

# ELS EXPLORADORS ESPACIALS HAN DE SER AGRICULTORS

Què sabem i què necessitem saber sobre el creixement de les plantes en l'espai

F. JAVIER MEDINA

L'exploració espacial requerirà sistemes de suport vital que incloguen plantes per a proporcionar nutrients, oxigen, humitat i benestar psicològic, i que servisquen a més per a eliminar deixalles. En entorns extraterrestres, les plantes s'han d'adaptar a una gravetat diferent i fins i tot a la gravetat zero dels vols espacials. En aquestes condicions s'alteren les característiques cel·lulars i moleculars relacionades amb el desenvolupament de les plantes i es produeixen canvis en l'expressió gènica. En la gravetat lunar, els efectes són comparables amb la microgravetat, mentre que la gravetat de Mart provoca alteracions més lleus. No obstant això, ja ha estat possible desenvolupar i reproduir plantes en l'espai. Les investigacions actuals tracten d'identificar senyals, com la llum, que reemplacen la gravetat com a impulsora del creixement vegetal. Contrarestar l'estrès gravitatori ajudarà a fer possible l'agricultura en hàbitats extraterrestres.

Paraules clau: biologia de plantes, Estació Espacial Internacional (ISS), microgravetat, meristema radical, expressió gènica.

## ■ INTRODUCCIÓ

El 10 d'agost de 2015, en els mitjans de comunicació de tot el món va aparèixer la imatge de tres tripulants de l'Estació Espacial Internacional (ISS per les seues sigles en anglès) mentre menjaven un encisam cultivat a bord. «Va ser un mosset per a l'home, però un gran salt per a #NASAVEGGIE i el nostre #ViatgeaMart. #1AnyAIEspai», va escriure l'astronauta Scott Kelly en Twitter (StationC-DRKelly, 2015) al costat del vídeo en què degustaven el refrigeri (moment que recull la foto de la Figura 1A). S'havia convertit en el primer agricultor espacial.

Aquest esdeveniment va ser l'espectacular resultat del projecte Vegetable Production System (conegut com «Veggie»), una instal·lació per al creixement vegetal que havia aconseguit produir una collita petita de plantes d'amanida per a proporcionar a la tripulació una font d'aliment fresc i de qualitat, en termes nutritius i de sabor. A més, el cultiu els va servir com a activitat relaxant, lluny dels pro-

cediments rutinaris de manteniment de l'Estació, i per al seu propi benestar fisiològic. Veggie proporciona llum i nutrients, però utilitza l'entorn de la cabina per a controlar la temperatura i l'intercanvi de gasos (Figura 1B).

«Com més ens allunyem i més temps passem els humans fora de la Terra, més gran és la necessitat de poder cultivar plantes per a obtenir aliment, reciclar l'atmosfera i aconseguir beneficis psicològics», va dir Gioia Massa (NASA, 2015), l'especialista científica de la instal·lació Veggie. «Crec que els sistemes vegetals seran components importants de qualsevol escenari d'exploració de llarga duració», va concloure. Tots els implicats en iniciatives futures d'exploració

**«La biologia vegetal espacial està progressant ràpidament, des que es va construir i va començar a operar l'Estació Espacial Internacional»**

espacial comparteixen les declaracions expressades per la Dra. Massa, des dels científics fins als gestors i els dirigents de les agències espacials més importants del món.

Tanmateix, vol això dir que s'han superat tots els obstacles per al creixement reeixit i continu de les plantes en l'espai?

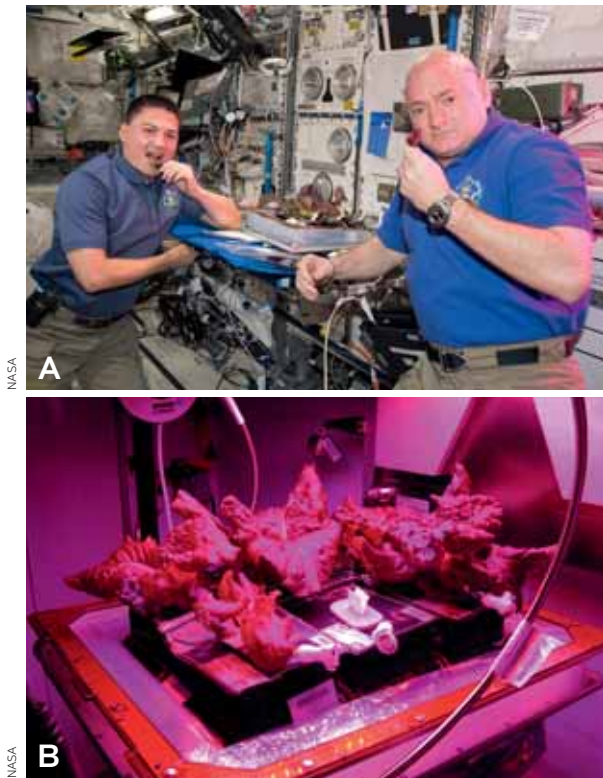


Figura 1. A) Els astronautes Scott Kelly (dreta) i Kjell Lindgren (esquerra), degustant un encisam de fulla de roure recentment recol·lectat de la seua collita espacial com a part de l'experiment Veg-01. B) Instal·lacions del Vegetable Production System de la NASA («Veggie») en l'Estació Espacial Internacional. La imatge mostra coixinets que contenen encisams de fulla de roure durant l'experiment Veg-01.

