

PONIENDO EN CLARO

Agricultura en la Luna

Saúl Pérez Castrillo¹, Teresa García Aldonza² y Fernando Cartón García³
Facultad de CC. Biológicas y Ambientales. Universidad de León. Alumnos de 3º
de Biología

(biospc01@estudiantes.unileon.es)¹, (biotga00@estudiantes.unileon.es)²,
(biofcg00@estudiantes.unileon.es)³.

Este artículo revisa los últimos estudios y técnicas desarrolladas para el futuro cultivo de plantas en la Luna. Se trata de aportar altas intensidades de luz a los cultivos con el fin de aumentar los rendimientos. Un factor a tener en cuenta en dicho cultivo son las condiciones de baja gravedad. No se han hecho muchos estudios acerca de cómo afecta este factor a las plantas, pero sí se sabe que tiene un efecto negativo en la orientación de la raíz y el metabolismo del almidón. Se trata además de conseguir el máximo aprovechamiento del espacio en los posibles cultivos lunares. Para ello se han diseñado diferentes sistemas de cultivo en cámaras de crecimiento, dentro de grandes complejos ecológicos con altas tasas de autorregeneración de residuos, conocidos como “sistemas ecológicos de soporte vital” (CELSS) o Base Lunar con Sistema de Soporte Vital Bioregenerativo (LBLSS), que aún no han sido puestos en marcha.

Palabras clave

Luna, microgravedad, sustrato, minerales, biorregenerativo.

Introducción

Celebramos en 2009 el año internacional de la astronomía. Tras la llegada del ser humano a la Luna, hace justo cuarenta años, se ha ido afianzando el deseo de llegar a establecerse durante tiempos más o menos prolongados en nuestro satélite. Pero aún quedan muchas incógnitas por resolver ¿Es posible vivir en la Luna? ¿Por cuánto tiempo? ¿Qué interés tiene para la comunidad científica y para la población humana en general? ¿Cómo se puede hacer para conseguir el autoabastecimiento sin necesidad de llevar demasiados productos desde la Tierra?

En estas cuestiones precisamente está trabajando la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y su equivalente europeo, la ESA (European Space Administration), a través de sus respectivos proyectos, destinados en conjunto a encontrar un sistema mediante el cual se pueda mantener la vida en la Luna de manera sostenible, y así intentar en un futuro (lejano todavía) el asentamiento humano en nuestro satélite (**Figura 1**).

En la Luna no hay atmósfera por lo que se tienen que crear unas condiciones gaseosas en las que sea posible el mantenimiento de la vida, y así los seres humanos que pudieran habitar allí sean capaces de cultivar sus propios alimentos. Para ello se deben cultivar las plantas en condiciones óptimas para su crecimiento (temperatura, humedad, concentraciones de gases...), es decir, en aquéllas donde su rendimiento metabólico sea el máximo posible, adaptando esas circunstancias al momento de desarrollo de la planta.

Así se han desarrollado sistemas en los que se pueden realizar cultivos de forma totalmente controlada.



Figura 1. Dibujo idealizado de una base lunar en la que la tripulación cultiva plantas para su autoabastecimiento. (Tomado de <http://www.oregon15.org>)

Desarrollo de condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas

Para empezar, se necesitan niveles de luz altos, que es el requisito más importante para obtener rendimientos elevados. Además se requiere el control de la temperatura, del nivel de dióxido de carbono, de la velocidad del aire...

Teniendo en cuenta que en la Luna no existen estaciones, el entorno ambiental donde se realizarían todos los cultivos sería bajo tierra. Allí en cuanto se cosechara un cultivo se plantaría el siguiente. Al reducir el número de días de cultivo, aumenta el rendimiento en términos diarios.

Así los experimentos realizados hasta el momento han demostrado que los rendimientos máximos que se pueden alcanzar son mayores que los descritos en las mejores condiciones de campo. Ello es debido a que en estos estudios se diseñan condiciones ideales que en el campo nunca se dan (elevada cantidad de luz por ejemplo).

