

# Cambios musculoesqueléticos en el entorno de microgravedad

*Musculoskeletal changes in a microgravity environment*

*Alterações musculoesqueléticas em ambiente de microgravidade*

Leandro Emílio Nascimento Santos<sup>I</sup>

Robinson Esteves Pires<sup>II</sup>

Cláudia Sousa Antunes<sup>III</sup>

Ricardo Gakiya Kanashiro<sup>IV</sup>

## RESUMEN

El astronauta es un individuo que trabaja en un ambiente hostil de microgravedad. Ese ambiente anormal altera la fisiología humana en prácticamente todos los sistemas orgánicos. El sistema musculoesquelético tiene repercusiones clínicas que pueden extenderse incluso después de la misión espacial. Conocer los cambios del sistema osteomuscular para actuar antes, durante y después del vuelo espacial es fundamental, porque la hipotrofia ósea puede permanecer años después del regreso a la Tierra. La intervención médica tiene por objeto reducir los riesgos de los problemas de salud relacionados con el sistema musculoesquelético. El objetivo de este estudio es realizar una revisión bibliográfica para identificar los cambios musculoesqueléticos en el entorno de microgravedad y describir las medidas de prevención y tratamiento durante y después de los viajes aeroespaciales.

**Palabras clave:** Astronautas. Microgravedad. Sistema musculoesquelético. Vuelo espacial.

## ABSTRACT

*The astronaut is an individual working in a hostile environment of microgravity. This abnormal environment alters human physiology in virtually all organic systems. The musculoskeletal system has clinical repercussions that may extend even after the space mission. Knowing the changes in the musculoskeletal system to act before, during*

*and after spaceflight is essential, as bone hypotrophy can remain years after returning to Earth. Medical intervention aims to reduce the risks of health problems related to the musculoskeletal system. The aim of this study is to conduct a literature review to identify musculoskeletal alterations in the microgravity environment and describe prevention and treatment measures during and after aerospace travel.*

**Keywords:** Astronauts. Microgravity. Musculoskeletal system. Space flight.

## RESUMO

*O astronauta é um indivíduo que trabalha em um ambiente hostil de microgravidade. Esse ambiente anormal altera a fisiologia humana em praticamente todos os sistemas orgânicos. O sistema musculoesquelético apresenta repercussões clínicas que podem estender-se mesmo após a missão espacial. Conhecer as alterações do sistema osteomuscular para atuar antes, durante e depois do voo espacial é fundamental, pois a hipotrofia óssea pode permanecer anos após o retorno à Terra. A intervenção médica visa reduzir os riscos de agravos à saúde relacionados ao sistema musculoesquelético. O objetivo deste estudo é realizar uma revisão bibliográfica para identificar as alterações musculoesqueléticas no ambiente de microgravidade e descrever medidas de prevenção e tratamento durante e após viagem aeroespacial.*

**Palavras-chave:** Astronautas. Microgravidade. Sistema musculoesquelético. Voo espacial.

I. Escuadrón de Salud de Lagoa Santa – Hospital Felício Rocho – Belo Horizonte/MG – Brasil. Estudiante de doctorado en Ciencias Aplicadas a la Cirugía y a la Oftalmología por la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG). Email: leandroens@hotmail.com

II. Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG) – Hospital Felício Rocho – Belo Horizonte/MG – Brasil. Doctor en Cirugía y Oftalmología por la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG). Email: robinsonestevpires@gmail.com

III. Universidad de la Fuerza Aérea (UNIFA) – Rio de Janeiro/RJ – Brasil. Doctora en Letras por la Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ). Email: claudia.sousa@yahoo.com.br

IV. Dirección de Salud de la Aeronáutica (DIRSA) – Rio de Janeiro/RJ – Brasil. Máster en Ciencias Aeroespaciales por la Universidad de la Fuerza Aérea (UNIFA). Email: ricarkan@uol.com.br

Recibido: 12/04/19

Aceptado: 13/05/19

Las siglas y abreviaturas contenidas en el artículo corresponden a las del texto original en lengua portuguesa.

