l'apice radicale era orientato all'angolo ottimale di curvatura (120-135°) durante il periodo di centrifugazione. Un punto interessante era che le radici cresciute in assenza di gravità erano più sensibili rispetto a quelle cresciute in 1g. Il limite di gravità percepito da questi semenzali è stato calcolato come compreso fra 0g e 0.002g, per la precisione 1.4×10^{-5} grazie all'uso del modello iperbolico. Nella primavera 2013 volerà l'esperimento successivo, Gravi-2, che analizzerà la distribuzione del calcio nelle cellule (il calcio è un messaggero secondario molto attivo) e le proteine *target* del calcio nell'apice radicale.

Un altro esperimento di biologia vegetale condotto sulla ISS nel 2007, denominato Multigen-1, aveva lo scopo di investigare l'influenza della gravità sui processi di circumnutazione (Mugnai et al., 2007) dello stelo di *Arabidopsis thaliana* (Johnsson et al., 2009; Solheim et al., 2009). In condizioni di assenza di gravità la maggior parte dei movimenti dello stelo erano di tipo randomizzato, ma veniva comunque mantenuto un certo grado di ritmicità, sebbene di misura inferiore (5-10 volte) quello riscontrabile in 1g. Una volta che veniva introdotto il fattore gravità (0.8g mediante centrifuga) il periodo di circumnutazione arrivava a raggiungere 60', fino a 85' nel periodo di buio. L'analisi dell'immagine 3D indicava che questi movimenti avevano direzionalità diverse. Dopo che la centrifuga veniva fermata, nessun movimento circumnutazionale veniva riscontrato. Questi risultati integrano osservazioni recenti e confermano come l'esistenza di movimenti circumnutazionali in assenza di gravità avvengano comunque, nonostante abbiano un minor numero di cicli e minor ampiezza. L'importanza della gravità nell'amplificare questi movimenti oscillatori è stata quindi dimostrata.

In generale, la ricerca in biologia vegetale sulla ISS ha fatto e sta facendo

uso di numerose *facilities* sperimentali sulla ISS, dal Kubik all'EMCS (European Modular Cultivation System). La maggior parte degli esperimenti vengono condotti sulla specie modello *Arabidopsis thaliana*, data la esatta e completa conoscenza del suo genoma, la sua adattabilità e l'enorme numero di genotipi e mutanti esistenti. Insieme a Multigen-1, descritto in precedenza, altri interessanti esperimenti condotti in passato su *A. thaliana* su ISS sono stati ROOT, che mirava a studiare le modificazioni che avvenivano nella proliferazione cellulare (Matía et al., 2007), e ARABIDOPS-ISS (Vukich et al., 2012), condotto dal prof. Mancuso dell'Università di Firenze, con lo scopo di investigare l'up- e down- regulation del genoma di *A. thaliana* in assenza di gravità.

4. IL FUTURO DELL'ESPLORAZIONE SPAZIALE

La strategia futura di esplorazione spaziale umana comincia con la Stazione Spaziale Internazionale (ISS) come il primo importante passo verso l'atterraggio su Marte e la successiva espansione umana nello spazio. Altre missioni esplorative sono state pianificate, quali quelle miranti a un ritorno sulla Luna e quelle per la colonizzazione di asteroidi, entrambe fondamentali per poter pianificare le future missioni marziane. Ingegneri e scienziati di tutto il mondo stanno lavorando sulle attività preparatorie essenziali per estendere la presenza umana nello spazio ed esplorare il pianeta Marte. Grazie allo sviluppo di un percorso condiviso, le agenzie spaziali (ESA, NASA, CSA, JAXA e Roscosmos) tentano di coordinare i loro investimenti per massimizzare i risultati e arrivare agli obiettivi previsti con quella che viene denominata "Global Exploration Roadmap". Molteplici attività sono attualmente in corso o pianificate nelle seguenti aree, ognuna delle quali presenta opportunità di coordinamento e cooperazione globale:

- *Uso della ISS per l'esplorazione spaziale*: la recente decisione dei partner di estendere la vita della ISS fino ad almeno il 2020 assicura il fatto che la ISS possa venire effettivamente ed efficacemente utilizzata per l'esplorazione, sia dalle agenzie partner che da nuovi partner;

- *Missioni robotiche*: le missioni robotiche sono sempre servite come precursori alle missioni umane di esplorazione spaziale. Le missioni robotiche sono essenziali per mantenere la sicurezza e il successo delle missioni umane, oltre ad assicurare il massimo ritorno possibile degli investimenti richiesti per la successiva esplorazione spaziale umana. Esempi di missioni robotiche promosse da ESA per il futuro prossimo sono la

SCOPO	OBIETTIVO
La ricerca della vita	Trovare evidenze di vita passata e/o presente Esplorare il potenziale di altre destinazioni all'interno del nostro sistema solare in grado di sostenere la vita
Estendere la presenza umana	Esplorare nuove destinazioni Incrementare le opportunità per gli astronauti Incrementare l'auto-sostenibilità dell'Uomo nello spazio
Sviluppare le tecnologie adeguate	Testare contromisure e tecniche per mantenere elevata la salute e la performance degli equipaggi Mitigare l'effetto delle radiazioni Dimostrare e testare l'efficienza di tecnologie in grado di produrre e immagazzinare energia Sviluppare tecnologie di <i>life support system</i> efficienti e durature Sviluppare e validare strumenti per l'utilizzo di materie prime presenti nello spazio Sviluppare tecnologie in grado di supportare gli esperimenti e la ricerca scientifica
Scienza per supportare l'esplorazione	Valutare la salute umana nello spazio Caratterizzare la geologia, la topografia e le condizioni ambientali delle destinazioni Caratterizzare le risorse disponibili a destinazione

Tab. 1

sonda Exomars (studierà l'ambiente marziano soprattutto dal punto di vista dell'astrobiologia) e BepiColombo, un doppio satellite per l'esplorazione di Mercurio;

– *Sviluppo tecnologico avanzato*: l'esplorazione umana oltre LEO richiederà una nuova generazione di capacità e di sistemi che incorporino tecnologie ancora non scoperte.

Gli obiettivi comuni della Global Exploration Roadmap sono invece descritti nella tabella 1.

RIASSUNTO

L'esplorazione umana e robotica della Luna, degli asteroidi e di Marte rafforzerà e arricchirà il futuro dell'Umanità, unendo i diversi Paesi per una causa comune, rivelando nuove conoscenze e stimolando l'innovazione tecnica e commerciale. A partire dallo storico volo di Yuri Gagarin il 12 aprile 1961, i primi 50 anni del volo spaziale umano hanno creato una forte partnership che ha condotto a importanti scoperte e innovazioni, ed è stata fonte di ispirazione per tutta l'Umanità. ESA ha sempre svolto un ruolo di primo piano in questa avventura, sia per quanto riguarda l'esplorazione umana che per l'applicazione terrestre di tutte le innovazioni tecnologiche. Dopo un breve riassunto sulla passata esperienza nei voli spaziali umani, questo capitolo si

concentrerà sullo stato attuale della ricerca scientifica promossa da ESA nell'ambito della biologia vegetale e sullo sviluppo dei futuri programmi di esplorazione dello spazio.

ABSTRACT

Human and robotic exploration of the Moon, asteroids, and Mars will strengthen and enrich humanity's future, bringing nations together in a common cause, revealing new knowledge, and stimulating technical and commercial innovation. Building on the historic flight of Yuri Gagarin on April 12, 1961, the first 50 years of human spaceflight have resulted in strong partnerships that have brought discoveries, innovations, and inspiration to all mankind. ESA always played a leading role in this adventure, both for human exploration and the terrestrial application of all the technological innovation. After a brief resume of the past experience in human spaceflights, this chapter will focus on the present status of ESA scientific research in plant biology and the development of future programmes for space exploration.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- DRISS-ECOLE D., LEGUÉ V., CARNÉRO-DIAZ E., PERBAL G. (2008): *Gravisensitivity and automorphogenesis of lentil seedling roots grown on board the International Space Station*, «Physiologia Plantarum», 134, pp. 191-201.
- JOHNSSON A., SOLHEIM B.G.B., IVERSEN T.-H. (2009): *Gravity amplifies and microgravity decreases circumnutations in Arabidopsis thaliana stems: results from a space experiment*, «New Phytologist», 182, pp. 621-629.
- MATÍA I., GONZÁLEZ-CAMACHO, MARCO R., KISS, J.Z., GASSET G., VAN LOON J., MEDINA F.J. (2007): *The "ROOT" experiment of the "Cervantes" spanish Soyuz mission: Cell proliferation and nucleolar activity alterations in Arabidopsis roots germinated in real or simulated microgravity*, «Microgravity Science and Technology», 19, pp. 128-132.
- MUGNAI S., AZZARELLO E., MASI E., PANDOLFI C., MANCUSO S. (2007): *Nutation in plants*, in *Rhythms in Plants* (Mancuso S. and Shabala S., Eds.), Springer, Berlin, pp. 77-90.
- SOLHEIM B.G.B., JOHNSSON A., IVERSEN T.-H. (2009): *Ultradian rhythms in Arabidopsis thaliana leaves in microgravity*, «New Phytologist», 183, pp. 1043-1052.
- VUKICH M., GANGA P.G., CAVALIERI D., RIZZETTO L., RIVERO D., POLLASTRI S., MUGNAI S., MANCUSO S., PASTORELLI S., LAMBREVA M., ANTONACCI A., MARGONELLI A., BERTALAN I., JOHANNINGMEIER U., GIARDI M.T., REA G., PUGLIESE M.G., QUARTO M., ROCA V., ZANINI A., BORLA O., REBECCHI L., ALTIERO T., GUIDETTI R., CESARI M., MARCHIORO T., BERTOLANI R., PACE E., DE SIO A., CASAROSA M., TOZZETTI L., BRANCIAMORE S., GALLORI E., SCARIGELLA M., BRUZZI M., BUCCIOLINI M., TALAMONTI C., DONATI A., ZOLESI V. (2012): *BIOKIS: A Model Payload for Multidisciplinary Experiments in Microgravity*, «Microgravity Science and Technology», 24, pp. 397-409.

Ricerca di segni di vita nello spazio

Lo studio dell'origine, l'evoluzione e la distribuzione della vita nell'Universo è un tema scientifico che negli ultimi anni sta riscontrando un interesse sempre crescente. Questo studio, necessariamente interdisciplinare ha mostrato di poter raccogliere gli interessi di un'ampia comunità scientifica e ha evidenziato nuovi e interessanti linee di sviluppo, necessariamente basate su competenze e conoscenze appartenenti a diversi ambiti culturali come ad esempio la biologia, la genetica, la chimica e l'astrofisica. Questa nuova scienza, che prende il nome di astrobiologia, mostra di avere importanti implicazioni in vari ambiti della ricerca ma anche nello sviluppo di nuovi strumenti tecnologici dedicati all'esplorazione spaziale.

La presenza della vita sulla Terra è direttamente correlata all'origine ed evoluzione del Sistema Solare e alle condizioni iniziali presenti nella nube molecolare interstellare dalla quale il nostro pianeta ha avuto origine. La vita, così com'è conosciuta sulla Terra, è originata da complesse reazioni basate sulla chimica del carbonio, probabile risultato dell'interazione di molecole organiche e materiale inorganico. Tuttavia, le condizioni ambientali in cui la vita si è sviluppata sulla Terra primordiale non sono note, e le tracce della più antica storia del nostro pianeta sono state, purtroppo, cancellate dall'attività tettonica. Ancora oggi mancano le prove definitive della composizione dell'atmosfera primordiale, della temperatura superficiale, il pH oceanico, e di tutte le altre condizioni ambientali generali e locali importanti per la comparsa dei primi organismi viventi sulla Terra. Nonostante i resti di rocce dell'Archeano precoce siano scarsi, i dati recenti, provenienti dallo studio di cristalli di zircone, ci suggeriscono che l'acqua liquida era presente sulla Terra fin dall'inizio

* *INAF - Osservatorio Astrofisico di Arcetri*

già 4,4 miliardi di anni fa (Wilde et al., 2001; Mojzsis et al., 2001). I segni chimici più antichi della presenza di vita sulla Terra risalgono a 3,86 miliardi di anni fa e sono stati trovati analizzando grani di apatite, provenienti dalla regione a sud-ovest della Groenlandia, contenenti inclusioni di grafite ricche di carbonio leggero ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C} \sim -35$ a -60 ppm) (Mojzsis et al., 1996). L'associazione grafite-apatite suggerisce che i microrganismi si siano trasformati in grafite, mentre il fosforo di tali microbi si sia convertito in apatite (fosfato di calcio). Tuttavia, le recenti analisi (Fedo & Whitehouse, 2002) mettono in discussione la natura sedimentaria della formazione rocciosa, suggerendo che il carbonio isotopicamente più leggero non può essere di origine biogenica. L'origine biologica dei resti fossili di 3,5 miliardi di anni ritrovati in sedimenti degli Apex australiani (Schopf, 1993; Schopf et al., 2002) è stata recentemente contestata (Brasier et al., 2002). Questi autori sostengono che le strutture interpretate come simili a microfossili fotosintetici sono, in realtà, o di natura non-biologica oppure sono i resti fossili di una comunità microbica connessa a un sistema idrotermale presente nei fondali marini (Brasier et al., 2002). Mentre è possibile che i sedimenti degli Apex australiani non corrispondano a un ambiente tipico di acque poco profonde, l'origine biologica di queste strutture non è preclusa, e quindi possono ancora essere considerati come i più antichi microfossili conosciuti (Schopf et al., 2002).

Mentre si continua a dibattere se l'origine della vita sulla Terra risalgia a 3,86 miliardi di anni fa, i dati isotopici di campioni contenenti carbonio organico proveniente da rocce sedimentarie ci forniscono la prova che un ciclo del carbonio biologico già era attivo circa 3,6 miliardi di anni fa. A ogni modo è difficile spiegare quale potesse essere l'esatta natura della vita in quel momento della storia della Terra. Oggi, quindi, si cerca di concentrare gli sforzi sullo studio in laboratorio dei meccanismi chimico-fisici di interesse per le prime fasi evolutive terrestri e attive nello spazio. In particolare si cerca di individuare quali percorsi chimici siano stati seguiti dal materiale organico nelle fasi precedenti alla formazione del Sistema Solare e quale sia stato il materiale prebiotico trasportato sulla superficie terrestre attraverso gli impatti di asteroidi o comete.

Pertanto, per comprendere le linee evolutive seguite nello spazio dalla materia organica che hanno portato alla nascita della vita sulla Terra, ed eventualmente su altri corpi del Sistema Solare, è importante studiare le interazioni tra il materiale organico primordiale e l'ambiente circostante analizzando, così, le trasformazioni chimiche subite dalla materia primordiale.

In questo contesto, stabilire se la vita sia mai esistita, o sia ancora attiva da qualche altra parte nell'Universo, è una delle questioni scientifiche che ancora

oggi attendono una risposta. Nel tentativo di definire una strategia che sia efficace per la ricerca di vita, ad esempio su Marte, un approccio sul quale oggi la comunità scientifica è d'accordo è quello di affrontare all'inizio separatamente il problema di determinare se la vita è estinta o presente sul pianeta rosso, e solo successivamente cercare un filo conduttore che possa suggerire un modo comune per affrontare entrambi i casi.

LA TEORIA ETERTROFA E IL BRODO PRIMORDIALE

La mancanza di vincoli sui parametri riguardanti l'origine della vita ha portato a teorie alternative e concorrenti per quanto riguarda l'emergere dei primi sistemi viventi e delle caratteristiche che definiscono i primi organismi. Sebbene sovente si ripresentino discussioni sulla panspermia, cioè il trasferimento di microrganismi da un pianeta all'altro, questo approccio non fa che spostare altrove il problema dell'origine della vita. È importante sottolineare che la vita come noi la conosciamo è un fenomeno chimico, e la chimica è il problema centrale dell'origine della vita. Ci sono diverse teorie in competizione tra loro su come questa chimica possa sorgere. Nonostante la loro diversità, le teorie del brodo primordiale, dei camini idrotermali sottomarini, o dell'origine extraterrestre hanno tutte come presupposto l'idea comune che i composti organici abiotici siano un preambolo necessario per la comparsa di vita. Questo è il principio fondamentale dell'ipotesi eterotrofa per l'origine della vita, in primo luogo proposto da Oparin e Haldane nel 1920, secondo cui le forme di vita non erano in grado di sintetizzare i composti stessi, ma si sono formati da composti organici preesistenti di origine abiotica (Oparin, 1924).

