

ROBERTO MARCO, UN REFERENTE ESPAÑOL EN LA BIOLOGÍA ESPACIAL

Emilio de Juan Navarro

*Departamento de Fisiología, Genética y Microbiología
Facultad de Ciencias. Universidad de Alicante*

Permítanme que comience con una confesión: me resulta tan grato como difícil escribir este artículo. Posiblemente, quienes conocieron a Roberto comprendan mi afirmación. ¿De qué Roberto hablarles? ¿del hombre con el cual y gracias al cual realicé experimentos espaciales? ¿del científico que no se daba por vencido a pesar de los fracasos? ¿del profesor que, ya enfermo, seguía preguntando por antiguas anotaciones e ideando proyectos? ¿del sabio despistado que me dejó en una autopista francesa durante tres horas para volver a por un portátil olvidado? ¿del amigo que aparece en mi álbum de fotos? ¿del ser humano que, al marcharse, me hizo sentir la orfandad intelectual? Todos esos, y muchos otros, era Roberto. Intentaré, por tanto, hablarles de algunos de ellos. Confío en que el testimonio personal no opaque la figura investigadora, ni los datos científicos enturbien el retrato humano que intento trazar.

Roberto era una persona con una enorme capacidad para trabajar, ilusionarse e ilusionarnos en los desafíos del saber. Pero no crean que se trataba de un ingenuo, que prefería obviar las dificultades u obsecarse con sus proyectos: en un artículo suyo, publicado a mediados de 1996 en la revista española “Medicina aeroespacial y ambiental”, Roberto llegaba incluso a plantearse su continuidad en la investigación espacial (1). Revisando el panorama científico de nuestro país, se centraba en los problemas de la investigación biológica espacial, y los señalaba como comunes a otros muchos campos científicos. Cuando escribió “La investigación biológica espacial en España. Un ejemplo muy especial de la delicada situación que atraviesa en estos momentos la investigación en nuestro país”, Roberto ya había desarrollado en este campo una actividad continuada de unos quince años, había participado en más de media docena de experimentos espaciales, y se encontraba dentro de la pequeña comunidad de investigadores que estudiaban el comportamiento de los sistemas biológicos en el espacio. Sin embargo, en el mencionado artículo, confesaba:

Cada vez que terminamos una serie de experimentos o se plantea la renovación de un proyecto, me pregunto seriamente si debo continuar o no trabajando en él. ¿Existe algún futuro en la Biología Espacial? ¿Puede ser rentable un tema tan lento, tan arriesgado, considerado por la mayoría de los investigadores como un área de investigación de valor dudoso, independientemente de la atención que le dediquen los medios de comunicación y el público en general, normalmente tan impermeables al lenguaje, objetivos y desarrollo científico?

Es cierto que, con el paso del tiempo y aunque no todo lo deseable, mejorarían las condiciones estructurales, y aumentaría la dedicación de los organismos españoles y europeos a las ciencias de la vida. Pero fueron sobre todo, y sin duda, el tesón y la gran inteligencia y capacidad de Roberto los que mantuvieron activo a su grupo de investigación durante tantos años en este área de la Biología Espacial, y los que lograron que otros cualificados científicos se embarcaran con él en esta arriesgada actividad.

Empecemos por el principio. Corría el mes de noviembre de 1985. La Agencia Espacial de la República Federal Alemana, a través de la Agencia Espacial Europea (ESA), lograba enviar al espacio en la misión D1 una serie de experimentos incluidos en el proyecto Biorack, a bordo de la lanzadera de la NASA Challenger. El Biorack, desarrollado por ESA formaba parte del laboratorio Spacelab, también una contribución europea para ser alojada en las lanzaderas de la NASA. El Biorack era una instalación versátil, capaz de incorporar múltiples experimentos biológicos simultáneamente, y en la que los astronautas especialistas podían controlar las operaciones necesarias para su realización. Por insistencia de los grupos europeos que presentaban los proyectos, entre ellos el de Roberto, por vez

primera en la historia de la investigación espacial, se incorporaron en el diseño de esta unidad, una serie de centrífugas que conseguían simular las condiciones de gravedad terrestre durante el vuelo espacial. Así, la comparación entre el grupo expuesto permanentemente a la microgravedad y el grupo control de vuelo, sometido a una aceleración de 1 x g en las centrífugas, permitiría determinar si los resultados observados eran un efecto directo de esta, o se debían a otros factores del ambiente espacial como podía ser la radiación cósmica.

