

PLASTICIDAD NEURONAL Y FISIOLÓGÍA AEROESPACIAL: MUCHOS HECHOS Y ALGUNAS ESPECULACIONES

ALAIN RIVEROS RIVERA*

Resumen

La investigación de los procesos neurofisiológicos atrae el interés de las agencias aeroespaciales ya que la exploración humana, más allá de la atmósfera terrestre, implica el sometimiento del sistema nervioso a una serie de fenómenos con capacidad de generar cambios drásticos tanto en nivel celular como sistémico. Estudios arrojados en las últimas décadas demuestran que de realizarse exploraciones que requieran una exposición prolongada a estos fenómenos (por ejemplo un eventual viaje a Marte), uno de los principales componentes que podría afectarse en el sistema nervioso sería su plasticidad. La presente mini-revisión se enfoca en aquellos fenómenos que han sido descritos más frecuentemente y las consecuencias moleculares y celulares que pueden tener. Estos fenómenos básicamente son las radiaciones cósmicas, la aceleración gravitacional y de otros tipos, la hipoxia, la hiperoxia e hipobaría, la vibración, el confinamiento, los campos magnéticos y la nutrición. Es claro que la relación de estos fenómenos con su efecto neural será diferente dependiendo el tipo de vuelo al que nos refiramos (extra o intra-atmosférico) y que el listado presentado corresponde tan solo al conocimiento actual de los posibles factores fisicoquímicos implicados. Sin embargo, futuras investigaciones pueden develar aspectos hasta el momento ni siquiera contemplados. Adicionalmente, se propone una clasificación sobre los diferentes tipos de adaptaciones que acompañan la exposición del sistema nervioso, especialmente en el vuelo espacial.

Palabras clave: potenciación a largo plazo, transmisión sináptica; plasticidad neuronal, electrofisiología.

NEURAL PLASTICITY AND AEROSPACE PHYSIOLOGY: MANY FACTS AND SEVERAL SPECULATIONS

Abstract

The investigation of the neurophysiologic processes has attracted the interest of space agencies because human exploration, beyond the terrestrial atmosphere implies the exposure of the nervous system to a series of phenomena capable of generating drastic changes at the cellular and systemic levels. Research from the last decades suggests that neural plasticity might be one of the main properties affected, especially during extended exposition to space conditions (such as an eventual trip to Mars). In this mini review, I focus on the most frequently

* Facultad de Medicina; Universidad Militar Nueva Granada. Dirección electrónica para correspondencia: alainriv@umng.edu.co
Dirección postal: Laboratorio de Fisiología. Facultad de Medicina, Universidad Militar Nueva Granada. Tr. 3 # 49-00, Bogotá, Colombia.

Recibido: Mayo 15 de 2006. Aceptado: Mayo 24 de 2006

described phenomena and their consequences at the molecular and cellular levels. These include cosmic radiation, gravitational acceleration, hypobaric conditions, hypoxia, hyperoxia, vibrations, confinement, magnetic fields and nutrition. It is clear that the effects of the conditions mentioned above are multiple depending on the type of flight (e.g. intra or extra atmospheric) and the included list is based only on the present knowledge. On the other hand, so-far unknown, conditions might be potentially discovered during the next years of research. In addition, I propose a broad classification of the diverse adaptations of the nervous system related to space exploration.

Key words: long-term potentiation, synaptic transmission, neuronal plasticity, electrophysiology.

Introducción

El deseo del hombre de explorar más allá de los límites que le impone su fisiología, ha hecho que sea capaz de mirar en universos otrora solo imaginados en artículos de ficción. El área de la neurofisiología ha sido uno de los principales focos de atención desde que se comenzaron a realizar estudios sobre los efectos que podrían tener las condiciones especiales a las que era sometido el cuerpo humano durante el vuelo. La importancia radica en que modificaciones importantes en este sistema, conllevan directamente a una frustración de la misión que se pretenda realizar.

Si bien es cierto la sintomatología acusada por los astronautas se ha descrito desde hace varias décadas y los cuadros clínicos están caracterizados (ver tabla 1), el reconocimiento de los efectos del vuelo en nivel celular y molecular hasta ahora está comenzando a ser entendido.