ORIGINE AUTOTROFA DELLA VITA

Alcune teorie propongono un'origine alternativa, ovvero autotrofa della vita, vale a dire che i primi organismi erano in grado di fissare CO_2 e sintetizzare i composti organici necessari al loro mantenimento. L'ipotesi autotrofa più citata deriva dal lavoro di Günter Wächtershäuser, il quale sostiene che la vita sia iniziata per mezzo di un sistema metabolico bidimensionale chemolitotrofico auto catalitico basato sulla pirite, un minerale a base di ferro e zolfo.

La reazione $\text{FeS} + \text{H}_2\text{S} = \text{FeS}_2 + \text{H}_2$ è altamente esoergonica con una variazione di energia libera standard di $-9,23 \text{ kcal / mol}$, che corrisponde a un po-

tenziale di riduzione = -620 mV. Così, la combinazione $\text{FeS}/\text{H}_2\text{S}$ è un agente con un forte potenziale di riduzione, e ha dimostrato di fornire non solo una fonte efficiente di elettroni per la riduzione dei composti organici a pressione atmosferica e temperature inferiori a 100 °C, ma anche di promuovere la formazione di legami peptidici che derivano dalla attivazione di amminoacidi con monossido di carbonio e (Ni, Fe) S, nonché la fissazione di monossido di carbonio attivo in acido acetico da una miscela di NiS / Fe / S (Huber & Wächtershäuser, 1998).

Nessuno di questi esperimenti (che si verificano in un mezzo acquoso) dimostra da sé che sia gli enzimi che gli acidi nucleici sono il risultato evolutivo di un metabolismo limitato da una superficie, come ipotizzato da Wächtershäuser (1988). Questi risultati però sono compatibili con un modello modificato di un “brodo primordiale” in cui la pirite è vista come fonte importante di elettroni per la produzione di composti organici ridotti. I risultati sperimentali finora raggiunti usando la combinazione $\text{FeS}/\text{H}_2\text{S}$ sono coerenti con un’origine della vita eterotrofa.

CHIMICA PREBIOTICA

La formazione di composti organici in condizioni che possono essere accettate come primitive, è un ambito studiato intensamente. L’elenco delle possibili reazioni chimiche comprende la reazione di Strecker di alanina da acetaldeide, ammoniaca e acido cianidrico, e la sintesi di Butlerov di zuccheri da formaldeide. Solo nel 1953 è stata compiuta da parte di Miller la prima sintesi efficace di composti organici in condizioni primordiali plausibili. Attraverso l’azione di scariche elettriche, che furono lasciate agire per una settimana in una miscela di CH_4 , NH_3 , H_2 , e H_2O , venne osservata la formazione di miscele racemiche di amminoacidi, nonché idrossiacidi, urea, e altre molecole organiche (Miller, 1953; Miller & Urey, 1959). L’esperimento di Miller del 1953 fu seguito pochi anni dopo dalla dimostrazione della sintesi di adenina dalla polimerizzazione acquosa di HCN in condizioni basiche (Orò & Kimball, 1961, 1962). Il ruolo di HCN nella chimica prebiotica è stato ulteriormente sostenuto dalla scoperta che l’idrolisi di polimeri di HCN porta a diversi amminoacidi, purine, e acido orotico, che è un precursore biosintetico della pirimidina uracile, un costituente di RNA (Ferris et al., 1978). Un potenziale percorso prebiotico per la sintesi con alte rese di citosina è fornito dalla reazione di cianoacetaldeide con urea, specialmente quando la concentrazione di quest’ultimo è alta simulando, così, un bacino acquifero in

evaporazione (Miller & Lazcano, 2002). Inoltre, è interessante notare come si sia osservato che l'adsorbimento selettivo di composti organici da parte delle superfici di vari minerali sia in grado di promuovere la concentrazione e la polimerizzazione di vari monomeri (Ferris et al., 1996).

La facilità di formare amminoacidi, purine, pirimidine e altri precursori biologici semplici in condizioni prebiotiche suggerisce che questi componenti erano certamente presenti nell'ambiente prebiotico terrestre o marziano. Esperimenti di laboratorio ci suggeriscono che è possibile sintetizzare altri prodotti prebiotici come urea, alcoli, acidi carbossilici, zuccheri, e una grande varietà di idrocarburi alifatici e aromatici, acidi grassi ramificati e lineari, alcuni dei quali sono in grado di formare vescicole. La lista include anche diversi derivati altamente reattivi dell'acido cianidrico (HCN), come cianammide (H_2NCN) e il suo dimero ($\text{H}_2\text{NC}(\text{NH})\text{NH-CN}$), dicianammide (NC-NH-CN), e del cianogeno (NC-CN), che sono noti per catalizzare reazioni di polimerizzazione (Orò et al., 1990).

Il motivo per il quale vengono condotti esperimenti di simulazione di chimica prebiotica è giustificato dal fatto che è stata rivelata nella meteorite di Murchison, condrite carbonacea formata 4,6 miliardi di anni fa, la presenza di una vasta gamma di amminoacidi sia proteici che non proteici, acidi carbossilici, purine, pirimidine, idrocarburi, e altre molecole organiche rilevanti per la vita. Questi composti meteoritici rendono plausibile un apporto di materia giunto dallo spazio e che, quindi, la natura renda facile percorrere i primi passi nel campo della chimica prebiotica.

FONTI EXTRATERRESTRI DI COMPOSTI ORGANICI

Le sintesi abiotiche di amminoacidi, purine, pirimidine, e altri composti sono molto efficienti se l'ambiente in cui avvengono le reazioni è fortemente riducente. Tuttavia, la possibilità che l'atmosfera primitiva fosse non riducente, come oggi gli astrofisici sostengono, non crea problemi insormontabili, poiché anche in queste condizioni si pensa che il brodo primordiale è possibile che si sia formato. Per esempio, è possibile che l'idrogeno sia stato prodotto per mezzo della pirite. Infatti, uno ione solfuro (SH^-) sarebbe stato convertito in un ione disolfuro (S^{2-}) in presenza di composti ferrosi, liberando così l'idrogeno molecolare. Inoltre è anche possibile che gli impatti dovuti ad asteroidi ricchi di ferro abbiano migliorato le condizioni riducenti dell'atmosfera primordiale, e che le collisioni cometary abbiano creato localmente ambienti favorevoli alla sintesi organica.

Naturalmente, la questione non è tanto quella di capire quale sia la fonte dei composti organici, ma in che misura abbiano contribuito le varie sorgenti di materia extraterrestre. Ad esempio, sebbene la quantità totale di formaldeide, acetaldeide, cianoacetaldeide e altri composti prebiotici in una data nube interstellare sia elevata, i composti che sono sopravvissuti alla formazione del sistema solare hanno raggiunto la Terra come costituenti minori di comete, meteoriti ricche di carbonio o particelle di polvere interplanetaria. Il meteorite Murchison contiene circa il 3% di carbonio organico, la maggior parte del quale è un polimero insolubile. Allo stesso tempo, sono stati estratti circa 100 ppm di amminoacidi che rappresentano, ipotizzando una porosità del 10% e una densità di circa 2 g cm^{-3} , una concentrazione di 0,1 g di amminoacidi per kg di meteorite, o $\sim 200 \text{ mM}$ di amminoacidi (Miller & Lazcano, 2002).

Qualsiasi teoria sull'origine della vita basata sulla evoluzione di un sistema genetico autoreplicante si basa sulla presenza di composti chimicamente stabili e di micro-ambienti stabilizzanti. Dalle conoscenze che fino a oggi si hanno, la chimica del HCN fornisce un percorso preferenziale per la sintesi prebiotica di purine e pirimidine. In alternativa, la formammide (HCONH_2) in presenza di catalizzatori inorganici come i minerali è in grado di sintetizzare purine e pirimidine; quest'ultimo potrebbe rappresentare un percorso prebiotico più efficiente della chimica del HCN (Saladino et al., 2001).

CHIRALITÀ E L'ORIGINE DELLE SOSTANZE ORGANICHE

Una caratteristica fondamentale della vita è la omochiralità (fig. 1) presente nella maggior parte dei suoi elementi costitutivi. Le teorie proposte per spiegare la sua origine sono molteplici e la maggior parte di esse richiedono che sia attivo un sistema di amplificazione chimico che può differire per il meccanismo iniziale usato: fluttuazione casuale, effetto di interazione elettrodebole, o apporto extraterrestre. Eccessi enantiomerici sono stati trovati nelle meteoriti (Engel & Macko, 1997; Cronin e Pizzarello, 1997; Pizzarello & Cronin, 1998, 2000), ma ancora oggi vengono cercati in altri materiali extraterrestri come le micrometeoriti (ad esempio Vandenabeele-Trambouze et al., 2001) e nelle comete (Thiemann & Meierhenrich, 2001).

I primi approcci sperimentali sulle sintesi di composti organici inizialmente non ebbero molta fortuna nel produrre molecole chirali (Miller e Urey, 1953). Alcuni, quindi, ne hanno dedotto che i meccanismi abiotici proposti per l'origine delle molecole chirali sulla Terra primitiva non possono verificarsi in natura (Bonner et al., 1999). L'assenza di chiralità nei prodotti ottenuti

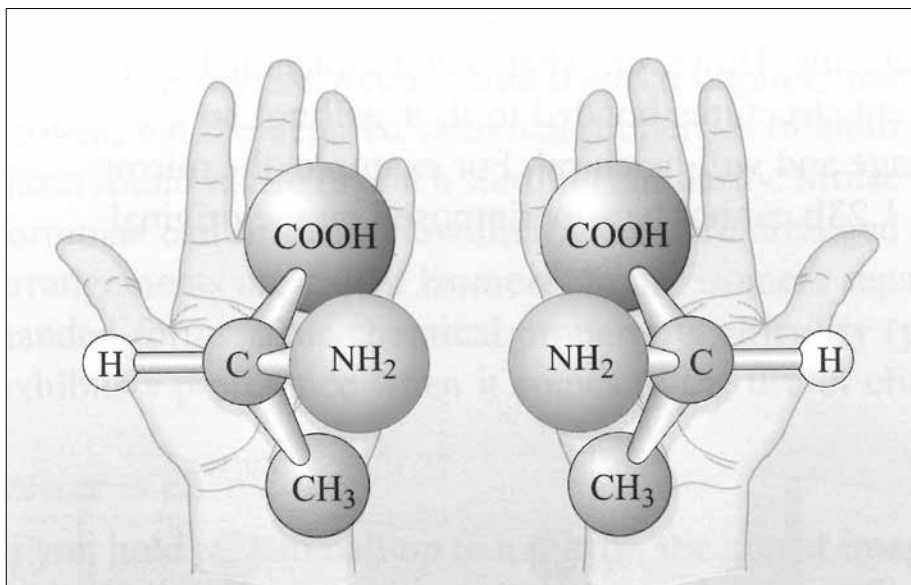


Fig. 1 Molte molecole biologiche possono esistere in due forme chirali destra, di tipo D, o sinistra, di tipo L (Credito Bada J.L.)

da esperimenti di chimica prebiotica rafforza la presunzione che la sintesi naturale abiotica produca invariabilmente miscele racemiche. Però nel 1997, Cronin e Pizzarello riuscirono a vedere modesti eccessi enantiomerici di tipo L che andavano dal 2 a 9% in alcuni amminoacidi estratti dal meteorite Murchison. Questo risultato fu possibile perché si cercò di evitare tutte le possibili contaminazioni durante l'analisi dell'acido 2-ammino-2,3-dimetilpentanoico, acido α -metil norvalina e isovalina. Bailey et al. (1998) suggerirono che gli eccessi enantiomerici osservati potrebbero essere stati indotti dalla luce polarizzata circolarmente derivante dalla dispersione di polvere in regioni di formazione stellare. Questa ipotesi è stata recentemente dimostrata attraverso un esperimento in cui sono state irraggiate molecole semplici a 80 K con luce ultravioletta polarizzata circolarmente. Le molecole che sono state sintetizzate hanno mostrato di possedere un lieve eccesso enantiomerico (Nuevo et al., 2006). Tuttavia, bisogna tener conto che gli amminoacidi sono composti molto fragili e che sono distrutti facilmente da particelle cariche o da fotoni di bassa energia (Ehrenfreund et al., 2001). Pertanto, l'origine extraterrestre della chiralità è fortemente dibattuta. A ogni modo, miscele racemiche di amminoacidi possono essere trasformate da un meccanismo di amplificazione in miscele con dominanza di chiralità di tipo L o D.

Ci sono, senza dubbio, molte domande su questo argomento che sono

ancora senza risposta e i problemi posti sono ben lungi dall'essere risolti. Tuttavia, la possibilità di accoppiare i composti organici extraterrestri con le condizioni ambientali getta nuova luce sull'importanza della omochiralità e il ruolo che l'apporto di materia organica proveniente dallo spazio ha avuto per l'origine della vita.

PROSPETTIVE NEL CAMPO DELLE BIOTECNOLOGIE E NANOTECNOLOGIE

La ricostruzione degli eventi critici che stanno alla base dell'origine della vita è una sfida che l'uomo ha da tempo deciso di intraprendere. Poiché non è rimasta alcuna traccia geologica nota della chimica prebiotica terrestre è evidente che siamo di fronte a un problema. Nonostante abbiamo a disposizione vari modelli suggestivi che possano in qualche modo giustificare sia la presenza che l'abbondanza di composti organici sulla Terra primitiva e avendo, inoltre, una conoscenza dettagliata della moderna biochimica, oggi abbiamo a disposizione solo lo strumento della speculazione per guidare la nostra comprensione sui passi che la chimica ha dovuto compiere per collegare questi due regni ancora distinti. Infatti, sappiamo ancora poco sugli stadi intermedi che sono esistiti tra questi due estremi.

L'ipotesi del "Mondo a RNA" assume che il primo sistema apparso avesse la capacità di auto-replicazione (Gesteland et al., 1999), il "Mondo a lipidi" assume invece che i comparti siano stati i primi a comparire (Segre et al., 2001), mentre il "Mondo a proteine" ritiene che per prima siano apparse microstrutture di proteine (Fox, 1988) e, infine, il "Mondo a tioesteri" considera che sia stato il metabolismo il primo a comparire sulla Terra (de Duve, 1991). La verità è che abbiamo cominciato solo oggi a capire le relazioni fondamentali ad esempio tra le varie unità presenti in una cellula vivente, o sulla distribuzione delle proprietà comuni tra le specie, o quali siano i fattori principali che costituiscono le forme di vita. Non ci può essere alcun dubbio che tale approccio comporta una valutazione critica e una messa a punto di modelli che avvenga in modo continuo e che richieda un miglioramento costante del nostro pensiero sulle origini della vita.

Dal punto di vista teorico, possiamo notare che c'è stata un'esplosione di simulazioni al computer e di modelli analitici che cercano di descrivere comportamenti collettivi complessi di miscele chimiche prebiotiche (Dyson, 1985). La maggior parte delle versioni più popolari tendono a essere variazioni del concetto originale di Eigen di iperciclo (Eigen & Schuster, 1979), dove la caratteristica generale è un modello composto da reazioni e diffusioni

di una miscela complessa di bio-molecole organiche. La miscela complessa iniziale dovrebbe essere sufficientemente varia, così che certi composti molecolari possano catalizzare la formazione di altri. In una regione dello spazio dei parametri, la catalisi e la diffusione reciproca porterà ad auto-alimentare reti autocatalitiche che possono contenere informazioni, unirsi, dividersi e riprodursi. Così procedendo, la vita dovrebbe seguire spontaneamente. C'è un collegamento interessante che rende l'approccio teorico, non solo rilevante per l'origine degli studi sulla vita, ma anche per lo sviluppo di nuove tecnologie. Nel campo della genomica e della bioinformatica, progetti come E-cell (<http://www.e-cell.org>) si sforzano di riprodurre le caratteristiche di un organismo vivente in un modello riprodotto al computer. I modelli di E-cell necessitano di una attenta calibrazione per mezzo di dati sperimentali, ma possono offrire una prova virtuale delle condizioni chimiche necessarie alla vita.