Entre los experimentos del vuelo D1, se encontraba el “Fly 15-E”, cuyo investigador principal era Roberto Marco. Este experimento tenía como objetivo estudiar los efectos de la microgravedad sobre el desarrollo embrionario de la mosca *Drosophila melanogaster*; y se enmarcaba en sus investigaciones sobre el desarrollo, uno de los intereses de estudio de su grupo del Departamento de Bioquímica de la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) y, del entonces, Instituto de Investigaciones Biomédicas del CSIC, posteriormente denominado IIBM-CSIC “Alberto Sols”, en honor al que había sido su gran maestro.

El experimento de Roberto fue diseñado y realizado en condiciones experimentales más controladas que los llevados a cabo hasta entonces, gracias a las ventajas ofrecidas por la utilización del Biorack, y a que los astronautas especialistas podían recolectar las puestas de las hembras en periodos determinados a lo largo de la misión. El hecho de tener dos grupos de drosophilas en distintas condiciones espaciales y otro como control paralelo de tierra, permitió comparar y obtener resultados cuantitativos (2, 3). Estos indicaban que, aunque es posible el desarrollo esencialmente normal de las drosophilas durante su exposición al ambiente espacial, la microgravedad altera la ovogénesis y la embriogénesis de las moscas. Se encontró una estimulación del proceso ovogenético, al cuantificar el número de embriones producidos por las hembras en ausencia de gravedad. Además, se observó un retraso en el curso temporal del desarrollo, puesto de manifiesto por el número de larvas eclosionadas en los distintos periodos de recolección, y por un retraso de los embriones y larvas para alcanzar la fase de adultos. Pero estos no fueron los únicos resultados del D1: entre los objetivos propuestos también se hallaba el comprobar los efectos del vuelo espacial sobre otro de los procesos biológicos fundamentales, el del envejecimiento.

A finales de la década de los setenta, Jaime Miquel, había llevado a cabo dos experimentos pioneros con drosophilas en biosatélites no tripulados de la serie Cosmos conjuntamente con biólogos espaciales soviéticos, en una colaboración NASA-URSS. Miquel había observado una aceleración del envejecimiento en las drosophilas jóvenes adultas expuestas a vuelos espaciales de veinte días (4). En el experimento de Roberto, se confirmó ese mismo efecto, incluso en un vuelo de sólo siete días, al encontrar una reducción significativa en la longevidad de las drosophilas adultas jóvenes expuestas continuamente al ambiente espacial. Además esta reducción se restringía prácticamente a los machos, y estaba inducida específicamente por la microgravedad, ya que el acortamiento en la longevidad no se observó en los controles de vuelo sometidos a gravedad simulada.

*Inevitables golosas, / que ni labráis como abejas, / ni brilláis cual mariposas; /
pequeñitas, revoltosas, / vosotras, amigas viejas, / me evocáis todas las cosas.*

(ANTONIO MACHADO, Las moscas)

Si las moscas vulgares de Machado se posaban sobre libros y cartas, las moscas del vinagre de Roberto viajaban mucho más lejos. No obstante, unas y otras comparten el poder evocador. Pero ¿por qué utilizar estas moscas para enviarlas al Espacio?