Además estos experimentos nos permiten confiar en que sería posible cultivar plantas fuera de la Tierra con un rendimiento aceptable. Sin embargo hasta ahora sólo se ha investigado con plantas de fácil manejo como es el trigo, y el ser humano necesita además otras fuentes de alimento. Por tanto el proyecto citado es prometedor, pero aún le falta desarrollar partes importantes para que el ser humano pueda habitar de forma permanente en la Luna.

Cultivo en espacio reducido

Debido a que en la Luna no hay atmósfera, ni estaciones climáticas, el cultivo de plantas debería realizarse en espacios controlados, bajo unas condiciones determinadas. Esos espacios físicos no pueden ser muy grandes ya que en las estaciones espaciales el espacio es limitado y debe aprovecharse al máximo. Por ello los cultivos experimentales se realizan en lugares reducidos, concretamente en las llamadas cámaras de crecimiento en las cuales se mantienen las condiciones óptimas para el crecimiento vegetal.

¿Cómo obtener el máximo rendimiento en esos espacios? Se debe proporcionar a las plantas en cada momento condiciones óptimas para su crecimiento y sobre todo un nivel de luz bastante más alto que el de campo, ya que eso es lo que hace, precisamente, que sus ciclos de crecimiento varíen y su rendimiento sea el máximo, mucho mayor que el que alcanzan en la Tierra.

Así en esas cámaras de crecimiento se usan sustratos con una composición similar a la del suelo que la planta necesitaría en la Tierra, o grava volcánica, y se riega las plantas con una solución hidropónica (máximamente nutritiva). El CO₂ que producirían los humanos se canaliza hasta esas cámaras de crecimiento y así las plantas lo usarán para su fotosíntesis. Además, ese CO₂ también se utilizará para, junto con el hidrógeno lunar, sintetizar *in-situ* agua que servirá tanto para abastecimiento humano como de las plantas. La **Figura 2** muestra cómo es una de esas cámaras de crecimiento:

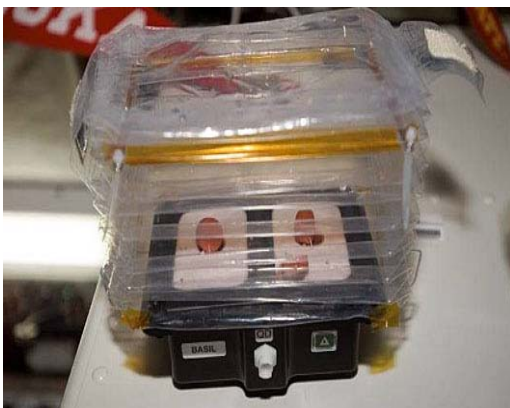


Figura 2. Cámara de crecimiento de la NASA donde están desarrollándose plantas en condiciones controladas. (Tomado de <http://www.nasa.gov>)

Así, se obtienen plantas en los distintos tipos de cultivos y condiciones. Un experimento realizado por la NASA dio como resultado el crecimiento considerable de plantas de trigo durante 20 días en las cámaras de crecimiento controlado. Las imágenes sucesivas que se obtuvieron fueron las mostradas en la **Figura 3**.