La resposta és «no», almenys des de la perspectiva de la investigació biològica vegetal; o, com a màxim, «encara no». Els investigadors pensen que els resultats inicials de Veggie, seguits per altres avanços recents, plantegen noves preguntes i reptes per al treball científic. És cert que una planta vascular va créixer en l'espai fins a una etapa adulta i que mostrava la mateixa forma, característiques i composició que la seua espècie mostra en la Terra. No obstant això, no sabem com va superar aquella planta les alteracions cel·lulars i moleculars provocades per l'exposició a l'entorn espacial que s'han observat en nombroses ocasions (Herranz i Medina, 2014). El professor Marco i el seu equip (Marco, Husson, Herranz, Mateos i Medina, 2003) ja van descobrir aquesta paradoxa després de realitzar experiments pioners amb *Drosophila*, la mosca de la fruita, que van revelar que, pel que sembla, el desenvolupament es va comple-

tar de manera normal malgrat la presència de canvis cel·lulars i moleculars. Trobar les claus per a solucionar aquesta paradoxa és un dels reptes més emocionants de la investigació actual en biologia espacial.

## ■ L'ENTORN ESPACIAL: RADIACIÓ I GRAVETAT

Molts objectes orbiten al voltant de la Terra, la Lluna, Mart i altres cossos més llunyans, en un entorn que, des de la perspectiva terrestre, és hostil i perillós per a la vida. Certament, l'únic objecte en òrbita que alberga vida terrestre fora del nostre planeta és l'ISS (i les naus relacionades amb el seu manteniment).

La Terra és l'únic planeta del Sistema Solar dotat d'una atmosfera compatible amb l'existència d'éssers vius. L'atmosfera i la magnetosfera de la Terra protegeixen els éssers vius de les condicions hostils de l'espai exterior, que inclouen el buit, la radiació i la temperatura. Tant les astronaus com qualsevol hàbitat que s'establisca a la Lluna o Mart han d'estar protegits contra aquests factors i replicar l'atmosfera terrestre en el seu interior.

La radiació còsmica mereix especial consideració com un factor ambiental crucial durant les missions espacials. La radiació provoca un dany cel·lular que pot arribar a ser letal o afectar la fisiologia dels teixits i òrgans. L'exposició a altes dosis de radiació és un greu perill per als exploradors espacials i això es va tenir en compte en la construcció de les astronaus, que van implantar escuts protectors. No obstant això, l'exposició a dosis menors de radiacions

més penetrants, que van acumulant-se després de travessar les proteccions, induïx els organismes a un estat d'estrès. Això representa un risc per a missions a llarg termini com un viatge a Mart.

L'altre factor important de l'entorn espacial és l'alteració gravitatòria. La gravetat és la força d'atracció existent entre

dos objectes. D'acord amb la llei de gravitació universal de Newton, aquesta força és directament proporcional al producte de les seues masses i inversament proporcional al quadrat de la distància entre els seus centres. Per tant, l'acceleració de la gravetat en la superfície de la Terra és de  $9,8 \text{ m/s}^2$  ( $1 \text{ g}$ ), i es redueix fins a  $9,0 \text{ m/s}^2$  ( $0,9 \text{ g}$ ) en una òrbita terrestre baixa, com la distància a la qual orbita l'ISS (a uns 400 km de la Terra). Només es podria assolir una reducció de  $10^{-2} \text{ g}$  a una distància d'uns 200.000 km de la Terra, sense considerar la influència d'altres objectes.

**«La radiació còsmica mereix especial consideració com un factor ambiental crucial durant les missions espacials»**



Llavors, per què quan els astronautes estan en l'ISS o en altres astronaus al voltant de la Terra experimenten la «gravetat zero»? En l'ISS això ocorre pel fet que està en òrbita, és a dir, en una caiguda lliure sense fi al voltant de la Terra. La gravetat arrossega els objectes en òrbita cap al centre del nostre planeta, però l'alta velocitat del moviment lateral evita la caiguda i manté l'objecte a una distància constant. El resultat de la força centrífuga produïda per l'òrbita i la força de la gravetat cap a la Terra és la «ingravitació» o la «microgravetat». En termes més col·loquials, en diem «gravetat zero» (gravetat efectiva  $<10^{-3} g$ ). Un vehicle espacial que orbita la Terra es troba en aquest estat. No obstant això, en la superfície lunar o marciana la força de la gravetat depèn de la massa de cada satèl·lit o planeta i és de 0,17 g en el cas de la Lluna i de 0,38 g en el de Mart.

El canvi de gravetat que existeix en l'entorn espacial en comparació amb la Terra és especialment important per a l'exploració espacial. En la pràctica, només és possible contrarestar físicament aquest canvi mitjançant una centrifugació contínua, que fins al moment no s'ha considerat una opció eficient i assequible. Per tant, l'estratègia és conèixer els seus efectes en els éssers vius i intentar mitigar les alteracions fisiològiques mitjançant l'ús de mecanismes biològics que acaben conduint a l'adaptació dels éssers vius al nou entorn.

## ■ LA GRAVETAT HA MODELAT EL PLANETA TERRA, LA VIDA I LES PLANTES

Entre els factors ambientals que afecten els éssers vius, la gravetat és l'únic que ha tingut una presència constant al llarg de la història de la vida en la Terra. No sols l'evolució biològica, també els processos geològics que han impulsat la formació del planeta Terra s'han produït en presència d'un vector de gravetat constant, que de fet continua operant avui dia. La morfologia i les funcions dels éssers vius terrestres estan molt influïdes per la gravetat, i en la biodiversitat de la Terra es poden trobar molts òrgans, sistemes i processos diferents destinats a detectar i respondre a la gravetat, així com a utilitzar la gravetat en benefici de les seues funcions biològiques.