La mosca de la fruta o del vinagre (*Drosophila melanogaster*) es un modelo muy apropiado para realizar experimentos en Biología Espacial en vuelos espaciales. Especialmente para aquellos centrados en el estudio de los efectos de la microgravedad en la respuesta de los seres vivos y, más

concretamente, sobre dos procesos biológicos tan fundamentales como son el desarrollo y el envejecimiento. Estos son algunos de los motivos:

- *Drosophila* es un insecto fácil de mantener y de pequeño tamaño. Característica esta última nada desdeñable, pues la limitación de espacio resulta crucial para realizar un experimento a bordo de los distintos tipos de plataformas espaciales de que se dispone: satélites biológicos, lanzaderas, Estación Espacial Internacional (ISS) y, secundariamente, aviones y cohetes en vuelo parabólico o torres de caída libre.
- Posee un ciclo de vida corto: dependiendo de las condiciones ambientales, fácilmente aparece una nueva generación en un par de semanas. Además, es factible realizar estudios en cada una de las fases de su metamorfosis.
- Resulta un modelo experimental idóneo para estudiar el envejecimiento, ya que la longevidad media de los adultos es inferior a dos meses, y con relativa facilidad su esperanza de vida se puede ver acelerada o retrasada por las condiciones de cultivo y mantenimiento. Y, lo que es aún más importante, porque los individuos adultos están constituidos fundamentalmente por células fijas postmitóticas: células que ya no se dividen y, por tanto, carecen de uno de los mecanismos compensadores del envejecimiento.
- Se posee un amplio conocimiento sobre su biología, su genética, su desarrollo embrionario. Actualmente, su genoma completo ya está totalmente secuenciado, compartiendo un gran número de genes con la especie humana.

Gran parte de las anteriores características del modelo *Drosophila* ya habían sido investigadas a finales de los ochenta, y Roberto conocía ampliamente estas investigaciones.

Tras ese primer experimento a bordo del Challenger, Roberto volvió a enviar moscas al espacio, en septiembre de 1989, en el biosatélite soviético Biokosmos-9 (Cosmos 2044). La misión era una operación conjunta de la ESA y el Instituto para Problemas Biomédicos de Moscú (IBMP), que era el organismo responsable de la investigación espacial de la URSS para vuelos biológicos no tripulados. El “Fly Experiment” estaba codirigido por Roberto Marco y por Jaime Miquel. Este último había vuelto de Estados Unidos, y se hallaba adscrito al Departamento de Bioquímica de la Facultad de Medicina de la Universidad de Alicante (UA). El “Fly Experiment” sería la primera ocasión en la que Roberto, a través de la ESA, consiguiera realizar experimentos en vehículos soviéticos (posteriormente rusos); también, la primera participación de la UA en experimentos espaciales.

Los directores de ambos grupos se habían conocido a principios de los años setenta, cuando Roberto realizaba una estancia posdoctoral en el laboratorio de Bioquímica de la Facultad de Medicina de Stanford (California, Estados Unidos), bajo la dirección del Premio Nobel en Medicina Arthur Kornberg. Para entonces, Jaime Miquel ya llevaba muchos años como Jefe de la División de Patología Experimental del “Ames Research Center” de la NASA en California. Allí comenzó una amistad que, con el transcurso de los años, conduciría a una estrecha colaboración científica en el ámbito de la experimentación espacial.

El experimento en el Biokosmos-9 permitió confirmar e incluso ampliar los resultados del vuelo D1 (5). Todo ello, a pesar de los imprevistos que afectaron seriamente al protocolo experimental inicial de la misión, como el retraso de hasta una semana en el lanzamiento. Además, las diferentes temperaturas a que se expusieron los controles terrestres en Moscú y en el interior del satélite, obligaron a repetir posteriormente varios controles en Madrid, simulando exactamente las condiciones de temperatura reales. Este vuelo de 15 días aumentó la información sobre el proceso del desarrollo en *Drosophila*. Se constató que es posible el desarrollo normal de embriones a partir de huevos formados enteramente en microgravedad, y que el desarrollo de las larvas y adultos recuperados era básicamente

normal. También se verificó consistentemente el efecto estimulador de la microgravedad sobre la ovogénesis, ya que el número de larvas y adultos en los contenedores de vuelo fue el doble que en los de los controles. Además, la mayoría de los adultos emergidos no presentaban características morfológicas anómalas, y la proporción de machos y hembras era muy similar, lo que supone una ausencia de mutaciones letales provocadas por la radiación espacial. Es decir, ésta era demasiado baja para inducir efectos significativos mediante la modificación genética en las moscas.