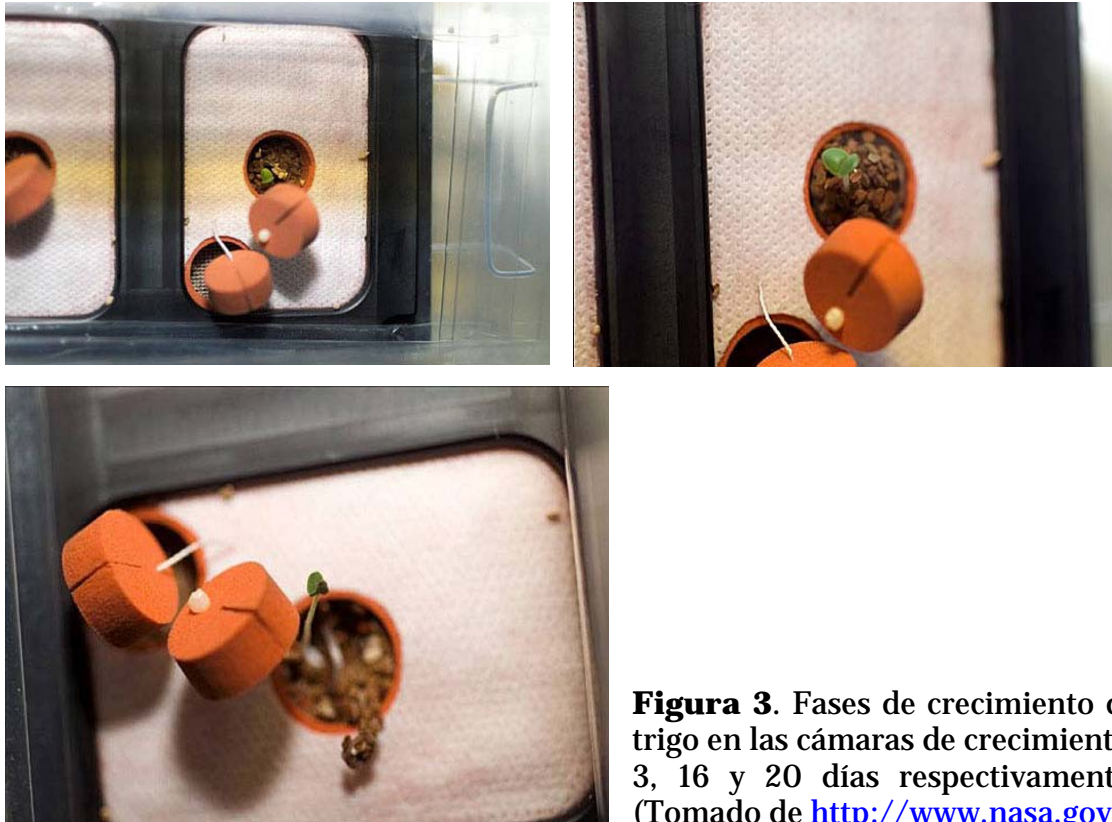


Figura 3. Fases de crecimiento de trigo en las cámaras de crecimiento. 3, 16 y 20 días respectivamente. (Tomado de <http://www.nasa.gov>)

Efectos de la baja gravedad en la agricultura en la Luna

Las condiciones de baja gravedad no solo afectan al crecimiento de la planta, sino también al mantenimiento del sustrato en el suelo, el almacenaje del agua y el riego de la planta. Por tanto constituyen un factor importante a tener en cuenta ya que la planta vive del agua y de los minerales que se aportan, y si éstos no son administrados por falta de gravedad la planta no podría sobrevivir.

En la actualidad no se conocen muchos efectos de la baja gravedad en las plantas, ya que es difícil recrear en la tierra estas condiciones, pero tras algunos ensayos realizados en expediciones espaciales se ha observado un efecto negativo en la orientación de la raíz y en el metabolismo del almidón.

Experimentos realizados con musgos en la estación espacial Mir para observar los efectos de la microgravedad, determinaron que los gránulos de almidón no se depositaban en la dirección de la gravedad, sino al azar. Este efecto produce un crecimiento anormal de la planta. En un experimento se observó que la orientación de las raíces era en forma espiral (**Figura 4**).

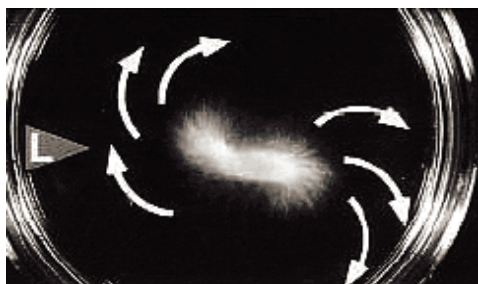


Figura 4. Orientación de las raíces en disposición espiral debido a la baja gravedad. (Tomado de weboflife.nasa.gov)

En otro experimento realizado en la Estación Espacial Internacional (EEI), se intentaron cultivar semillas en condiciones de baja gravedad. Esto se llevó a cabo en cámaras de crecimiento cerradas y con un ambiente controlado. A la vez se cultivaron en la Tierra las mismas semillas. En la actualidad solo se han culminado dos ciclos de vida completos de los experimentos realizados. Uno fue el de un experimento con trigo, realizado en la Estación Mir, el cual completó su ciclo de vida, pero únicamente produjo semillas vacías. El otro experimento fue realizado también en la Estación Mir, con semillas no comestibles, y sí obtuvieron semillas en varias generaciones.