## 1 INTRODUCCIÓN

Hay dos formas conocidas de simular el entorno de microgravedad en la Tierra. La primera es por medio de una enorme aeronave, conocida como “Cometa Vómito” que realiza una trayectoria en parábola. El avión, como una montaña rusa, sube a aproximadamente 32.000 pies. Durante el ascenso, todo en el avión parece 1.8 veces más pesado que la gravedad de la Tierra. Al llegar a la parte superior, los ocupantes flotan momentáneamente durante unos 25-30 segundos hasta que la aeronave se vuelva paralela a la superficie de la Tierra. Después que la aeronave baja, la gravedad aumenta gradualmente hasta acercarse a 1,8 G, llegando a la misma altitud a la que comenzó el arco parabólico – cerca de 24.000 pies. Cada arco parabólico dura 65 segundos y, en un período de entrenamiento de 2-3 horas, la aeronave realiza 31 parábolas por vuelo, momento en el que los astronautas prueban su equipo, practican actividades como comer, beber y realizan maniobras de movimiento en el entorno de microgravedad. Estos vuelos producen náuseas y vómitos en algunos pasajeros, lo que justifica el apodo dado al avión como “Cometa Vómito”.

La segunda forma de simular la microgravedad es con la construcción de satélites bajo el agua. Los astronautas se visten con trajes espaciales para tener flotabilidad en el buceo, como si estuvieran flotando en el espacio. Se puede usar para entrenar a los astronautas sobre cómo trabajar en el espacio. No es perfecto, porque en el agua hay más resistencia que en el espacio y la gente todavía tiene la gravedad dentro de los trajes, por lo que están trabajando con más dificultad que en el espacio.

Otra forma de simular los efectos de la microgravedad en los sistemas musculoesquelético y cardiovascular es el reposo en la cama con una inclinación al revés (*Head-Down Tilt - HDT*) de 6 grados al menos durante 30 días. Esta inclinación al revés fue sugerida por investigadores rusos en un intento de compensar el cambio de fluido de los miembros inferiores a la región cefálica que ocurre en el espacio. El reposo en cama HDT con voluntarios normales es el análogo más común para la simulación de microgravedad y para probar las contramedidas para la pérdida ósea, atrofia muscular y cardíaca, intolerancia ortostática y reducción de la fuerza muscular y la capacidad de ejercitar. (HARGENS, 2016).

La NASA crea un entorno de microgravedad no solo con el propósito de ayudar y entrenar a los astronautas sino que prueba también muchos procesos físicos y experimentos.

En el entorno de la microgravedad, el peso de los órganos del cuerpo humano disminuye y el sistema osteomuscular desarrolla cambios cualitativos y cuantitativos. La magnitud del acometimiento

osteomuscular depende de la duración del viaje espacial (TEIXEIRA, 2005).

Los músculos responsables de la postura erguida durante la ortostática son los más afectados por la microgravedad. Estos músculos, conocidos como antigravitacionales, se atrofian e incluso pueden presentar alteraciones histológicas, como la sustitución de fibras de tipo I, lentas, por fibras de tipo II, de contracción rápida (TEIXEIRA, 2005).

El metabolismo óseo en el espacio es alterado y el astronauta puede desarrollar osteopenia u osteoporosis. La reducción de la masa ósea es más prominente en la región pélvica y en los miembros inferiores (TEIXEIRA, 2005).

Es necesario que los astronautas tengan una dieta rica en calcio, vitamina D y proteínas, así como hacer ejercicios aeróbicos de impacto y anaeróbicos para amenizar la reducción de la masa ósea, al mismo tiempo que tratan de mantener el tónus muscular.

Conocer los cambios del sistema osteomuscular relacionados con el vuelo espacial es fundamental. La intervención médica tiene por objeto reducir los riesgos agravios a la salud relacionados con el sistema musculoesquelético, así como evitar comprometer la seguridad y los objetivos de las misiones aeroespaciales.

El objetivo de este estudio es realizar una revisión bibliográfica para identificar los cambios musculoesqueléticos relacionados con el entorno de microgravedad, además de describir las medidas de prevención y tratamiento durante el viaje aeroespacial y después de su regreso.

## 2 MÉTODO

Las investigaciones en las bases de datos LILACS y PUBMED se llevaron a cabo con los siguientes descriptores en 2012: astronautas, atrofia muscular, medicina aeroespacial, microgravedad, osteoporosis, simulación en microgravedad y vuelo espacial. De un total de 12619 artículos, sólo 15 fueron seleccionados por estar relacionados con los cambios musculoesqueléticos en humanos en el entorno de microgravedad.