Lamentablemente, debido a los imprevistos mencionados, no se recuperó suficiente número de individuos adultos vivos para poder obtener conclusiones del otro objetivo científico: el de los efectos del vuelo espacial sobre el envejecimiento. Por ello, éste se estudió sobre la descendencia de las moscas que se habían reproducido en el Espacio. Esa tarea la realizamos en el laboratorio de Alicante, donde observamos una disminución en la longevidad de las moscas expuestas a la microgravedad en las primeras fases de su ciclo vital. Puesto que el proceso del envejecimiento se caracteriza por un declinar progresivo en la capacidad de respuesta fisiológica de los individuos, medimos dos funciones que indican muy bien el grado de vitalidad en *Drosophila*: la geotaxis negativa, o respuesta innata para el vuelo de escape vertical hacia la parte superior de un compartimento cilíndrico; y la capacidad copulatoria máxima por hora de los machos. Ambos parámetros mostraban una caída progresiva con la edad, más acusada en los ejemplares de vuelo que en los de tierra. Un nuevo interrogante se abría para nosotros: ¿por qué se acelera el envejecimiento también en una descendencia expuesta a la microgravedad al comienzo de su desarrollo? Las características propias de la investigación espacial obligaron a dar prioridad a otras cuestiones científicas.

En enero de 1992, el grupo de Roberto tuvo de nuevo la oportunidad de realizar un experimento espacial, cuyo objetivo inicial era tratar de repetir los resultados del exitoso vuelo D1, volviendo a utilizar la instalación Biorack en una lanzadera de la NASA. Un aspecto esencial del método científico y, por tanto de la investigación espacial, es la necesidad de reproducir los resultados obtenidos para poder obtener conclusiones sólidas.

En gran parte de los campos de investigación experimental suele ser habitual y relativamente sencillo que un experimento se pueda repetir. No es este el caso de la Biología Espacial. Por razones obvias, la posibilidad de participar en vuelos espaciales es algo infrecuente. De ahí que cada oportunidad de vuelo sea un paso muy importante en el avance del conocimiento. Pero otra de las peculiaridades que dificultan investigar en este campo es la que se deriva de los diseños, protocolos y configuraciones, diferentes para cada misión espacial. El “IML-1” (International Microgravity Laboratory – 1) se incluyó en el vuelo STS-042 de la lanzadera Discovery, una colaboración entre la NASA y la ESA. En dicha misión, se alojaban experimentos de investigadores norteamericanos y europeos.

El “experimento FLY” consistía básicamente en volver a recolectar embriones y larvas en distintos momentos del vuelo. La posibilidad de que los astronautas grabaran en vídeos de más calidad y mayor duración el comportamiento de los adultos en microgravedad iba a proporcionar más información que las observaciones previas del D1, según las cuales había un aumento aparente en la motilidad de las moscas en el Espacio. Hay que mencionar que *Drosophila* es un insecto díptero, y estos se caracterizan por un vuelo muy preciso, consecuencia de un proceso evolutivo que ha transformado el par de alas traseras en unas pequeñas estructuras denominadas balancines: estas no solo actúan como estabilizadores de vuelo, sino también como órganos sensoriales que proporcionan información de orientación y aceleración.

Obtener información de la conducta de las moscas a bordo de la lanzadera era de especial relevancia, ya que, para explicar la aceleración de su envejecimiento en el Espacio, se planteaba la hipótesis de que la ausencia de dirección del vector de gravedad terrestre tendría un efecto sobre la conducta locomotora, debido a la incapacidad de los adultos para orientarse o para controlar su vuelo. En otros términos, las moscas no dejarían de buscar permanentemente dónde está arriba y dónde está

abajo, y sería esta situación de estrés ambiental continuo lo que incrementaría su tasa metabólica y su consumo de oxígeno, con un concomitante daño a las mitocondrias lo que, por tanto, provocaría una aceleración del envejecimiento, según la hipótesis ya propuesta por Miquel (6).