El objetivo de esta revisión es plantear los hallazgos que hasta el momento se han obtenido en un fenómeno circunscrito de la neurofisiología: la plasticidad neuronal. Esta puede ser interpretada como “la capacidad del sistema nervioso para cambiar su reactividad como el resultado de activaciones sucesivas”. Desde luego, ella es el pilar fundamental por medio del cual el cerebro aprende, memoriza y se adapta; especialmente este último punto resulta trascendental en las condiciones exigidas durante el vuelo. Empecemos pues por reconocer algunos aspectos generales de la plasticidad neuronal.

Fenómenos de plasticidad neuronal

Dentro de este marco de referencia es importante presentar la manera como se interpreta la plasticidad neuronal y por ende como se estudia. Podríamos entonces iniciar con los grandes grupos de cambios:

1. **Cambios a corto plazo:** Generalmente se traducen en modificaciones de la activación sináptica por una potenciación o inhibición en la respuesta interneuronal. Las modificaciones suelen presentarse por cambios en las conductancias de ciertas especies iónicas (como el calcio), la dinámica de los receptores de neurotransmisores y la activación de vías de señalización con fenómenos de fosforilación (de los mismos canales o receptores o de otras proteínas involucradas en la respuesta postsináptica). Al estudiarlas desde el punto de vista eléctrico, se pueden encontrar los fenómenos de potenciación postetánica -PPT- y plasticidad por pulsos pareados-PPP- (la cual puede ser facilitadora -PPF- o depresora -PPD). Estas formas de plasticidad están relacionadas con el calcio disponible en la terminal presináptica y en algunos sitios y circunstancias se relacionan con ciertos neurotransmisores como la acetilcolina o el glutamato¹.
2. **Plasticidad a largo plazo:** Cuando las modificaciones sinápticas se mantienen por varios minutos, horas, o inclusive días, hablamos de cambios a largo plazo. En este caso pueden aparecer modificaciones que potencian el contacto sináptico, que además de funcional

TABLA 1. Efectos neuroclínicos durante el viaje espacial

Efectos neuroclínicos durante el viaje espacial: (2;2;11)	
1.	Ilusiones posturales
2.	Sensación de caída (<i>tumbling</i>)
3.	Vértigo
4.	Enfermedad del movimiento en el espacio (SMS, <i>space motion sickness</i>)
5.	Cambio en el gusto, olfato y percepción somatosensorial
6.	Disminución del apetito y sensación de llenura
7.	Degustación suave de los alimentos (de ahí la necesidad de aumentar los condimentos en el viaje espacial)
8.	Percepción intermitente de fosfenos (<i>flash</i>) durante el vuelo (debido al impacto de partículas pesadas ionizadas en la retina)
9.	Disminución de la masa muscular, especialmente la musculatura antigravitatoria (esto puede conducir a cambios en las cortezas motoras con consecuencias claras en los procesos de readaptación después de largos viajes).
10.	Regulación a la baja de receptores D2 en el estriado de ratas
11.	Disturbios del sueño (aumentando el sueño hasta 12 horas diarias)
12.	Alteraciones psicológicas como estrés y depresión (que pueden muy bien estar relacionadas con el mismo contexto de un viaje espacial, más que con los mismos fenómenos que se han estado tratando)
1.	Fatiga muscular y debilidad
2.	Ataxia

(modificaciones a corto plazo: efectos ionotrópicos, fosforilaciones, etc.) pueden ser también estructurales. Ejemplos concretos se ven durante la generación de nuevos contactos (neurogénesis) o inclusive nuevas neuronas (neurogénesis). Electrofisiológicamente se reconocen fenómenos como la potenciación a largo plazo -LTP- en los cuales pueden aparecer modificaciones funcionales o estructurales. Hay quienes argumentan que este mismo fenómeno puede dividirse en largo y corto plazo. En cualquier caso la división presentada aquí es por supuesto artificial y responde simplemente a la manera como se aborda el fenómeno¹.