Possono i modelli al computer servire anche come strumenti di progettazione razionali per la preparazione di sistemi che si autosostengono ab initio? Se sì, questo potrebbe contribuire alla nostra comprensione delle reti chimiche complesse che stanno alla base della vita e l'origine della vita sulla Terra o su altri pianeti.

La capacità che oggi abbiamo di realizzare nano-materiali ha portato a una nuova prospettiva riguardante le origini della vita. Per esempio, ci sono connessioni evidenti tra la progettazione di un sistema vivente e una capsula che permette la somministrazione di farmaci. Entrambi devono essere in grado di auto-propagarsi, riconoscere un target, e dare una risposta. Quindi è interessante notare come gli stessi metodi possano essere utilizzati in entrambi i campi, con reciproco vantaggio fornendo così nuove opportunità (Szostak et al., 2001).

L'ACQUA NEL SISTEMA SOLARE

Un altro aspetto fondamentale che ha un impatto significativo nell'esplorazione dello spazio è la ricerca della presenza di acqua. Cercare segni di vita nel Sistema Solare o altrove, si fonda su un'assunzione fondamentale cioè che la vita sia così come la conosciamo sulla Terra. Quindi è facile comprendere come la presenza di acqua sia un prerequisito essenziale.

La storia dell'acqua nel Sistema solare è ancora oggi oggetto di dibattito. È, tuttavia, utile avere un'idea di base della storia dell'acqua nel Sistema Solare. Le idee presentate di seguito sono una breve panoramica di alcune delle

ipotesi più recenti, che hanno guadagnato una certa popolarità. Le molecole di H_2O e OH sono presenti nell'universo fin dalle prime fasi in cui le stelle hanno completato il loro ciclo di vita e rilasciato ossigeno nel mezzo interstellare. Infatti l' H_2O è una delle molecole più abbondanti nella materia interstellare. Quindi, man mano che il collasso della nebulosa protosolare procede, l'acqua presente prevalentemente sotto forma di ghiaccio, è sottoposta, come tutti gli altri composti presenti nella nebulosa, a un aumento della pressione e temperatura che le permette di passare in fase vapore. Solamente nelle zone più esterne del Sistema Solare, probabilmente a circa la stessa distanza in cui oggi troviamo Giove $\sim 5,2$, AU, l'acqua può nuovamente condensare. La "snow line", come è solitamente chiamata, ovvero il confine oltre il quale le temperature sono sufficientemente basse da permettere la presenza di ghiacci, è stata popolata da un gran numero di corpi ghiacciati, responsabili a sua volta della rapida formazione di Giove. Quei corpi che sono riusciti a sfuggire all'attrazione di Giove, essenzialmente le comete, si sono resi disponibili a svolgere un ruolo importante nella distribuzione di acqua all'interno del Sistema Solare che, invece, è nato arido. Da una parte la forza di attrazione solare che ha costretto le comete a rallentare e cadere verso l'interno del Sole e dall'altra la migrazione della "snow line" verso l'interno del Sistema Solare fino a circa 3 AU, hanno fatto sì che l'acqua potesse ridistribuirsi verso le zone interne del Sistema Solare dove i pianeti terrestri si stavano formando. Gran parte dell'acqua che successivamente è entrata a far parte dell'inventario attuale del Sistema Solare interno, può essere stata raccolta e trasportata non solo dalle comete ma anche dagli asteroidi. Esiste un metodo molto efficace per sapere qual è stata l'origine dell'acqua nel Sistema Solare. Questo consiste nel misurare la distribuzione di deuterio all'interno del Sistema Solare. L'acqua originaria del mezzo interstellare (ISM) è arricchita in deuterio, ciò è dovuto a una chimica che coinvolge ioni e molecole a bassissima temperatura tipica del mezzo interstellare. Di contro il deuterio è distrutto all'interno delle stelle che quindi hanno impoverito di deuterio le regioni più interne del Sistema Solare.

Un caso di particolare rilievo è Marte, obiettivo principale di molte missioni spaziali condotte dalla NASA e dall'ESA con l'obiettivo di cercare segni di vita e di capire se l'ambiente marziano possa avere o avere avuto ambienti ideali a sostenere la vita. Oggi si conoscono varie fonti possibili di acqua su Marte. È possibile che una certa quantità di acqua si sia condensata da una primordiale atmosfera, dopo che il pianeta si è raffreddato; l'acqua potrebbe essere stata emessa dalle regioni interne attraverso un'attività vulcanica; l'acqua potrebbe essere stata portata dagli asteroidi con composizione simili

alle meteoriti condriti carbonacee; infine, potrebbe essere stata trasportata da impatti di comete avvenuti durante la parte finale del periodo di grande bombardamento, che anche la Terra ha subito, circa 3.8 miliardi di anni fa.

Le prime stime che riguardano la quantità di acqua presente su Marte sono ottenute dallo studio delle immagini restituite dalle missioni spaziali. Numerosi studi sulle caratteristiche morfologiche della superficie marziana, come i canali di deflusso e i resti di bacini, ci lascia pensare che siano dovuti alla presenza di oceani, con profondità stimate che vanno da alcune decine di metri fino a 440 metri (Carr, 1986; Baker et al., 1991). I primi indizi che riguardano la composizione isotopica dell'idrosfera marziana sono stati ottenuti da osservazioni spettroscopiche condotte da telescopi della atmosfera (Owen et al., 1988). Tali misure hanno mostrato che l'acqua atmosferica è più ricca in deuterio rispetto a quella dell'atmosfera terrestre di un fattore di circa sei. Supponendo che l'atmosfera sia stata strettamente accoppiata all'idrosfera, questo mostra che l'acqua su Marte non ha avuto la stessa composizione di quella terrestre, o che attraverso alcuni meccanismi si sia evoluta diversamente portando a una composizione isotopica distinta.

Se la vita è mai sorta sul pianeta rosso, probabilmente questo è accaduto quando Marte era un pianeta più caldo e umido, si pensa questo sia avvenuto all'incirca entro il primo miliardo di anni successivi alla sua formazione. Le condizioni allora erano simili a quelle terrestri. Entrambi i pianeti erano abitabili, nel senso che possedevano le necessarie condizioni ambientali e i vari ingredienti per poter sostenere la vita, cioè, acqua liquida, carbonio, e altri elementi essenziali, così come fonti di energia. La vita potrebbe essersi presentata in luoghi più idonei come, ad esempio, in prossimità di attività idrotermali. Marte è oggi un obiettivo primario per la ricerca di segni di vita nel nostro Sistema Solare.

La strategia per trovare tracce della passata attività biologica si basa sul presupposto che le eventuali tracce superstiti possano essere conservate nell'ambiente geologico sotto forma di resti sepolti, di materiale organico adsorbito su minerali, oppure di comunità fossili. Allo stesso modo, poiché le condizioni superficiali di Marte sono ostili per gli organismi viventi così come li conosciamo, la metodologia di ricerca che ad esempio L'ESA sta seguendo si basa su indagini di nicchie protette come, ad esempio, nel sottosuolo e all'interno di affioramenti superficiali. Il Rover ExoMars che verrà lanciato presumibilmente nel 2018 dall'ESA sarà dotato di uno strumento indispensabile, un trapano in grado di perforare la superficie per ben due metri e raccogliere campioni dal sottosuolo da analizzare con sofisticati strumenti analitici posti a bordo del Rover. La figura 2 presenta una visione artistica del Rover e del



Fig. 2 Visione artistica del Rover ExoMars. È possibile vedere il trapano in grado di prelevare campioni a una profondità di 2 metri nel suolo marziano (Credito ESA)

trapano sulla superficie di Marte. Il Rover sarà in grado di monitorare e controllare la coppia, la spinta, la profondità di penetrazione, e la temperatura della punta del trapano. Il trapano è inoltre dotato di uno spettrometro IR

per permettere di studiare la composizione mineralogica all'interno del foro. In attesa che ExoMars sia lanciato, sta completando il suo viaggio verso Marte il rover Curiosity della NASA nell'agosto del 2012 è atterrato su Marte per studiare le condizioni ambientali marziane e, in particolare, se queste siano state idonee a sostenere la vita.

CAMPIONI RIPORTATI A TERRA DA MISSIONI SPAZIALI

I programmi di esplorazione spaziale oltre all'invio di rover sulla superficie di oggetti del Sistema Solare, hanno come obiettivo a medio termine (10-20 anni per missioni su asteroidi, comete, lune di Marte e Luna) e lungo termine (30 anni per missioni su Marte), riportare a terra campioni extraterrestri. In un contesto internazionale in continua evoluzione, le missioni spaziali di Sample Return, ovvero che hanno come obiettivo quello di raccogliere e riportare a terra campioni extraterrestri, stanno ottenendo un interesse sempre maggiore sia da parte della comunità scientifica internazionale che di quella industriale. Lo studio in laboratorio di materiale extraterrestre raccolto da asteroidi primitivi o da Marte fornirà nuove opportunità di progresso della conoscenza su temi fondamentali come la nascita e l'evoluzione del Sistema Solare o l'origine della vita sulla Terra. Inoltre, lo sviluppo di tecnologie innovative che permetteranno, in maniera autonoma, di atterrare su un corpo del Sistema Solare, di scegliere e raccogliere il materiale dal suolo e di riportarlo a Terra è considerato prioritario per l'Europa.

Stardust della NASA è stata la prima missione che, il 15 gennaio 2006, è riuscita a portare a Terra (http://www.nasa.gov/mission_pages/stardust/main/index.html) campioni di polvere raccolti dalla cometa Wild 2 (fig. 3). Successivamente, nel giugno 2010 sono stati riportati a Terra i campioni extraterrestri prelevati da un asteroide roccioso per mezzo della missione Hayabusa realizzata dall'agenzia spaziale giapponese (JAXA) (www.isas.ac.jp/e/enterp/missions/hayabusa/index.shtml). Nel frattempo è già stata selezionata il sequel, Hayabusa 2 che avrà l'obiettivo di raccogliere e riportare a terra campioni prelevati da un asteroide di tipo C, ovvero ricco di carbonio. La NASA prevede di inviare nel 2016 la missione OSIRIS-REx su un asteroide di tipo B, anch'esso ricco di materiale organico che sarà raccolto e riportato a terra nel 2023. Infine, l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) ha in corso lo studio nell'ambito del programma Cosmic Vision della missione MarcoPolo-R (Barucci et al., 2012). L'obiettivo principale è la raccolta e il rientro a terra, per la

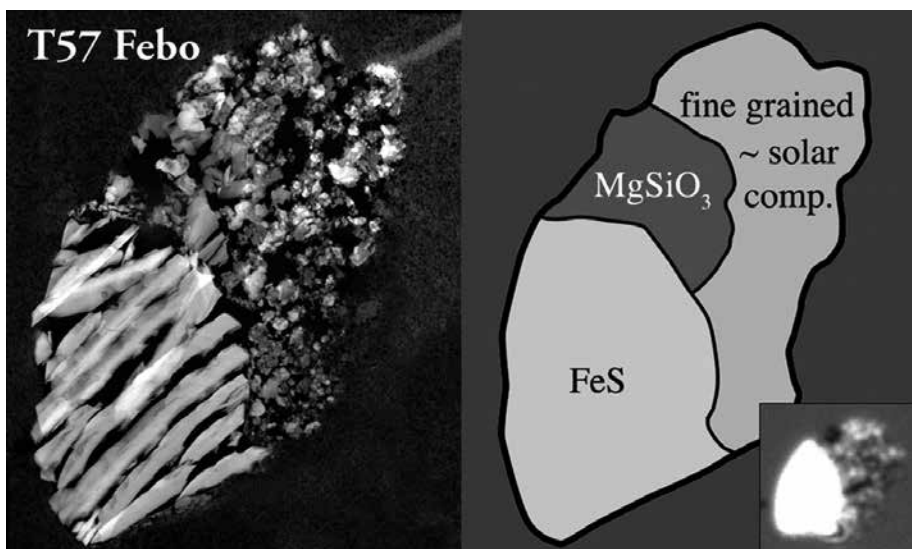


Fig. 3 Un grano di polvere raccolto dalla sonda Stardust della NASA dalla cometa Wild 2. Le dimensioni del grano sono di 8 micrometri. Le analisi in laboratorio hanno mostrato la presenza di tre componenti: pirrotite, enstatite e materiale poroso con composizione simile alla meteoriti condritiche (Brownlee et al., 2006). Si osserva un fenomeno inaspettato, cioè che materiali che si sono formati in zone diverse del Sistema Solare coesistono in un unico grano di polvere

prima volta in Europa, di materiale prelevato da un asteroide primitivo ricco di carbonio, di tipo C, con un lancio previsto nel 2022 e un rientro nel 2029 (sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=108). Questo studio vede una vasta partecipazione e interesse sia della comunità scientifica italiana che delle industrie italiane attive nel settore aerospaziale. Infine è in preparazione la missione “Mars Sample Return” che selezionerà e riporterà a terra campioni della superficie marziana per le analisi di laboratorio.

Nei prossimi 20 anni, quindi, un gran numero di campioni extraterrestri saranno riportati a terra da missioni spaziali e sarà, quindi, necessario che in Europa si realizzi un centro dove poter conservare, manipolare, analizzare e distribuire i campioni. Ma perché riportare a terra campioni extraterrestri? Molte delle risposte alle domande che la scienza sta tentando di risolvere, come l'origine del Sistema Solare o la presenza di vita nello spazio verranno date da misure di alta precisione e sensibilità condotte in laboratorio su materiali extraterrestri. Questo perché le capacità degli strumenti spaziali hanno dei vincoli dovuti alle limitazioni sulle dimensioni, massa, potenza, velocità di trasmissione dati e durata. Ciò è dovuto ad aspetti pratici delle missioni

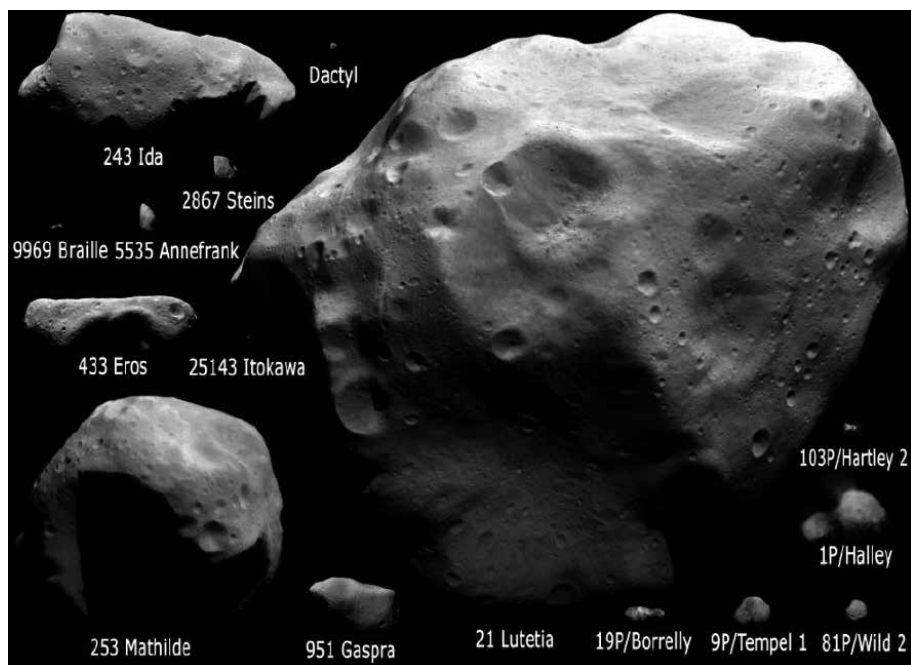


Fig. 4 Immagini in scala di asteroidi e comete visitate da missioni spaziali. È possibile notare la grande diversità in dimensioni, forme e proprietà superficiali (Credito ESA)

spaziali che, necessariamente, hanno risorse limitate. Le prestazioni di uno strumento da laboratorio non potranno mai essere eguagliate da un suo analogo miniaturizzato e adattato a un volo spaziale. Inoltre parte dei materiali riportati a terra saranno conservati all'interno di centri di curatela Storage and Curation Facility per le generazioni future di scienziati e di strumentazioni.