Sin embargo, en esta misión IML-1, la NASA impuso modificaciones en el protocolo de entrega de los contenedores con alimento para la recolección de las muestras. Estas hubieron de enviarse un mes antes del lanzamiento, por lo que el laboratorio de Roberto se vio obligado a implementar el procedimiento de esterilización de los contenedores. A pesar de ser un procedimiento conocido, dos días después del lanzamiento desde el Kennedy Space Center (KSC) en Florida, Roberto, su becario Juan González-Jurado y yo mismo (invitado por Roberto para analizar el envejecimiento de las moscas una vez recuperadas) recibimos horrorizados la noticia de que las moscas a bordo del Discovery comenzaban a morir. Lo mismo sucedía en los controles terrestres. Se había perdido una oportunidad de vuelo. Pero tuve la oportunidad de comprobar, una vez más, cómo era Roberto. A pesar de que aquello era una seria adversidad, dio la mejor respuesta posible: gracias a su empuje y reacción, rápidamente nos centramos en intentar resolver las causas de aquel revés. Más tarde, aquella tarea continuaría en su laboratorio de Madrid.

Una nueva oportunidad para realizar otros experimentos espaciales con moscas llegaría con el vuelo del biosatélite Bion-10 (Cosmos 2229). Se trataba de otra colaboración entre la ESA y el IBMP de Moscú y, de nuevo participaban los dos únicos laboratorios españoles dedicados por entonces a la Biología Espacial, el “Madrid Developmental Biology Microgravity Laboratory” (MDBML) de Roberto y el de Alicante. Un acertado retrato de aquella misión, y que seguro Roberto también compartiría, es el que describe Wim Jansen, Gestor de proyectos de la ESA para la misión Bion-10, en su prefacio al monográfico sobre la misión publicado por la ESA (7):

No other epithet could possibly reflect the environment around the Bion-10 project more eloquently than the word *theatre*, a place where the unexpected happens, a place close to, but not necessarily in phase with reality. As long as the reader is willing to accept the total absence of any malignity in this title, we can describe Bion-10 as a play that began in November 1989 and ended in April 1993.

El reconocimiento hacia las capacidades de Roberto por parte de la ESA ya se había puesto de manifiesto al encargarle la organización de una reunión, celebrada en Madrid en 1990, en la que se presentaron los resultados preliminares del vuelo Biokosmos-9, y se discutieron los planes para el siguiente: el Bion-10. A ella asistieron prácticamente la totalidad de investigadores de ambas misiones, responsables de la ESA y una delegación del IBMP (véase la foto). Se llegó a dos acuerdos de colaboración: los investigadores rusos Alexey Alpatov e Ilya Ushakov participarían en el experimento “FLIES”, que sería responsabilidad principal del grupo de la UA, y se centraría en el estudio del envejecimiento acelerado de las moscas en microgravedad; el experimento “CLOUD” estaría dirigido por investigadores del IBPM, y enfocado al análisis del desarrollo de *Drosophila*. Roberto participaría como coinvestigador en ambos. Para cada experimento, se planteó la necesidad de que los grupos responsables diseñaran y desarrollaran aparatos específicos en los que alojar a las distintas muestras de moscas para alcanzar los diferentes objetivos.

Nuestro laboratorio de la UA se embarcó en lo que se convertiría en una complicada tarea. En un contenedor espacial ruso, de tamaño similar al de una caja de zapatos infantiles, debíamos alojar un equipo capaz de detectar y registrar autónomamente, mediante un sistema de haces de luz infrarroja, la actividad locomotora de las moscas durante el vuelo espacial. Finalmente, el equipo DEMIR-108 fue diseñado, desarrollado y construido por la empresa española Ondatrón. Para conseguirlo pasamos por una contrarreloj los ingenieros fabricantes, los responsables de Calidad y Seguridad de la ESA del Centro Tecnológico y Espacial (ESTEC), Roberto (al otro lado del teléfono, siempre dispuesto a ayudar) y quien escribe. Los problemas y dificultades técnicas no parecían terminar nunca: miniaturizar todos los componentes, conseguir que funcionara con precisión y registrara con sus baterías durante casi veinte días, superar todos los ensayos de vibraciones e impactos, servir como

soporte vital autónomo para las moscas, y cumplir con todos los estrictos controles de seguridad requeridos por los miembros de ESTEC (materiales no tóxicos, más de cuarenta ensayos con las baterías...) Ahora lo puedo recordar con serenidad, pero ya habíamos sufrido los contratiempos que pueden suceder en los experimentos espaciales, de manera que, hasta que no terminara la misión, no podíamos estar tranquilos.



