

# Desempeño psicofísico en un vuelo espacial corto. Revisión narrativa de la literatura\*

| Fecha de recibido: 24 de abril 2022 | Fecha de aprobación: 03 de junio 2022 |

## Nindre Pico Quintero

Psicóloga, magíster en Trastornos  
Cognitivos y del Aprendizaje

Dirección de Medicina Aeroespacial.  
Fuerza Aérea Colombiana  
Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de investigación: Ciencia  
y Poder Aéreo CIPAER

<https://orcid.org/0000-0002-6311-9274>  
✉ [nindre.pico@fac.mil.co](mailto:nindre.pico@fac.mil.co)

## Diego Leonel Malpica Hincapie

Especialista en Medicina Aeroespacial  
Docente de Fisiología de Vuelo. Escuela de  
Posgrados Fuerza Aérea Colombiana  
Colombia

Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de investigación: Ciencia  
y Poder Aéreo CIPAER

✉ [dmlalpicah@unal.edu.co](mailto:dmlalpicah@unal.edu.co),  
[diego.malpica@epfac.edu.co](mailto:diego.malpica@epfac.edu.co)

\* Revisión sistemática de la literatura, grupo CIPAER, Financiación en especie de la DIMAE.

**Cómo citar este artículo:** Pico Quintero, N., y Malpica Hincapie, D. L. (2022). Desempeño psicofísico en un vuelo espacial corto. Revisión narrativa de la literatura. *Ciencia y Poder Aéreo*, 17(2), 65-81. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaaereo.752>



## Desempeño psicofísico en un vuelo espacial corto. Revisión narrativa de la literatura

**Resumen:** Desarrollar actividades en el espacio presenta retos psicofisiológicos que dificultan el desempeño humano, por lo que su entendimiento es fundamental para la planeación de misiones suborbitales, orbitales y de exploración. El ambiente de microgravedad, sumado a la exposición a las condiciones habitacionales en naves espaciales, exige una integración holística de los campos del conocimiento que estudian el rendimiento humano para llevar a cabo diversas actividades de investigación en ciencias espaciales para beneficio de las personas en la Tierra, además de tareas de mantenimiento de equipos, navegación y supervivencia, pero sobre todo, para el diseño de programas que conserven la salud y preparen a los astronautas para la reentrada a la atmósfera, con el fin de disminuir la morbilidad y facilitar la aclimatación a la superficie terrestre. Se realiza, por tanto, una revisión de la literatura publicada en el periodo 1969-2020 mediante la búsqueda en bases de datos como ProQuest, Ebsco, Ovid, arXiv.org, Sage, BioMed, ClinicalKey, SciELO, ScienceDirect, Scopus, SpringerLink, Web of Science, Wiley, PubMed y Google Scholar, y se escogen los artículos que describan los cambios fisiológicos más relevantes en una secuencia de lanzamiento, vuelo orbital y reentrada en los sistemas nervioso central, cardiovascular, respiratorio, musculoesquelético y hematológico, inducidos por la microgravedad y la dinámica de una operación espacial corta.

**Palabras clave:** vuelo espacial; astronautas; fisiología; medicina aeroespacial; Colombia.

## Psychophysical performance in a short space flight. Narrative literature review

**Abstract:** Human activities in space impose several psychophysiological challenges that impact human performance, and its understanding is pivotal for the planning phase of suborbital, orbital and exploration type missions. The holistic integration of different knowledge fields in human performance influenced by microgravity and the spacecraft environment is necessary to carry out activities in space science, research, equipment maintenance, navigation and survival for the benefit of people on earth, continuation of space endeavors, to decrease the likelihood of morbidity and facilitate physiological adaptation of astronauts during re-entry and postlanding activities. A review of literature was performed from 1969 to 2020 using ProQuest, Ebsco, Ovid, arXiv.org, Sage, BioMed, ClinicalKey, SciELO, ScienceDirect, Scopus, SpringerLink, Web of Science, Wiley, PubMed and Google Scholar choosing the best available description of central nervous system, cardiovascular, respiratory, musculoskeletal, and hematologic changes induced by microgravity during a short space flight mission.

**Keywords:** spaceflight; astronauts; physiology; aerospace medicine; Colombia.

## Desempenho psicofísico em um voo espacial de curta duração. Revisão narrativa da literatura

**Resumo:** O desenvolvimento de atividades no espaço apresenta desafios psicofisiológicos que dificultam o desempenho humano, por isso sua compreensão é fundamental para o planejamento de missões suborbitárias, orbitais e de exploração. O ambiente de microgravidade, aliado à exposição às condições de habitação em naves espaciais, requer uma integração holística de campos de conhecimento que estudam o desempenho humano para realizar várias atividades de pesquisa em ciência espacial em benefício das pessoas na Terra, além das tarefas de manutenção, navegação e sobrevivência de equipamentos, mas sobretudo para o projeto de programas que preservem a saúde e preparem astronautas para a reentrada na atmosfera, a fim de reduzir a morbilidade e facilitar a aclimação à superfície da Terra. Portanto, é realizada uma revisão da literatura publicada no período 1969-2020 por meio de bancos de dados de pesquisa como ProQuest, Ebsco, Ovidio, arXiv.org, Sage, BioMed, ClinicalKey, SciELO, ScienceDirect, Scopus, SpringerLink, Web of Science, Wiley, PubMed e Google Scholar, e os artigos que descrevem as mudanças fisiológicas mais relevantes em uma sequência de lançamento, voo orbital e reentrada nos sistemas nervoso central, cardiovascular, respiratório, musculoesquelético e hematológico, induzidos pela microgravidade e dinâmica de uma pequena operação espacial.

**Palavras-chave:** voo espacial; astronautas; fisiologia; medicina aeroespacial; Colômbia.

## Introducción

Se han cumplido veinte años de presencia permanente en la Estación Espacial Internacional (EEI), ubicada a 400 km de altitud, la cual reúne el esfuerzo de 15 naciones que, con su persistente contribución, han realizado más de 2700 estudios científicos para el entendimiento de enfermedades como el Alzheimer, Parkinson, asma, cáncer y la enfermedad cardiovascular, así como avances en estudios de microbiología, agricultura, física cuántica y de fluidos, astrofísica, desarrollo tecnológico e incluso para la ayuda en toma de decisiones en gestión de desastres por eventos naturales en la Tierra. El esfuerzo para vivir y trabajar en el espacio depende de la capacidad del ser humano para aclimatarse biológica, psicológica y socialmente en un ambiente extremo, además del mantenimiento de la salud, dado que la microgravedad induce cambios importantes en la fisiología mientras que la exposición a radiación pone en riesgo la salud de los astronautas (Barratt *et al.*, 2020).

El soporte tecnológico y logístico hizo posible el vuelo de Dennis Tito como turista a la EEI a bordo del Soyuz-TM32 en el 2001, y la evolución del vuelo espacial privado ha hecho posible disminuir los costos en un 30 % para ingresar a una órbita baja terrestre (Greason y Bennet, 2019). Pronto se ampliará con vuelos suborbitales el número de personas que han volado al espacio, sin dejar de lado el concepto de una adecuada aptitud psicofísica para la salida y la reentrada atmosférica (Chang, 2020).

La planeación del vuelo espacial demanda un amplio conocimiento aplicado en ciencias espaciales y la comprensión holística del desempeño humano en operaciones en condiciones nominales y de emergencias, por medio del soporte de especialistas en medicina aeroespacial que se encargan de analizar y gestionar los riesgos desde la selección del personal, el entrenamiento, el soporte al lanzamiento, el vuelo, la recuperación de la nave, la vigilancia por telemedicina y el mantenimiento del desempeño psicofisiológico durante y posterior al regreso (Stepanek *et al.*, 2019).

Los cambios psicofísicos dependen de la duración y el destino del vuelo, así como de las demandas de las actividades de trabajo programadas con anticipación; sin embargo, el ambiente de microgravedad crea ciertas condiciones físicas, responsables de los cambios fisiológicos, como se muestra en la figura 1. Por ejemplo, las operaciones suborbitales duran unos minutos a una altitud que supera los 100 km y los retos psicofisiológicos se relacionan con la exposición a aceleraciones, ruido, vibración, confinamiento y microgravedad, lo que puede generar cinetosis, hipocapnia y ansiedad (Blue *et al.*, 2012; Campbell y Garbino, 2011; Jennings *et al.*, 2006).

El entendimiento de los cambios fisiológicos esperados en un vuelo espacial no son materia de revisión frecuente en las facultades de Medicina en Colombia y, por lo general, son discutidos a nivel de especialidad médica y maestría, por lo cual es necesario proveer una breve descripción para los profesionales de la salud que tienen interés por las ciencias espaciales.