En el cas concret de les plantes, la colonització dels entorns terrestres pels ancestres de les plantes aquàtiques, que es va produir fa prop de 400 milions d'anys, va marcar una fita crucial. Per a emergir de la mar i créixer en terra ferma, les plantes van haver de desenvolupar un cos rígid capaç de resistir la força de la gravetat

i mantenir la planta dreta. L'èxit va radicar en la creació de parets protectores que afectaven àrees extenses del cos de la planta, com les capes de lignina, que també ajudaven a evitar la dessecació. Posteriorment, les plantes van diferenciar òrgans aeris especialitzats per a maximitzar l'exposició de les fulles a la llum del sol i l'eficiència de la fotosíntesi, i arrels i pèls absorbents per a capturar l'aigua i els minerals del sòl. Les plantes van utilitzar la gravetat per a aquesta diferenciació i van desenvolupar el gravitropisme per a gestionar el seu creixement d'acord amb el vector gravetat. Per tant, les arrels mostren gravitropisme positiu perquè creixen cap al centre de la Terra, mentre que les tiges tenen gravitropisme negatiu i creixen cap a la llum del sol.

En aquest context, el viatge espacial és una altra gran fita en la història de les plantes: per primera vegada s'enfronten a una condició ambiental (la microgravetat) que no han experimentat mai, no sols en termes ontogenètics sinó també filogenètics. Els primers experiments espacials, de fa més de cinquanta anys, van mostrar que les plantes podien sobreviure i créixer en l'espai, encara que prompte es van observar alteracions (Perbal, 2001). Els resultats a vegades eren confu-

sos, en la majoria de casos a causa de deficiències en el disseny experimental i en els aparells utilitzats per fer germinar llavors i per cultivar les plantes. Les millores en les instal·lacions de cultiu, com en el cas de Veggie, ens han permès concloure que la microgravetat en si mateixa no impedeix el creixement i reproducció de les plantes. Per tant, continua oberta la qüestió de quins mecanismes utilitzen les plantes per a superar les alteracions i aconseguir una adaptació funcional. Qualsevol possible resposta a aquesta pregunta hauria de tenir en compte que durant la seua evolució les plantes han desenvolupat una gran plasticitat per a adaptar-se a condicions ambientals canviants, a causa de la seua condició sèssil. Aquesta plasticitat es basa en l'existència de teixits meristemàtics i en l'alta redundància de genomes i famílies de gens que contenen.

## ■ CONSEQÜÈNCIES DE LA MICROGRAVETAT PER A LES PLANTES

El meristema de l'arrel és un teixit essencial per al desenvolupament i la resposta a l'estrès de les plantes. És una reserva permanent de cèl·lules totipotents indiferenciades que generen cèl·lules diferenciades per al desenvolupament. La funció de les cèl·lules meristemàtiques és realitzar un cicle continu de creixement

**«El viatge espacial és una gran fita en la història evolutiva de les plantes: per primera vegada, s'enfronten a la microgravetat»**

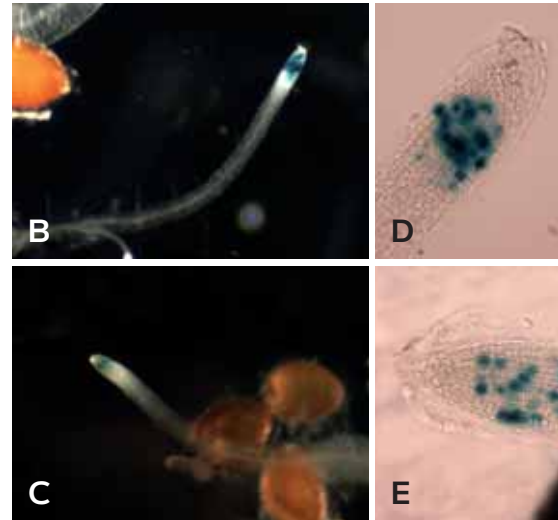
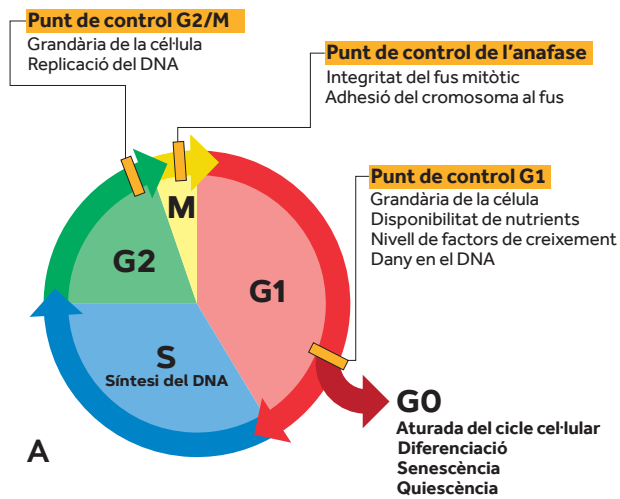


Figura 2. **A**) Representació esquemàtica del cicle cel·lular. S'hi representen les quatre fases de què consta (G1, S, G2, i M, o mitosi), així com els punts de control en què es duen a terme els processos reguladors. En cada punt de control s'indiquen els processos i paràmetres específics que s'han de comprovar. Quan les cèl·lules deixen de progressar al llarg del cicle cel·lular, entren en la fase G0. La destinació de les cèl·lules G0 és variable i s'indiquen les principals destinacions alternatives. **B, C**) Visualització en el meristema de l'arrel de l'expressió de la ciclina B1, una proteïna que actua en el punt de control G2/M del cicle, detectada mitjançant la construcció genètica reportera *cycB1: GUS*, observada amb un estereoscopi binocular. Les plàntules es van cultivar en condicions control 1 g (**B**) o en microgravetat simulada (**C**). **D, E**) Visualització de l'expressió de la ciclina B1 com en les imatges anteriors, però observada a més augment, mitjançant un microscopi òptic. L'expressió del regulador del cicle cel·lular es redueix molt en microgravetat simulada.