Se realizó una nueva investigación en la base de datos PUBMED del 08/06/2018 al 08/08/2018, con los mismos descriptores, considerando los estudios en humanos, en los últimos cinco años, en español, inglés y portugués, se seleccionaron 17 artículos científicos más porque cumplen con los criterios de selección estrictamente relacionados con los cambios musculares y óseos en el entorno de microgravedad.

Los dos momentos de la investigación corresponden al año de la realización de la monografía del Curso de Medicina Aeroespacial en el IMAE (UNIFA), en

2012, y el año de la segunda colección de datos para la actualización bibliográfica, en 2018.

### 3 DISCUSIÓN

Los músculos pierden masa, fuerza y rigidez de los tendones durante el vuelo espacial. Los más afectados son los músculos posturales que mantienen el cuerpo humano en ortostatismo en un ambiente gravitacional. A partir de siete días de vuelo espacial, se detectan cambios estructurales en los músculos y en los tendones (RILEY, 1990). Después de dos semanas en el ambiente de microgravedad, la masa muscular disminuye hasta un 20% (CLEMENT, 2003). En misiones más largas - de tres a seis meses - puede ocurrir una pérdida del 30% del volumen de la masa muscular (SHACKELFORD, 2008).

La causa fundamental de esta atrofia muscular es la ausencia de carga gravitacional en los huesos y músculos durante el vuelo espacial. Los músculos sin carga presentan cambios bioquímicos y estructurales con reducción de la longitud de los sarcómeros y reducción de su posición óptima de trabajo. Factores adicionales como la malnutrición y el estrés físico y psicológico durante el viaje aeroespacial pueden contribuir al aumento de la pérdida de músculo (BUCKEY, 2006b). La atrofia muscular no se produce por la cantidad de la fibra muscular sino por la reducción de su tamaño. Hay dos tipos de fibras musculares: el tipo I, antigravitacional, postural o de contracción lenta, que tienen resistencia a la fatiga muscular, presentan una gran cantidad de mitocondrias y mioglobinas, y están ricamente vascularizadas (BUCKEY, 2006b). Las fibras musculares de tipo I son muy sensibles a la inactividad, la inmovilización y la ausencia de gravedad. Las fibras musculares de tipo II o de contracción rápida son fáciles de fatigar y tienen menos mitocondrias y mioglobina (BUCKEY, 2006b). Estas parecen sufrir mayores pérdidas que las fibras de tipo I. Las biopsias de los músculos después del desembarque también indican un cambio fenotípico de las fibras de tipo I a las de tipo II, proporcionando una contracción más rápida, pero con mayor fatiga (BUCKEY, 2006b; CLEMEND, 2003).

La disminución del volumen muscular viene con una menor fuerza muscular, aunque no es proporcional a esta reducción. Los músculos que tienen un índice de mayor atrofia muscular son: el cuádriceps, los aductores de la cadera, el tríceps sural (principalmente el músculo solear) y el músculo paravertebral lumbar, con especial énfasis en los músculos multifidos (KAWASHIMA et al., 2004). Los cambios en la lordosis y el rango de movimiento (ADM) asociados con la atrofia muscular

El multifidus se producen en la mayoría de los astronautas. Sin embargo, sólo aquellos con graves

irregularidades en la placa terminal presentaban síntomas lumbares post-vuelo: lumbalgia crónica o hernia de disco. La insuficiencia de la placa vertebral antes del vuelo puede aumentar el riesgo de lesión de los astronautas al volver a la carga gravitacional (BAILEY, 2017).

El reposo en cama, un análogo del vuelo espacial en tierra, induce una robusta atrofia del músculo esquelético y se exacerba con el aumento de la edad. Y ya es evidente después de 14 días de descanso en cama (ARENTSON-LANTZ, 2016).