## Métodos

Se realizó una revisión narrativa de la literatura mediante metabuscadores y bases de datos como ProQuest, Ebsco, Ovid, arXiv.org, Sage, BioMed, ClinicalKey, SciELO, ScienceDirect, Scopus, SpringerLink, Web of Science, Wiley, PubMed y Google Scholar para el periodo 1969-2020. Se emplearon las palabras clave *short-duration space flight and cardiovascular physiology, short-duration space flight and neurophysiology, short-duration space flight and musculoskeletal physiology, short-duration space flight and Skylab, short-duration space flight and Apollo, short-duration space flight and respiratory physiology, short-duration space flight and gastrointestinal physiology, short-duration space flight and endocrine physiology, short-duration space flight and neuropsychology, short-duration space flight and neurocognitive, short-duration space flight and biomedical, short-duration space flight and orthostatic*

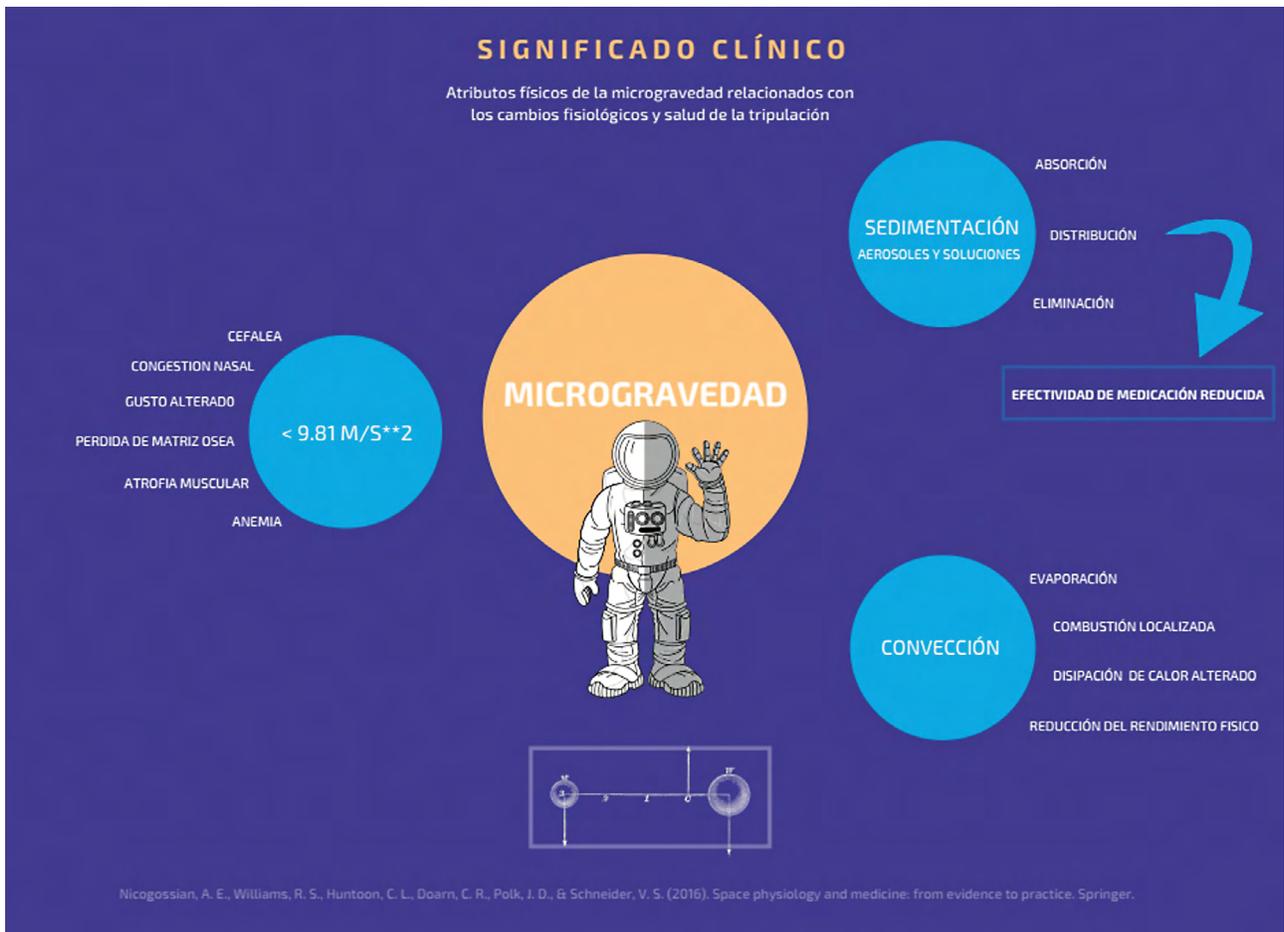


Figura 1. Atributos físicos en microgravedad y significado clínico

Fuente: elaboración propia, con base en Nicogossian *et al.* (2016).

*intolerance, short-duration space flight and International Space Station, short-duration space flight and human performance, short-duration space flight and bone*, se hizo la búsqueda con la estrategia descrita en la tabla 1, de acuerdo con Richter *et al.* (2017), se restringió la búsqueda de los artículos al idioma inglés y posteriormente se llevó a cabo la lectura independiente de aquellos que describen los cambios fisiológicos más importantes en una secuencia de vuelo espacial de corta duración en las fases de despegue, entrada a vuelo orbital, entrada a la atmósfera y posaterizaje. Se excluyeron los estudios que no cumplieron los criterios de inclusión, que describen cambios de adaptación a microgravedad en exposiciones mayores a

treinta días, los análogos espaciales, aquellos que describen el efecto de la exposición diferente a humanos y aquellas publicaciones que hayan salido de órbita terrestre baja, como aquellas en las misiones de Apollo que incluyeron actividad extravehicular en la superficie de la Luna. Las publicaciones en medicina del espacio presentan retos que han limitado la generación de metaanálisis dado que existen pocos ensayos clínicos controlados, diversos métodos de investigación no estandarizados y como se describe en algunas publicaciones, pobre reporte de datos de estudio (Winnard *et al.*, 2022). Por esta razón, se realiza una descripción narrativa de la literatura relevante a un vuelo espacial de corta duración.

Tabla 1.  
Ejemplo de la estrategia de búsqueda

Número de búsqueda	Término	Palabras clave en formato de búsqueda	Filtro de búsqueda
1	Short-duration space flight.	"Short-duration space flight" OR "short space flight" OR "space flight less than 30 days".	Título/Resumen.
2	Partial gravity.	"microgravity" OR "partial gravity" OR "reduced gravity" OR "low gravity" OR "hypogravity".	Todos los campos.
3	Cardiopulmonary physiology.	Cardio OR cardiac OR cardiopulmonary OR heart OR blood OR myocardial OR arterial OR venous OR orthostatic OR cardiovascular system (mesh) OR Circulatory and Respiratory physiological phenomena"	Todos los campos.
4	Neurophysiology.	Neurology OR neurological OR neuro-ocular OR neurocognitive OR central nervous system OR neurological physiological phenomena (mesh) OR neuropsychology OR neurosensory.	Todos los campos.
5	Musculoskeletal.	Muscle OR bone OR body composition OR osteo OR neuromusculoskeletal OR musculoskeletal system (mesh).	Todos los campos.
6	Human performance.	Cognition OR emotional OR visuospatial OR memory OR attention OR sensory.	Todos los campos.
7	Gastrointestinal.	Intestine OR gastric OR bowel OR liver OR pancreatic OR hepatic OR gastrointestinal physiological phenomena (mesh).	Todos los campos.
8	Mechanics.	Biomechanics OR locomotion OR run OR jump OR impact OR acceleration OR electromyography OR mechanical work OR kinetics OR pressure suit OR positive pressure OR movement (mesh) OR mechanics OR workload OR mechanical phenomena (mesh)	Todos los campos.
9	Búsqueda combinada.	1 AND (2 OR 3 OR 4 OR 5 OR 6 OR 7 OR 8).	

*Nota.* Las palabras clave fueron combinadas usando descriptores booleanos agrupados por palabras clave. Los titulares de tópicos médicos, del inglés Medical Subject Headings (MeSH) fueron incluidos además de los filtros de búsqueda avanzada en las bases de datos descritas.

Fuente: elaboración propia.