i divisió: el cicle cel·lular. La divisió cel·lular per mitosi produeix dues cèl·lules filles, que passen per la interfase fins a la divisió següent. Les fases G1 i G2 de la interfase estan separades per la fase S, caracteritzada per la replicació de DNA (Figura 2). El creixement de les cèl·lules meristemàtiques durant la interfase no sols afecta la grandària de la cèl·lula, sinó que també implica un augment en el seu contingut proteic, per a fer possible la següent divisió cel·lular (Perrot-Rechenmann, 2010). Com que les proteïnes se sintetitzen en els ribosomes, la biogènesi dels ribosomes i el nuclèol són marcadors fidels del creixement de les cèl·lules meristemàtiques. En general, la funció de les cèl·lules meristemàtiques està basada en una estricta coordinació entre les taxes de proliferació i creixement cel·lular, anomenada «competència meristemàtica» (vegeu Herranz i Medina, 2014).

L'experiment Root ("Arrel"), el primer experiment europeu de biologia vegetal realitzat a bord de la ISS, va mostrar un notable augment en la taxa de proliferació cel·lular en els meristemes radicals de les mostres espacials, acompanyat d'un descens en la taxa de creixement cel·lular, expressat com la producció de precursors preribosòmics en el nuclèol (Matía et al., 2010). Alguns experiments pioners anteriors ja havien observat

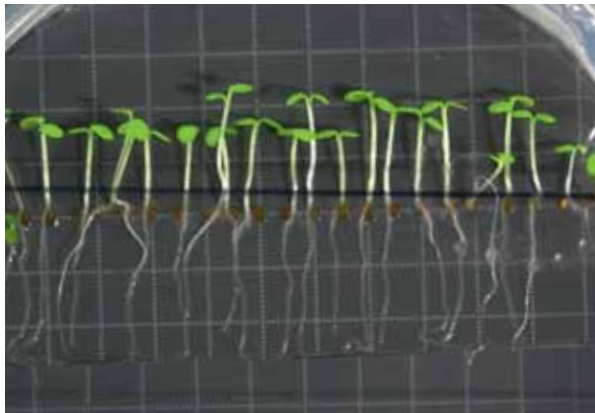
alteracions en certs paràmetres del cicle cel·lular (Peral, 2001). Les anàlisis complementàries realitzades en microgravetat simulada en instal·lacions en terra van confirmar aquests desajustaments induïts per la microgravetat. En concret, s'han demostrat alteracions en la regulació del cicle cel·lular que produeixen l'escurçament de la fase G2, la més activa en termes de producció de ribosomes, i, consegüentment, l'anticipació de la mitosi (Kamal, Herranz, Van Loon i Medina, 2019). Així doncs, la condició ambiental d'absència de gravetat provoca un estrès notable en la planta a causa de la pèrdua de la competència meristemàtica (Herranz i Medina, 2014) (Figura 2).

La competència meristemàtica està connectada fisiològicament amb la percepció de la gravetat mitjançant la fitohormona auxina. L'alteració de la gravetat provoca canvis en l'equilibri lateral d'auxina de l'arrel, la qual cosa produeix distorsions i curvatures i, consegüentment, la pèrdua de l'orientació i l'alteració del gravitropisme (Gadalla, Braun i Böhmer, 2018). A més, l'auxina és un important controlador de l'activitat meristemàtica que regula el creixement i la proliferació cel·lular (Perrot-Rechenmann, 2010). S'ha postulat l'existència de sensors cel·lulars de gravetat addicionals, probablement localitzats en la paret cel·lular, i de meca-

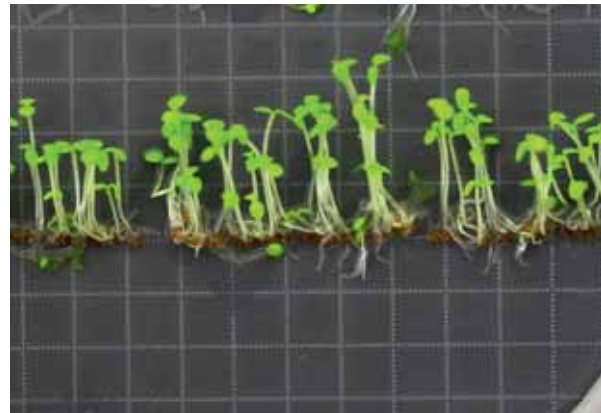
**«El canvi de gravetat existent en l'ambient espacial en comparació amb la Terra és especialment important per a l'exploració espacial»**