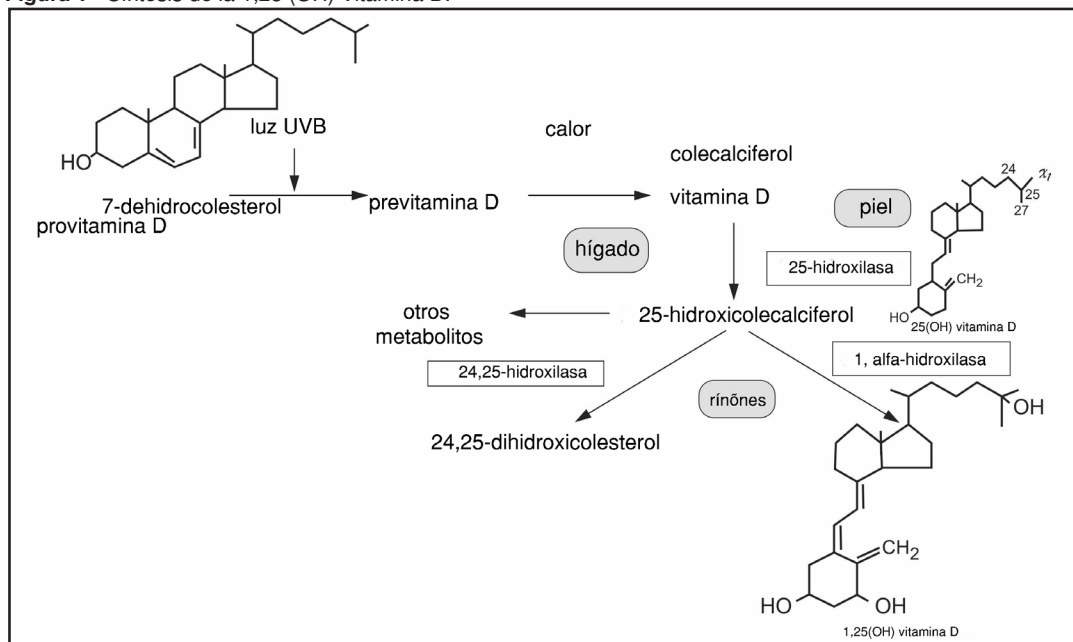
La reducción de la rigidez de los tendones se debe a los cambios en la alineación y la longitud de las fibras de colágeno debido a la ausencia de gravedad.

El regreso a la Tierra puede desencadenar lumbalgia, dolor en la pantorrilla y en el muslo y, en algunos casos, fascitis plantar (CLEMEND, 2003; SHACKELFORD, 2008). Al regresar de la estación espacial, el astronauta debe someterse a un programa de rehabilitación y acondicionamiento muscular para recuperar la masa y la fuerza muscular, lo que suele ocurrir entre uno y dos meses (SHACKELFORD, 2008).

El desequilibrio muscular causado por la hipertrofia del flexor y la atrofia de la musculatura extensora y de la columna lumbar pélvica aumenta el riesgo de lesiones posteriores a la misión espacial. Un método que se utiliza actualmente en los vuelos espaciales tripulados en Europa para ayudar a la recuperación posterior a la misión se centra en la enseñanza de la contracción voluntaria de determinados músculos pélvicos lumbares y el posicionamiento de la columna vertebral, progresando al entrenamiento funcional con carga. Un enfoque alternativo sería usar un dispositivo de ejercicio funcional de readaptación para reclutar adecuadamente los músculos (EVETTTS, 2014).

Una medida que aborda tanto la preservación de los músculos musculoesqueléticos como de los cardiovasculares es el ejercicio de remo de alta intensidad y de corta duración seguido de ejercicios de fuerza de resistencia complementarios. El entrenamiento de remo preservó eficazmente la función y la estructura del músculo esquelético, evitando parcialmente la atrofia en los principales músculos antigravedad (KRAINSKI, 2013).

La microgravedad disminuye la densidad mineral ósea. La formación del hueso depende del grado de carga sobre el hueso. Por lo tanto, la disminución de la carga sobre el hueso dificulta e incluso inhibe su formación (BUCKEY, 2006a; CANN, 1997; SHACKELFORD, 2008). Otros factores contribuyen a la pérdida ósea, como la baja luz solar, que disminuye la formación de vitamina D, y el ambiente con alta concentración de CO<sub>2</sub>, que lleva a acidosis respiratoria (BUCKLEY, 2006a).