## Resultados

Se recolectaron 4889 referencias de vuelo espacial que hacen una descripción de cambios psicofísicos en humanos durante el periodo 1969-2020, los cuales incluyen los siguientes sistemas: cardiovascular (832), nervioso central (674), osteomuscular (955), gastrointestinal (476), endocrinológico (299), respiratorio (738), y referencias con la descripción neuropsicológica (44), los cuales incluyen aspectos emocionales (498) y rendimiento cognitivo (373). Se descartaron aquellos títulos cuyo acceso electrónico no fue posible (561) y los registros de referencias repetidas (1419), vuelo espacial de más de 30 días (2129) y se excluyen los títulos de análogos espaciales (643), dado que no tienen la capacidad de simular todas las variables de exposición. Se recopilaron 137 artículos publicados que

hacen referencia a los criterios anteriores, finalmente se seleccionaron 69 referencias que describen los cambios en las fases tempranas del vuelo espacial, vuelo orbital, reentrada y aterrizaje y posvuelo, que además incluye lo que se ha publicado en libros de referencia de medicina, psicología y fisiología espacial, donde se consigna la experiencia que no se ha publicado en literatura científica. Se relatan los hallazgos para que el lector acceda a una revisión rápida y pueda entender con mayor facilidad la dinámica fisiológica en microgravedad en una temporalidad menor a 30 días.

### Fases tempranas del vuelo espacial

Desde el despegue hasta el momento de apagado de los motores de propulsión química responsables del ascenso, hay un lapso de 9 minutos, aproximadamente; la aceleración pico está en promedio entre 3-4 G

que con la vibración y el ruido hace difícil las tareas de interacción con interruptores, pantallas, listas de chequeo y comunicaciones, por lo que el lanzamiento es automatizado; sin embargo, se monitorizan los parámetros del lanzamiento en el potencial escenario de ejecución de procedimientos para abortar o asumir el control manual (Barratt *et al.*, 2020; Clément, 2011).

Como se describe en la figura 2, los cambios fisiológicos inmediatos posteriores a la pérdida del vector de aceleración de la propulsión vienen de la perturbación del gradiente de la presión hidrostática, que desplaza en dirección cefálica aproximadamente 2 L de volumen desde las piernas a la circulación central con edema y eritema facial, lo que desencadena síntomas de congestión nasal, frontal, maxilar y retroocular, mejorando de horas a días con la actividad física por las contramedidas adoptadas desde la experiencia de Skylab (NASA, 1977).

El síndrome de adaptación espacial (SAS) describe los síntomas más prevalentes en los astronautas durante la primera semana de entrada en órbita, e incluyen náuseas, emesis, ilusiones de movimiento y pérdida de apetito, por lo cual las tareas de actividades extravehiculares (EVA) se inician a las 72 h de entrada en órbita (Nicogossian *et al.*, 2016).

Por otra parte, pasados minutos u horas de la entrada en órbita se produce un alargamiento axial de la columna vertebral (Chang *et al.*, 2016), se reduce la cifosis torácica y comienza el proceso de atrofia osteomuscular en las regiones de soporte del peso corporal (Lang *et al.*, 2004).

En cuanto al sistema cardiovascular, este es altamente influenciado por el gradiente hidrostático debido al cambio de la entrada de señales en los barorreceptores en las carótidas, atrio, uniones atrioventriculares, aorta y vasculatura pulmonar, que detecta un incremento relativo de la presión hidrostática y amplifica la frecuencia de actividad parasimpática para producir vasodilatación y mantener la presión arterial normal (Morin, 1961; Nicogossian *et al.*, 2016).

En las fases tempranas de la salida a vuelo orbital, el gasto cardiaco se incrementa del 18 % al 26 % (Prisk *et al.*, 1993; Shykoff *et al.*, 1996), secundario al aumento del volumen del latido por el desplazamiento



Figura 2. Retos fisiológicos del vuelo espacial  
Fuente: Barratt *et al.* (2020) y Liu *et al.* (2016).

cefálico de fluidos que, acompañado de la temprana pérdida del volumen plasmático del 10-15 % (Smith *et al.*, 1997), contribuye a la extravasación al compartimento extracelular y una pérdida de la masa eritrocitaria del 10 % en la primera semana, a causa de la disminución de la secreción de eritropoyetina y hemocitólisis selectiva (Heer *et al.*, 2001).

El sistema respiratorio en un astronauta generalmente no sufre cambios importantes que impacten la efectividad del desempeño físico durante el lanzamiento y el vuelo orbital; no obstante, el ambiente de la unidad presurizada contiene contaminantes como dióxido de carbono y partículas en suspensión que para una persona con predisposición a tener efectos adversos con la exposición sería intolerable (Barratt *et al.*, 2020).

Por su parte, el sistema musculoesquelético se ve afectado en relación con los cambios de actividad física en vuelo orbital, así como por el balance nutricional proteico y la predisposición individual. En estudios que comparan la fuerza relativa con el prevuelo se ha podido concluir que en las extremidades inferiores se pierde un 20 % de fuerza en músculos extensores y hasta del 17 % en flexores (Thorton y Rummel, 1975). Estudios posteriores de expediciones cortas de una semana en órbita demostraron, mediante resonancia magnética, que un día después del aterrizaje los astronautas habían disminuido el volumen del sóleo gastrocnemio en un 6,3 %, de cuádriceps en un 6 %, de músculos de la espalda en un 10,3 %, de muslo posterior en un 8,3 % (LeBlanc *et al.*, 1995), lo mismo para los grupos musculares de la rodilla (5-16 %) (Akima *et al.*, 2000).

La integridad del sistema óseo se ha visto comprometida en misiones de larga duración únicamente, con pérdida de la densidad mineral ósea (BMD), calcio y fosfato, con una disminución general de la absorción de calcio. Esta pérdida de densidad mineral ósea es preferente en la parte inferior del cuerpo en un ritmo calculado para la columna axial del 0,9 %/mes, del 1,5 %/mes en cadera y del 0,4 %/mes en calcáneo (Lang *et al.*, 2004); la pérdida de la masa y la densidad trabecular es del 14-16 % del fémur proximal, a un ritmo del 5 %/mes (Lang *et al.*, 2006).

El fenómeno que acompaña la pérdida se ve reflejado en la toma de biomarcadores incrementados como el calcio urinario y fecal, hidroxiprolina urinaria, N-telopéptido, desoxipirodinolina y reducción en los marcadores de formación ósea como la fosfatasa alcalina específica del hueso y osteocalcina, así como incremento en los niveles de parathormona (PTH), y disminución de los niveles de 1,25-dihidroxicolecalciferol, que tienden a normalizarse días después de la re-entrada (Caillot *et al.*, 1998; Morey *et al.*, 1988; Smith *et al.*, 2005; Whedon *et al.*, 1977).

Esta pérdida del calcio urinario no solo incrementa el riesgo de fracturas en misiones de larga duración, sino también el riesgo de nefrolitiasis y cólico renal, por lo que se establecen contramedidas para gestionar el riesgo a partir de la estimulación de la actividad física y el seguimiento nutricional de las tripulaciones (Nicogossian *et al.*, 2016).

## Desempeño psicofísico en órbita

Estudios de rendimiento cardiovascular en astronautas en un vuelo de 15 días han mostrado que el consumo de oxígeno (VO<sub>2</sub>) disminuye progresivamente del 8 % a un promedio de hasta el 12 % aproximadamente a los 60 días, y una recuperación del 6 % posterior a los dos meses a bordo de la EEI (Trappe *et al.*, 2006).

Las contramedidas establecidas para el desacomodamiento cardiovascular en el espacio comienzan a los 15 días de entrada en órbita, para permitir mejor equilibrio del cambio cefálico de fluidos y con esto preparar para la actividad física más demandante en las EVA, mediante el uso de banda trotadora y del dispositivo de ejercicio de resistencia avanzado (ARED), con el fin de que el astronauta logre mantener la fuerza muscular de brazos y hombros, factor crítico para mantener la aptitud física en misiones de mayor duración (Barratt *et al.*, 2020).

La termorregulación se ve afectada por la evaporación de agua de la piel durante actividades de ejercicio físico, dado que la adherencia del sudor a la piel tiene que ser removida por el mismo astronauta. Los sistemas de control ambiental mantienen la temperatura de la atmósfera entre los 18 °C y 27 °C durante

operaciones nominales, y excluyen operaciones con las unidades de movilidad extravehicular (EMU), ascenso, entrada, aterrizaje y postaterizaje (NASA, 2019). Las mediciones de temperatura central mediante telemetría han revelado un promedio de 37 °C con un incremento de 0,5 °C en las actividades de uso de EMU y en las del reingreso a la atmósfera, a pesar de que los trajes tengan mecanismos de disipación de calor mediante tubos con circulación de líquido (Rimmer *et al.*, 1999).

El sistema gastrointestinal, por su parte, presenta cambios por la disminución de la peristalsis, probablemente relacionada con la cinetosis en los primeros días, aunque algunos estudios han sugerido mediante mediciones de electrogastrografía (Harm *et al.*, 2002) la presencia de edema hepático y pancreático, que disminuye el vaciamiento gástrico, junto a la insuficiencia pancreática leve que contribuye también a este fenómeno (Smith *et al.*, 2020). No obstante lo anterior, el proceso digestivo no es clínicamente significativo, dado que la frecuencia de síntomas no es diferente a la reportada en la Tierra; de todas formas, hoy en día se requieren más estudios para ser concluyentes al respecto (Barratt *et al.*, 2020).