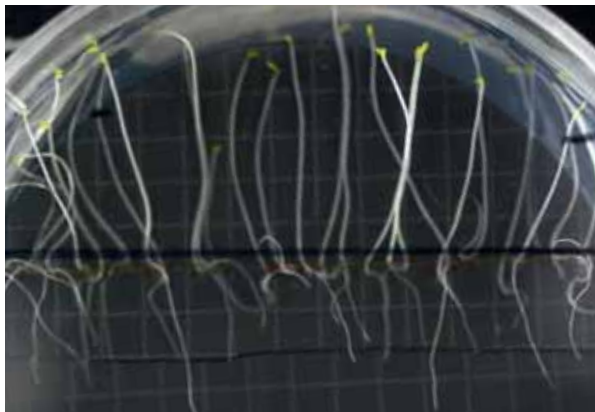
FONT DE LLUM



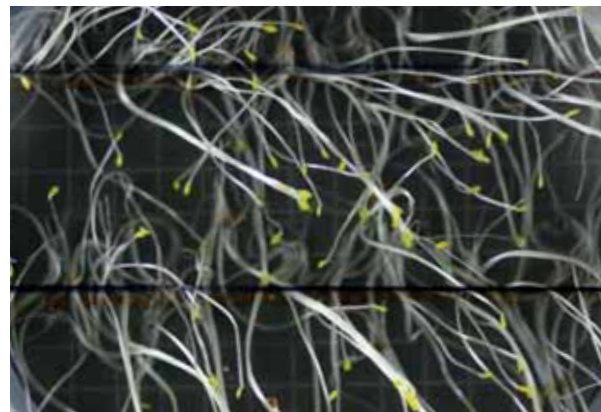
Llum  
Gravetat (1g)



Llum  
NO gravetat ( $\mu g$ )



NO llum  
Gravetat (1g)



NO llum  
NO gravetat ( $\mu g$ )

F. Javier Medina

Figura 3. Efectes de la llum i la gravetat en l'orientació de les tiges (hipocòtils) i arrels de plàntules joves. Es mostren les diferents possibilitats de combinació dels dos factors tropístics ambientals. Observeu els diferents efectes en els dos òrgans de la plàntula. S'indiquen, si és el cas, la posició de la font de llum i la direcció del vector de gravetat ( $g$ ).

nismes intracel·lulars de transducció del senyal (Herranz i Medina, 2014).

A més d'efectes cel·lulars, l'entorn de microgravetat provoca la reprogramació gènica de les plantes. L'absència d'una «memòria» de la falta de gravetat en l'evolució de les plantes planteja una pregunta clau: si l'organisme respon a l'absència d'aquest factor desenvolupant un mecanisme completament nou o utilitzant mecanismes de resposta generals i no especialitzats. Els estudis realitzats han demostrat una resposta complexa en les plantes. Fins ara no s'han trobat gens específics de resposta a les alteracions en la gravetat, però en canvi sí que es coneixen gens que participen en els mecanismes generals de resposta a l'estrès abiòtic i que han demostrat que modifiquen la seua expressió en ambient de microgravetat (vegeu Paul et al., 2017, i les referències esmentades).

■ EL PAPER DE LA LLUM

Malgrat els canvis fisiològics provocats en l'ambient espacial, es desenvolupen plantes adultes i flors amb aparent normalitat en l'espai. Per tant, la qüestió clau en termes pràctics és identificar i comprendre les estratègies que la planta desencadena per a contrarestar els problemes de supervivència associats amb l'ambient espacial i la microgravetat. El terme clau per a aquest important objectiu d'investigació és *mecanisme(s) d'adaptació*. Quins són aquests mecanismes i com i quan s'estableixen?

L'adaptació i la supervivència de plantes en l'espai podria beneficiar-se de la substitució de la gravetat per un altre senyal extern, que podria complir el mateix paper que la gravetat en la Terra en l'orientació del creixement i desenvolupament de les plantes o un



paper similar. La llum és una bona candidata, ja que en realitat és un estímul tropístic. El fototropisme complementa al gravitropisme amb l'objectiu d'optimitzar l'eficiència en la captura de nutrients (Figura 3). A més, la llum, especialment la llum roja, és captada pels fitocroms per a produir canvis en la regulació dels gens de resposta a l'auxina i molts coordinadors de creixement (Vandenbrink, Kiss, Herranz i Medina, 2014).

En aquest context, seria interessant saber fins a quin punt la llum pot actuar com un senyal capaç de contrarestar els efectes de la falta de gravetat. Per a això, en l'ISS es va dur a terme el denominat «Seedling Growth Project» («Projecte de creixement de plàntules») (Vandenbrink et al., 2014), constituït per tres experiments successius realitzats respectivament en 2013, 2014 i 2017. El projecte ha estat el resultat de la cooperació entre la NASA i l'Agència Espacial Europea (ESA per les seues sigles en anglès), en el qual s'ha utilitzat un dispositiu incubador europeu combinat amb una cambra de cultiu americana per a estudiar la germinació de les llavors i el creixement de les plàntules. Es van utilitzar diferents col·leccions de mutants de l'espècie vegetal model *Arabidopsis thaliana* que afectaven fitocroms, proteïnes nucleolars i gens de resposta a l'auxina. Les llavors van germinar en el vol i van créixer durant sis dies en diferents règims d'il·luminació i gravetat. A més de la microgravetat, les plàntules van ser sotmeses a diferents nivells de gravetat entre 0 g i 1 g, incloent-hi els nivells de la Lluna i Mart. Aquests nivells es van simular en una centrifugadora instal·lada en l'incubador (Figura 4).

Tot i que algunes de les anàlisis encara estan en curs, ja s'han identificat noves respostes fototròpiques a la llum blava en l'espai. A més, s'ha observat un efecte positiu de la llum roja per a contrarestar l'estrès provocat per la microgravetat en el creixement i la proliferació cel·lular del meristema de l'arrel (Valbuena et al., 2018), i aquest efecte ha estat confirmat en un estudi transcriptòmic global. Per tant, sembla que la llum (roja) podria ser un dels factors que promouen l'adaptació de les plantes a la microgravetat i que es podria utilitzar per a mitigar l'estrès gravitatori en el cultiu de plantes en l'espai.

## ■ CREIXEMENT DE PLANTES EN LA GRAVETAT PARCIAL DE LA LLUNA I DE MART

El cultiu de plantes és necessari per a l'exploració espacial no sols a bord de les astronaus en òrbita, caracteritzades per un entorn de microgravetat, sinó també per als assentaments humans més o menys permanents

en altres planetes o satèl·lits (la Lluna i Mart són els objectius principals, per raons òbvies).