El efecto de las condiciones de microgravedad sobre la orientación de la parte aérea es mucho menor, ya que ésta viene determinada principalmente por la dirección de la luz incidente. Por ello en la agricultura lunar se podría aportar a las plantas una fuente de luz de mayor intensidad que la utilizada en la agricultura tradicional, para compensar el efecto de la baja gravedad. Este hecho se está investigando actualmente en estaciones espaciales. El experimento consiste en aportar a varias muestras de plantas intensidades de luz diferentes. De esta forma la parte aérea tendría ya la orientación adecuada.

Por otra parte, la baja gravedad tendría un efecto considerable sobre el riego de la planta. La raíz necesita tener el agua en sus inmediaciones, para así poder absorberla y transportarla al resto de la planta. De este modo, si la gravedad es baja lo más probable es que el agua se encontrara en movimiento debido a su bajo peso, y al no hallarse cerca de la raíz, la planta no tendría agua y su viabilidad sería nula.

Para controlar la orientación de la parte radicular los cambios a realizar serían más complicados. Uno de ellos afecta a la orientación de los gránulos de almidón en las células del extremo de la raíz, responsables de la percepción de la gravedad en este órgano. Para modificar dicha orientación se han hecho experimentos en los cuales se añaden productos químicos que destruyen los gránulos o que les hacen orientar otras direcciones.

Otra solución –la que tiene mayor aceptación– es analizar las semillas de las plantas cuando lleguen a la Tierra, seleccionar las de aquéllas que se hayan hecho resistentes a las condiciones de microgravedad, e identificar los cambios en el material genético asociados a esta resistencia. Así se podrán sembrar estas

semillas en sucesivos experimentos, y se podrán transmitir a otras plantas los genes responsables de las mutaciones que favorecen el crecimiento en baja gravedad.

Sustrato de las plantas en el espacio. Reciclaje de agua, gases y minerales.

Hasta la fecha, cada vez que los humanos han viajado al espacio han tenido que llevar consigo agua, comida y aire. Los periodos de estancia están limitados por la comida transportada. El aire y el agua pueden ser reciclados por máquinas.

¿Podríamos cultivar en el espacio nuestros propios alimentos, y proporcionar así dietas equilibradas vegetarianas a los astronautas?

Muchos grupos de investigación de la NASA, ESA y diferentes universidades y agencias espaciales, llevan décadas estudiando los nuevos “Sistemas Ecológicos de Soporte Vital (CELSS)”, caracterizados por ser autosuficientes. Son sistemas cíclicos en los que la materia se va transformando hasta comenzar de nuevo el ciclo.

Los primeros experimentos llevados a cabo entre 1950 y 1960 apuntaban a la posibilidad del reciclado del aire de las naves o bases espaciales usando algas. Se podrían construir tanques donde crecieran las algas gracias a luz artificial, para absorber el CO₂ generado por los humanos y emitir el O₂ que éstos necesitan. Estos tanques podrían estar apilados, formando el suelo o las paredes de la nave. Se calcula que se requerirían unos 8 m² de superficie donde crecieran algas para el reciclado de los gases producidos y consumidos por un solo tripulante.

Estudios más actuales, llevados a cabo por el “Centro Europeo de Investigación y Tecnología Espacial (ESTEC)” afirman que podría acabarse la necesidad de transportar nutrientes y sustrato desde la Tierra para el desarrollo de plantas, ya que han descubierto el modo de cultivar claveles de Indias (*Tagetes patula*) en anortosita, una roca muy semejante al regolito lunar.