La filtración glomerular no se afecta significativamente, a pesar de la ligera disminución del aclaramiento de creatinina durante el primer día de entrada en órbita con normalización del segundo día en adelante; los niveles de hormona antidiurética (ADH) se incrementan cuatro veces con este mismo patrón, probablemente por el fenómeno de cinetosis (Eversmann *et al.*, 1978), y regresan a valores normales a medida que pasa el tiempo en órbita. En general, se ha visto que el eje renina-angiotensina-aldoesterona se estimula por encima de lo normal en comparación con los datos de los estudios terrestres (Drummer *et al.*, 2001; Eversmann *et al.*, 1978).

En relación con los cambios neurooftálmicos, estos incluyen alteraciones del nervio óptico que afectan la agudeza visual y con frecuencia requieren prescripción de lentes para la corrección visual cercana. En estudios de tomografía de coherencia óptica (OCT) y fundoscopia se ha documentado el aplanamiento posterior del globo, distensión de las fibras del nervio

óptico, edema, pliegues lineales en la coroides retiniana, exudados algodinosos compatibles con estasis axonal y cambios de hiperopía (Lee *et al.*, 2020), con una prevalencia del 60 % (Kramer *et al.*, 2012).

Se ha demostrado que los cambios neurológicos son sutiles y no degradan el desempeño funcional en las tareas ejecutadas en el vuelo orbital; se espera mayor impacto funcional en los días posteriores a la reentrada, a excepción del incremento de la respuesta catecolamínica durante la actividad física (Hyatt y West, 1977) y, a pesar de que la resistencia vascular periférica se ve disminuida, la actividad simpática se incrementa o no se afecta en algunos astronautas (Ertl *et al.*, 2002), lo que sugiere una discrepancia que debe estudiarse más a fondo. La actividad parasimpática se puede ver aminorada (Cox *et al.*, 2002), al igual que la variabilidad de la frecuencia cardíaca (Cooke *et al.*, 2000); sin embargo, la actividad física mantiene un balance de la sensibilidad del reflejo baroreceptor (Hughson *et al.*, 2012).

El trabajo habitual de astronautas incluye tareas como la operación de sistemas técnicos complejos, la experimentación científica, el mantenimiento de la EEI y la realización de EVA, que implican alta demanda sobre procesos cognitivos y de función psicomotora que se traducen en el éxito de la misión y en la seguridad de toda la tripulación (Van Vuuren, 1987).

A pesar de que las demandas sobre el ser humano sean altas en operaciones espaciales, esto no significa que la exposición al ambiente operacional en el espacio sea inocua. Desde los comienzos del vuelo humano espacial se conoce la afectación del desempeño cognitivo con la influencia de eventos fisiológicos como desorientación espacial, ilusiones visuales, alteración de la percepción de la temporalidad, afectación de la atención y la concentración, realización de tareas motoras y un enlentecimiento del desempeño de tareas (Christensen y Talbot, 1986; Kubis *et al.*, 1977).

En la microgravedad se observa una alteración del procesamiento de señales del sistema vestibular, visual y propioceptivo que afecta las funciones cognitivas superiores relacionadas con la percepción espacial y el reconocimiento de patrones y objetos (Leone *et al.*, 1998; McIntyre *et al.*, 2001), además de la afectación

del procesamiento de la programación y la ejecución de movimientos voluntarios, probablemente por la modificación de la percepción de la posición de extremidades que lleva a micro correcciones de la ejecución motora (Bock, 1994; Cruse *et al.*, 1990), también llamada “discordancia sensoriomotora” (Bock, 1998).

Los humanos son considerados como una de las especies más adaptables en este planeta, pues poseen la capacidad de vivir en entornos diferentes a los vistos en la Tierra. El espacio representa la última frontera y un gran desafío para las capacidades de adaptación humana. Los astronautas y cosmonautas son seleccionados por su capacidad para trabajar en entornos altamente peligrosos en el espacio, dando lo mejor de sí mismos. Ahora bien, las investigaciones realizadas en la Tierra han llegado a demostrar que el rendimiento cognitivo, perceptivo y motor humano se deteriora bajo estrés. Se esperaría, por tanto, observar dichos efectos en el espacio, ya que actualmente este entorno representa un ambiente excepcional para poner a prueba a los humanos. Por ello resulta imprescindible para los neurocientíficos y psicólogos comprender los parámetros neurocognitivos y neuropsicológicos que influyen en los vuelos espaciales. En este sentido, muchas de las características ambientales particulares de las misiones espaciales, las cuales también están presentes en las simulaciones de vuelos espaciales, pueden afectar el desempeño neurocognitivo (De la Torre, 2014).

Se pueden diferenciar cuatro tipos de factores estresantes durante vuelos espaciales (Crucian *et al.*, 2014):

1. Factores estresantes que surgen en el entorno espacial. El ejemplo más específico de este tipo es la microgravedad. Careciendo de la fuerza gravitacional habitual se inducen varios cambios fisiológicos (por ejemplo, cambios en la entrada vestibular; desplazamiento de los líquidos corporales hacia las partes superiores del cuerpo; cambios en el metabolismo óseo y mineral; alteraciones de los procesos propioceptivos).
2. Factores estresantes que surgen del hábitat espacial y su sistema de soporte vital. Esta clase de factores estresantes incluye factores como

confinamiento, niveles elevados de CO<sub>2</sub> en el aire ambiental y niveles elevados de ruido.

3. Factores estresantes relacionados con la carga de trabajo físico y mental de los astronautas para misiones específicas.
4. Factores estresantes relacionados con la situación social en el hábitat espacial (por ejemplo, falta de privacidad, aislamiento de familiares y amigos).

Considerando que se puede esperar que los efectos de la última clase de estresores emerjan solo después de algunas semanas en el espacio, todos los demás tipos de factores estresantes pueden afectar el rendimiento y el estado de ánimo de los astronautas durante los vuelos espaciales, tanto a corto como a largo plazo. A pesar de su relevancia operativa, la investigación relacionada con el desempeño humano durante los vuelos espaciales hasta ahora se ha limitado en gran medida a estudiar los efectos específicos de la microgravedad en funciones visuales y perceptivas, así como procesos psicomotores implicados en el control corporal (Manzey *et al.*, 1998). Solo en los últimos años se ha incrementado el interés científico para describir el curso temporal de diferentes aspectos de la eficiencia mental a lo largo de las misiones espaciales. Esto ha dado lugar a varios estudios de seguimiento del rendimiento durante los vuelos espaciales a corto plazo usando métodos de investigación en simulaciones análogas espaciales (Cromwell *et al.*, 2021; Stahn y Kühn, 2021).

Los efectos no especificados del estrés además pueden afectar la alerta situacional, sumando a la alta carga de trabajo, el aislamiento y el confinamiento que se han tratado de explicar mediante el modelamiento neurofisiológico de activación cortical (Hockey y Hamilton, 1983). Estudios han demostrado variaciones en el alertamiento general, la selectividad atencional, la velocidad de procesos cognitivos, la precisión de procesos cognitivos y la capacidad de memoria de trabajo (Rutherford, 1987), que por estrategias de adaptación a las demandas del trabajo evidencian algunos errores de ejecución, incremento del efecto de la fatiga y disminución de la eficiencia de las tareas (Robert y Hockey, 1997). De acuerdo con esta afirmación, los

signos tempranos de la disminución del desempeño secundario al estrés pueden ser encontrados en pruebas sensibles o en la afectación del desempeño en tareas específicas de la misión (Kanas y Manzey, 2008).

Estudios de monitoreo continuo de astronautas en el espacio han revelado que el desempeño de tareas dobles, que incluyen el cambio rápido de atención por la limitación primaria de la selectividad atencional y por la influencia de las demandas de la alta carga de trabajo y el estrés del ambiente operacional, reducen la eficiencia en la ejecución de las tareas (Fowler *et al.*, 2000a; Fowler *et al.*, 2000b; Kanas y Manzey, 2008). Un estudio de seguimiento a un cosmonauta en una misión de 20 días a bordo de Mir demostró que mediante una evaluación del desempeño del rastreo (incremento del tiempo entre el estímulo y la respuesta motora, errores de rastreo) evaluado prevuelo, en vuelo y posvuelo, es significativamente diferente en vuelo contrastado con el prevuelo y relativamente normalizado en posvuelo a partir del día 12 (Manzey *et al.*, 2000).