Además de esta clasificación y especialmente para el caso de la fisiología aeroespacial, se podría clasificar en tres tipos de modificaciones las adaptaciones plásticas al vuelo:

1. Adaptaciones fásicas: Ocurren al inicio de un cambio en las condiciones del medio externo. Ejemplo de ello es el cambio en la disposición postural que acompaña la adaptación después de iniciar un vuelo extra-atmosférico, pero que desaparece tras un tiempo de exposición al fenómeno.

2. Adaptaciones tónicas: Se dan durante todo el tiempo de exposición a las condiciones especiales, o inclusive duran un poco después de dicha exposición. Sin embargo, luego de un lapso posterior desaparecen totalmente. Un ejemplo típico son los cambios sobre el sistema vestibular que pueden acompañar durante todo el vuelo a los astronautas, pero que al regreso a tierra inician un proceso de reversión. En este caso, no sólo el sistema nervioso está implicado, sino que procesos relacionados como el movimiento de líquidos y electrolitos, explican en parte la sintomatología.

3. Adaptaciones permanentes: Aparecen durante, o después de la exposición a condiciones especiales, siendo su principal característica el hecho de perdurar en el tiempo. Este tipo de situaciones se han detectado en la evaluación de ciertas habilidades motoras que los astronautas aprenden durante el vuelo y que aún después de regresar a la tierra, pueden mantenerse.

Como se ha mencionado, ambos tipos de clasificaciones sólo responden al abordaje que se hace en el momento de investigar los fenómenos. Por ello

es probable que exista un solapamiento entre las diferentes categorías y que algunas de ellas responden incluso, a fenómenos cruzados de plasticidad a corto y largo plazo.

Determinantes de las modificaciones neuronales durante el vuelo aeroespacial

Antes de presentar los resultados de investigaciones en el área, es conveniente mencionar los principales factores que eventualmente pueden modificar la plasticidad neuronal durante el vuelo aeroespacial:

1. Radiaciones cósmicas.
2. Aceleración gravitacional y otros tipos de aceleración.
3. Hipoxia, hiperoxia e hipobaría.
4. Vibración.
5. Confinamiento.
6. Campos magnéticos.
7. Aspectos nutricionales, especialmente micronutrientes.

Es probable que el cuerpo humano deba soportar todas estas circunstancias durante el vuelo aeroespacial, sin embargo y dependiendo si el vuelo es atmosférico o extraatmosférico, la implicación de cada uno de ellos es variable. Por ejemplo, las condiciones de hipoxia, hipobaría e hiperoxia son más notorias durante maniobras atmosféricas, mientras que las radiaciones cósmicas y los efectos de la microgravedad son característicos del viaje extraatmosférico.

Durante las primeras exploraciones humanas en las misiones Mercurio, Gemini y Vostok, los investigadores no encontraron alteraciones importantes sobre el sistema nervioso central pero se debe tener en cuenta que en la mayoría de estos vuelos, la duración no era mayor a dos semanas. Fueron las misiones rusas, Salyut y Mir y las norteamericanas, especialmente Skylab, las que permitieron una evaluación después de tiempos mayores de exposición, entre 100 a 300 días². Curiosamente, a partir de ese momento, comenzó a aparecer una estela de efectos bien interesantes y que desde entonces han generado una importante línea de investigación. Los siguientes son resultados arrojados por los estudios en esta área.

Efectos de las radiaciones cósmicas

Uno de los factores más estudiados durante el vuelo espacial lo constituyen las radiaciones exomagnéticas. Para esto se requiere conocer los tipos de radiaciones a que está sometido un navegante espacial (Tabla 2). Se debe aclarar que sin ningún tipo de aislamiento especial, el blindaje habitual de los vehículos espaciales protege contra los rayos X y ultravioleta. Hasta el momento el peligro más caracterizado lo ofrecen las radiaciones con iones pesados, dentro de los que se destaca el hierro. Hay estudios que aseveran que la exposición a las condiciones espaciales y el impacto de partículas HZE (*high z and energy*) es similar al efecto del envejecimiento, el decremento funcional y la neurodegeneración. Los iones HZE como el hierro, cobran interés por la gran cantidad de energía y carga que poseen³. Precisamente los experimentos de Joseph con ratas demostraron que la irradiación con Fe56 produce un déficit en el desempeño de los animales, el cual es además, dosis dependiente y probablemente relacionado con una disminución en la liberación de dopamina estriatal².