**Figura 1 - Síntesis de la 1,25 (OH) Vitamina D.**

**Fuente:** PREMAOR; FURLANETTO, 2006. El 7-dehidrocolesterol, a través de la acción de la luz ultravioleta y del calor, se isomeriza en colecalciferol en la piel. Luego se transporta al hígado, donde sufre la acción de la 25-hidroxilasa, convirtiéndose en 25-hidroxicolecalciferol. Cuando esta molécula llega al riñón, puede convertirse en la forma activa forma inactiva de esta hormona, a través de la acción de la 1, alfa, hidroxilasa o 24,25 hidroxilasa, respectivamente.

El entorno de microgravedad altera la homeostasis del calcio debido a la mala alimentación de este ion, la ausencia de luz solar, la alta concentración de CO<sub>2</sub> y la ausencia de carga en el hueso. La disminución del calcio sérico aumenta la secreción de la parathormona (PTH), lo que provoca un aumento de la producción de 1,25-dihidroxitamina D, una mayor absorción intestinal de calcio y fosfato, estimula la reabsorción renal de calcio, inhibe la reabsorción renal de fosfato, además de aumentar la reabsorción ósea (Figura 2).

La desmineralización de los huesos comienza tan pronto como se llega al espacio y puede continuar durante toda la misión. En los primeros días, se observa un aumento del 60 al 70% del calcio urinario y fecal (BUCKEY, 2006a; CLEMENT, 2003).

La pérdida de densidad ósea durante el reposo en cama es del 1 al 2% por mes en los huesos de carga como las vértebras lumbares, la pelvis, el cuello femoral, la región trocantérica, la tibia y el calcáneo (BUCKEY, 2006a; CANCEDDA, 2001; CLEMENT, 2004; LANG et al, 2006a; LEBLANC et al, 2002). En estas regiones, la pérdida de densidad mineral ósea después de 6 meses en la estación espacial es del 8 al 12% (SHACKELFORD, 2008).

La mayor pérdida ósea media absoluta por desuso se produce en el compartimento cortical, aparentemente solo durante los primeros 60 días. Después de ese período, la pérdida trabecular puede volverse más prominente (CERVINKA, 2014).

La densitometría ósea y la tomografía computarizada son pruebas útiles para monitorear la pérdida ósea y

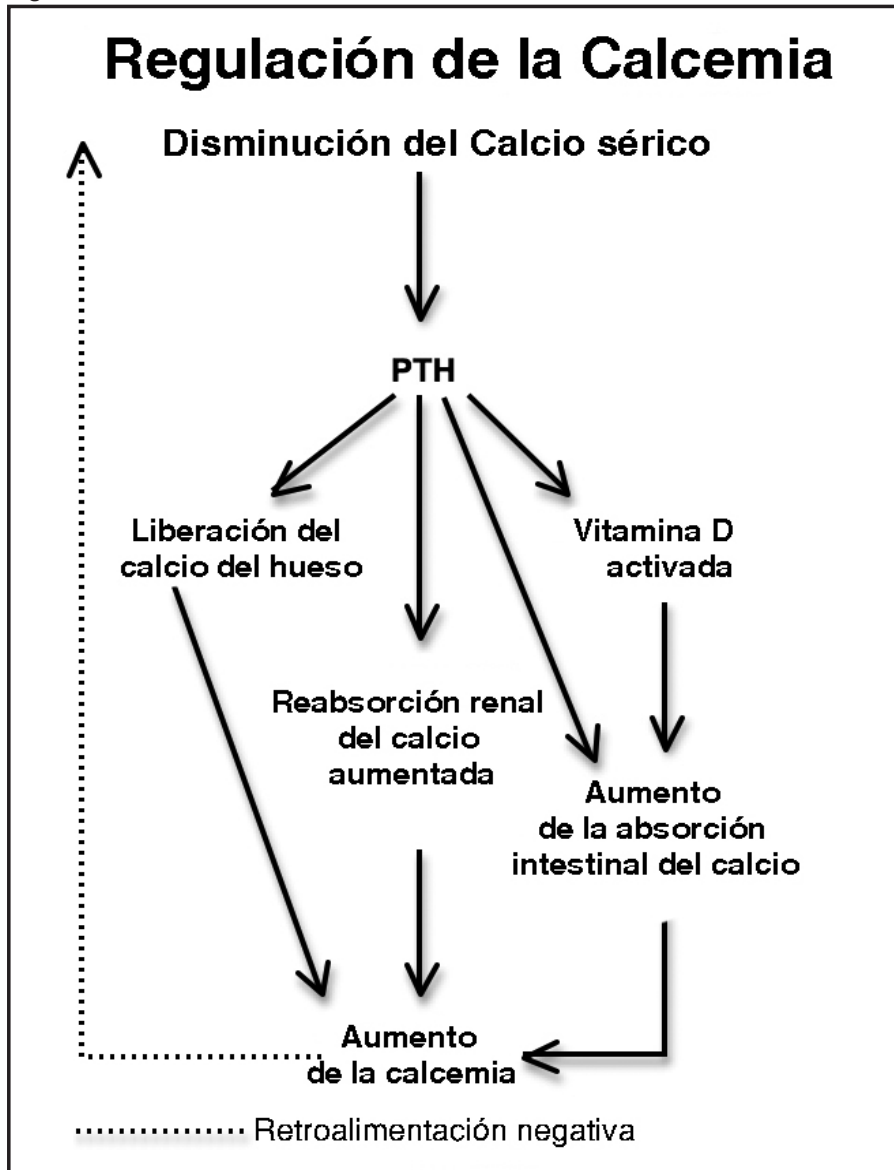
también para probar la efectividad de los ejercicios de resistencia y la efectividad de la terapia con bisfosfonatos en astronautas que han regresado de viajes espaciales (WILLIAMS et al, 2009).