Los modelos experimentales de estudio del estrés agudo producen gran material de investigación para analizar e incluyen tareas de estrés psicológico (es decir, hablar en público, paracaidismo, creación de entornos similares inhóspitos a los que los tripulantes se expondrán, aislamiento, limitación de comunicaciones, entre otros), generando similitudes a las documentadas en las proximidades de lanzamiento y aterrizaje en un vehículo espacial. Los elementos estresores comienzan a acrecentarse a medida que las tripulaciones logran avanzar en sus diversas fases, y todo ello permite comprender que si las variables nacientes no se entrenan para generar una mayor adaptación, las consecuencias en el rendimiento cognitivo de las tripulaciones será evidente a corto plazo y puede afectar el desarrollo exitoso de la misión establecida (Crucian *et al.*, 2014). Un estudio que analiza el impacto de los estresores espaciales sobre los dominios neurocognitivos ha evidenciado un pobre nivel de evidencia del efecto de la radiación en la memoria de trabajo y sobre procesos emocionales, el impacto de la microgravedad sobre la flexibilidad cognitiva, control cognitivo y memoria de trabajo requiere más estudios, el efecto del aislamiento y confinamiento sobre

estos últimos tres dominios sumado a la vigilancia y atención requieren más escrutinio científico (Desai *et al.*, 2022), sin embargo, los efectos de estos procesos neuropsicológicos sobre la misión no han sido relacionados como precondiciones en eventos de seguridad operacional en órbita, probablemente por los efectivos programas de selección, entrenamiento y contramedidas establecidas en la fase prevuelo. (Jennings *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2016; Steimle y Norberg, 2013).

## Reentrada y posaterrizaje

Desde el descenso del vuelo orbital hasta el inicio del contacto con la atmósfera terrestre se crea una resistencia aerodinámica que resulta en disminución de la velocidad y en un incremento de la temperatura, finalizando con una pérdida de altitud que expone a los astronautas a cambios dinámicos de aceleración por el uso de paracaídas y dependiendo del diseño de la cápsula, propulsión con cohetes hasta el aterrizaje (Ley *et al.*, 2009).

Todo este proceso ocurre rápidamente, desde el proceso de frenado con la propulsión que permite el descenso orbital a una velocidad de 8 km/s hasta 0, imponiendo sobre el humano un incremento del estrés fisiológico por el regreso a 1 G, y es en este momento que el desacondicionamiento se vuelve sintomático para la tripulación (Macdonald y Badescu, 2014).

Los procedimientos de reentrada requieren la monitoría del estado de los motores, las comunicaciones con el control de misión en tierra en una posición semirreclinada para la tecnología usada actualmente (Soyuz, Dragon y el CST-100 Starliner). Los sistemas de protección como el traje Kentavr y el traje intravehicular de SpaceX ofrecen refrigeración con gas (nitrógeno y oxígeno), protección anti-G controlada por el astronauta para las actividades posteriores al aterrizaje, y en el ya retirado transbordador espacial (STS) la exposición durante 1 h a 1,2 +Gx y el uso de traje anti-G con el sistema de refrigeración hidráulica (Clément, 2011; Ley *et al.*, 2009; Morin, 1961).

Los síntomas de origen cardiovascular son los primeros en presentarse, con una elevación de la frecuencia cardíaca, monitorizada desde los sistemas del

Soyuz a través de electrocardiografía y frecuencia respiratoria que, además de esto, muestran un incremento en la frecuencia de extrasístoles monomórficas de corta duración, sin repercusión hemodinámica, a pesar de todo el fenómeno ortostático controlado por el dispositivo anti-G y las contramedidas protocolarias previas a la reentrada (Kotovskaia *et al.*, 2001).

El regreso de la estimulación neurosensorial vestibular comienza con las cargas de aceleración en la entrada de la atmósfera, dado que la otoconia asume el vector gravitacional independiente de los movimientos de la cabeza al plano vertical al mismo tiempo que los propioceptores, generando ilusiones somatográficas y sensación vertiginosa, que es más frecuente y severa en la medida en que el tiempo en órbita sea mayor (Kotovskaia *et al.*, 2001; Small *et al.*, 2012).

La palabra “contacto” durante el aterrizaje marca el paso al periodo posaterizaje, que incluye apagado de algunos sistemas y de la configuración de los motores con sus fórmulas de enfriamiento para evitar la exposición del equipo de médicos especialistas en tierra que, en el lapso de media hora a hora y media, asistirán la salida de la cápsula. Los astronautas que han permanecido largos periodos de tiempo en el espacio (usualmente más de 30 días) presentan una sensación de aumento de peso con el movimiento de extremidades al desamarrarse y, a pesar de los mecanismos de enfriamiento del traje de reentrada, el vehículo influye en la presentación de estrés térmico que se suma al reacondicionamiento de los gradientes hidrostáticos sobre el sistema cardiovascular, y la exposición a 1 G que se impone sobre músculos, tendones, huesos y sistema neurovestibular desencadena la intolerancia ortostática, el desacondicionamiento musculoesquelético y los síntomas neurosensoriales (Clément, 2011; Morin, 1961; Nicogossian *et al.*, 2016).

## Intolerancia ortostática

La hipovolemia relativa y la anemia, que combinada con la alteración de la sensibilidad de barorreceptores, la reducción del volumen latido dependiente de la precarga, la disminución de la masa muscular en miembros inferiores y de la eficiencia del retorno venoso

ocasiona un incremento en la frecuencia cardiaca que, al no ser suficiente, puede producir una hipoperfusión del sistema nervioso central en 1-3 de cada 10 astronautas en vuelos de menos de 15 días (Buckey *et al.*, 1996), observando además que aquellos con mejor respuesta de vasoconstricción y aumento de la resistencia vascular periférica (Meck *et al.*, 2004) se mantienen sin síntomas por más tiempo en bipedestación. La disminución de la hemoglobina y del hematocrito se exacerba con la expansión de volumen usada en las contramedidas y constituye el estímulo principal para incrementar la producción de eritropoyetina, regulando los valores de días a semanas (NASA, 1977), y una recuperación completa a los tres meses posvuelo. Es importante anotar que previo a la reentrada y una hora después del aterrizaje, los astronautas deben ingerir líquidos y electrolitos, mantener la posición reclinada, usar el traje intravehicular para mantener una normal termorregulación y disminuir la vasodilatación periférica por el incremento de la temperatura de la cabina, y continuar la vigilancia médica para evaluar la recuperación al estado euvolémico (Leach *et al.*, 1996).

## Desacondicionamiento musculoesquelético

Se espera que la exposición al ambiente de microgravedad produzca síntomas de debilidad muscular que gracias a los programas actuales de la EEI son menores que en el pasado. La rehabilitación comienza el día del regreso con la medición de la fuerza muscular y la densidad ósea, terminando en la mayor parte de los casos al día 45 (Barratt *et al.*, 2020). Esta incluye además actividades que se enfocan en la deambulación, el fortalecimiento del sistema cardiovascular, el incremento de fuerza, flexibilidad, balance y propiocepción que se espera recuperen en las primeras semanas, siendo el sistema óseo el que tarda en recuperarse casi 2 a 3 veces más que la misma duración de la exposición a microgravedad (Sibonga *et al.*, 2007).

## Desacondicionamiento neurosensorial

La degradación de la capacidad en la estabilidad postural ha sido observada en todas las tripulaciones,

a excepción de los astronautas de los programas Gemini y Mercury, que no permitieron la adaptación porque el espacio para moverse dentro de las cápsulas era mínimo en comparación con los de programas posteriores como Skylab (NASA, 1977) y Apollo (Johnston *et al.*, 1975). La observación de los astronautas evidencia un incremento en la utilización de orientación visual; además, muestran mayor grado de desorientación, ilusiones perceptuales y síntomas vertiginosos con movimientos de la cabeza que tienden a recuperarse entre 3 y 4 días después (Black *et al.*, 1995).

Los síntomas más frecuentes en los astronautas incluyen movimientos torpes (70 %), caminata difícil en línea recta (66 %) y continuación de la percepción de movimientos (60 %), en su mayoría leves, con una duración de 1 a 7 días (Bacal *et al.*, 2003), y hasta 15 días para tener una movilidad funcional restaurada (Mulavara *et al.*, 2010).

## Actividades posvuelo

El equipo médico encargado de la salud y el seguimiento clínico de los astronautas realiza las actividades de investigación para astronautas que efectúan vuelos hasta de 15 días en órbita y, según el criterio médico, se hacen estudios adicionales. Sin embargo, en la mayoría de los casos, les dan salida a los astronautas para que inicien su proceso de readaptación a la vida terrestre enfocados en actividades de reposo, actividad física y cargas a 1 G según su propia tolerancia, con la repetición de exámenes de laboratorio al tercer día, además de continuar su trabajo como pilotos a su propia discreción (Barratt *et al.*, 2020).

## Discusión

Los cambios fisiológicos del astronauta en microgravedad son detectables y, sin embargo, no son significativos para el desempeño humano por su gran capacidad de adaptación, demostrado en la amplia experiencia en el desarrollo de actividades de alta complejidad que demandan resistencia física y orientación

tridimensional sin las entradas sensoriales terrestres; las tripulaciones han mostrado una gran eficiencia en su trabajo con aceptables márgenes para el mantenimiento de la salud y la seguridad (Barratt *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2016; Mathieu *et al.*, 2009; Nicogossian *et al.*, 2016).