La composición del suelo lunar es muy pobre en minerales que contienen N, P o K, nutrientes imprescindibles para las plantas (**Figura 5**). Por ello estos claveles de Indias crecían muy mal en anortosita. Sin embargo tras la inoculación del sustrato triturado con la bacteria *Paenibacillus* sp. las plantas lograban crecer rápidamente e incluso florecer.

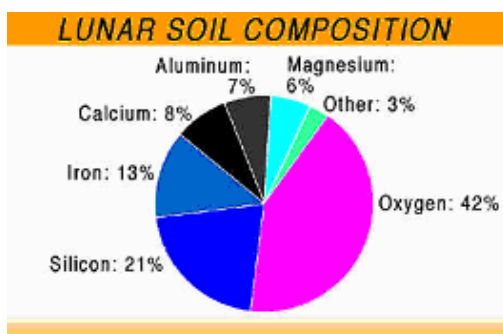


Figura 5. Composición del suelo lunar.

Las bacterias actuaban retirando de la roca minerales como K, Ca y Fe (que son usados por la planta), y fijando el nitrógeno atmosférico, sin provocar ninguna alteración en la rizosfera donde crecían. Además actuaban protegiendo a la planta frente a diferentes tipos de estrés.

Las plantas obtenidas, a pesar de tener partes comestibles, no pueden ser consideradas como una verdadera cosecha. Pero este proceso sigue siendo interesante, pues los claveles de Indias podrían ser procesados posteriormente para fabricar compost sobre el que crecer las verdaderas cosechas.

Este sistema continúa en estudio, y se podría mejorar gracias a la selección genética de plantas y bacterias para un mayor rendimiento.

Sistemas Ecológicos de Soporte Vital (CELSS)

Este tipo de sistemas tiene actualmente una tasa de autosuficiencia superior al 95%. Destacan algunos desarrollados en la Tierra, como Estación Antártica Concordia, Biosphera 1, Biosphera 2, Biosphera 3 y MELISSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative), y otros hasta ahora solo en fase de diseño como LunaGaia.

Todos ellos presentan tres componentes: zoológico (acuario), botánico (invernadero) y bacteriano (que recicla los residuos).

Componente botánico: consiste en el invernadero donde se cultivarían las plantas usadas como alimento para la tripulación. Inicialmente podrían realizarse cultivos hidropónicos automatizados, debido al reducido tamaño de la estación, y el bajo número de astronautas que la habitaran. Cuando esto aumente se cultivaría sobre sustrato lunar enriquecido con materiales transportados desde la tierra, y provenientes del reciclado de residuos.

El aire de la base sería reciclado gracias a las plantas que transformarían el CO₂ de nuevo en materia orgánica. Todo ello en mayor o menor medida dependiendo de las necesidades, ajustando la intensidad de luz para una mayor o menor tasa fotosintética.

La biomasa vegetal desechable que no se consumiera sería reciclada gracias a microorganismos u hongos, que la transformarían de nuevo en sustrato.

Componente zoológico. Consistiría en un acuario, donde se alimentaría a especies de rápido crecimiento, como *Tilapia aurea*, que podrían servir luego como alimento para tripulación.

El alimento de los peces podría ser la biomasa vegetal desechable, que no sirve para el consumo humano. Se reciclarían los desechos de esta forma.

Los productos tóxicos formados, junto con los excrementos de los peces (NH_3), serían reciclados por bacterias nitrificantes. Servirían después como nuevo sustrato para las plantas.

El agua proveniente del riego y del acuario se trataría y reciclaría gracias a columnas de intercambio iónico y potabilizadoras.

Componente bacteriano. Consistiría en tanques (digestores anaeróbicos) donde crecerían bacterias nitrificantes, fotoheterótrofas, fotoautótrofas, anaeróbicas termófilas... que digerirían la biomasa vegetal desechable, liberando minerales, NH_3 , ácidos grasos volátiles y CO_2 . El CO_2 sería usado por las plantas y bacterias fotoautótrofas, y los minerales y NH_3 serían transformados por bacterias nitrificantes en otros compuestos inorgánicos, como nitratos, con los que se enriquecería el nuevo sustrato para la siguiente cosecha. Todo este proceso está indicado en la **Figura 6**.