I NEA (asteroidi che orbitano vicino alla Terra) sono gli obiettivi più accessibili per le missioni spaziali di sample return (fig. 4) e contengono materiali primitivi adatti alla ricerca scientifica. Essi offrono due vantaggi principali: i) la maggior parte di loro provengono dalla fascia degli asteroidi, che li rende rappresentativi della intera popolazione di asteroidi, e (ii) diversamente degli asteroidi più lontani della fascia principale, i NEA sono obiettivi altamente accessibili per le missioni spaziali. È possibile dimostrare che alcuni NEA sono più facili da raggiungere rispetto alla Luna. Anche se l'elenco degli accessibili NEA per le missioni spaziali contiene già molti oggetti, il loro numero è destinato a crescere notevolmente nel prossimo futuro, grazie a programmi osservativi in corso come Pan-STARR.

Lo studio della natura fisica dei NEA è rilevante anche per la valutazione del rischio potenziale di impatti che questi possono avere sul nostro pianeta. I NEA sono responsabili della maggior parte delle cadute di meteoriti e dei grandi eventi catastrofici da impatto. Qualunque sia lo scenario che si potrebbe presentare, è chiaro che la tecnologia necessaria per elaborare una strategia realistica che possa evitare un impatto da un asteroide dipende dalla conoscenza delle proprietà fisiche del corpo impattante. Utilizzare, ad esempio, una sorta di trattore gravitazionale per deviare la traiettoria di un NEA richiede che massa, forma e rotazione dell'oggetto sia nota con precisione. Il ritorno di un campione da un NEA e la sua successiva analisi di laboratorio non solo aiuterà a rispondere alle domande relative alla formazione dei pianeti, ma fornirà anche per la prima volta una buona conoscenza delle proprietà dei materiali di un potenziale pericolo spaziale.

Un obiettivo ancora più avvincente sarà quello di osservare la presenza di biomolecole nel materiale riportato a terra. Un campione proveniente da un NEA primitivo contenente componenti con diversi gradi di alterazione acquosa darebbe risposte definitive sui processi di formazione della materia organica nello spazio. Avendo a disposizione un campione senza contaminazione terrestre, ogni ambiguità di vita nello spazio sarebbe eliminata.

BIBLIOGRAFIA

- BAILEY J., CHRYSOSTOMOU A., HOUGH J.H., GLEDHILL T.M., MCCALL A., MENARD F. AND TAMURA M. (1998): *Circular Polarization in Star-Formation Regions: Implications for Biomolecular Homochirality*, «Science», 281, pp. 672-674.
- BAKER V.R., STROM R.G., GULICK V.C., KARGEL J.S., KOMATSU G., KALE V.S. (1991): *Ancient oceans, ice sheets and the hydrological cycle on Mars*, «Nature», 352, pp. 589-594.
- BARUCCI M.A., CHENG A.F., MICHEL P., BENNER L.A.M., BINZEL R.P., BLAND P.A., BÖHNHARDT H., BRUCATO J.R., CAMPO BAGATIN A., CERRONI P., DOTTO E., FITZSIMMONS A., FRANCHI I.A., GREEN S.F., LARA L.-M., LICANDRO J., MARTY B., MUINONEN K., NATHUES A., OBERST J., RIVKIN A.S., ROBERT F., SALADINO R., TRIGO-RODRIGUEZ J.M., ULAMEC S., ZOLENSKY M. (2012): *MarcoPolo-R near earth asteroid sample return mission*, «Experimental Astronomy», 33, pp. 645-684.
- BONNER W.A., GREENBERG J.M. AND RUBENSTEIN E. (1999): *The Extraterrestrial Origin of the Homochirality of Biomolecules – Rebuttal to a Critique*, «Origins of Life and Evolution of the Biosphere», 29, pp. 215-219.
- BRASIER M.D. et al. (2002): *Questioning the evidence for Earth's oldest fossils*, «Nature», 416, pp. 76-79.
- CARR M.H. (1986): *Mars: a water-rich planet?*, «Icarus», 68, pp. 187-216.
- CRONIN J.R. AND PIZZARELLO S. (1997): *Enantiomeric Excesses in Meteoritic Amino Acids*, «Science», 275, pp. 951-955.
- DE DUVE C. (1991): *The Nature and Origin of Life*, Burlington, Carolina Biological Supply.

- DYSON F. (1985): *Origins of Life*, Cambridge, Cambridge University Press.
- EIGEN M. AND SCHUSTER P. (1979): *The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organization*.
- ENGEL M.H. AND MACKO S.A. (1997): *Isotopic evidence for extraterrestrial non-racemic amino acids in the Murchison meteorite*, «Nature», 389, pp. 265-268.
- EHRENFREUND P., BERNSTEIN M.P., DWORKIN J.P., SANDFORD S.A. AND ALLAMANDOLA L.J. (2001): *The Photostability of Amino Acids in Space*, «Astrophys. J.», 550, pp. 95-99.
- FEDO C.M. AND WHITEHOUSE M. (2002): *Metasomatic Origin of Quartz-Pyroxene Rock, Akilia, Greenland, and Implications for Earth's Earliest Life*, «Science», 296, pp. 1448-1152.
- FERRIS J.P., JOSHI P.C., EDELSON E.H. AND LAWLESS J.G. (1978): *HCN: A plausible source of purines, pyrimidines and amino acids on the primitive earth*, «J. Mol. Evol.», 11, pp. 293-311.
- FERRIS J.P., HILL A.R., LIU R. AND ORGEL L.E. (1996): *Synthesis of long prebiotic oligomers on mineral surfaces*, «Nature», 381, pp. 59-62.
- FOX S.W. (1988): *The Emergence of Life: Darwinian Evolution from the Inside*.
- GESTELAND R.F., CECH T.R. AND ATKINS J.F. (1999): *The RNA World*, New York, Cold Spring Harbor Laboratory Press.
- HUBER C. AND WÄCHTERSCHÄUSER G. (1998): *Peptides by Activation of Amino Acids with CO on (Ni,Fe)S Surfaces: Implications for the Origin of Life*, «Science», 281, pp. 670-672.
- MILLER S.L. (1953): *A production of amino acids under possible primitive earth conditions*, «Science», 117, pp. 528-529.
- MILLER S.L. AND LAZCANO A. (2002): *Life's Origin: The Beginning of Biological Evolution*, ed. W Schopf, California, University of California Press.
- MILLER S.L. AND UREY H.C. (1959): *Origin of Life*, «Science», 130, pp. 245-251.
- MOJZSIS S.J., AHRRENIUS G., McKEEGAN K.D., HARRISON T.M., NUTMAN A.P. AND FRIEND C.R.L. (1996): *Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago*, «Nature», 384, pp. 55-59.
- MOJZSIS S.J., HARRISON T.M. AND PIDGEON R.T. (2001): *Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth's surface 4,300 Myr ago*, «Nature», 409, pp. 178-181.
- NUEVO M., MEIERHENRICH U.J., MUÑOZ CARO G.M., DARTOIS E., D'HENDECOURT L., DEBOFFLE D., AUGER G., BLANOT D., BREDEHÖFT J.-H., NAHON L. (2006): *The effects of circularly polarized light on amino acid enantiomers produced by the UV irradiation of interstellar ice analogs*, «Astronomy and Astrophysics», 457, pp. 741-751.
- OPARIN A.I. (1924): *Proiskhozhenie Zhizni* Moskva: Moskovskii Rabachii, Reproduced Bernal J.D., *The Origin of Life*, London, Weidenfeld and Nicholson, 1967, pp. 199-234.
- ORÒ J. AND KIMBALL A.P. (1961): *Synthesis of purines under possible primitive earth conditions. I. Adenine from hydrogen cyanide*, «Arch. Biochem. Biophys.», 94, pp. 217-227.
- ORÒ J. AND KIMBALL A.P. (1962): *Synthesis of purines under possible primitive earth conditions: II. Purine intermediates from hydrogen cyanide*, «Arch. Biochem. Biophys.», 96, pp. 293-313.
- ORÒ J., MILLER S.L. AND LAZCANO A. (1990): *The origin and early evolution of life on Earth*, «Ann. Rev. Earth and Planetary Sci.», 18, pp. 317-356.
- OWEN T., MAILLARD J.P., DE BERGH C., LUTZ B.L. (1988): *Deuterium on Mars: the abundance of HDO and the value of D/H*, «Science», 240, pp. 1767-1770.

- PIZZARELLO S. AND CRONIN J.R. (1998): *Alanine enantiomers in the Murchison meteorite*, «Nature», 394, p. 236.
- PIZZARELLO S., HUANG Y., BECKER L., POREDA R.J., NIEMAN R.A., COOPER C. AND WILLIAMS M. (2001): *The Organic Content of the Tagish Lake Meteorite*, «Science», 293, pp. 2236-2239.
- SALADINO R., CRESTINI C., COSTANZO G., NEGRI R. AND DI MAURO E. (2001): *A possible prebiotic synthesis of purine, adenine, cytosine, and 4(3H)-pyrimidinone from formaldehyde: implications for the origin of life*, «Bioorg. Med. Chem.», 9, p. 1249.
- SEGRÈ D., BEN-ELI D., DEAMER D.W. AND LANCET D. (2001): *The lipid world*, «Origins of Life and Evolution of the Biosphere», 31, pp. 119-145.
- SCHOPF J.W. (1993): *Microfossils of the Early Archean Apex chert: new evidence of the antiquity of life*, «Science», 260, pp. 640-646.
- SCHOPF J.W., KUDRYAVTSEV A.B., AGRESTI D.G., WDOWIAK T.J. AND CZAJA A.D. (2002): *Laser-Raman imagery of Earth's earliest fossils*, «Nature», 416, pp. 73-76.
- SZOSTAK J.W., BARTEL D.P. AND LUISI P.L. (2001): *Synthesizing life*, «Nature», 409, pp. 387-390.
- THIEMANN W. AND MEIERHENRICH U. (2001): *ESA mission ROSETTA will probe for chirality of cometary amino acids*, «Origins of Life and Evolution of the Biosphere», 31, pp. 199-210.
- VANDENABEELE-TRAMBOUZE O. ET AL. (2001): *Frontiers of Life*, Actes des XIIème rencontres de Blois.
- WAECHTERHAEUSER G. (1988): «Microbiological Rev.», 52, pp. 452-484.
- WILDE S.A., VALLEY J.W., PECK W.H. AND GRAHAM C.M. (2001): *Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago*, «Nature», 409, pp. 175-178.

Suoli extraterrestri

Here men from the planet Earth first set foot upon the Moon, July 1969 A.D.

We came in peace for all Mankind.

Neil A. Armstrong, Michael Collins, Edwin E. Aldrin Jr, Richard Nixon

(frase incisa su una placca di acciaio inossidabile, 228x194x1.6 mm, lasciata nel cratere lunare Sabine D durante la missione NASA Apollo 11)

Una delle domande che sorgono pensando allo spazio è se in quell'immensità possa esserci qualche forma di vita. Prima, in realtà, dovremmo chiederci se fuori dal nostro pianeta esistano ambienti adatti a sostenere la vita, capaci cioè di alimentarla e proteggerla da fattori nocivi. Sulla Terra, l'ambiente che più di ogni altro sostiene la vita è il suolo. Suolo che svolge le fondamentali funzioni di fornire nutrienti e acqua agli organismi e di proteggerli dalla predazione o da eventi estremi, quali gelate, siccità o il passaggio del fuoco. Perché allora non chiedersi innanzi tutto se ci siano suoli al di fuori del nostro pianeta? La domanda è lecita, tanto più se si pensa che a oggi non esiste un'unica definizione di suolo, universalmente accettata. La pedologia – la disciplina che studia i suoli per come sono in natura, la loro genesi, le loro relazioni con l'ambiente e la loro distribuzione geografica – è d'altronde nata abbastanza di recente, convenzionalmente alla fine dell'800, quando il russo Vasily Dokuchaev inquadrò il suolo come un'entità con dignità propria, «un corpo indipendente posto alla superficie terrestre, con morfologia e proprietà fisiche, chimiche e biologiche peculiari, formatesi in una determinata situazione topografica per l'interazione nel tempo tra organismi viventi e morti, roccia esposta e clima». L'interesse tardivo nei confronti dello studio del suolo si spiega anche con il fatto che il

* Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente, Università di Firenze

** Dipartimento dei Sistemi Agro-Ambientali, Università di Palermo

suolo, pur svolgendo da sempre funzioni fondamentali, è considerato come qualcosa di sporco. Non a caso, *dirt*, sporcizia, è il termine colloquiale con cui si indica il suolo nei paesi anglosassoni. Il suolo da sempre è visto come quanto di più lontano dalla sfera celeste, quella del divino. E così anche la rappresentazione del suolo nell'arte ha avuto scarsa fortuna fino a tempi relativamente recenti. Giotto, un innovatore assoluto nel campo dell'arte, che si distinse dai suoi predecessori anche per la cura che poneva nel rappresentare gli elementi della natura, ignorava il suolo. Dipingeva piante erbacee e alberi che crescevano direttamente (e assai improbabilmente) su lisci pendii rocciosi. Bisogna aspettare la fine dell'800 perché il suolo venga rappresentato nella sua complessità dal danese Johan Thomas Lundbye. All'inizio del '900 poi, Grant Wood mostrerà nel quadro *Arbor Day* addirittura la sequenza di strati orizzontali, i cosiddetti *orizzonti*, di un suolo del natìo Iowa. E sono proprio gli orizzonti una delle peculiarità del suolo. La Soil Taxonomy, il testo base per la classificazione dei suoli negli Stati Uniti d'America e in molti altri paesi, definisce il suolo come «un corpo tridimensionale naturale, composto da solidi minerali e organici, liquidi e gas, posto alla superficie terrestre e caratterizzato 1) da orizzonti sovrapposti differenziatisi dal materiale di partenza in seguito a fenomeni di acquisto, perdita, trasferimento, o trasformazione di sostanze e/o 2) dalla capacità di sostenere la crescita di piante superiori in un ambiente naturale» (Soil Survey Staff, 2010). Questa definizione non prescinde dal fatto che il suolo debba contenere sia acqua in forma liquida che sostanza organica; il che impedirebbe, per quanto se ne sa fino a oggi, di considerare suoli quelli della Luna, di Marte e di altri corpi solidi del Sistema Solare. Donald Johnson ha formulato una definizione “cosmica” di suolo, cioè non esclusivamente legata al nostro pianeta: «Suolo è qualsiasi materiale minerale od organico posto alla superficie di pianeti o corpi simili, alterato da agenti biologici, chimici e/o fisici» (Johnson, 1998). Questa definizione ha il merito di riconoscere nella presenza di tracce consistenti di alterazione l'essenza del suolo, permettendo così di considerare suoli anche quelle superfici extraterrestri finora genericamente chiamate *regolite*, termine che indica nulla più che del materiale incoerente ed eterogeneo posto al di sopra di solida roccia. Definizione a parte, anche a noi sembra che l'essenza del concetto di suolo stia nella presenza di tracce evidenti di alterazione chimica che testimonia l'impatto dei fattori ambientali sul materiale di partenza. E allora suolo sarebbe qualsiasi superficie incoerente, terrestre e non, che conserva intrinseca memoria delle condizioni climatiche e geochimiche del passato. Sulla Terra l'azione combinata di almeno cinque diversi fattori – roccia madre, clima, topografia, organismi viventi e tempo – produce il suolo. *Suoli Antropogenici*

sono stati detti quelli fortemente condizionati dalle attività umane, come le continue lavorazioni o addirittura la messa in posto del materiale su cui il suolo si è formato. I suoli Antropogenici antichi sono stati proposti come i marcatori più attendibili dell'inizio dell'Antropocene, l'attuale epoca terrestre in cui l'azione dell'uomo è divenuta un fattore importante, forse il più importante, nel plasmare il paesaggio del nostro pianeta (Certini e Scalenghe, 2011). A oggi, quando ormai solo una minima porzione del nostro pianeta è scevra da influenza umana (Sanderson et al., 2002), l'uomo è considerato a tutti gli effetti il sesto fattore della formazione del suolo (Amundson e Jenny, 1991). La necessità degli organismi viventi, uomo compreso, nella formazione del suolo è tuttavia ancora oggetto di dibattito, anche perché sulla Terra esistono diversi esempi di pedogenesi in ambienti virtualmente abiotici: dalle McMurdo Dry Valleys, in Antartide (Ugolini e Bockheim, 2008), all'aridissimo deserto di Atacama, fra Cile e Perù (Navarro-González et al., 2008). Suoli certamente abiotici li hanno trovati Neil Armstrong, il primo uomo a camminare sulla Luna, e Phoenix, il rover della NASA che quasi 40 anni dopo l'allunaggio ha scavato su Marte il primo profilo di suolo al di fuori del nostro pianeta. Nei suoli extraterrestri le fonti di energia che guidano le reazioni chimiche sono i gradienti termici, osmotici e ionici, l'attrazione magnetica, la radioattività, l'attività vulcanica, gli impatti di meteoriti e il vento solare. L'assenza di vita, e quindi di reazioni biochimiche, non implica che non vi si formino gli orizzonti e altre figure pedogenetiche tipiche dei suoli terrestri (Duke e Nagle, 1975). Per esempio, possono crearsi le forme peculiari dei suoli periglaciali in cui i cicli gelo-disgelo causano la segregazione del materiale fine da quello più grossolano, a formare i cosiddetti *suoli poligonali* (Krantz et al., 1989). Questi sono caratterizzati dal fatto di avere una morfologia superficiale a mosaico, composta da figure geometriche così regolari da sembrare artificiali: cerchi, poligoni, isole, labirinti o strisce di pietre in una matrice di terra fine, o viceversa, che si possono ripetere uguali a loro stessi per chilometri. Suoli poligonali sono stati fotografati su Marte dove, in effetti, la presenza di acqua ghiacciata sottosuperficiale è stata ampiamente dimostrata (Smith et al., 2009).