Algunos investigadores y miembros de la ESA y del IBMP en las misiones Biokosmos-9 y Bion-10 asistentes a la reunión celebrada en Madrid en abril de 1990. De derecha a izquierda y en segunda fila, Miguel Maroto (UAM) y Emilio de Juan (UA); tercero por la derecha, y en primera fila, Jaime Miquel. En primer plano, Roberto, anfitrión y organizador del simposio.

En los últimos días del mes de diciembre de 1992, Roberto y yo viajamos a Moscú para trabajar en los experimentos del Bion-10. El IBMP nos había reservado un laboratorio en uno de sus edificios. La “Room 314” era, efectivamente, una habitación, con unas mesas y unas sillas, donde preparamos el experimento “FLIES”. Quedan cada vez más lejanos los recuerdos de aquellos días: las condiciones de trabajo en aquel “laboratorio”, cuyo suelo alguien llenó de cubos un día de nevada extrema, para recoger el agua de las goteras; la jornada perdida, en ayunas, en una comisaría rusa, después de que un conductor nos embistiera, camino del IBMP, con su vehículo sin placas de matrícula... Lo que sí perdurará en mi memoria es haber compartido la nochevieja en aquel laboratorio con Roberto, con algo de turrón alicantino, pero absolutamente centrados en la preparación del experimento, que debíamos entregar a los investigadores rusos para que lo incorporaran en el satélite. En el equipo incluiríamos poblaciones de moscas de mediana edad y pupas, que esperábamos eclosionaran como adultos en microgravedad.

El esfuerzo valió la pena: cuando descargamos los registros de la unidad “DEMIR” tras el vuelo espacial, compartimos la emoción de comprobar que la actividad locomotora de las moscas jóvenes en microgravedad era hasta cinco veces superior a la de las maduras, lo que estaba muy por encima de lo esperado. No solamente esto: teníamos un registro continuo (de cada cinco minutos) de la actividad, de tal modo que pudimos confirmar que las moscas jóvenes habían eclosionado como adultos escasas horas después de que el satélite entrara en microgravedad. Estos datos ponían de manifiesto, por primera vez de manera cuantitativa, el incremento de la actividad locomotora de las moscas en el Espacio, mucho más acusado en los ejemplares jóvenes, recién eclosionados en

microgravedad (y, por tanto, sin haber sido expuestos a la gravedad), que en los de mediana edad, eclosionados en la Tierra.

Sin embargo, aquello no había terminado: con un retraso de 24 horas, en el IBMP se modificaba la temperatura del incubador que alojaba los experimentos control de tierra, siguiendo fielmente los datos enviados por el satélite. Los responsables de la ESA comprobaron que esos datos y la calibración del incubador no eran exactos, por lo que la comparación con los grupos de tierra obligaba a repetir los controles. Además, el equipo del experimento “CLOUD”, desarrollado por una empresa rusa, estaba diseñado para ir separando automáticamente, en distintos compartimentos, las moscas descendientes en sus diferentes fases del desarrollo. Lamentablemente, en condiciones espaciales, el aparato no funcionó correctamente. A pesar de que estos contratiempos afectaron principalmente al experimento sobre desarrollo, Roberto consiguió una beca para que el Dr. Ilya Ushakov, responsable del aparato “CLOUD”, investigara en su laboratorio MDBML en Madrid (8).