Es importante anotar que, a pesar de los evidentes efectos de la microgravedad y el ambiente operacional espacial, se ha visto que el monitoreo continuo, la selección del personal, el entrenamiento y las contramedidas establecidas son un eficiente mecanismo que mantiene la seguridad de la tripulación y que garantiza el cumplimiento de tareas asignadas (Barratt *et al.*, 2020; Kanas y Manzey, 2008).

En esta década hemos podido observar cómo SpaceX ha lanzado exitosamente misiones para la NASA con astronautas profesionales de la EEI, pero uno de los hitos más notorios es la participación del astronauta civil y ciudadano común, como lo demostró la misión “Inspiration 4” en el 2021, Axiom Space (Ax-1) en abril de 2022 y las próximas cuatro misiones de “Polaris Dawn”, a partir de 2022, quienes harán la primera actividad extravehicular civil con una iteración y adaptación del traje intravehicular para proteger al astronauta fuera de la nave espacial Crew Dragon, además de realizar la investigación necesaria para vuelos espaciales largos, específicamente en el síndrome neuroocular espacial (Iwasaki *et al.*, 2021; Khosravi y Hargens, 2021), embolismo gaseoso venoso (Kluis y Díaz, 2021), radiación ionizante (Antonsen *et al.*, 2022) y para recolectar muestras para análisis genético y molecular entre otros (Musk, 2022).

## Conclusiones

A pesar de los retos fisiológicos encontrados durante las operaciones espaciales y del riesgo que representan para la salud, los programas para el mantenimiento de la integridad física de las tripulaciones gestionan el riesgo de reducción del desempeño psicofísico durante el vuelo orbital.

La investigación del rendimiento humano en astronautas necesita incluir aspectos neurocognitivos y

comportamentales en actividades críticas como las extravehiculares, en ambientes que incluyan la Luna y Marte ya que, en la actualidad, el aislamiento por periodos de tiempo mayores a quinientos días no se ha realizado, y la duración de una misión de ida y vuelta a Marte supera los mil días.

La selección de personal para actividades críticas es necesaria dentro de un programa de astronautas profesionales, donde se tamizan aspectos psicofísicos que se consideran puedan no solo deteriorarse con la exposición al ambiente espacial, sino que son necesarios para cumplir una misión específica, donde se incluye que la salud física se mantenga normal haciendo énfasis en el sistema cardiovascular, función osteomuscular y neurosensorial, sin embargo, estos procedimientos siguen evolucionando con el objetivo de ser menos estrictos como, en la década de los 70, e incluyen para el sector comercial, dado que se espera que personas con más avanzada edad sean astronautas no profesionales. El esfuerzo de las misiones privadas ha sido liderado en esta década por empresas como SpaceX y Axiom Space, quienes durante el 2022 han participado en misiones civiles en la EEI menores a 30 días, con miras a instalar en esta década cuatro módulos en esta estación para posteriormente independizarse y funcionar como estación espacial privada de órbita baja, abriendo el espacio a los países sin un programa espacial humano establecido y corporaciones con los recursos para realizar misiones espaciales en órbita baja.

Se espera que en las próximas décadas Colombia, con la firma de los acuerdos Artemisa celebrados con la NASA en el 2022, participe en operaciones de exploración espacial humana de manera conjunta con los países signatarios, que gracias a la reducción de costos por la intervención del sector privado en el lanzamiento, el vuelo y la recuperación de cohetes reutilizables y por el interés de los gobiernos en el beneficio económico de la aplicación de tecnologías espaciales en varios sectores productivos, se amplíe el campo de acción en investigación y desarrollo de tecnologías espaciales, por lo cual los profesionales dedicados a la medicina aeroespacial y áreas afines a las ciencias espaciales deben ampliar el esfuerzo investigativo, con

el fin de garantizar que el acceso al espacio sea cada vez más frecuente, incluya mayores rangos de edad, gestione el riesgo médico espacial y garantice el mantenimiento de la salud a pesar de la exposición.

## Agradecimientos

Esta revisión fue motivada por el grupo de profesionales dedicados al proyecto “Astronauta colombiano” y a la Fuerza Aérea Colombiana (FAC). Las opiniones y argumentos expresados en este artículo son de los autores y no necesariamente de la FAC.

## Referencias

- Akima, H., Kawakami, Y., Kubo, K., Sekiguchi, C., Ohshima, H., Miyamoto, A. & Fukunaga, T. (2000). Effect of short-duration spaceflight on thigh and leg muscle volume. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(10), 1743–1747. <https://doi.org/10.1097/00005768-200010000-00013>
- Antonsen, E. L., Myers, J. G., Boley, L., Arellano, J., Kerstman, E., Kadwa, B., Buckland, D. M. & Van Baalen, M. (2022). Estimating medical risk in human spaceflight. *Npj Microgravity*, 8(1), 8. <https://doi.org/10.1038/s41526-022-00193-9>
- Bacal, K., Billica, R. & Bishop, S. (2003). Neurovestibular symptoms following space flight. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation*, 13(2–3), 93–102.
- Barratt, M. R., Baker, E. S. & Pool, S. L. (2020). *Principles of Clinical Medicine for Space Flight*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9889-0>
- Black, F. O., Paloski, W. H., Doxey-Gasway, D. D. & Reschke, M. F. (1995). Vestibular plasticity following orbital spaceflight: Recovery from postflight postural instability. *Acta Oto-Laryngologica*, 115(S520), 450–454. <https://doi.org/10.3109/00016489509125296>
- Blue, R. S., Riccitello, J. M., Tizard, J., Hamilton, R. J. & Vanderploeg, J. M. (2012). Commercial spaceflight participant G-force tolerance during centrifuge-simulated suborbital flight. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 83(10), 929–934. <https://doi.org/10.3357/ASEM.3351.2012>