L'entorn dur i hostil de la Lluna i de Mart és una limitació molt important a l'hora de projectar i implantar qualsevol tipus d'«hivernacle». El concepte de *terraformar* un planeta o lluna està passant de la ciència-ficció (en literatura, o en el cinema) a la ciència real. Designa el procés humà de modificar l'atmosfera, temperatura, topografia superficial o ecologia d'un cos estel·lar per a fer-lo més similar a l'entorn de la Terra i aconseguir que siga habitable per a la vida terrestre. Curiosament, els experiments realitzats amb sòls simulats en la seua composició han demostrat que el creixement i desenvolupament de les plantes seria compatible amb la superfície de Mart i de la Lluna.

Una vegada més, la gravetat és un factor permanent i inevitable. Com ja s'ha indicat, la gravetat de la Lluna és de 0,17 g i la de Mart és de 0,38 g. Això entra en els anomenats nivells de gravetat parcial, vectors de grave-

tat que assoleixen només una fracció de la seua magnitud a la Terra. Aquests nivells van ser simulats a la Terra mitjançant la implantació de solucions tecnològiques, validades biològicament amb el cultiu de plàntules d'*Arabidopsis thaliana*. Els paràmetres fisiològics de les plàntules cultivades simulant el nivell de gravetat

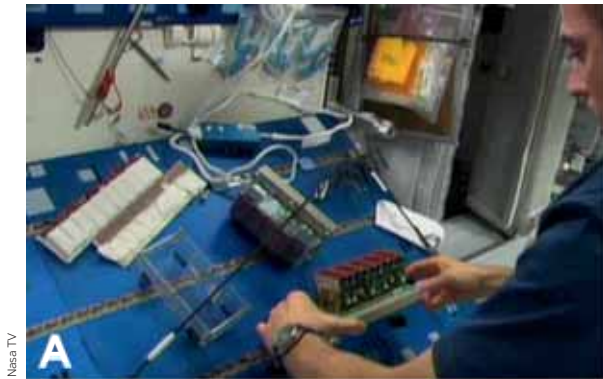
de la Lluna es van veure afectats seriosament, amb una intensitat fins i tot major a la registrada en microgravetat simulada, mentre que el nivell de gravetat de Mart només va produir una lleu alteració de l'equilibri entre creixement cel·lular i proliferació, amb paràmetres similars als que es van obtenir amb les mostres del control 1 g (Manzano et al., 2018).

Curiosament, la gravetat lunar simulada no va poder orientar el creixement de les plàntules, però, en la gravetat marciana, aquestes van mostrar un gravitropisme visible. Al seu torn, els resultats obtinguts en l'espai, utilitzant la centrifugadora per a produir un ampli espectre de valors de gravetat parcial, van seguir la mateixa tendència obtinguda en els dispositius de simulació en terra. Per tant, sembla que la gravetat marciana no serà un obstacle important per al cultiu de plantes.

## ■ PERSPECTIVES FUTURES

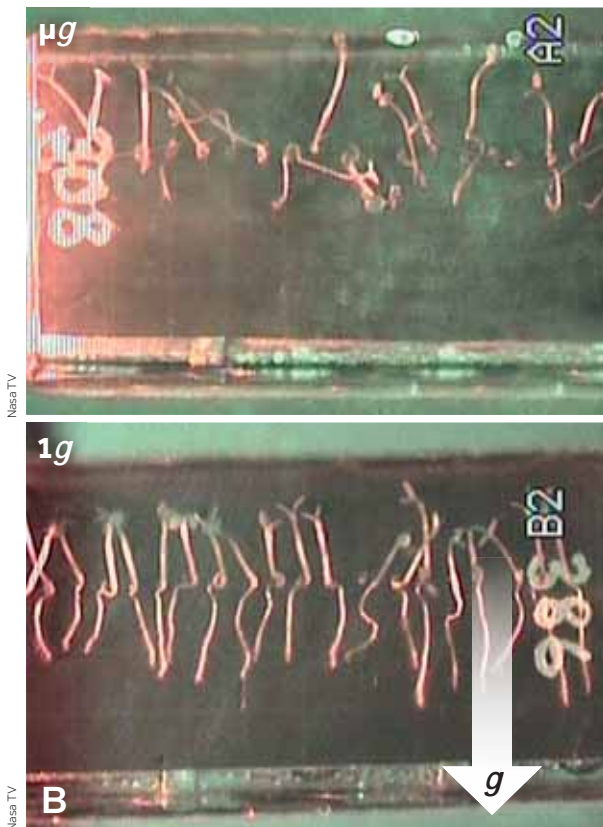
La secció de la pàgina web de l'ESA dedicada a la investigació amb plantes en l'espai<sup>1</sup> subratlla la impor-

<sup>1</sup> [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/Research/Plants](https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/Plants)



Nasa TV

Figura 4. Imatges de l'experiment espacial «Seedling Growth», obtingudes a bord de l'Estació Espacial Internacional. **A)** Un astronauta ha extret de l'incubador els contenidors experimentals i les cambres de cultiu en les quals han crescut les plàntules, i està realitzant les operacions necessàries per a preservar adequadament les mostres per a transportar-les a la Terra i fer-ne les anàlisis posteriors al laboratori. **B)** Imatges de les plàntules cultivades en l'espai, d'acord amb els protocols experimentals.  $\mu g$ : microgravetat.  $1 g$ : control en gravetat terrestre. En aquest cas, les plàntules d' $1 g$  van créixer en una centrifugadora a bord que girava a aquesta velocitat angular. L'orientació del creixement de les plàntules difereix molt en tots dos casos. S'indica la direcció del vector de gravetat ( $g$ ) en l'experiment de control.