La medición de la densidad mineral ósea (DMO) por absorciometría de rayos-X de doble energía (DXA: Dual-energy X-ray Absorptiometry) es utilizada en la NASA Johnson Space Center. Los exámenes de DXA de la DMO de la tripulación mostraron disminuciones acentuadas en la DMO para la cadera y la columna después de típicas misiones espaciales de seis meses (SIBONGA, 2015).

Los hallazgos de laboratorio del astronauta que regresa a la Tierra se caracterizan por un aumento de los marcadores de resorción ósea, marcadores de formación ósea sin cambios, disminución de la síntesis de vitamina D, disminución de la absorción del calcio intestinal y el aumento del calcio sérico. (LEBLANC et al. 2000). Las tablas 1, 2 y 3 caracterizan los criterios de deficiencia de vitamina D, los factores de riesgo de hipovitaminosis D y los valores de referencia para el calcio sérico en adultos, respectivamente.

El Departamento de Metabolismo Óseo y Mineral de la Sociedad Brasileña de Endocrinología y Metabología (SBEM) estaba discutiendo los valores de normalidad de la 25-OH-vitamina D hace algún tiempo. El valor normal propuesto por la Endocrine Society y por la SBEM, antes por encima de 30 ng/mL, se cambió en 2017, siendo en que mayor de que 20 ng/mL es el deseable para una población general sana y se recomienda entre 30 y 60 ng/mL para grupos de riesgo.

Figura 2 - Homeostasis del calcio.



Fuente: El autor. Metabolismo del calcio y fósforo. El PTH activa la vitamina D, aumenta la absorción intestinal de calcio, inhibe la eliminación renal de calcio, aumenta la eliminación renal de fósforo y aumenta la reabsorción ósea. Cuando el calcio sérico está aumentado, inhibe la liberación del PTH: retroalimentación negativa.

Tabla 1 - Nuevos criterios diagnósticos propuestos por la SBEM en 2017 para la deficiencia de vitamina D.

Dosis de 25-hidroxivitamina D (ng/mL)	
10 a 20 ng/mL	considerado bajo: con riesgo de aumentar la remodelación ósea y, por tanto, pérdida de masa ósea, además del riesgo de osteoporosis y fracturas
> 20 ng/mL	deseable para la población general sana
30 a 60 ng/mL	recomendado para grupos de riesgo como ancianos, mujeres embarazadas, pacientes con osteomalacia, raquitismo, osteoporosis, hiperparatiroidismo secundario, enfermedades inflamatorias, enfermedades autoinmunes y renal crónica y prebariátricos

Fuente: Departamento de Metabolismo Óseo y Mineral de SBEM.