- Bock, O. (1994). Joint position sense in simulated changed-gravity environments. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 65(7), 621–626.
- Bock, O. (1998). Problems of sensorimotor coordination in weightlessness. *Brain Research Reviews*, 28(1–2), 155–160. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(98\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(98)00035-6)
- Buckey, J. C., Lane, L. D., Levine, B. D., Watenpaugh, D. E., Wright, S. J., Moore, W. E., Gaffney, F. A. & Blomqvist, C. G. (1996). Orthostatic intolerance after spaceflight. *Journal of Applied Physiology*, 81(1), 7–18. <https://doi.org/10.1152/jappl.1996.81.1.7>
- Caillot, A., Lafage, M. H., Soler, C., Pernod, J., Dubois, F. & Alexandre, C. (1998). Bone formation and resorption biological markers in cosmonauts during and after a 180-day space flight (Euromir 95). *Clinical Chemistry*, 44(3), 578–585. <https://doi.org/10.1093/clinchem/44.3.578>
- Campbell, M. R. & Garbino, A. (2011). History of suborbital spaceflight: Medical and performance issues. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 82(4), 469–474. <https://doi.org/10.3357/ASEM.2921.2011>
- Chang, D. G., Healey, R. M., Snyder, A. J., Sayson, J. V., Macias, B. R., Coughlin, D. G., Bailey, J. F., Parazyński, S. E., Lotz, J. C. & Hargens, A. R. (2016). Lumbar spine paraspinal muscle and intervertebral disc height changes in astronauts after long-duration spaceflight on the International Space Station. *Spine*, 41(24), 1917–1924. <https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000001873>
- Chang, E. Y. (2020). From aviation tourism to suborbital space tourism: A study on passenger screening and business opportunities. *Acta Astronautica*, 177(March), 410–420. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.07.020>
- Christensen, J. M. & Talbot, J. M. (1986). A review of the psychological aspects of space flight. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 57(3), 203–212.
- Clément, G. (2011). *Fundamentals of Space Medicine* (2.<sup>nd</sup> ed.). Microcosm Press.
- Cooke, W. H., Ames IV, J. E., Crossman, A. A., Cox, J. F., Kuusela, T. A., Tahvanainen, K. U. O., Moon, L. B., Drescher, J., Baisch, F. J., Mano, T., Levine, B. D., Blomqvist, C. G. y Eckberg, D. L. (2000). Nine months in space: Effects on human autonomic cardiovascular regulation. *Journal of Applied Physiology*, 89(3), 1039–1045. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.89.3.1039>
- Cox, J. F., Tahvanainen, K. U. O., Kuusela, T. A., Levine, B. D., Cooke, W. H., Mano, T., Iwase, S., Saito, M., Sugiyama, Y., Ertl, A. C., Biaggioni, I., Diedrich, A., Robertson, R. M., Zuckerman, J. H., Lane, L. D., Ray, C. A., White, R. J., Pawelczyk, J. A., Buckey, J. C., ... Eckberg, D. L. (2002). Influence of microgravity on astronauts' sympathetic and vagal responses to Valsalva's manoeuvre. *Journal of Physiology*, 538(1), 309–320. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2001.012574>
- Cromwell, R. L., Huff, J. L., Simonsen, L. C. & Patel, Z. S. (2021). Earth-Based Research Analogs to Investigate Space-Based Health Risks. *New Space*, 9(4), 204–216. <https://doi.org/10.1089/space.2020.0048>
- Crucian, B., Simpson, R. J., Mehta, S., Stowe, R., Chouker, A., Hwang, S. A., Actor, J. K., Salam, A. P., Pierson, D. & Sams, C. (2014). Terrestrial stress analogs for spaceflight associated immune system dysregulation. *Brain, Behavior, and Immunity*, 39, 23–32.
- Cruse, H., Dean, J., Heuer, H. & Schmidt, R. A. (1990). Utilization of Sensory Information for Motor Control. In O. Newman & W. Prince (Ed.), *Relationships Between Perception and Action* (pp. 43–79). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-75348-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-75348-0_4)
- De la Torre, G. G. (2014). Cognitive neuroscience in space. *Life*, 4(3), 281–294.
- Desai, R. I., Limoli, C. L., Stark, C. E. L. & Stark, S. M. (2022). Impact of Spaceflight Stressors on Behavior and Cognition: a Molecular, Neurochemical, and Neurobiological Perspective. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 104676. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2022.104676>
- Drummer, C., Norsk, P. & Heer, M. (2001). Water and sodium balance in space. *American Journal of Kidney Diseases*, 38(3), 684–690. <https://doi.org/10.1053/ajkd.2001.27765>
- Ertl, A. C., Diedrich, A., Biaggioni, I., Levine, B. D., Robertson, R. M., Cox, J. F., Zuckerman, J. H., Pawelczyk, J. A., Ray, C. A., Buckey, J. C., Lane, L. D., Shiavi, R., Gaffney, F. A., Costa, F., Holt, C., Blomqvist, C. A., Eckberg, D. L., Baisch, F. J. & Robertson, D. (2002). Human muscle sympathetic nerve activity and plasma noradrenaline kinetics in space. *Journal of Physiology*, 538(1), 321–329. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2001.012576>
- Eversmann, T., Gottsmann, M., Uhlich, E., Ulbrecht, G., von Werder, K. & Scriba, P. C. (1978). Increased secretion of growth hormone, prolactin, antidiuretic hormone, and cortisol induced by the stress of motion sickness. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 49(1 I), 53–57. <https://doi.org/10.5282/ubm/epub.8290>
- Fowler, B., Bock, O. & Comfort, D. (2000a). Is dual-task performance necessarily impaired in space? *Human Factors*, 42(2), 318–326. <https://doi.org/10.1518/001872000779656507>

- Fowler, B., Comfort, D. & Bock, O. (2000b). A review of cognitive and perceptual-motor performance in space. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 71(9 II Suppl.).
- Greason, J. & Bennet, J. (2019). *The economics of space: an industry ready to launch* (Issue June). <https://reason.org/wp-content/uploads/economics-of-space.pdf>
- Harm, D. L., Sandoz, G. R. & Stern, R. M. (2002). Changes in gastric myoelectric activity during space flight. *Digestive Diseases and Sciences*, 47(8), 1737–1745. <https://doi.org/10.1023/A:1016480109272>
- Heer, M., De Santo, N. G., Cirillo, M. & Drummer, C. (2001). Body mass changes, energy, and protein metabolism in space. *American Journal of Kidney Diseases*, 38(3), 691–695. <https://doi.org/10.1053/ajkd.2001.27767>
- Hockey, G. R. J. & Hamilton, P. (1983). *The cognitive patterning of stress states. Stress and fatigue in human performance.*
- Hughson, R. L., Shoemaker, J. K., Blaber, A. P., Arbeille, P., Greaves, D. K., Pereira-Junior, P. P. & Xu, D. (2012). Cardiovascular regulation during long-duration spaceflights to the International Space Station. *Journal of Applied Physiology*, 112(5), 719–727. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01196.2011>
- Hyatt, K. H. & West, D. A. (1977). Reversal of bedrest induced orthostatic intolerance by lower body negative pressure and saline. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 48(2), 120–124.
- Iwasaki, K., Ogawa, Y., Kurazumi, T., Imaduddin, S. M., Mukai, C., Furukawa, S., Yanagida, R., Kato, T., Konishi, T., Shinjima, A., Levine, B. D. & Heldt, T. (2021). Long-duration spaceflight alters estimated intracranial pressure and cerebral blood velocity. *Journal of Physiology*, 599(4), 1067–1081. <https://doi.org/10.1113/JP280318>
- Jennings, R. T., Murphy, D. M. F., Ware, D. L., Aunon, S. M., Moon, R. E., Bogomolov, V. V., Morgun, V. V., Voronkov, Y. I., Fife, C. E., Boyars, M. C. & Ernst, R. D. (2006). Medical qualification of a commercial spaceflight participant: Not your average astronaut. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 77(5), 475–484.
- Johnston, R. S., Dietlein, L. F. & Berry, C. A. (1975). *Biomedical results of Apollo* (Vol. 368). Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space.
- Kanas, N. & Manzey, D. (2008). Space Psychology and Psychiatry. In *Space Psychology and Psychiatry* (Vol. 22). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6770-9>
- Khosravi, E. A. & Hargens, A. R. (2021). Visual disturbances during prolonged space missions. *Current opinion in ophthalmology*, 32(1), 69–73. NLM (Medline). <https://doi.org/10.1097/ICU.0000000000000724>
- Kluis, L. & Díaz, A. (2021). Revisiting decompression sickness risk and mobility in the context of the SmartSuit, a hybrid planetary spacesuit. *Npj Microgravity*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41526-021-00175-3>
- Kotovskaia, A. R., Vil'-'Vil'iams, I., Gavrilova, L. N., Elizarov, S. I. & Uliatovskii, N. V. (2001). Tolerance of +Gx by MIR 22 -- 27 main crew in space flights. *Aviakosmicheskaia i Ekologicheskaia Meditsina = Aerospace and Environmental Medicine*, 35(2), 45–50.
- Kramer, L. A., Sargsyan, A. E., Hasan, K. M., Polk, J. D. & Hamilton, D. R. (2012). Orbital and intracranial effects of microgravity: Findings at 3-T MR imaging. *Radiology*, 263(3), 819–827. <https://doi.org/10.1148/radiol.12111986>
- Kubis, J. F., McLaughlin, E. J., Jackson, J. M., Rusnak, R., McBride, G. & Saxon, S. V. (1977). Task and work performance on Skylab missions 2, 3, and 4: Time and motion study-experiment M151. *Biomedical Results from Skylab*, 136–154.
- Lang, T. F., Leblanc, A. D., Evans, H. J. & Lu, Y. (2006). Adaptation of the proximal femur to skeletal reloading after long-duration spaceflight. *Journal of Bone and Mineral Research*, 21(8), 1224–1230. <https://doi.org/10.1359/jbmr.060509>
- Lang, T., LeBlanc, A., Evans, H., Lu, Y., Genant, H. & Yu, A. (2004). Cortical and trabecular bone mineral loss from the spine and hip in long-duration spaceflight. *Journal of Bone and Mineral Research*, 19(6), 1006–1012. <https://doi.org/10.1359/JBMR.040307>
- Leach, C. S., Alfrey, C. P., Suki, W. N., Leonard, J. I., Rambaut, P. C., Inners, L. D., Smith, S. M., Lane, H. W. & Krauhs, J. M. (1996). Regulation of body fluid compartments during short-term spaceflight. *Journal of Applied Physiology*, 81(1), 105–116. <https://doi.org/10.1152/jappl.1996.81.1.105>
- LeBlanc, A., Rowe, R., Schneider, V., Evans, H. & Hedrick, T. (1995). Regional muscle loss after short duration spaceflight. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 66(12), 1151–1154.
- Lee, A. G., Mader, T. H., Gibson, C. R., Tarver, W., Rabiei, P., Riascos, R. F., Galdamez, L. A. & Brunstetter, T. (2020). Author Correction: Spaceflight associated neuro-ocular syndrome (SANS) and the neuro-ophthalmologic effects of microgravity: A review and an update (NPJ). *NPJ Microgravity*, 6(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41526-020-00114-8>