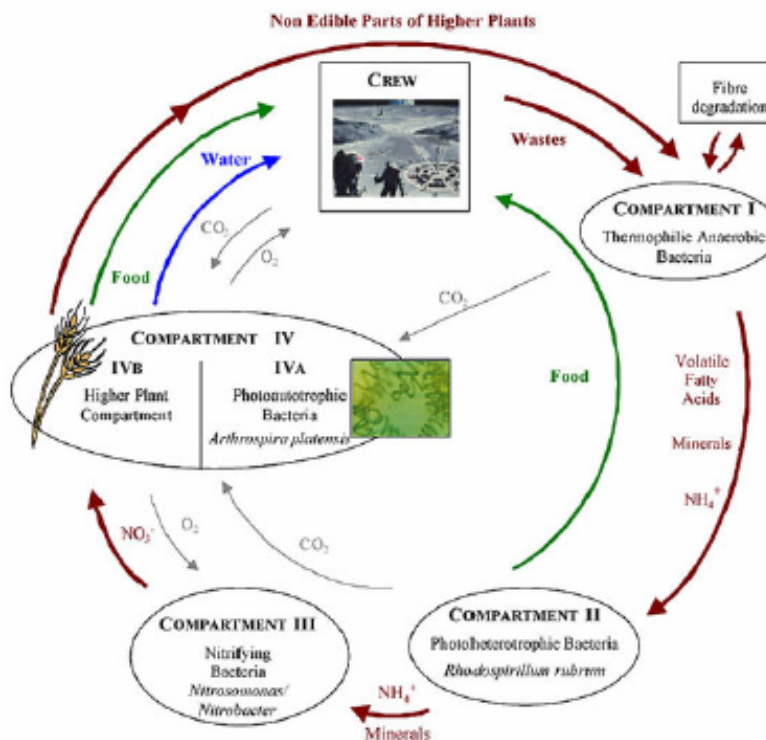


Figura 6. Componente bacteriano Melissa. La materia vegetal desechable es descompuesta por bacterias termófilas anaeróbicas que forman ácidos grasos volátiles. Estos a su vez son usados por bacterias fotoautótrofas productoras de amonio, que es transformado en nitrato por bacterias nitrificantes.

Este sistema fue concebido por un grupo de científicos de la Universidad de Beijing. Es, al igual que los anteriores, un sistema autosuficiente de aporte de alimentos que podría ser establecido en una base lunar. Usa un sustrato sólido para el crecimiento de plantas.

Para la supervivencia de la tripulación se han diseñado dietas vegetarianas basadas en el cultivo de trigo, arroz, zanahorias, tomates, coles, cebollas, ajo, soja, calabacín... que aportan el 76% de los requerimientos nutricionales. El 24% restante sería a base de las reservas transportadas de pescado en conserva, sal yodada, azúcar, salsa de carne y salsa de marisco.

Para el cultivo de las plantas se han planteado varios sistemas:

1. Sistemas de aporte de nutrientes mediante aeroponía: Es un tipo de cultivo en el que las raíces crecen en oscuridad y expuestas al aire (**Figura 7**). La solución nutritiva se pulveriza directamente sobre las raíces.
2. Sistemas hidropónicos, en los que las raíces crecen en agua. Con estos sistemas, se corre el riesgo a largo plazo de la infección de la solución nutritiva con bacterias u hongos fitopatógenos, y que la cosecha se pierda. No se considera este tipo de cultivo.



Figura 7. Cultivo aeropónico de lechugas.