Otros autores como Philpott *et al.* demostraron que la radiación con Ar40 también disminuye el desempeño de las ratas, relacionado especialmente con alteraciones en el funcionamiento hipocampal. En este caso los autores reportaron una disminución en la densidad sináptica y en la longitud de las espinas sinápticas en el hipocampo². Curtis *et al.* presentaron también el resultado del análisis por simulación de lo que representaría un viaje a Marte (una duración de aproximada de tres años), calculando que uno o más iones con $z = 15$ (P31) impactarían en por lo menos del 6% al 12% de los núcleos de la población neuronal, de áreas clasificadas como trascendentales. Resulta lógico pensar que si además los núcleos se consideran también los pericariones, este porcentaje se aumentaría, para lo cual los autores muestran cifras tan dramáticas como del 46% de la población neuronal evaluada. Para refinar un poco los resultados los investigadores se dirigieron específicamente al impacto con iones de hierro, alcanzándose en este caso, cifras del 1,6% al 3% contra los núcleos y del 7% al 13% contra toda la célula. Se advierte también un impacto hasta del 25% de las células ganglionares de la fovea, por iones con $z = 15$. En este caso hay que tener en cuenta que una célula

horizontal toma información de 100 fotorreceptores, lo cual puede ampliar notoriamente el efecto deletéreo de una sola partícula en la retina. En resumen, se calcula que 6 millones de los 43 millones de neuronas hipocámpales y 55 mil de los 1,8 millones de neuronas talámicas, serían impactadas con iones $z = 26$; y 20 millones y 230 mil respectivamente con $z = 15$.

Como conclusión a sus cálculos, los investigadores señalan que en una misión de tres años a Marte, el 46% de la población total de neuronas en el hipocampo, tálamo y núcleo basal de Mesynert, serían impactadas por iones con $z = 15$, siendo del 10%, la máxima disminución calculada por el blindaje, en este porcentaje de impacto.

La importancia de estudiar específicamente el hierro ionizado es que a pesar de representar solamente el 1% de las radiaciones, está demostrado que puede causar daños en el DNA y alteraciones motoras, especialmente en el sistema nigroestriado. También está documentado que el impacto con estas partículas puede alterar la sensibilidad de receptores muscarínicos, en un efecto que parece estar relacionado con procesos de peroxidación lipídica².

En otros estudios se ha evaluado el efecto de diferentes dosis de radiación sobre los procesos de neuritogénesis. Vázquez *et al.* por ejemplo, utilizaron explantes de la retina de pollos de seis días de nacidos, demostrando que con dosis de 10 a 80 cGy por 24 horas sobre los explantes, se alteraba la densidad, la elongación y los índices neuronales. Señalaron además que los efectos son dosis dependiente y que el hecho que las exposiciones sean

agudas o fraccionadas, determina diferentes tipos de reparación. Llama la atención que la supervivencia de las neuronas aumentaba, si la retina se mantenía con el tectum, debido posiblemente a la capacidad del tectum de secretar factores tróficos que disminuyan la lesión retiniana. Estudios anteriores con bajos LET también habían demostrado disminución de la neuritogénesis⁴.

Concluyen estos autores que aunque los viajes cortos pueden no afectar la plasticidad neuronal, se debe tener en cuenta la interacción microgravedad-radiación, sobretodo con misiones a la Luna o a Marte, por su mayor tiempo de exposición. Resaltan la importancia de considerar otros factores como los ciclos circadianos y el efecto de la gravedad en funciones colaterales, como la mecánica de fluidos y la biofísica de los gases, que obviamente se afectan durante el viaje espacial y que pueden modificar el aporte de nutrientes al tejido cerebral y presentan evidencia adicional sobre el efecto de la hipogravedad en la diferenciación neuronal, al parecer por mecanismos que median una disposición citoarquitectónica distinta y por ello, procesos de migración y estructuración igualmente diferentes⁴.