La nostra luna è l'unico altro corpo celeste che sia stato calpestato da un uomo, anzi da ben dodici uomini. Sulla sua solida roccia poggia un manto di detriti eterogenei: nei *mària*, pianure che a noi appaiono scure, tale manto è spesso pochi metri e si origina da basalti, mentre nelle *terrae*, chiari e brillanti altipiani, esso è spesso alcune decine di metri e si origina da anòrtositi. Dopo la fine dell'era vulcanica e dal momento in cui l'impatto di meteoriti è cessato, la superficie lunare è rimasta stabile e l'irraggiamento del vento solare la ha

progressivamente arrossata, in proporzione al suo contenuto in ferro (Hapke, 2001). Ed è soprattutto per questo motivo che la superficie lunare mostra una discreta variabilità cromatica e addirittura orizzonti pedologici in senso stretto, ancorché sottili. Se l'azione di indagine sulla Luna è molto rallentata dopo l'epopea dello sbarco in occasione della missione Apollo 11 del 1969 e delle sei susseguenti missioni (l'ultima delle quali nel dicembre 1972), lo studio diretto di Marte è in pieno fermento. Diverse sonde sono atterrate sul "pianeta rosso", dalla sovietica Mars 3, nel 1971, che funzionò solo per pochi secondi dopo l'atterraggio, a quelle più recenti e di maggior successo degli americani con i due Vikings nel '76, Sojourner nel '97, Spirit ed Opportunity nel 2004. Tutte atterrate in posti diversi, alcuni assai lontani fra loro. Le ultime tre missioni hanno impresso una decisa accelerazione alla conoscenza di Marte, grazie soprattutto ai rovers, robottini mobili in grado di percorrere la superficie del pianeta, fotografandola e analizzandola. E la variabilità tra i suoli analizzati è risultata elevata, almeno più di quanto si ipotizzasse. Tra le cose ormai assodate su Marte il fatto che in generale vi sia un'intensa alterazione fisica a carico delle rocce e, quindi, produzione in atto di quel materiale fine che è l'elemento indispensabile per poter parlare di suoli. Ma su Marte c'è stata anche alterazione chimica in mezzo acquoso. Il ritrovamento vicino al bordo del cratere *Endeavour*, da parte di Opportunity, di venature di gesso precipitato da fluidi a bassa temperatura ne è prova (Squyres et al., 2012). Quando nell'agosto 2012 la navicella Curiosity sarà atterrata nella grande pianura *Elysium*, si avrà un quadro più ampio delle caratteristiche pedologiche di Marte, anche se si tratterà di un quadro che si riferisce pur sempre a un'area piuttosto limitata del pianeta. E, magari, in quell'occasione si potrà risolvere il dilemma se vi sia ancora oggi in atto alterazione chimica mediata dall'acqua.

A oggi la conoscenza dei corpi solidi del Sistema Solare è molto disomogenea, ma sostanzialmente di tutti si conoscono abbastanza bene le condizioni atmosferiche, climatiche e geomorfologiche. Ciò permette di fare molte considerazioni sul tipo di suoli che si possono eventualmente trovare (Certini et al., 2009). Tuttavia, solo la conoscenza diretta tramite fotografie ravvicinate e analisi in loco o, eventualmente, su campioni prelevati e riportati sulla Terra, possono darci una risposta definitiva riguardo al fatto se essi possono essere considerati suoli. Nel Sistema Solare dove si può sperare di trovare suoli oltre che su Terra, Luna e Marte? Per quanto riguarda i pianeti, solo su Mercurio e Venere, gli unici altri due che hanno consistenza solida. L'ardente Mercurio, il pianeta più prossimo al Sole, ha una superficie anortositica ricca in ferro, che ha subito gli impatti dei meteoriti e l'azione continua del vento solare. Su

di essa non è ancora atterrata alcuna navicella, e le uniche osservazioni ravvicinate risalgono a tre sorvoli del pianeta effettuati da Mariner 10 negli anni '70. Pertanto le informazioni disponibili sono relativamente scarse (Solomon, 2003). La testimonianza pedogenetica più rilevante che al momento è dato conoscere è la probabile presenza di microgranuli di ferro metallico; forse un po' poco per poter già parlare di suoli. Nel 2004 la NASA ha lanciato la navicella MESSENGER (acronimo di MErcury Surface, Space ENvironment, GEochemistry, and Ranging) che nell'aprile 2012 ha completato la prima delle manovre di riduzione del suo periodo orbitale attorno al pianeta. La missione MESSENGER sarà integrata dalla missione europea-giapponese ESA-JAXA BepiColombo che partirà nel 2015 e arriverà nel 2022, da quando le sonde Mercury Planetary Orbiter e Mercury Magnetospheric Orbiter raccoglieranno dati su Mercurio fino al 2023. E allora ne sapremo di più sui presunti suoli di quel pianeta. Contrariamente a Mercurio, Venere ha una densa atmosfera, composta principalmente da anidride carbonica e goccioline di acido solforico. La pedogenesi, se definibile come tale, qui consiste in una vigorosa alterazione fisica della roccia, promossa da pressioni e temperature molto elevate, e in un'altrettanto vigorosa alterazione chimica in ambiente iperacido. Ma nulla di certo è per ora dato sapere sulla composizione e sulla morfologia dei presunti suoli di Venere. Non pare invece possibile parlare di suoli in altri corpi tellurici del Sistema Solare. Uno strato di polvere finissima di carbonati inglobati nel ghiaccio costituisce la superficie di Phobos e Deimos, le due piccole lune di Marte. La crosta ferro-solforico-silicatica di Io, una luna solida di Giove, è vulcanicamente attiva, ghiacciata ma contemporaneamente riscaldata da maree e dai campi gravitazionali di Europa e Ganimede, altre due lune di Giove; ha quindi tempi di rigenerazione apparentemente troppo veloci per andare incontro a una pedogenesi apprezzabile. Su Titano, la più grande luna di Saturno, la superficie ghiacciata è sagomata da dune di idrocarburi solidi, fiumi e grandi laghi di metano continuamente agitati da forti venti: ipotizzare lì processi pedogenetici come siamo soliti intenderli è obiettivamente arduo. A differenza di pianeti e lune, gli asteroidi sono troppo piccoli per avere calore interno in grado di indurre vulcanismo e tettonica, fenomeni geologici che ringiovanirebbero la loro superficie. Questa è dunque sottoposta da tempi lunghissimi all'azione alterante del vento solare e dell'impatto dei micrometeoriti. Il piccolo asteroide Itokawa (diametro medio 330 m) è composto da frammenti di roccia e polveri tenuti insieme dalla forza di gravità. Del materiale superficiale è stato prelevato nel 2005 da un veicolo spaziale giapponese, Hayabusa. Senza atterrare, ma sparando una sfera di metallo da un'orbita di parcheggio a 20 km, e raccogliendo le polveri

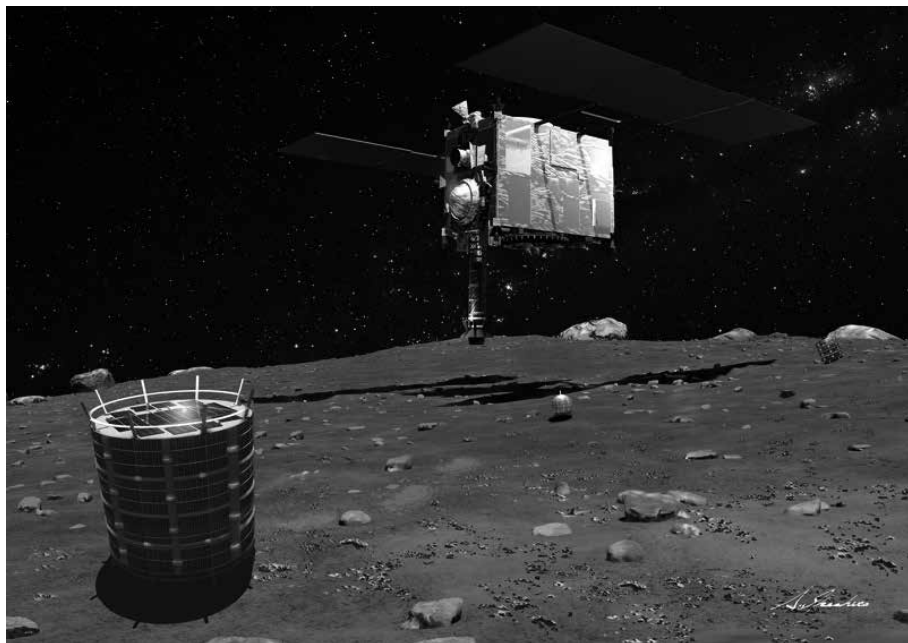


Fig. 1 Ricostruzione al computer di Akihiro Ikeshita® della fase di prelievo da parte della sonda Hayabusa di un campione di suolo dell'asteroide Itokawa [immagine concessa dall'agenzia spaziale giapponese JAXA]

sollevarsi in seguito all'impatto della sfera (fig. 1).

Le particelle così raccolte, una volta portate sulla Terra e analizzate hanno mostrato chiari segni di alterazione (Noguchi et al., 2011). In termini di composizione elementare, a parte l'abbondanza di platino, metallo prezioso, e di magnesio, fondamentale per le piante, l'asteroide non si differenzia in maniera sostanziale dal nostro pianeta (Nakamura et al., 2011). In sostanza, il suolo di Itokawa conterrebbe molti dei nutrienti necessari alla crescita vegetale, incluso il fosforo, che è invece carente in molti suoli terrestri, tanto da essere l'elemento nutritivo in assoluto più mobilizzato dall'uomo sulla Terra (Falkowski et al., 2000).

Al di fuori del Sistema Solare ci sono i pianeti extrasolari, i cosiddetti *esopianeti*, che ruotano attorno ad altre stelle. Al primo di maggio 2012 quelli individuati erano 763, in buona parte apparentemente solidi. Come Kepler-22b, che orbita nella zona teoricamente abitabile della stella Kepler-22. Considerata la sua distanza approssimativa di 600 anni luce da noi, ci si può rassegnare all'impossibilità di osservare direttamente la superficie di questo come degli altri esopianeti, e appurare quindi se vi siano o meno suoli.

La recente possibilità anche per i privati di andare nello spazio aprirà forse nuove prospettive economiche. L'agenzia spaziale privata Planetary Resources ha come obiettivo quello di sviluppare tecnologie adatte a estrarre dagli asteroidi elementi che ormai scarseggiano sulla Terra. La realizzazione di questa impresa, se avverrà, non potrà prescindere dall'installazione di basi permanentemente abitate dall'Uomo sugli asteroidi stessi o su corpi celesti intermedi. A oggi, quelle della Luna e di Marte sono le superfici in cui è più plausibile l'installazione di tali basi. Lì l'uomo dovrà fronteggiare molti fattori ambientali avversi e, necessariamente, far ricorso a risorse fondamentali disponibili in loco per poter essere indipendente dalla Terra. Tra queste il suolo, per praticarvi coltivazioni indoor. E dovrà allora fare i conti, ad esempio, col fatto che quel suolo è a tessitura troppo fine e privo di struttura per poter ospitare vegetali superiori terrestri senza interventi agronomici mirati a migliorarne la porosità e, con essa, il drenaggio. Tale tipo di tessitura aggrava infatti gli effetti negativi della microgravità (un terzo di quella terrestre sulla Luna, un sesto su Marte) sulla dinamica dell'acqua e dei gas, che tendono a ristagnare nel suolo e a deprimere quindi la crescita vegetale. Ma sia sulla Luna che su Marte i suoli indagati sono pochi e siamo ben lungi dall'averne un quadro esaustivo delle loro proprietà e potenzialità. Sulla Terra la varietà dei suoli è elevatissima e se alieni atterrassero in Amazzonia e lì vi analizzassero i suoli, farebbero un errore clamoroso a dedurre che le caratteristiche dei suoli della tundra siberiana siano le stesse. Su Luna e Marte le condizioni ambientali sono indubbiamente più omogenee che non sulla Terra, ma risulta ormai chiaro che almeno i suoli del "pianeta rosso" non sono affatto tutti uguali. L'impresa di coltivare questi suoli è indubbiamente ardua, ma è impensabile che migliaia di anni di esperienza pratica accumulati sulla Terra e, soprattutto, le conoscenze scientifiche codificate dalla Scienza del Suolo – dalle storiche prove di Justus von Liebig a oggi – e i futuri esperimenti sui suoli extraterrestri o su loro analoghi terrestri, non consentiranno prima o poi di raggiungere lo scopo. E a quel punto come non ipotizzare, dando sfogo alla fantasia, la nascita di un agriturismo extraterrestre? Che sarebbe utile, anche perché come ha detto Roberto Vittori, l'ultimo italiano salito sullo Shuttle: «Andare nello spazio è un'esperienza davvero incredibile, anche per un astronauta. Peccato che lassù il cibo sia così cattivo».

RIASSUNTO

Il viaggio dalla Terra alla Luna, fantascienza nel libro di Jules Verne, si è trasformato in realtà dopo poco più di un secolo. Da allora, si sono ottenute tante informazioni dirette sui corpi del Sistema Solare. Nel caso di quelli solidi a noi più vicini si è ora in grado di decidere se le loro superfici incoerenti possano essere considerate suoli. Quelle della no-

stra luna, di Marte e di qualche asteroide lo sono, in virtù del fatto che risultano alterate chimicamente e quindi conservano informazioni sulla loro storia climatica e geochemica. L'attuale rinnovato interesse delle agenzie spaziali pubbliche e private per l'esplorazione dello spazio probabilmente porterà in un non lontano futuro alla costruzione di basi permanenti sulla Luna e su Marte. In esse i colòni dovranno fare affidamento sui suoli locali per la coltivazione protetta di vegetali, necessari al benessere fisico e psicologico durante i lunghi periodi di permanenza. A tale scopo, i suoli "extraterrestri" dovranno essere liberati da alcune sostanze tossiche, arricchiti nei pochi nutrienti carenti, e ammendati al fine di creare una struttura che ottimizzi lo scambio dei fluidi, difficoltoso a causa della bassa gravità.

ABSTRACT

Jules Verne imagined the journey from Earth to the Moon in the second half of the nineteenth century. This futuristic hypothesis has been turned into reality in the following century. Since then to present, a significant mass of information about the bodies of our Solar System and outside has been accumulated. In the case of a few nearest solid bodies such information is enough for deciding if their loose surfaces are real soils. We feel that at least the ones of the Moon and Mars are actually soils, by virtue of the fact that they are weathered and are hence entities that retain information on their climatic and geochemical history. The current renewed interest of public and private space agencies in space exploration and exploitation will probably lead to building planetary bases, where people will have to rely on local soils for performing indoor agriculture and gardening, eventually amending them for those purposes.