3. Sistemas convencionales de cultivo en sustrato. Una opción en estudio es el uso de suelo lunar o marciano como sustrato. Por ejemplo en suelo lunar el crecimiento de plantas se vería limitado por la baja concentración de K, P y N. Por ello es más realista el uso de sustratos fabricados por el hombre. Estos sustratos deben tener unas características especiales para poder ser usados en bases espaciales:
 - a. Alta fecundidad: que la cantidad y calidad de las plantas cosechadas sea la misma que si se hicieran crecer mediante cultivos hidropónicos.
 - b. Capacidad de protección de las plantas. Que en la biota bacteriana del sustrato no haya microorganismos fitopatógenos.
 - c. Alta capacidad de recuperación de los nutrientes perdidos tras la recolección.

Se calcula que se requeriría un espacio de unos 47,5 m² para el cultivo de las plantas necesarias para un solo tripulante de la estación.

Para reducir el tiempo de crecimiento se podrían enviar desde la Tierra las plantas de la primera cosecha, ya germinadas y crecidas hasta una cierta edad.

Habría que solucionar otros problemas, como los daños causados en las plantas por las vibraciones del despegue y del viaje, e inducir su crecimiento en la dirección adecuada para cuando lleguen a la Luna, pues el viaje dura 3 días y se realiza en ausencia total de gravedad.

Por otro lado queda por abordar el problema del reciclado de los desechos vegetales y de los tripulantes, y del reciclado del aire y agua para que se cierre el ciclo y este sistema sea verdaderamente biorregenerativo.

El aire sería regenerado directamente por la actividad fotosintética de las plantas. Para un mayor o menor nivel de reciclado, se podría controlar la densidad de flujo de fotones aplicada (que variaría entre 700 y 900 micromoles/m²s, dependiendo de la especie) y el fotoperiodo.

Los residuos de la tripulación, como las heces y orina, serían rápidamente deshidratados y almacenados.

El agua del riego, procedente de la deshidratación de los desechos y la transpirada por las plantas (que sería condensada de nuevo), sería rebotabilizada gracias a columnas de intercambio iónico y tanques anaeróbicos, donde crecerían microorganismos.

Por último, los residuos producidos por los restos de alimentos y de biomasa vegetal son reciclados también; por ejemplo, los desechos ricos en lignina, como la paja del trigo, pueden ser usados como sustrato para el crecimiento de hongos, en concreto de la especie *Pleurotus florida*. La paja es molida y tratada con métodos térmicos e inoculados con las esporas de este hongo, procedentes del ciclo de crecimiento anterior. Se cultivarían durante 60 – 70 días a 19 – 27°C y se recolectarían. Los cuerpos fructíferos de los hongos son comestibles, y el sustrato con el micelio se habría transformado en un compost que sería añadido al sustrato para la siguiente cosecha (**Figura 8**).