En otras investigaciones se ha observado que la radiación disminuye el número de segundos mensajeros que modulan los niveles de calcio intracelular, algo que resulta indispensable para el nuevo crecimiento neurítico y otros procesos de activación sináptica. A lo anterior se suma el efecto de la hipogravedad sobre la disponibilidad de calcio y sobre la dinámica del citoesqueleto, los cuales constituyen pilares fundamentales en la plasticidad a corto y largo plazo⁵.

TABLA 2. Composición de las radiaciones cósmicas exomagnetosféricas.

Composición de las radiaciones cósmicas exomagnetosféricas	
Radiaciones cósmicas galácticas:	Eventos de partículas solares*:
Protones: 87-90%	
Núcleos de helio: 8-10%	
Electrones: ~1%	
Iones pesados: ~1%	
*Difieren en el espectro y la distribución de energía y variaciones temporales.	

Efecto de la aceleración y la microgravedad

Tanto para los vuelos intra como extra-atmosféricos, la gravedad es una variable a tener en cuenta, pues sus repercusiones además de evidentes, suelen generar cambios patentes en la fisiología humana. Los estudios clásicos de la aceleración y sus efectos sobre el sistema vestibular han demostrado que se pueden presentar aprendizajes que conducen al aumento de la respuesta vestibulo-ocular. Es probable que los cambios de gravedad a microgravedad se deban a un aumento de la actividad cerebelosa, fenómeno plenamente caracterizado en peces. En esos mismos estudios también se ha reportado un aumento de la creatin cinasa cerebral y de la citocromo oxidasa, por el paso de la gravedad 1 hacia la microgravedad⁶.

Aunque muchos estudios se enfocan en las estructuras del sistema nervioso directamente implicadas en el procesamiento sensorial gravitatorio o motor primario (sistema vestibular y asociados), está demostrado que otras estructuras también se afectan por las modificaciones del campo gravitatorio. Se sabe por ejemplo que en algunas maniobras aéreas, o durante el despegue de naves espaciales, los cuerpos pueden estar sometidos a campos hipergravitatorios de más de 6G⁷.

En un estudio reciente se demostró que campos de 4G con una exposición de 48 horas, pueden modificar la inducción de la plasticidad sináptica en el hipocampo. Para ello se tomaron ratones y se sometieron a fuerzas gravitatorias de 1G, 2G y 4G, encontrándose que la PPF no tuvo modificaciones significativas. Llamó la atención que la exposición a 48 horas hizo que la inducción de LTP fuera mayor en este grupo, que en los grupos sometidos a 2G, o a 24 horas de exposición a 4G. Adicionalmente los investigadores demostraron que tales cambios estaban relacionados con la fosforilación de la subunidad GluR1 del receptor AMPA. Se sabe que estas modificaciones aumentan la entrada de calcio y con ello se modifica la actividad del receptor NMDA, el cual participa en algunas formas de LTP¹. Sin embargo, parece que la fase tardía de la LTP (duración mayor a 3 horas) no aumentó por la exposición hipergravitatoria, algo evidente por la ausencia de modificaciones en la actividad de CREB⁸. Obviamente esta exposición

de 48 horas continuas bajo 4G no se presenta durante las maniobras aéreas, pero puede ser un manifiesto de que efectivamente la hipergravedad puede modificar estructuras plásticas no implicadas directamente en las adaptaciones sensoriomotoras, requeridas durante el vuelo aeroespacial.

Visiones reduccionistas, enfocadas en el papel de ciertas moléculas como el receptor de glutamato NMDA, involucrado en la coordinación de procesos de modulación y adaptación sináptica, dan pistas sobre posibles modulaciones en la plasticidad sináptica aeroespacial. Un ejemplo interesante es su participación en el reflejo de algunos mamíferos conocido como “*air righting*” (la capacidad que tiene un animal para enderezar su cuerpo y caer sobre sus patas), pues luego de administrar bloqueadores específicos del receptor, se observó un deterioro dosis dependiente de dicho reflejo, hecho que demuestra que se trata de un proceso aprendido y que resalta la importancia del receptor ionotrópico de glutamato en la señalización que conduce al fortalecimiento de esta vía refleja⁹. Es posible entonces que modificaciones potenciadoras o supresoras de este receptor, lleven a mejores adaptaciones y específicamente al mejoramiento en las respuestas de desorientación postural o propioceptiva.