BIBLIOGRAFIA

- AMUNDSON R., JENNY H. (1991): *The place of humans in the state factor theory of ecosystems and their soils*, «Soil Science», 151, pp. 99-109.
- CERTINI G., SCALENGHE R. (2011): *Anthropogenic soils are the golden spikes for the Anthropocene*, «The Holocene», 21, pp. 1269-1274.
- CERTINI G., SCALENGHE R., AMUNDSON R. (2009): *A view of extraterrestrial soils*, «European Journal of Soil Science», 60, pp. 1078-1092.
- DUKE M.B., NAGLE J.S. (1975): *Stratification in the lunar regolith – A preliminary view*, «Earth, Moon, and Planets», 13, pp. 143-158.
- FALKOWSKI P.G. ET 16 AL. (2000): *The global carbon cycle: A test of our knowledge of Earth as a system*, «Science», 290, pp. 291-296.
- HAPKE B. (2001): *Space weathering from Mercury to the asteroid belt*, «Journal of Geophysical Research», 106, pp. 10039-10073.
- JOHNSON D.L. (1998): *A universal definition of soil*, «Quaternary International», 51-52, pp. 6-7.
- KRANTZ W.B., GLEASON K.J., CAINE N. (1989): *Suoli poligonalali*, «Le Scienze», 246, pp. 46-52.
- NAKAMURA T. ET 21 AL. (2011): *Itokawa dust particles: a direct link between S-type asteroids and ordinary chondrites*, «Science», 333, pp. 1113-1116.

- NAVARRO-GONZÁLEZ R. ET 11 AL. (2008): *Mars-like soils in the Atacama Desert, Chile, and the dry limit of microbial life*, «Science», 302, pp. 1018-1021.
- NOGUCHI T. ET 17 AL. (2011): *Incipient space weathering observed on the surface of Itokawa dust particles*, «Science», 333, pp. 1121-1125.
- SANDERSON E.W., JAITEH M., LEVY M.A., REDFORD K.H., WANNENO A.V., WOOLMER G. (2002): *The human footprint and the last of the wild*, «BioScience», 52, pp. 891-904.
- SMITH P.H. ET 35 AL. (2009): *H₂O at the Phoenix landing site*, «Science», 325, pp. 58-61.
- SOIL SURVEY STAFF (2010): *Keys to Soil Taxonomy*, Undicesima edizione, United States Department of Agriculture e Natural Resources Conservation Service, U.S. Government Printing Office, Washington DC.
- SOLOMON S.C. (2003): *Mercury: the enigmatic innermost planet*, «Earth and Planetary Science Letters», 216, pp. 441-455.
- SQUYRES S.W. ET 26 AL. (2012): *Ancient impact and aqueous processes at Endeavour crater, Mars*, «Science», 336, pp. 570-576.
- UGOLINI F.C., BOCKHEIM J.G. (2008): *Antarctic soils and soil formation in a changing environment: A review*, «Geoderma», 144, pp. 1-8.

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.

GIACOMO CAO^{*,**,**}, ALESSANDRO CONCAS^{*}, GIANLUCA CORRIAS^{**},
ROBERTO ORRÙ^{**}, ROBERTA LICHERI^{**}, MASSIMO PISU^{*}

Reperimento *in-situ* di materie prime utili per il sostentamento di missioni umane nello spazio

INTRODUZIONE

I paradigmi ISRU (In Situ Resource Utilization) e ISFR (In Situ Fabrication and repair) costituiscono il fondamento concettuale su cui basare lo sviluppo di tecnologie utili per l'esplorazione e la colonizzazione dello spazio. Le tecnologie ISRU hanno come obiettivo quello di garantire il sostentamento e l'operatività di equipaggi umani che nel futuro si insedieranno in modo permanente su Marte, Luna o asteroide attraverso lo sfruttamento di risorse naturali disponibili "in situ" quali materie prime per la produzione di ossigeno, acqua e cibo ma anche di propellenti e materiali da costruzione. L'obiettivo delle tecnologie ISFR è invece quello di consentire la fabbricazione e/o riparazione "in situ" di attrezzature e materiali utilizzati durante le missioni spaziali.

Pur essendo principalmente volto alla risoluzione di problematiche tipiche del settore aerospaziale, l'utilizzo dei paradigmi ISRU e ISFR può avere importanti ripercussioni su problematiche relative all'ambiente terrestre consentendo lo sviluppo di tecnologie innovative per la riduzione delle emissioni di CO₂ in atmosfera, il riciclo dei rifiuti e la riduzione dei consumi idrici.

In tale ottica una "task force" costituita dall'Università di Cagliari, dal Dipartimento Energia e Trasporti del CNR (DET-CNR) e dal Centro di ricerca sviluppo e studi superiori in Sardegna (CRS4) svolge un'intensa attività di ricerca finalizzata allo sviluppo di nuove tecnologie ISRU e ISFR nell'ambito

* CRS4, Centro di Ricerca, Sviluppo e Studi Superiori in Sardegna, Parco Scientifico e Tecnologico, POLARIS

** Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali, Università di Cagliari

*** Centro Interdipartimentale di Ingegneria e Scienze Ambientali (CINSA) e Laboratorio di Cagliari del Consorzio Interuniversitario Nazionale "La Chimica per l'Ambiente" (INCA)

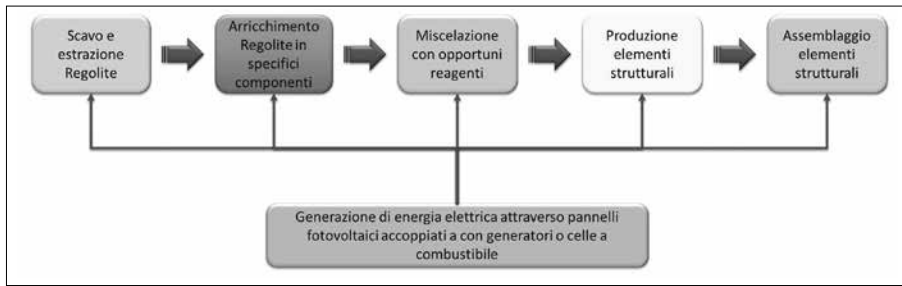


Fig. 1 Schema a blocchi del processo di produzione di elementi strutturali per la realizzazione di strutture a uso civile e/o industriale su Luna, Marte e asteroide

del progetto COSMIC finanziato dall’Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Tale attività si è recentemente concretizzata nel deposito di quattro brevetti (Cao et al., 2010; 2011a; 2011b; 2012) relativi a nuovi processi sia per la produzione di elementi strutturali su Luna, Marte e asteroide sia per lo sfruttamento di risorse naturali disponibili su Marte. Nelle parti seguenti del documento si riporta una breve descrizione delle caratteristiche dei processi brevettati.

PRODUZIONE DI ELEMENTI STRUTTURALI

I primi brevetti depositati da Cao et al. (2010; 2011a) si riferiscono allo sviluppo di un processo basato sui paradigmi ISRU e ISFR per la produzione di elementi strutturali utili alla realizzazione di costruzioni di strutture a uso civile e/o industriale sulla Luna, su Marte e su asteroide. Le rivendicazioni del brevetto hanno come oggetto anche il “kit” o gli impianti necessari per l’implementazione di tale processo. Il processo brevettato contempla le fasi operative mostrate schematicamente in figura 1.

Sia nel caso di applicazioni lunari sia nel caso di applicazioni su Marte, la prima fase del processo consiste nello scavo ed estrazione della regolite attraverso opportune apparecchiature specificatamente progettate e realizzate per operare in condizioni extraterrestri. Nella fase successiva del processo la regolite viene arricchita in particolari composti già presenti in quantità significative sia nel suolo marziano che in quello lunare. Nello specifico il composto in cui è arricchita la regolite è l’ilmenite per il caso di applicazioni lunari e l’ematite per quanto concerne le applicazioni su Marte. La terza fase operativa del processo prevede la miscelazione della regolite arricchita con specifici reagenti trasferiti, se necessario, dalla terra.

Lo “step” successivo, che costituisce il cuore dell’intero processo, consi-

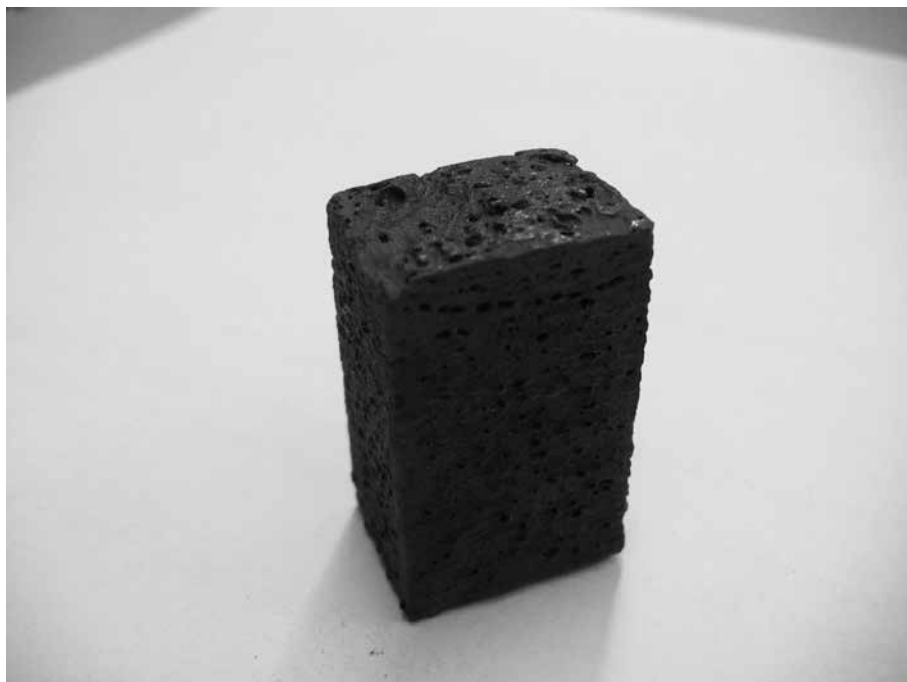


Fig. 2 *Fotografia di un tipico elemento strutturale prodotto mediante il processo brevettato*

ste nell'innescare una reazione auto-propagante a elevata temperatura in seno alla miscela ottenuta come precedentemente riportato. Questa tipologia di reazioni è caratterizzata dal fatto che, una volta innescate si auto-propagano sotto forma di un'onda di combustione attraverso la miscela reagente senza richiedere ulteriore energia. Tale fase operativa è realizzata all'interno di particolari reattori che costituiscono l'unità impiantistica principale del processo e sono opportunamente progettati per operare in condizioni marziane e lunari, ossia in condizioni microgravità, in presenza di basse temperature e in atmosfera estremamente rarefatta o quasi totalmente assente.

Il prodotto finale del processo è costituito da elementi strutturali a cui è possibile conferire forme e dimensioni opportune attraverso appropriati stampi. In definitiva sfruttando reazioni molto semplici, attivabili con bassi consumi energetici, è possibile ottenere prodotti solidi finali, modulabili in dimensione e forma nonché caratterizzati da una buona purezza e ottime proprietà meccaniche che ne consentono lo sfruttamento per la realizzazione di strutture a uso civile e/o industriale sul suolo marziano e lunare. In figura 2 è mostrata una fotografia di un elemento strutturale ottenuto attraverso il processo brevettato.

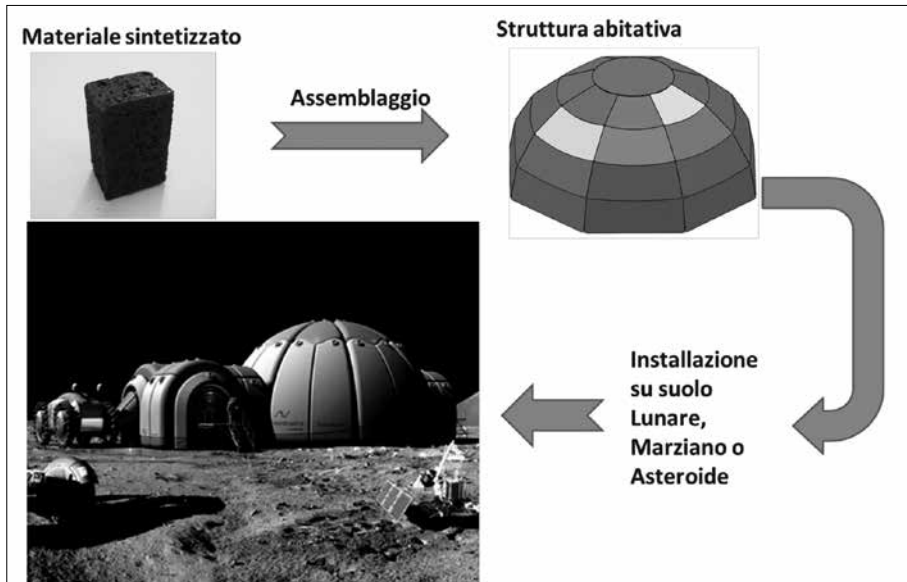


Fig. 3 Implementazione del processo brevettato sul Luna, Marte o asteroide

In figura 3 si mostra schematicamente come gli elementi strutturali ottenuti possono essere assemblati per realizzare strutture a uso civile e/o industriale su Luna e Marte.

La fattibilità della fase operativa principale del processo, ovvero dello stadio reattivo, è stata verificata nell'ottobre del 2010 a Bordeaux (France) durante la 53° campagna di voli parabolici, nell'ambito della quale è stato possibile eseguire esperimenti in condizioni di microgravità all'interno di un Airbus 300 durante le 30 parabole relative a ciascuna delle tre missioni compiute.

PRODUZIONE DI MATERIALI PER IL SOSTENTAMENTO DI MISSIONI UMANE SUL PIANETA MARTE

Il pianeta Marte è caratterizzato dalla presenza di importanti risorse naturali utilizzabili come materia prima per la produzione di beni di consumo utili a futuri equipaggi umani. Tra tali risorse è possibile annoverare l'anidride carbonica, l'azoto, l'argon e il vapor acqueo presenti nell'atmosfera marziana così come l'acqua adsorbita sulla regolite. In linea di principio la trasformazione di queste risorse in materiali utili per il sostegno di missioni spaziali umane permanenti può avvenire facendo ricorso a opportune tecnologie.