En julio de 1994, por tercera vez, la ESA volvería a utilizar el Biorack en un vuelo de la lanzadera de la NASA. Teníamos otra oportunidad de volver a realizar un experimento con las ventajas de un vuelo tripulado: el “International Microgravity Laboratory – 2” (IML-2), a bordo del Columbia. Este vuelo de casi quince días permitió estudiar los efectos tanto sobre el desarrollo como sobre el envejecimiento de las drosophilas (9, 10). Además, su mayor duración supuso un mejor diseño experimental: los astronautas recogerían muestras en distintos estados de desarrollo, y grabarían en vídeo la conducta de las moscas macho jóvenes.

Los resultados del IML-2 confirmaron sólidamente las anteriores observaciones sobre los cambios en el desarrollo de las moscas, incluso tras una exposición a la microgravedad de mayor duración. Los machos jóvenes volvían a mostrar un marcado aumento en su actividad locomotora durante el vuelo espacial. Tras su recuperación, al compararlas con los controles de vuelo y terrestres, se observó una aceleración de su envejecimiento, tanto en términos de respuesta fisiológica (copulación y geotaxis negativa) como en las curvas de supervivencia. Además mostraban una acusada caída en un importante marcador molecular de envejecimiento que, poco tiempo antes, el laboratorio de Roberto había descrito: el RNA ribosomal 16S mitocondrial.

En la misión siguiente a bordo del biosatélite ruso, Foton-10, en febrero de 1995, trataríamos de volver a confirmar los hallazgos sobre la aceleración del envejecimiento. Era otra colaboración entre la ESA e IBMP de Moscú, y de nuevo se constató la dificultad que supone investigar en Biología Espacial. El experimento a bordo del Foton-10 significó la pérdida de las moscas y de una de nuestras unidades DEMIR. Tras aterrizar correctamente, la cápsula resultó destruida durante su traslado en helicóptero a un aeropuerto. Debido a las malas condiciones meteorológicas, el helicóptero tuvo que soltar la cápsula desde decenas de metros, y esta impactó violentamente contra el suelo. Varios experimentos resultaron completamente dañados, pero pudimos obtener el registro de la actividad de las moscas durante el vuelo.

La misión Foton-11, en octubre de 1997, consistió en una repetición de la anterior: se expusieron machos jóvenes y machos adultos al vuelo espacial. Los resultados coincidían con las observaciones anteriores (Bion-10, IML-2 y Foton-10), y confirmaban la correlación entre el incremento de la actividad locomotora en microgravedad, especialmente de los machos jóvenes, y la aceleración posterior del deterioro funcional y mitocondrial (11, 12), lo que implicaba incremento del metabolismo y daño mitocondrial en el proceso del envejecimiento. Todas estas observaciones contribuyeron a aclarar los mecanismos del complejo fenómeno del envejecimiento en los sistemas biológicos, incluidos los seres humanos.

En esta revisión no se ha contemplado toda la actividad investigadora que Roberto realizó en Biología Espacial, como sus experimentos sobre radiación espacial en otro animal modelo, el crustáceo *Artemia*, en colaboración con Arantxa Hernandorena del Laboratorio del Museo Nacional de

Historia Natural de Biarritz (Francia). Especialmente tuvo una larga y fructífera colaboración con Francisco Javier Medina del Centro de Investigaciones Biológicas (CIB-CSIC), que culminaría con la participación de ambos en tres experimentos de la misión “Cervantes” en la Estación Espacial Internacional. Esta misión y otras investigaciones recientes sobre efectos biológicos de las alteraciones gravitacionales las trata su discípulo Raúl Herranz en este mismo número de *Encuentros Multidisciplinares*. Tampoco se ha pormenorizado la gran implicación de Roberto como docente en este campo, puesta de manifiesto en la organización y participación en las múltiples ediciones de los cursos para posgraduados “Life in Space”, en el Observatorio Oceanológico de Banyuls sur Mer (Francia), o últimamente, en el de Biología Espacial de la “Universidad Virtual” de la ESA, con implicación de varias universidades europeas.