**Tabela 2** - Risk factors for hypovitaminosis D.

Poca exposición a la luz UVB	Disminución de la síntesis de vitamina D por la piel	Enfermedades que alteran el metabolismo de la vitamina D
Uso excesivo de ropa		Fibrosis quística
Países con poca luz (alta latitud)	Raza amarilla	Inmovilización para el tratamiento de fracturas óseas
Baja penetración de la luz UVB durante el invierno en la atmósfera	Envejecimiento	Insuficiencia cardíaca
Utilização de protectores solares		Enfermedades renales
El confinamiento en lugares donde no hay una exposición a la luz UVB		Enfermedades hematológicas
		Enfermedades del tracto gastrointestinal

Fuente: PREMAOR; FURLANETTO, 2006.

**Tabla 3** - Valores de referencia del calcio sérico en adultos (PREMAOR; FURLANETTO, 2006).

Calcio total	8.8 a 11.0 mg/dL
Calcio iónico	4.60 a 5.40 mg/dL

Fuente: PREMAOR; FURLANETTO, 2006.

La tabla 4 muestra los marcadores bioquímicos del metabolismo óseo.

**Tabla 4** - Marcadores bioquímicos del metabolismo óseo.

Formación	Reabsorción
	Hidroxiprolina (orina)
	Interconectores de colágeno-cross-links (orina y suero)
	Piridinolinas totales
Fosfatasa alcalina ósea y/o total (suero)	Piridinolina y/o deoxipiridinolina libre
Osteocalcina (suero)	N-telopeptido (NTX)
Propeptidos de colágeno tipo 1 (suero)	C-telopeptido (CTX)
	Fosfatasa ácida tartrato resistente (suero)

Fuente: PREMAOR; FURLANETTO, 2006.

La pérdida ósea acelerada en un entorno de microgravedad hace que el plomo se libere de los huesos donde estaban almacenados. Tal hecho aumentaría el riesgo de saturnismo, lo que genera preocupación sobre la concentración aceptable de plomo en el agua potable de los vehículos espaciales. Sin embargo, según Garcia (2013), la mayoría de los astronautas en misiones espaciales largas no se verán afectados por la liberación de plomo de los huesos a la sangre. Un pequeño porcentaje de astronautas con una alta concentración de plomo en los huesos podría haber aumentado la plumbemia, dependiendo de la tasa individual de pérdida ósea (GARCIA, 2013).

Debido a la fragilidad de los huesos, los astronautas que acaban de regresar de un viaje espacial deben mantenerse alejados de las actividades de impacto y de volar en aviones de alto rendimiento (CLEMMENT, 2003; LANG et al. 2006).

Sin embargo, esta pérdida ósea puede persistir durante más tiempo. El tiempo de recuperación de la masa ósea es mayor que el tiempo pasado en el espacio. La recuperación de la densidad ósea puede tardar hasta tres años después de la finalización del viaje espacial y es posible que no vuelva a los niveles previos al viaje (CLEMMENT, 2003). La recomposición de la masa ósea puede formar un trabeculado y una mineralización ósea diferente diferentes de la arquitectura ósea antes del vuelo (LANG et al. 2006).

En la tibia, además de la disminución de la densidad mineral ósea en los compartimentos cortical y trabecular, se observó una disminución del 4% del grosor cortical y un aumento del 15% de la porosidad cortical en el aterrizaje. El tamaño y la densidad cortical se recuperaron posteriormente y los cambios séricos en la periostina [marcador de la actividad osteocítica o del metabolismo perióstico, junto con la esclerostina] se asociaron con la recuperación cortical durante un año después del desembarque. Sin embargo, la porosidad cortical de la tibia o del hueso trabecular no se ha recuperado, lo que da como resultado una fuerza reducida. La radio, conservada en el aterrizaje, desarrolló inesperadamente una fragilidad posterior al vuelo, a partir de los 3 meses posteriores al aterrizaje, particularmente en su estructura cortical. Los marcadores de remodelación, desacoplados a favor de la reabsorción ósea en el aterrizaje, volvieron a sus valores anteriores en 6 meses, luego disminuyeron a valores por debajo de los valores previos al vuelo. Nuestros hallazgos destacan la necesidad de medidas de protección específicas, no solo durante, sino también después de los vuelos espaciales, debido a la continua incertidumbre sobre la recuperación del esqueleto, mucho después del aterrizaje (VICO, 2017, p. 2).