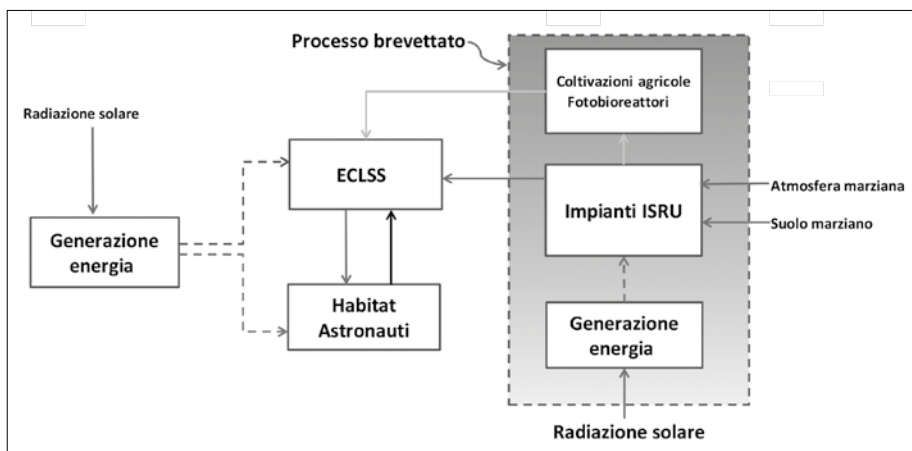


Fig. 4 Schema di una possibile integrazione delle tecnologie ISRU con sistemi ECLSS

In questo scenario, i successivi brevetti depositati da Cao et al. (2011b; 2012) si riferiscono a una tecnologia innovativa che, opportunamente accoppiata con sistemi di controllo ambientali rigenerativi (ECLSS), consente di perseguire gli obiettivi sopra esposti, ossia lo sfruttamento delle risorse marziane per la produzione di materiali utili a missioni spaziali umane permanenti. I sistemi ECLSS tipicamente impiegati nella Stazione Spaziale Internazionale sono costituiti da un insieme di unità impiantistiche che operando in sinergia consentono di mantenere le opportune condizioni fisiologiche all'interno della cabina dell'equipaggio rimuovendo i cataboliti organici e inorganici prodotti dagli astronauti quali atmosfera esausta, scarti e umidità così come diverse tipologie di rifiuti solidi e liquidi. I sistemi ECLSS rigenerativi permettono inoltre il riciclo degli scarti rimossi attraverso delle tecnologie che consentono di ottenere, a partire da questi, materiali utili per l'equipaggio quali acqua, ossigeno e in alcuni casi cibo. Nonostante l'obiettivo ultimo dei moderni sistemi rigenerativi sia quello di pervenire a una sorta di sistema a ciclo chiuso in cui tutti materiali necessari al sostentamento degli astronauti possano essere prodotti riciclando gli scarti, attualmente le sperimentazioni e le simulazioni modellistiche effettuate nell'ambito di specifiche attività di ricerca, hanno dimostrato che solo una piccola percentuale dei fabbisogni materiali primari degli astronauti può essere soddisfatta attraverso il riciclo degli scarti (Poughon et al., 2009). Questo implica che le aliquote di materiali necessari non ottenibili attraverso riciclo debbano essere trasferite sulla stazione spaziale dalla terra. Risulta quindi evidente che facendo ricorso esclusivamente a sistemi ECLSS, le future missioni spaziali umane su Marte potranno

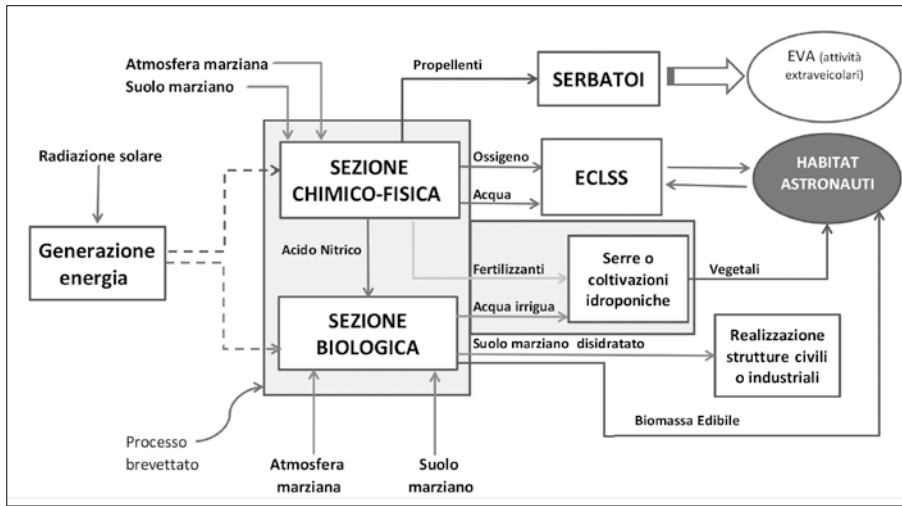


Fig. 5 Schema a blocchi del processo ISRU brevettato

essere fortemente condizionate, in termini di fattibilità tecnico-economica, dalla necessità di porre in essere dispendiosi viaggi interplanetari per il rifornimento continuo dei materiali necessari alla sussistenza e all'operatività dell'equipaggio.

D'altra parte le tecnologie ISRU possono contribuire a superare questi inconvenienti in quanto i materiali richiesti potrebbero essere prodotti "in situ" a partire dalle risorse naturali disponibili su Marte. Come mostrato in figura 4 il processo brevettato da Cao et al. (2011b; 2012) si basa su questo concetto di fondo integrando lo sfruttamento delle risorse in-situ con gli attuali sistemi rigenerativi ECLSS.

Nello specifico, il processo proposto da Cao et al. (2001b; 2012) consente la produzione di energia, ossigeno respirabile, acqua per usi potabili e igienici, idrogeno e ammoniaca da utilizzare come propellenti, acido nitrico e nitrato d'ammonio da sfruttare come fertilizzanti così come di biomassa edibile, a partire dalle risorse disponibili nell'atmosfera e nel suolo marziani.

A tale fine l'impianto proposto è concettualmente suddiviso in due sezioni interagenti ossia la sezione chimico fisica e quella biologica (fig. 5). Nella prima sezione, la combinazione di diverse unità impiantistiche specificatamente progettate per operare in condizioni Marziane, consente la produzione di acqua, ossigeno e dei propellenti necessari all'equipaggio così come opportuni quantitativi di fertilizzanti da utilizzare nella sezione biologica.

La sezione biologica è alimentata sia da risorse naturali quali CO_2 atmo-

sferica e regolite sia da fertilizzanti sintetici, prodotti nella sezione chimico-fisica, utilizzati per produrre biomassa edibile e ossigeno fotosintetico mediante opportuni fotobioreattori e serre.

RIASSUNTO

Nel campo della ricerca spaziale è noto come il ricorso ai paradigmi ISRU (In Situ Resource Utilization) e ISFR (In Situ Fabrication and Repair) abbia consentito lo sviluppo di tecnologie fondamentali per l'esplorazione dello spazio e la sua colonizzazione. Recentemente sono stati brevettati due nuovi processi ISRU/ISFR, potenzialmente utili per la realizzazione di future missioni spaziali umane su Marte e Luna. In particolare il primo processo, sfruttando reazioni auto-propaganti da elevata temperatura, consente la produzione di elementi strutturali utili alla realizzazione di strutture ad uso civile e/o industriale in ambiente extra terrestre utilizzando come materia prima le regolite Lunare o Marziana. Il secondo processo consente la produzione di materiali quali ossigeno, acqua e biomassa edibile, utili al sostentamento di missioni spaziali umane su Marte. In particolare vengono sfruttate come materie prime solo le risorse naturali disponibili in situ, ossia l'atmosfera e la regolite Marziana. Nel presente articolo, i suddetti processi sono brevemente descritti e discussi.

ABSTRACT

In the field of space research it is well known that ISRU (In Situ Resource Utilization) and ISFR (In Situ Fabrication and Repair) paradigms gave rise to the development of core technologies for space exploration and colonization. In this framework two novel ISRU/ISFR processes, potentially useful for future manned Lunar and/or Martian space missions, have been recently patented. Specifically, the first process involves the fabrication of physical assets by self-propagating high temperature synthesis (SHS) for construction applications in extra-terrestrial environments starting from Lunar or Martian regolith. On the other hand, the second process allows the production of materials such as oxygen, water and edible biomass that are potentially useful to sustain manned space missions on Mars. In this process only natural resources available in-situ, namely Mars atmosphere and regolith, are exploited as raw feedstock. The above processes are briefly described and discussed in this work.

REFERENCES

- CAO G., CONCAS A., CORRIAS, G., LICHERI R., ORRÙ R., PISU M., ZANOTTI C. (2010): *Procedimento di fabbricazione di elementi per strutture abitative e/o industriali sul suolo lunare e/o marziano*, MI2010A001412; Applicants: UNICA, ASI; Luglio.
- CAO G., CONCAS A., CORRIAS G., LICHERI R., ORRÙ R., PISU M., ZANOTTI C. (2011a): *Process for manufacturing physical assets for civil and/or industrial facilities on moon, mars and/or asteroid*, 10453PTWO; Applicants ASI, UNICA; Luglio.

- CAO G., CONCAS A., CORRIAS G., LICHERI R., ORRÙ R., PISU M. (2011b): *Procedimento per l'ottenimento di prodotti utili al sostentamento di missioni spaziali sul suolo marziano mediante l'utilizzo di risorse reperibili in situ*, 11205PTIT; Applicants ASI, CRS4, UNICA; Luglio.
- CAO G., CONCAS A., CORRIAS G., LICHERI R., ORRÙ R., PISU M., (2012): *A process for the production of useful materials to sustain manned space missions on Mars through in-situ resources utilization*, PCT/IB2012/053754; Applicants:UNICA, CRS4, ASI; Luglio.
- POUGHON L., FARGES B., DUSSAP C.G., GODIA F., LASSEUR C. (2009): *Simulation of the MELiSSA closed loop system as a tool to define its integration strategy*, «Advances in Space Research», 44, pp. 1392-1403.

Coltivazione di piante per alimentazione in ambiente extraterrestre

La coltivazione delle piante nello spazio (space farming) può essere intesa sia come la possibilità di crescere piante in piccole serre a bordo di astronavi durante lunghi viaggi spaziali, oppure come la possibilità di coltivare ampie superfici su altri pianeti. Mentre il secondo scenario può essere considerato come parte di un futuro lontano, la coltivazione di piante su astronavi è qualcosa di molto più prossimo. La pianificazione delle missioni umane su Marte, previste entro la metà del secolo, ha infatti risvolti che non riguardano solo gli aspetti tecnologici ma anche inattesi aspetti “agricoli”. Un viaggio verso Marte richiede circa 6 mesi (solo andata), un tempo lungo che implica la necessità di fornire all’equipaggio tutto quello che serve in termini di ossigeno e di alimenti per un periodo di almeno un anno. In questa prospettiva risulta particolarmente interessante sviluppare sulle astronavi delle coltivazioni vegetali che da un lato riciclano la CO₂ prodotta dall’equipaggio rigenerando ossigeno e dall’altro producono alimenti vegetali che possono servire per integrare la dieta, un sistema definito come «bioregeneration life support system» (Drysdale et al., 2003).

In linea di principio le specie vegetali possono essere coltivate nello spazio, tuttavia le condizioni di microgravità a cui sono sottoposte le piante al di fuori dell’atmosfera terrestre possono influenzare la loro crescita e la loro produttività (Salisbury, 1997; Stutte et al., 2006). Sinora molto è stato fatto per mettere a punto piante e sistemi di coltivazione potenzialmente idonei alla coltivazione nello spazio, tuttavia sinora ci sono pochissimi studi dedicati alla verifica della potenzialità produttive delle piante in condizioni di microgravità (Campbell et al., 2001; Levinskikh et al., 2000a, 2000b).

* CRA-Centro di Ricerca per la Genomica e Postgenomica Animale e Vegetale, Fiorenzuola d’Arda (PC)



Fig. 1 Due varietà *super-dwarf* di frumento: *Apogee* a sinistra (circa 45 cm di altezza) e *Perigee* a destra (circa 30 cm di altezza) (http://www.usu.edu/cpl/research_dwarf_wheat.htm).

Sviluppare sistemi agricoli artificiali sulle astronavi richiede varietà e tecnologie dedicate. Lo spazio e il tempo disponibile per ottenere un raccolto è molto limitato ed è quindi necessario utilizzare piante di piccola dimensione capaci di crescere molto velocemente. In risposta a queste esigenze, nel corso degli anni '90 presso l'Università dello Utah (<http://www.usu.edu/cpl/outreach.htm>) sono state sviluppate alcune varietà di frumento (fig. 1), riso (fig. 2, Frantz et al., 1999), pomodoro e pisello definite “super-dwarf” e caratterizzate da un'altezza di circa 25-35 cm e da un ciclo vegetativo dalla semina alla raccolta inferiore ai 90 giorni. Queste varietà producono ovviamente molto meno delle varietà utilizzate in agricoltura, tuttavia intensificando il sistema colturale attraverso una semina molto fitta e una concimazione azotata e carbonica (facilmente realizzabile anche su un'astronave) è possibile ottenere produzioni accettabili. Recenti lavori hanno proposto anche l'utilizzo della patata dolce come coltura spaziale attraverso tecniche colturali capaci di limitarne lo sviluppo vegetativo (Massa e



Fig. 2 Esempio di pianta di riso super-dwarf (a destra) a confronto con piante nane e seminane. Le piante seminane sono quelle comunemente coltivate nei campi (http://www.usu.edu/cpl/research_dwarf_rice.htm)



Fig. 3 *Coltivazione di insalata in camere di crescita per astronavi spaziali con luce a LED*
(Fonte NASA)

Mitchell, 2012). Questi risultati rendono realistico l'uso delle piante come fonte di cibo e ossigeno in un viaggio spaziale. Ovviamente la “miniaturizzazione” delle piante è rilevante solo per le specie dove solo i semi o i frutti sono eduli, nel caso di verdure a foglia come lattughe o spinaci è possibile utilizzare le varietà tradizionali e raccogliere le piante quando la dimensione satura lo spazio disponibile. Con riferimento ai substrati necessari per la crescita delle piante, queste possono essere cresciute su substrati realizzati appositamente per le condizioni di microgravità (Gruener et al., 2003) oppure in sistemi idroponici.

Oltre alla selezione di varietà idonee alla crescita in spazi ridotti, la recente tecnologia delle luci a LED ha consentito un importante passo avanti nella realizzazione di sistemi di illuminazione capaci di fornire la luce necessaria alla crescita delle piante (anche solo limitatamente alle lunghezze d'onda nel rosso e nel blu utilizzate dalle foglie, fig. 3) senza produrre eccessivo calore minimizzando in tal modo lo spazio tra le lampade e le foglie delle piante.

L'utilizzo combinato di piante super-dwarf e di celle climatiche con luci a LED può realisticamente consentire di sviluppare coltivazioni in camere climatiche a più ripiani e fornire alimenti e ossigeno all'equipaggio di un viaggio

spaziale. L'obiettivo dei prossimi anni sarà quello di rendere un equipaggio spaziale autosufficiente per ossigeno e cibo attraverso la coltivazione di poche decine di metri quadrati per persona, una realtà che oggi pare a portata di mano e che contribuirà in modo significativo alla realizzazione delle missioni umane su Marte.

RIASSUNTO

La coltivazione delle piante nello spazio (space farming) può fornire ossigeno ed alimenti agli equipaggi durante i lunghi viaggi spaziali necessari per raggiungere altri pianeti (es. Marte). La selezione di piante "miniaturizzate" a rapido ciclo vegetativo combinata con la realizzazione di apposite celle climatiche dotate di luci a LED sta rendendo realistica un prospettiva che fino a qualche anno fa era confinata ai racconti di fantascienza.

ABSTRACT

Space farming is the ability of growth crop plant onboard of the spacecrafts. The selection on "superdwarf" genotypes with a short life cycle for most important crops coupled with special grow-chamber equipped with LED light is making possibly to growth plants in the space. Space farming is ready to provide oxygen and food to sustain the human life during long term missions (e.g. mission to Mars).

BIBLIOGRAFIA

- CAMPBELL W.F., SALISBURY F.B., BUGBEE B., KLASSEN S., NAEGLE E., STRICKLAND D.T., BINGHAM G.E., LEVINSKIKH M., ILJINA G.M., VESELOVA T.D., SYTCHEV V.N., PODOLSKY I., MCMANUS W.R., BUBENHEIM D.L., STIEBER J., JAHNS G. (2001): *Comparative floral development of Mir-grown and ethylene-treated, earth-grown Super Dwarf wheat*, «Journal of Plant Physiology», 158, pp. 1051-1060.
- DRYSDALE A.E., EWERT M.K., HANFORD A.J. (2003): *Life support approaches for Mars missions*, «Advances in Space Research», 3, pp. 51-61.
- FRANTZ J., PINNOCK D., KLASSEN S., BUGBEE B. (1999): *Characterizing 'Super Dwarf' Rice for Use in Advanced Life Support*, «Life Support and Biosphere Science».
- GRUENER J.E., MING D.W., HENDERSON K.E., GALINDO C. (2003): *Common ion effects in zeoponic substrates: wheat plant growth experiment*, «Microporous and Mesoporous Materials», 61, pp. 223-230.
- LEVINSKIKH M.A., SYCHEV V.N., DERENDIAEVA T.A., SIGNALOVA O.B., PODOL'SKI I.G., PADALKA G.I., AVDEEV S.V., BINGHAM G.E. (2000a): *Growth of wheat from seed-to-seed in space flight*, «Aerospace and Environmental Medicine», 34, pp. 44-49.
- LEVINSKIKH M.A., SYCHEV V.N., DERENDIAEVA T.A., SIGNALOVA O.B., SALISBURY F.B., CAMPBELL W.F., BINGHAM G.E., BUBENHEIM D.L., JAHNS G. (2000b): *Analysis of the*

spaceflight effects on growth and development of super dwarf wheat grown on the space station Mir, «Journal of Plant Physiology», 156, pp. 522-529.

MASSA G.D., MITCHELL C.A. (2012): *Sweetpotato vine management for confined food production in a space life-support system*, «Advances in Space Research», 49, pp. 262-270.

SALISBURY F.B. (1997): *Growing super-dwarf wheat in space station Mir*, «Life support & biosphere science: international journal of earth space», 4, pp. 155-166.