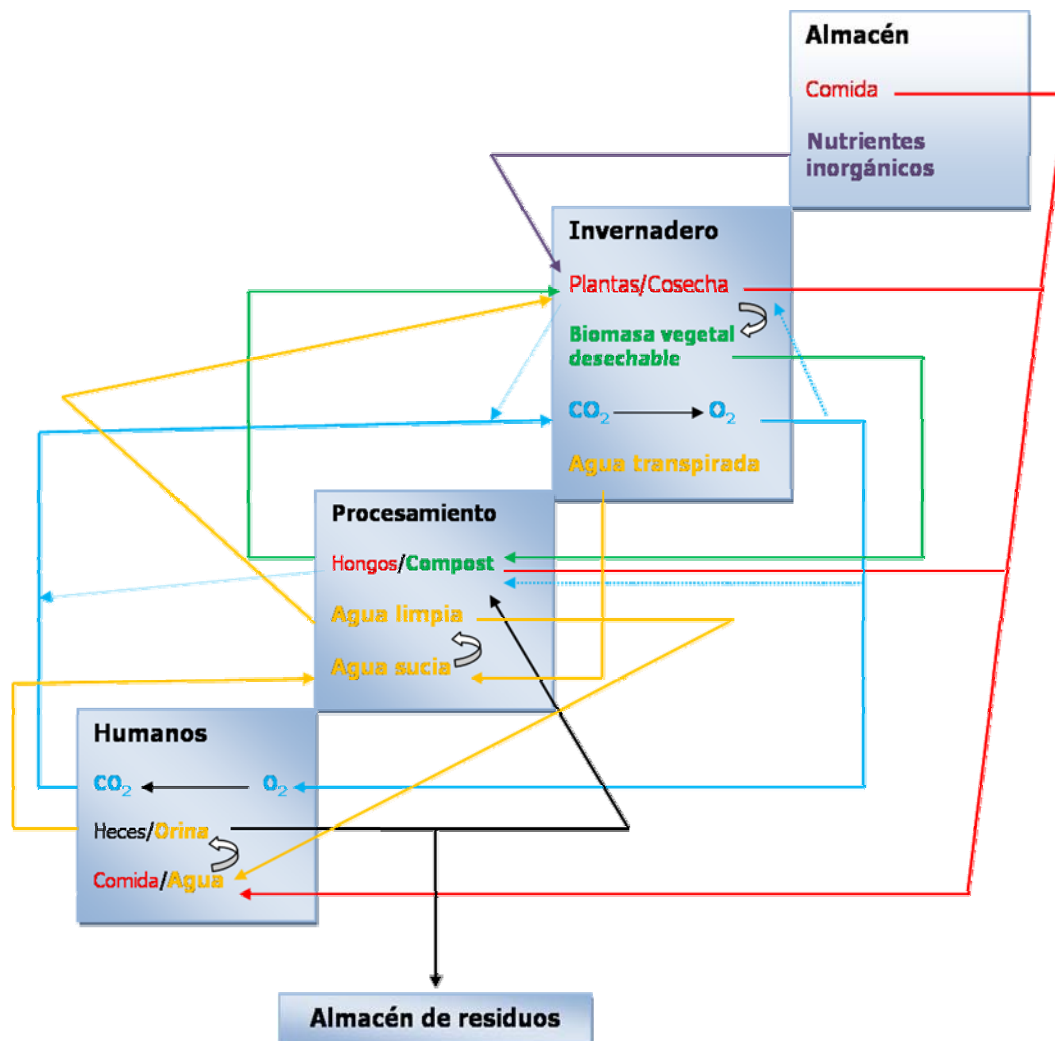


Figura 8. Esquema del sistema de autorregeneración LBLSS. Basado en el mecanismo de reutilización de todos los desechos formados por la tripulación, y reciclado de la materia vegetal no comestible.

Bibliografía

- Easterwood, G.W., Street, J.J., Sartain, J.B., Hubbell, D.H., Robitaille, H.A. 1992. Lunar Base CELSS-A Bioregenerative Approach. En *The second conference on Lunar bases and space activities of the 21st Century*, Ed. W.W. Mendell, NASA Conference Publication 3166, p. 519.
- Gros, B., Lasseur, C., Tikhomirov, A.A., Manukovsky, N.S., Ushakova, S.A., Zolotukhin, I.G. Wheat growth on neutral and soil-like substrates: carbon dioxide exchange and microflora. *ISHS Acta Horticulturae* 644:243-248.



- Salisbury, F.B., Bugbee, B.G. 1985. Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century. Wheat Farming in a Lunar Base. Houston, TX, Lunar and Planetary Institute, edited by W. W. Mendell, p.635.
- Salisbury, F.B., Ross, C.W. 2000. Fisiología de las Plantas. Ed Paraninfo. Madrid.
- <http://adsabs.harvard.edu/full/1985lbsa.conf..635S>
- <http://gateway.nlm.nih.gov/MeetingAbstracts/ma?f=102212635.html>
- <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7351437.stm>
- <http://spacegrant.engr.colostate.edu/projects/archive/pre2003/past/plantgrowth/index.html>
- <http://weboflife.nasa.gov/currentResearch/currentResearchFlight/sts107SeekingTheLight.htm>
- <http://www.asi.org/adb/02/12/01/01/>
- <http://www.cosis.net/abstracts/EGU2008/06761/EGU2008-A-06761.pdf>
- <http://www.nasa.gov>
- <http://www.permanent.com/s-ce-nas.htm>