- Leone, G., De Schonen, S. & Lipshits, M. (1998). Prolonged weightlessness, reference frames and visual symmetry detection. *Acta Astronautica*, 42(1-8), 281-286. [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(98\)00125-8](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(98)00125-8)
- Ley, W., Wittmann, K. & Hallmann, W. (2009). *Handbook of Space Technology* (Vol. 22). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470742433>
- Liu, Q., Zhou, R. L., Zhao, X., Chen, X. P. & Chen, S. G. (2016). Acclimation during space flight: Effects on human emotion. *Military Medical Research*, 3(1), 1317-1323. <https://doi.org/10.1186/S40779-016-0084-3>
- Macdonald, M. & Badescu, V. (2014). *The International Handbook of Space Technology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41101-4>
- Manzey, D., Lorenz, B., Heuer, H. & Sangals, J. (2000). Impairments of manual tracking performance during spaceflight: More converging evidence from a 20-day space mission. *Ergonomics*, 43(5), 589-609. <https://doi.org/10.1080/001401300184279>
- Manzey, D., Lorenz, B. & Poljakov, V. (1998). Mental performance in extreme environments: results from a performance monitoring study during a 438-day spaceflight. *Ergonomics*, 41(4), 537-559.
- Mathieu, P., Poirier, P., Pibarot, P., Lemieux, I. & Després, J. P. (2009). Visceral obesity the link among inflammation, hypertension, and cardiovascular disease. *Hypertension*, 53(4). CRC Press, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.108.110320>
- McIntyre, J., Lipshits, M., Zaoui, M., Berthoz, A. & Gurfinkel, V. (2001). Internal reference frames for representation and storage of visual information: The role of gravity. *Acta Astronautica*, 49(3-10), 111-121. [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(01\)00087-X](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(01)00087-X)
- Meck, J. V., Waters, W. W., Ziegler, M. G., DeBlock, H. F., Mills, P. J., Robertson, D. & Huang, P. L. (2004). Mechanisms of postspaceflight orthostatic hypotension: Low  $\alpha$  1-adrenergic receptor responses before flight and central autonomic dysregulation postflight. *American Journal of Physiology - Heart and Circulatory Physiology*, 286(4 55-4), H1486-H1495. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00740.2003>
- Morey, E. R., Schnoes, H. K., De Luca, H. F., Phelps, M. E., Klein, R. F., Nissenson, R. H. & Arnaud, C. D. (1988). Vitamin D metabolites and bioactive parathyroid hormone levels during Spacelab 2. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 59(11), 1038-1041.
- Morin, L. (1961). *Space physiology*. *Laval médical*, 32. Oxford University Press, USA.
- Mulavara, A. P., Feiveson, A. H., Fiedler, J., Cohen, H., Peters, B. T., Miller, C., Brady, R. & Bloomberg, J. J. (2010). Locomotor function after long-duration space flight: Effects and motor learning during recovery. *Experimental Brain Research*, 202(3), 649-659. <https://doi.org/10.1007/s00221-010-2171-0>
- Musk, E. (2022). *Polaris dawn*. Polaris Program. <https://polaris-program.com/dawn/>
- NASA. (1977). Biomedical Results from SKYLAB. *Biomedical*, 377. Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space. <http://www.scribd.com/doc/44234494/Bio-Medical-Results-From-Skylab%5Cn> <http://lsda.jsc.nasa.gov/books/skylab/skylabcover.htm>
- NASA. (2019). *NASA Spaceflight Human-System Standard Volume 2: Human Factors, Habitability, and Environmental Health*. *NASA Technical Standards*. <https://standards.nasa.gov/human-factors-and-health>
- Nicogossian, A. E., Williams, R. S., Huntoon, C. L., Doarn, C. R., Polk, J. D. & Schneider, V. S. (2016). *Space physiology and medicine: From evidence to practice* (Fourth edition). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6652-3>
- Prisk, G. K., Guy, H. J., Elliott, A. R., Deutschman, R. A. & West, J. B. (1993). Pulmonary diffusing capacity, capillary blood volume, and cardiac output during sustained microgravity. *Journal of Applied Physiology*, 75(1), 15-26. <https://doi.org/10.1152/jappl.1993.75.1.15>
- Richter, C., Braunstein, B., Winnard, A., Nasser, M. & Weber, T. (2017). Human biomechanical and cardiopulmonary responses to partial gravity - A systematic review. *Frontiers in Physiology*, 8(Aug). <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00583>
- Rimmer, D. W., Dijk, D. J., Ronda, J. M., Hoyt, R. & Pawelczyk, J. A. (1999). Efficacy of Liquid Cooling Garments To Minimize Heat Strain During Space Shuttle Deorbit and Landing. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 31(Supplement), S305. <https://doi.org/10.1097/00005768-199905001-01508>
- Robert, G. & Hockey, J. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitive-energetical framework. *Biological Psychology*, 45(1-3), 73-93. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(96\)05223-4](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(96)05223-4)
- Rutherford, A. (1987). *Handbook of perception and human performance*. Vol 1: Sensory processes and perception. Vol 2: Cognitive processes and performance. *Applied Ergonomics*, 18(4), 340. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(87\)90144-x](https://doi.org/10.1016/0003-6870(87)90144-x)

- Shykoff, B. E., Farhi, L. E., Olszowka, A. J., Pendergast, D. R., Rokitka, M. A., Eisenhardt, C. G. & Morin, R. A. (1996). Cardiovascular response to submaximal exercise in sustained microgravity. *Journal of Applied Physiology*, *81*(1), 26–32. <https://doi.org/10.1152/jappl.1996.81.1.26>
- Sibonga, J. D., Evans, H. J., Sung, H. G., Spector, E. R., Lang, T. F., Oganov, V. S., Bakulin, A. V., Shackelford, L. C. & LeBlanc, A. D. (2007). Recovery of spaceflight-induced bone loss: Bone mineral density after long-duration missions as fitted with an exponential function. *Bone*, *41*(6), 973–978. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2007.08.022>
- Small, R. L., Oman, C. M. & Jones, T. D. (2012). Space shuttle flight crew spatial orientation survey results. *Aviation Space and Environmental Medicine*, *83*(4), 383–387. <https://doi.org/10.3357/ASEM.3180.2012>
- Smith, S. M., Krauhs, J. M. & Leach, C. S. (1997). Chapter 6 Regulation of Body Fluid Volume and Electrolyte Concentrations in Spaceflight. *Advances in Space Biology and Medicine*, *6*(C), 123–165. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1569-2574\(08\)60081-7](https://doi.org/10.1016/S1569-2574(08)60081-7)
- Smith, S. M., Lane, H. W. & Zwart, S. R. (2020). *Spaceflight metabolism and nutritional support. Principles of Clinical Medicine for Space Flight*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9889-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9889-0_13)
- Smith, S. M., Wastney, M. E., O'Brien, K. O., Morukov, B. V., Larina, I. M., Abrams, S. A., Davis-Street, J. E., Oganov, V. & Shackelford, L. C. (2005). Bone markers, calcium metabolism, and calcium kinetics during extended-duration space flight on the Mir Space Station. *Journal of Bone and Mineral Research*, *20*(2), 208–218. <https://doi.org/10.1359/JBMR.041105>
- Stahn, A. C. & Kühn, S. (2021). Extreme environments for understanding brain and cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, *26*(1), 3–5. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.10.005>
- Steimle, H. & Norberg, C. (2013). Astronaut selection and training. In C. Norberg (Ed.), *Human Spaceflight and Exploration* (pp. 255–294). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23725-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23725-6_7)
- Stepanek, J., Blue, R. S. & Parazynski, S. (2019). Space Medicine in the Era of Civilian Spaceflight. *New England Journal of Medicine*, *380*(11), 1053–1060. <https://doi.org/10.1056/nejmra1609012>
- Thorton, W. & Rummel, J. (1975). Muscular deconditioning and its prevention in space flight. *NASA TM X-58154 - The Proceedings of Skylab Sciences Symposium*, *1*, 403–426.
- Trappe, T., Trappe, S., Lee, G., Widrick, J., Fitts, R. & Costill, D. (2006). Cardiorespiratory responses to physical work during and following 17 days of bed rest and spaceflight. *Journal of Applied Physiology*, *100*(3), 951–957. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01083.2005>
- Van Vuuren, L. J. (1987). Engineering Psychology and Human Performance. *SA Journal of Industrial Psychology*, *13*(1). Psychology Press. <https://doi.org/10.4102/sajip.v13i1.457>
- Whedon, G. D., Lutwak, L., Rambaut, P. C., Whittle, M. W., Smith, M. C., Reid, J., Leach, C., Stadler, C. R. & Sanford, D. D. (1977). Mineral and nitrogen metabolic studies, experiment M071. *Biomedical Results from Skylab*, 164–174.
- Winnard, A., Caplan, N., Bruce, C., Swain, P., Velho, R., Meroni, R., Wotring, V., Damann, V., Weber, T., Evetts, S. & Laws, J. (2022). Developing and implementing novel techniques during primary space medicine data systematic reviews. *Aerospace Medicine and Human Performance*, *92*(8), 681–688.