Nasa TV

Nasa TV

tància de l'agricultura espacial i destaca la necessitat de continuar investigant en aquesta disciplina, començant amb el paràgraf següent: «Cultivar plantes per a obtenir aliment va ser un pas significatiu en la història de la humanitat. Cultivar plantes per a obtenir aliment en l'espai i en altres planetes serà necessari per a l'exploració del nostre univers».

Establir assentaments humans temporals o permanents a la Lluna i a Mart comença a semblar una possibilitat real, després de l'èxit de diverses missions no tripulades amb robots. Malgrat que encara és necessari solucionar algunes qüestions tecnològiques, ètiques i polítiques, el camí per a aquesta iniciativa està obert. Observant els mitjans de comunicació de masses i les xarxes socials, percebem que la investigació per a l'exploració espacial atrau molt d'interès. Concretament, la cerca de vida alienígena i la supervivència i adaptació dels éssers vius terrestres a entorns extraterrestres desperten molta curiositat entre els ciutadans. A més, l'exploració espacial és un poderós impulsor per al progrés científic i tecnològic i per a la conscienciació pública sobre la seua importància.

### «Cada vegada és més evident que els exploradors espacials hauran de ser agricultors espacials»

Cada vegada és més evident que els humans han de convertir-se en exploradors espacials, i també queda igualment clar que els exploradors espacials hauran de ser agricultors espacials. La pel·lícula *The martian* (2015), dirigida per Ridley Scott, va posar en relleu aquesta necessitat en una escena que mostra de manera ben documentada el tipus de reptes i solucions que sorgeixen en l'exploració espacial en relació amb el cultiu i l'ús de plantes. Per descomptat, aquesta escena (com tota la pel·lícula) pertany al gènere de la ciència-ficció, però les nostres expectatives, basades en experiments científics reals, no s'allunyen molt del que mostra la pel·lícula.

La biologia vegetal espacial està progressant ràpidament, especialment des que es va construir i va començar a operar l'ISS. Malgrat les limitacions i obstacles que continuen afectant l'experimentació espacial, el coneixement que hem generat en els últims deu anys cada vegada està més prop de permetre'ns produir collites espacials per a alimentar els exploradors. Per exemple, ara coneixem bastant bé la reprogramació genètica induïda en les plantes quan s'adapten a l'entorn espacial.

Podríem oferir ací una llista que incloga alguns dels reptes més rellevants i urgents per al futur pròxim d'aquesta disciplina. En relació amb l'expressió genètica,

hem de definir quina és la proporció significativa de gens de «funció desconeguda» afectats per la microgravetat que s'han trobat en els estudis transcriptòmics. En la fisiologia vegetal, el desxiframent complet dels mecanismes d'adaptació, especialment tenint en compte el paper que pot exercir la llum com a impulsor del creixement vegetal en absència de gravetat, continua sent una qüestió sense resoldre, com ho és també la funció exacta de l'auxina en la transducció de senyals en diferents entorns amb estímuls ambientals alterats. El paper de la microgravetat en la senescència i els processos oxidatius és fonamental i no s'ha experimentat prou sobre aquest tema. Finalment (encara que aquesta llista no és exhaustiva), tard o d'hora haurem de passar del sistema model d'*Arabidopsis* a plantes de collita com a material dels nostres experiments.

«Què t'emportaries a l'espai? [...] Oxigen, aigua i menjar [...], els teus llibres, música i dispositius electrònics favorits, alguna cosa per a escriure, per a dibuixar... També hauries de portar medicaments.»

En relació amb aquesta pregunta, un grup d'estudiants d'educació secundària de Navarra han desenvolupat un projecte per a utilitzar plantes en l'espai per a produir i purificar proteïnes recombinants.

Aquestes proteïnes podrien ser, per exemple, medicaments amb data de caducitat superior a la duració de la missió espacial, o nutrients que no es troben en les plantes de manera natural. El projecte BioGalaxy,<sup>2</sup> desenvolupat pels estudiants amb el suport del Planetari de Pamplona i de l'Institut d'Agrobiotecnologia, ha obtingut el segon premi en el Concurs Internacional iGEM.

El futur no està escrit i ningú coneix el final d'aquesta història. ☺

#### REFERÈNCIES

- Gadalla, D. S., Braun, M., & Böhmer, M. (2018). Gravitropism in higher plants: Cellular aspects. En G. Ruyters, & M. Braun (Eds.), *Gravitational biology I: Gravity sensing and graviorientation in microorganisms and plants* (p. 75–92). Cham: Springer International Publishing.
- Herranz, R., & Medina, F. J. (2014). Cell proliferation and plant development under novel altered gravity environments. *Plant Biology*, 16, 23–30. doi: [10.1111/plb.12103](https://doi.org/10.1111/plb.12103)
- Kamal, K. Y., Herranz, R., Van Loon, J. J. W. A., & Medina, F. J. (2019). Cell cycle acceleration and changes in essential nuclear functions induced by simulated microgravity in a synchronized *Arabidopsis* cell culture. *Plant, Cell & Environment*, 42(2), 480–494. doi: [10.1111/pce.13422](https://doi.org/10.1111/pce.13422)
- Manzano, A., Herranz, R., Den Toom, L. A., Te Slaa, S., Borst, G., Visser, M.,... Van Loon, J. J. W. A. (2018). Novel, Moon and Mars, partial gravity simulation paradigms and their effects on the balance between cell growth and cell proliferation during early plant development. *NPJ Microgravity*, 4(1), 9. doi: [10.1038/s41526-018-0041-4](https://doi.org/10.1038/s41526-018-0041-4)

<sup>2</sup> [http://2018.igem.org/team/Navarra\\_BG](http://2018.igem.org/team/Navarra_BG).