La ESA ha coordinado ochenta y tres experimentos realizados por grupos españoles en distintas plataformas espaciales, de los cuales quince son de Biología Espacial. En doce de estos, Roberto fue investigador principal o miembro del equipo participante. Volviendo a aquella reflexión que Roberto se hacía hace años, en la que se cuestionaba si continuar en la Biología Espacial, debo decir que la gran actividad y el nivel de investigación desarrollados por él en ese campo a lo largo de varias décadas, hace que la respuesta sea fácil: los que hemos tenido la oportunidad de colaborar con Roberto, responderíamos, sin la menor duda, que sí, que se debe continuar investigando, que la Biología Espacial tiene futuro. Y ello gracias a Roberto.

Quiero agradecer sinceramente los comentarios y sugerencias de Raúl Herranz y de Mar Langa para la elaboración de este texto.

REFERENCIAS

- (1) Marco, R. (1996): “La investigación biológica espacial en España. Un ejemplo muy especial de la delicada situación que atraviesa en estos momentos la investigación en nuestro país”. *Med. Aeroesp. Ambient.* 1: 243-248.
- (2) Marco, R.; Vernós, I.; González, I.J.; Calleja, M. (1986): "Embryogenesis and Aging of *Drosophila melanogaster* flown in the Space Shuttle." *Naturwissenschaften* 73: 431-432.
- (3) Vernós, I.; González-Jurado, J.; Calleja, M.; Marco, R. (1989): “Microgravity effects on the oogenesis and development of embryos of *Drosophila melanogaster* laid in the Spaceshuttle during the Biorack experiment (ESA)” *Int. J. Dev. Biol.* 33: 213-226.
- (4) Miquel, J.; Philpott, D.E. (1978): “Effects of weightlessness on development and aging of *Drosophila melanogaster*”. *The Physiologist*, Vol. 21: 80.
- (5) Marco, R.; González-Jurado, J.; Calleja, M.; Garesse, R.; Maroto, M.; Ramírez, E.; Holgado, M.C.; de Juan E.; Miquel, J. (1992): "Microgravity Effects on *Drosophila melanogaster* Development and Aging: Comparative Analysis of the Results of the Fly Experiment in the Biokosmos 9 Biosatellite Flight" *Adv. Space Res.* 12(1): 157-166.
- (6) Miquel, J.; Fleming, J. (1984): “A two step hypothesis on the mechanisms of in vitro cell aging: cell differentiation followed by intrinsic mitochondrial mutagenesis” *Exp. Gerontol.* 19: 31-36.
- (7) Demets, R.; Jansen, W.H.; Simeone, E. (2002): *Biological Experiments on the BION-10 Satellite*. ESA SP-1208.
- (8) Marco, R.; de Juan, E.; Ushakov, I.; Hernandorena, A.; González-Jurado, J.; Calleja, M.; Manzanares, M.; Maroto, M.; Garesse, R.; Reitz, G.; Miquel, J. (1994): “Arthropod model systems for studying complex biological processes in the Space environment”. *Adv. Space Res.* 14 (8), 215-227
- (9) Marco, R.; Benguría, A.; Sánchez, J.; de Juan, E. (1996): "Effects of space environment on *Drosophila melanogaster* development. Implications of the IML-2 experiment", *J. Biotechnol.* 47(2-3): 179-189.
- (10) Benguría, A.; Grande, E.; de Juan, E.; Ugalde, C.; Miquel, J.; Garesse, R.; Marco, R. (1996): “Microgravity effects on *Drosophila melanogaster* behavior and aging. Implications of the IML-2 experiment.” *J. Biotechnol.* 47(2-3): 191-201.

- (11) Marco, R.; Díaz, C.; Benguría, A.; Mateos, J.; de Juan, E. (1999): “*Drosophila melanogaster*, a key arthropod model in the study of the evolutionary long term adaptation of multicellular organism to the space environment.” En: ESA SP-433: 433-440.
- (12) Marco, R.; Díaz, C.; Benguría, A.; Mateos, J.; Mas, J.; de Juan, E. (1999): “The role of gravity in the evolutionary emergence of multicellular complexity. The effects of microgravity on arthropod development and aging”. *Adv Space Res.* 23 (12) 2075-2082.