En lo que respecta a las adaptaciones a la microgravedad, es bien reconocido que luego de un vuelo espacial disminuye la estabilidad postural. Este efecto es marcado aún luego del regreso a G1, pero suele disminuir rápidamente durante las primeras 12 horas llegando a desaparecer totalmente al cabo de 2 a 4 días. Existen evidencias que las adaptaciones vestibulares están a cargo de las células ciliadas, pues se ha demostrado que las conexiones sinápticas entre células ciliadas tipo I y II con las terminales aferentes, aumentan en las ratas que han viajado en algunas misiones espaciales¹⁰.

En las evaluaciones a los astronautas durante el vuelo, se ha visto que aunque el reflejo H no se modifica al principio del viaje, los cambios que aparecen en la etapa inicial revierten paulatinamente. Estos cambios lentos pueden estar relacionados con los hallazgos en los que las células conectadas a los otolitos, cambian su activación de fásica hacia tónica, en circunstancias de hipergravedad hacia normogravedad¹¹. También se demostró en inves-

tigaciones realizadas con monos *Rhesus* durante la misión COSMOS 1667, que la actividad multiunitaria en el núcleo vestibular medial aumenta durante pruebas de mirada fija en los días 2-5 del viaje, pero que regresan a su actividad normal hacia el día 7 de microgravedad. En la misión COSMOS 1887 se demostró adicionalmente que la activación del nervio vestibular y el nódulo flóculo-nodular suelen tener un pico durante los días de vuelo 1-3¹¹. Estos resultados demuestran el gradiente temporal necesario dentro de los mecanismos de ajuste y control del sistema vestibular.

En un experimento de 7 días de vuelo espacial, Miller *et al* demostraron que el número de receptores 5-HT1 en el hipocampo de ratas y de receptores D2 en el estriado aumentaba, asociado este hallazgo con una disminución del mismo receptor en la corteza prefrontal. Según los autores, estos cambios probablemente se relacionan con modificaciones en el mapa espacial cognitivo, al pasar de G1 a G0. Estudios realizados en humanos demuestran que efectivamente durante la adaptación espacial, pueden aumentar los niveles de dos neurotransmisores, la serotonina y la histamina, las cuales disminuyen, luego de un tiempo de adaptación⁸. En otra investigación realizada con ranas toro, se reportan escasas perturbaciones en el desarrollo del sistema nervioso central y las pocas manifestadas, desaparecen al volver a la gravedad¹². Este experimento se menciona para llamar la atención en el hecho que diferentes modelos biológicos pueden llegar a arrojar resultados contradictorios y que la exclusiva aplicación de datos de modelos animales en humanos, puede llevar a falsas conclusiones. Si bien es cierto, este tipo de estudios enriquece nuestro conocimiento acerca de los efectos de los viajes espaciales, hay que ser cautelosos en el momento de aplicarlos a misiones tripuladas humanas.

Efecto de la hipoxia

Durante ciertas maniobras de vuelos atmosféricos es posible que el piloto se encuentre con pequeños lapsos de hipoxia, que con los años aumentan en cantidad. Estamos hablando de un fenómeno conocido como **hipoxia intermitente** y de la que se ha especulado si puede o no, causar daños en el funcionamiento neuronal, a largo