**«El cultiu de plantes és necessari per a l'exploració espacial, no sols a bord de les astronaus en òrbita, sinó també per als assentaments humans més o menys permanents en altres planetes o satèl·lits»**

- Marco, R., Husson, D., Herranz, R., Mateos, J., & Medina, F. J. (2003). *Drosophila melanogaster* and the future of 'evo-devo' biology in space. Challenges and problems in the path of an eventual colonization project outside the earth. *Advances in Space Biology and Medicine*, 9, 41–81. doi: [10.1016/S1569-2574\(03\)09003-8](https://doi.org/10.1016/S1569-2574(03)09003-8)
- Matía, I., González-Camacho, F., Herranz, R., Kiss, J. Z., Gasset, G., Van Loon, J. J. W. A.,... Medina, F. J. (2010). Plant cell proliferation and growth are altered by microgravity conditions in spaceflight. *Journal of Plant Physiology*, 167(3), 184–193. doi: [10.1016/j.jplph.2009.08.012](https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.08.012)
- NASA. (2015). Meals ready to eat: Expedition 44 crew members sample leafy greens grown on Space Station. Consultat en [https://www.nasa.gov/mis-sion\\_pages/station/research/news/meals\\_ready\\_to\\_eat](https://www.nasa.gov/mis-sion_pages/station/research/news/meals_ready_to_eat)
- Paul, A.-L., Sng, N. J., Zupanska, A. K., Krishnamurthy, A., Schultz, E. R., & Ferl, R. J. (2017). Genetic dissection of the *Arabidopsis* spaceflight transcriptome: Are some responses dispensable for the physiological adaptation of plants to spaceflight? *PLOS One*, 12(6), e0180186. doi: [10.1371/journal.pone.0180186](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180186)
- Perbal, G. (2001). The role of gravity in plant development. En G. Seibert (Ed.), *A world without gravity* (p. 121–136). Noordwijk, Països Baixos: ESA Publications Division.
- Perrot-Rechenmann, C. (2010). Cellular responses to auxin: Division versus expansion. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 2(5), a001446. doi: [10.1101/cshperspect.a001446](https://doi.org/10.1101/cshperspect.a001446)
- StationCDRKelly. (2015, 10 d'agost). It was one small bite for man, one giant leap for #NASA-*SAVEGGIE* and our #JourneytoMars. #YearInSpace [publicació en Twitter]. Consultat en <https://twitter.com/stationcdrkelly/status/630793511659421696>
- Valbuena, M. A., Manzano, A., Vandenbrink, J. P., Pereda-Loth, V., Carnero-Diaz, E., Edelmann, R. E.,... Medina, F. J. (2018). The combined effects of real or simulated microgravity and red-light photoactivation on plant root meristematic cells. *Planta*, 248(3), 691–704. doi: [10.1007/s00425-018-2930-x](https://doi.org/10.1007/s00425-018-2930-x)
- Vandenbrink, J. P., Kiss, J. Z., Herranz, R., & Medina, F. J. (2014). Light and gravity signals synergize in modulating plant development. *Frontiers in Plant Science*, 5, 563. doi: [10.3389/fpls.2014.00563](https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00563)

AGRAÏMENTS: Vull expressar el meu profund agraïment a tots els membres del meu grup d'investigació «Nuclèol, proliferació cel·lular i microgravetat en plantes» (CIB Margarita Salas-CSIC) a Madrid (científics i tècnics, passats i actuals), i especialment al Dr. Raúl Herranz. També agraiïca la participació de molts col·legues estrangers en diferents projectes col·laboratius. M'agradaria esmentar en particular el professor John Z. Kiss (UNCG, EUA) i el Dr. Ing. Jack van Loon (Universitat Lliure d'Amsterdam i ESA-ESTEC, Països Baixos). Mereix un esment especial la inestimable contribució dels astronautes que han realitzat experiments a bord de l'Estació Espacial Internacional. El treball realitzat en el laboratori de l'autor és finançat pel Pla Estatal d'Investigació Científica i Tècnica i d'Innovació del Govern d'Espanya (projectes números ESP2015-64323-R i AYA2012-33982, cofinançats per UE-FEDER). El finançament dels experiments realitzats durant els vols espacials i en les instal·lacions de simulació en Terra el va proporcionar l'Agència Espacial Europea.

**F. JAVIER MEDINA.** Cap del laboratori Nuclèol, Proliferació Cel·lular i Microgravetat en Plantes del Centre d'Investigacions Biològiques Margarita Salas (CIB-CSIC), Madrid (Espanya). Treballa en fisiologia vegetal cel·lular i molecular. En relació amb la investigació espacial, se centra en els efectes fisiològics de la gravetat alterada per a permetre el cultiu d'espècies vegetals per a l'exploració espacial humana. Ha realitzat experiments europeus pioners en l'ISS i recentment ha dirigit un projecte conjunt de la NASA i l'ESA en l'Estació Espacial Internacional sobre els efectes de la llum i la gravetat en el desenvolupament vegetal, que ha rebut el premi «NASA Group Achievement Award». Ha publicat més de 120 articles i capítols de llibres i ha assessorat diverses organitzacions d'investigació internacionals. Ha rebut la Medalla de l'Associació Europea de Microgravetat (ELGRA). ✉ [fjmedina@cib.csic.es](mailto:fjmedina@cib.csic.es)