STUTTE G.W., MONJE O., HATFIELD R.D., PAUL A.-L., FERL R.J., SIMONE C.G. (2006): *Microgravity effects on leaf morphology, cell structure, carbon metabolism and mRNA expression of dwarf wheat*, «Planta», 224, pp. 1038-1049.

FRANCESCO FERRINI*

Il verde nelle città del futuro

INTRODUZIONE

Già nel 1975, Barbieri sosteneva che il verde è una delle maggiori invenzioni dell'urbanistica moderna, con ciò sfatando uno dei tanti luoghi comuni diffusi dagli speculatori nella parte meno preparata dell'opinione pubblica, secondo cui le città del nostro tempo sarebbero “ineluttabilmente” condannate alla congestione, al soffocante gigantismo, al caos. Al contrario emerge chiaramente l'enorme divario che separa l'Italia dagli altri paesi cosiddetti “sviluppati”, e le nostre città da quelle straniere (soprattutto inglesi, francesi, tedesche e scandinave), nelle quali è evidente come lo sforzo delle società coscienti dei problemi del nostro tempo sia tutto teso a rendere sempre migliore la vita urbana, reintroducendo quel contatto con la natura che le sconvolgenti trasformazioni cui esse sono state sottoposte da oltre un secolo rischiavano di eliminare. Tali esempi, così come alcuni di recente realizzazione in Cina e Malesia, dovrebbero essere assunti a modello di quella che dovrà essere la città del futuro: sostenibile, intelligente, inclusiva; categorie ispirate alle linee guida proposte dal documento europeo Europa 2020. Una strategia per una crescita che veda la realizzazione di progetti realizzati in contesti socio-economico e culturali anche molto diversi tra loro, che si caratterizzeranno per l'essere costruzioni aperte e condivise, intrinsecamente connesse al paesaggio e al territorio circostante. Di conseguenza, nei programmi urbanistici delle maggiori città straniere, il verde viene accuratamente proporzionato e distribuito in base a norme precise, messe a punto da studi di igienisti, sociologi e urbani-

* *Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente, Università di Firenze*

sti, insieme a ecologi, agronomi e forestali: non si tratta di creare “giardini” isolati, ma di realizzare una maglia di spazi che penetri profondamente nell’abitato, in modo da servire il maggior numero di cittadini e consentire le più svariate attività creative.

LA CITTÀ DEL FUTURO

Sono passati quasi 18 anni da quando il futurologo George Gilder sentenziò: «Le città sono un avanzo lasciatoci dall’era industriale». Era il 1995 e, analizzando le potenzialità di Internet, Gilder riteneva che la Rete avrebbe annullato le distanze rendendo obsolete le città. La storia degli ultimi anni ha invece mostrato una tendenza opposta. I grandi agglomerati urbani stanno crescendo: una porzione sempre maggiore della popolazione si sta spostando nelle grandi città del pianeta. Internet non ha svuotato di senso le città, anzi. Le tecnologie digitali hanno invaso le strade e quartieri arricchendoli di nuovi servizi e creando un nuovo modo di vivere i centri abitati. Tuttavia la recente crisi economica sta comportando per tutte le città un ripensamento della pianificazione urbanistica e una difficile riflessione strategica sullo sviluppo (Benanti, 2011).

Le città europee sono, infatti, soggette a continui cambiamenti, e nessuna area urbana sarà immune dalle forze che li muovono. Infatti, come il XXI secolo progredirà, è probabile che il ritmo del cambiamento sarà anche accelerato. Luoghi che un tempo prosperavano potrebbero fisicamente e/o economicamente degenerare, mentre altre aree che sono attualmente ritenute povere o depresse potrebbero beneficiare di una rigenerazione o di una rinascita.

Dobbiamo perciò aver ben chiaro il concetto che le città del futuro si devono realizzare adesso per “costruire” la città sostenibile del 2050, poiché la mancanza di un reale impegno su questo porterà a un peggioramento dei problemi urbani. La domanda che dobbiamo porci è, quindi: come deve essere la città sostenibile del 2050?

Una città sostenibile, o eco-città, dovrà essere progettata in considerazione dell’impatto ambientale, abitata da persone dedicate alla minimizzazione degli input energetici, di acqua e cibo, e di output di calore, inquinamento dell’aria e dell’acqua, CO₂ e metano. Esistono alcuni punti fermi dai quali partire per la loro pianificazione:

- le città del futuro dovranno incorporare la natura (pareti verdi, tetti verdi, parchi naturali, connettori);
- si dovranno costruire solo “Green buildings”, cioè “edifici verdi” dove

- massima dovrà essere l'efficienza di uso dell'energia;
- dovrà essere massimizzata l'efficienza e l'efficacia della gestione delle risorse idriche;
- dovrà essere messa a punto una gestione precisa dei rifiuti che garantisca un loro riciclo quasi completo e la produzione di energia da essi;
- è fondamentale, inoltre, che la biodiversità e i sistemi naturali siano preservati a tutti i costi, perché hanno un ruolo critico da giocare nella futura struttura della città.

La città del futuro sarà, dunque, uno spazio urbano, ben diretto da una politica lungimirante, che affronterà le sfide che la globalizzazione e la crisi economica porranno in termini di competitività e di sviluppo sostenibile con un'attenzione particolare alla coesione sociale, alla diffusione e disponibilità della conoscenza, alla creatività, alla libertà e mobilità effettivamente fruibile, alla qualità dell'ambiente naturale e culturale.

In questo contesto le reti digitali possono diventare matrici insediative del territorio, assumendo un ruolo che nel passato è stato di altre infrastrutture a rete quali la ferrovia o il sistema autostradale: le reti digitali devono essere considerate a tutti gli effetti una nuova categoria di opere pubbliche, per cui bisogna pensare a un loro utilizzo strategico in sinergia con le altre opere pubbliche.

IL VERDE NELLE BASI SPAZIALI

Guardando avanti nel futuro e, soprattutto, tenendo conto che, agli attuali ritmi di crescita, avremo bisogno di almeno due "pianeti terra" nel 2050, è sempre meno utopica l'idea di colonizzare altri pianeti. È chiaro che costruire colonie nello spazio non è al momento una soluzione percorribile, ma la ricerca non deve porsi i limiti e, soprattutto, deve precorrere i tempi. Ecco perché, il convegno organizzato dall'Accademia dei Georgofili getta uno sguardo sul futuro offrendo concrete prospettive di quella che potrebbe essere la vita umana e vegetale in una base spaziale.

Poiché si tratta di progettare delle vere e proprie basi-città del tutto autonome, anche la presenza di piante, non necessariamente per scopi alimentari, appare fondamentale per le funzioni vitali dei futuri coloni spaziali. Negli insediamenti spaziali dovrà essere perciò contemplata la presenza di alberi o, comunque, di piante per la produzione di ossigeno e l'abbattimento della CO₂ prodotta senza dover ricorrere esclusivamente a costosi sistemi di depurazione e ossigenazione dell'aria. Sarà perciò fondamentale

studiare gli effetti che l'aria interna ha su una struttura e sui suoi occupanti, considerando che questi "coloni" spenderanno il 100% del loro tempo in un ambiente artificiale e che l'aria interna ha un contenuto d'inquinanti da 10 a 100 volte maggiore rispetto all'aria esterna (ovviamente sul nostro pianeta). La presenza di piante, oltretutto, servirà ad alleviare la "Sick Building Syndrome" (SBS), termine usato per descrivere una situazione in cui molte persone lamentano diversi sintomi o un generico senso di malessere, senza un'apparente ragione, che aumenta in gravità quanto maggiore è il tempo che trascorrono all'interno dell'edificio. Sin dal 1983, l'OMS (l'Organizzazione Mondiale della Sanità) ha riconosciuto la SBS e ha descritto i principali sintomi tra cui: irritazioni delle mucose e delle prime vie aeree, secchezza oculare e irritazione e/o secchezza della cute; lacrimazione, rinorrea; cefalea, difficoltà di concentrazione, ridotta capacità lavorativa; reattività ad allergeni e sostanze chimiche. La presenza di piante nell'ambiente può ridurre, se non eliminare, del tutto, i sintomi della SBS migliorando l'umore delle persone e la loro salute non solo fisica, riducendo la pressione sanguigna, il battito cardiaco e inducendo uno stato di benessere psico-fisico. Appare chiaro quanto sia, perciò, importante la loro presenza in una situazione ambientale particolare come quella di una base spaziale per la quale emerge l'importanza la scelta delle specie più adatte. A questo riguardo appare pertanto fondamentale svolgere specifiche ricerche in grado di rispondere alle seguenti domande:

- quali alberi sono più adatti per le particolari (limitanti?) condizioni micro-climatiche e luminose delle basi?
- quali alberi dovrebbero essere piantati per massimizzare il sequestro di CO_2 e la produzione di O_2 ?
- può essere aumentata la naturale tolleranza di certe specie alle condizioni limitanti mediante l'impiego di adeguate e migliorate tecniche gestione?
- come cambierà la fisiologia delle piante e le loro performance in assenza di cambiamenti stagionali e, soprattutto, dell'assenza di gravità? ($> T^\circ$ foglie, $<$ fotosintesi)
- l'habitus di crescita sarà modificato?
- i colori dei pigmenti fotosintetici su pianeti extrasolari potrebbero non essere verdi.

In conseguenza di quanto esposto, emergono alcuni principali criteri di scelta delle specie arboree per la creazione di aree verdi nelle basi spaziali:

- utilizzare specie che massimizzino la rimozione inquinanti e il sequestro di CO_2 ;

- usare alberi che richiedono bassa manutenzione, adatti al potenziale ambiente limitante (ciò riduce l'emissione dovuta alla gestione dell'albero);
- piantare gli alberi nelle zone della base dove possono essere > efficaci;
- piantare specie che non producono composti organici volatili che potrebbero influenzare negativamente la qualità dell'aria;
- piantare specie originarie delle zone equatoriali e tropicali per la mancanza del cambiamento stagionale (ma attenzione ai fabbisogni idrici);
- specie adatte all'irrigazione con acque reflue.

IL SUBSTRATO

È chiaro che nelle basi spaziali sarà anche necessario creare un substrato per la crescita delle piante. A questo proposito appaiono utili i risultati ottenuti riguardo alla messa a punto di substrati artificiali che potrebbero teoricamente essere utilizzati nella realizzazione di "aree verdi" nelle basi spaziali.

Già alla fine degli anni '50, l'Università di California pubblicò un manuale in cui venivano forniti alcuni suggerimenti sulla composizione dei substrati artificiali che, tuttavia, consistevano essenzialmente di una combinazione di sabbia grossolana (0.5-1 mm) e materiale organico (50:50 o 75:25) con l'aggiunta di piccole percentuali di argilla o limo (max 5%). In Francia, venti anni fa, fu realizzato un substrato fatto di un miscuglio di terra, per il 50%, e di ghiaia, per l'altro 50%: tra la terra fine e la ghiaia si verifica "rottura di granulometria", che è il primo modo di ridurre la compattazione.

Attualmente la ricerca si è orientata verso altri tipi di "mixes" che, oltreché creare un buon substrato per le piante, costituiscono una solida base per pavimentazioni e per marciapiedi.

Questi "mixes" sono, in linea generale, costituiti da una matrice sassosa, suolo che si insinua fra i pori della matrice e da un legante artificiale costituito da un idrogel. I risultati ottenuti confermano che a parità o, addirittura, con densità del terreno maggiori, si riesce a ottenere uno sviluppo radicale notevolmente maggiore, il che ha, chiaramente, riflessi positivi sulla crescita delle piante. I substrati artificiali hanno, infine, dimostrato che, qualora si provveda un adeguato rifornimento idrico, non si ha alcun effetto deprimente sull'attività delle piante, dovuto a problemi di siccità causati da un eccesso di scolo delle acque. L'utilizzo di elevate percentuali di materiale roccioso (reperibile sul pianeta "ospite") consentirà di ridurre notevolmente la quantità di terra (che invece dovrà essere, con elevatissima probabilità, trasportata dal nostro pianeta).

CONCLUSIONI

Nelle città del futuro, il verde pubblico dovrà assumere aspetti e funzioni sempre più precisi e differenziati, dovrà essere organizzato in un vero e proprio “sistema” continuo: dal verde sotto casa per i più piccoli, al parco-giochi a distanza pedonale, dal verde di quartiere con impianti sportivi elementari al verde di settore urbano con attrezzature più complesse e specializzate, fino alla grandiosa area naturale al servizio dell’intera città e del territorio circostante. A ciò va aggiunta la funzione che il verde avrà nella gestione dei cambiamenti climatici attraverso la mitigazione degli estremi climatici e la gestione delle acque meteoriche.

La necessità di scelte corrette su ciò che dobbiamo piantare per le città del futuro è perciò fondamentale in uno scenario di cambiamento globale che renderà ancora più evidente la natura “strutturale” delle criticità nella pianificazione, realizzazione e gestione del verde urbano.

Tutto questo vale ancor di più se applicato alle condizioni, probabilmente non facili (per non dire estreme), che dovranno essere affrontate su un altro pianeta. Ecco perché la ricerca dovrà prendere in considerazione una moltitudine di soluzioni e sarebbe stupido escluderne qualcuno a priori dalla sperimentazione. Qualcuna risulterà fattibile, altre no. È il rischio d’impresa che la ricerca deve e può correre.

BIBLIOGRAFIA

- ALUSI A., ECCLES R., EDMONSON A.C., ZUZUL T. (2011): *Sustainable cities: oxymoron or the shape of the future?*, Harvard Business School, Working paper, 11-062.
- ALVEY A.A. (2006): *Promoting and preserving biodiversity in the urban forest*, «Urban Forestry & Urban Greening», vol. 5 (4), pp. 195-201.
- BARBIERI G. (1975): *Un pianeta da salvare*, Principato Editore, Milano.
- BENANTI P. (2011): <http://sinderesi.wordpress.com/2011/05/05/smart-city-come-la-neuroetica-e-le-neuroscienze-stanno-cambiando-il-volto-delle-nostre-citta/>
- CHRISTENSEN J.H., HEWITSON B., BUSUIOC A., CHEN A., GAO X., HELD I., JONES R., KOLLI R.K., KWON W.T., LAPRISE R., MAGAÑA RUEDA V., MEARNES L., MENEDEZ G.C., RAISANEN J., RINKE A., SARR A., WHETTON P. (2007): *Regional climate projections*, in SOLOMON S., QIN D., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K.B., TIGNOR M., MILLER H.L. (ed.), *Climate Change 2007: the physical science basis*, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA) (2006): *Urban Sprawl in Europe – the ignored challenge*, EEA Report No 10/2006.EEA, Copenhagen.
- GILL S., HANDLEY J., ENNOS R. & PAULEIT, S. (2007): *Adapting Cities for Climate Change: the role of the green infrastructure*, «Built Environment», 30 (1).

- LAFORTEZZA R., CARRUS G., SANESI G., DAVIES C. (2009): *Benefits and well-being perceived by people visiting green spaces in periods of heat stress*, Urban Forestry & Urban Greening.
- MCCARTHY M.P., BEST M.J., BETTS R.A. (2010): *Climate change in cities due to global warming and urban effects*, «Geophysical Research Letters», 37, doi:10.1029/2010GL042845.
- MEEHL G.A., STOCKER T.F., COLLINS W.D., FRIEDLINGSTEIN P., GAYE A.T., GREGORY G.M., KITO H. A., KNUTTI R., MURPHY J.M., NODA A., RAPER S.C.B., WATTERSON I.G., WEAVER A.J., ZHAO Z.C. (2007): *Global Climate Projections*, in SOLOMON S., QIN D., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K.B., TIGNOR M., MILLER H.L. (ed.), *Climate Change 2007: the physical science basis*, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA.
- NEW YORK RESTORATION PROJECT (2011): *At the root of any vibrant city is an urban forest*, www.vibrantcities.org.
- SIMSON A. (2005): *Urban Forestry in Europe: Innovative Solutions and Future Potential*, in *Urban Forests and Trees*, ed. By Konijnendijk, C, Randrup, T B & Schipperijn, J. Springer-Verlag berlin.
- SIMSON A. (2004): *Successful Urban Forestry in the City Centre – is it all about image?*, in *Forestry Serving Urban Societies*, IUFRO World Series No 14, ed. by Konijnendijk, C, Schipperijn, J & Hoyer, K. IUFRO Vienna.