plazo. Recientemente se demostró el efecto de la hipoxia intermitente en regiones esenciales para el aprendizaje como el hipocampo, en un estudio que comparó ratas con un aporte constante de oxígeno al 21%, contra ratas que expuestas durante 12 horas de su ciclo luz oscuridad, a una administración cíclica de oxígeno al 21%, hasta oxígeno al 10% cada 90 segundos. Se evaluó el efecto que esto podría tener sobre las espigas poblacionales en el área CA1 sobre la plasticidad sináptica y se encontró que efectivamente existía un deterioro en consolidar la LTP por periodos más allá de 15 minutos¹³. El mismo grupo de investigadores había demostrado previamente, que los efectos de la hipoxia estaban fuertemente relacionados con la apoptosis desencadenada en neuronas de la región CA1 -curiosamente las de la región CA3 soportan mejor la hipoxia- que se marcan positivas para el receptor NMDA. Como señalan ellos mismos, son procesos relacionados con la expresión de mediadores apoptóticos, desde las CREB hasta las caspasas.

Efecto de la vibración y el confinamiento

Si bien es cierto que los anteriores factores resultan trascendentales en el abordaje fisiológico y médico de los tripulantes de aeronaves, existen otros que también tienen importancia. Se ha determinado por ejemplo, el efecto que puede tener la vibración (frecuente tanto en las misiones atmosféricas como extra-atmosféricas), al modificar la actividad del sistema nervioso. Una revisión de los doctores Newberg y Alavi, mostró que en experimentos con ratas que se sometían a vibración constante se presentaba aumento de los niveles de serotonina en la corteza parietal, el puente y el tálamo y disminución en el caudado y el hipotálamo². Las implicaciones de este hallazgo no se han analizado aún, pero es evidente que pueden generar alteraciones claras en los sistemas sensorial, autónomo y de conciencia. Otro factor interesante es el confinamiento al que deben someterse los tripulantes de una aeronave y que se debe tener en cuenta en las modificaciones comportamentales, hecho demostrado en la expresión de la subunidad NR1 del receptor NMDA en el sistema vestibular de ratas, que se modifica más por el efecto del confinamiento en una jaula, que por el mismo viaje extraatmosférico¹⁴.

Nuevos descubrimientos, nuevas preguntas

El conocimiento que tenemos de los fenómenos naturales, sobre y en los seres vivos (el cuerpo de conocimientos de la fisiología), puede limitar la determinación de todos aquellos factores que influyen en las condiciones de adaptación a ambientes especiales, como el vuelo aeroespacial. Desconocemos cuál es la totalidad de factores físicos a que estamos sometidos normalmente y que pueden aparecer en el espacio exterior, desconocemos también todos los mecanismos que explican el funcionamiento del sistema nervioso y todavía más, los que explican la vida. Desde este punto de vista, es claro que a medida que sepamos más de nuestro universo y de la vida, entendamos las limitaciones fisiológicas que debemos vencer si queremos conquistar el espacio.

En esta revisión no se ha reconocido el efecto que puede tener el campo magnético terrestre sobre la cognición humana. Si bien es cierto, es mucho lo que se especula acerca del efecto de los campos magnéticos sobre el cuerpo humano y en particular sobre el sistema nervioso, no cabe duda que por tratarse de un factor que acompañó toda la evolución de nuestra especie, debe cumplir su papel en los procesos fisiológicos normales. Hasta el momento no se han descrito en los humanos procesos parecidos a los de las aves, las cuales son capaces de orientarse por medio de campos magnéticos. Sin embargo, llama la atención evidencias de otros modelos animales que se pueden utilizar como claves de navegación. En un estudio reciente se demuestra que las hormigas, por ejemplo, al igual que otros insectos, utilizan patrones magnéticos como fuente de referencia en la navegación espacial¹⁵.

¿Será posible entonces que los humanos también estemos incluidos en el grupo de animales “magnetonavegantes”? Curiosamente desde hace algunos años el doctor Dobson viene realizando una serie de experimentos en los que demuestra la existencia de magnetita -un material ferroso- en el hipocampo de humanos sanos^{14,16}. Aunque no se tiene suficiente evidencia para demostrar la importancia de este hallazgo en funciones como la navegación, se puede especular por lo menos, que alguna implicación pueda tener en el mapeo espacial cognitivo. Lo anterior resulta de la correlación esencial que desde 1973 se ha establecido entre el hipocampo y la

navegación humana. Desde luego y si esto resultase cierto, sería un factor a tener en cuenta a la hora de planear viajes exomagnetosféricos de larga duración, si como sabemos, Marte no tiene un campo magnético equivalente al de la Tierra, Júpiter tiene uno mucho mayor que se invierte cada 6 horas y el Sol genera uno de una gran magnitud.

Conclusiones

Aunque se han realizado varios estudios sobre los cambios adaptativos del sistema nervioso durante el vuelo aeroespacial, existen aún algunas limitantes que en nuestro concepto merecen consideración:

1. El número de sujetos de la mayoría de investigaciones generalmente es pequeño.
2. Se deben realizar estudios con tiempos de exposición prolongados, es decir años.
3. Los modelos animales no siempre proporcionan información que se pueda extrapolar a los humanos.
4. Todavía no se conocen muchos mecanismos fisiológicos en condiciones habituales.
5. Aún es incierta la participación de otras variables físicas en el viaje extra-atmosférico.

Sin embargo, el sistema nervioso es suficientemente adaptable como para generar una serie de cambios que permitan al hombre del mañana asomarse a la ventana cósmica universal.

Referencias

1. Riveros A. Registros *in vivo* de la facilitación por pulsos pareados y la potenciación a largo plazo en la región CA1 de la rata: descripción y prueba de una técnica para la evaluación de la plasticidad sináptica. *Revista Med.* 2005; 13(1):75-85.
2. Newberg AB, Alavi A. Changes in the central nervous system during long-duration space flight: implications for neuro-imaging. *Adv Space Res.* 1998; 22(2): 185-196.
3. Palomino F. Fisiología del vuelo. Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil-República de Colombia, (editorial.) Manual básico de medicina aeroportuaria. *Editorial Gazeta.* 2004; 9-17.
4. Vazquez ME, Broglio TM, Worgul BV, Benton EV. Neurogenesis: a model for space radiation effects on the central nervous system. *Adv Space Res.* 1994; 14(10): 467-474.
5. Vazquez ME. Neurobiological problems in long-term deep space flights. *Adv Space Res.* 1998; 22(2): 171-183.

6. Curtis SB, Vazquez ME, Wilson JW, Atwell W, Kim M, Capala J. Cosmic ray hit frequencies in critical sites in the central nervous system. *Adv Space Res.* 1998; 22(2): 197-207.
7. Nicogossian AE, Parker JF. *Space physiology and medicine.* Washington D.C.: US government printing office. 1894.
8. Ishii M, Tomizawa K, Matsushita M, Matsui H. Exposure of mouse to high gravitation forces induces long-term potentiation in the hippocampus. *Acta Med Okayama.* 2004; 58(3): 143-149.
9. Wayner MJ, Tracy HA, Armstrong DL, Phelix CF. Air righting: role of the NMDA receptor channel and hippocampal LTP. *Physiol Behav.* 2000; 69(4-5): 505-510.
10. Slenzka K. Neuroplasticity changes during space flight. *Adv Space Res.* 2003; 31(6): 1595-1604.
11. Correia MJ. Neuronal plasticity: adaptation and readaptation to the environment of space. *Brain Res Brain Res Rev.* 1998; 28(1-2): 61-65.
12. Neubert J, Schatz A, Bromeis B, Linke-Hommes A. Effects of gravity on early development. *Adv Space Res.* 1998; 22(2): 265-271.
13. Payne RS, Goldbart A, Gozal D, Schurr A. Effect of intermittent hypoxia on long-term potentiation in rat hippocampal slices. *Brain Res.* 2004; 1029(2): 195-199.
14. Dechesne CJ, Milhaud PG, Dememes D, Venteo S, Gaven F, Raymond J. Confinement but not microgravity alters NMDA NR1 receptor expression in rat inner ear ganglia. *Neuroreport.* 2003; 14(6): 887-890.
15. Riveros AJ. *Mecanismos de navegación en Atta colombica.* Universidad Nacional de Colombia. Bogota; 2003.
16. Dobson J. Investigation of age-related variations in biogenic magnetite levels in the human hippocampus. *Exp Brain Res.* 2002; 144(1): 122-126.