Se cree que la radiación de alta transferencia de energía lineal (LET: *Linear Energy Transfer*) en el espacio exacerba

la pérdida de densidad ósea inducida por microgravedad a través de la CHK1 (*Checkpoint Kinase1*)/MEPE (*Matrix Extracellular Phosphoglycoprotein*) activado por radiación que exagera los efectos de la microgravedad en la pérdida de densidad mineral ósea en los astronautas (ZHANG, 2015).

Existe una preocupación por esta fragilidad ósea debido a la posibilidad de osteoporosis temprana y fractura en los astronautas (CLEMENT, 2003). La fractura puede ocurrir durante actividades espaciales extenuantes -caminatas - o principalmente después de regresar a la Tierra (SHACKELFORD, 2006).

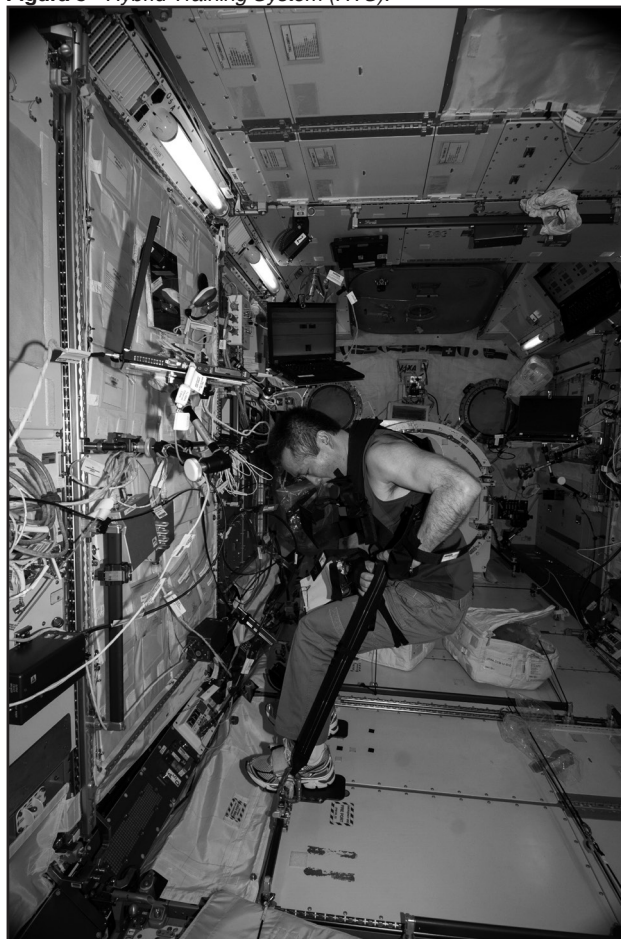
La falta de signos mecánicos por desuso puede inhibir la osteogénesis e inducir la adipogénesis de las células madre mesenquimales. Por tanto, la osteoporosis también puede ser causada por el número reducido de osteoblastos. La estimulación mecánica adecuada para la osteogénesis, particularmente en condiciones de microgravedad, puede restaurar la diferenciación osteogénica normal utilizando ultrasonido pulsátil de baja intensidad (LIPUS: *Low Intensity Pulsed Ultrasound*) por estimulación diaria de corta duración (UDDIN, 2013).

La tiroides controla los sistemas cardiovascular, musculoesquelético, nervioso e inmunológico y afecta el comportamiento y las funciones cognitivas. Se sabe que la microgravedad puede inducir cambios funcionales en la glándula tiroides (ALBI, 2017) con el consecuente deterioro de los sistemas antes mencionados.

Dado que la recuperación de la masa ósea perdida después del vuelo espacial es larga, es importante actuar para prevenir la pérdida ósea antes y durante el vuelo. Por tanto, existen medidas para evitar el catabolismo osteomuscular de los astronautas en el entorno de microgravedad. Tales medidas consisten en:

- selección adecuada de astronautas, excluyendo aquellos con baja masa ósea o tratándolos antes del vuelo (BUCKEY et al. 2006).
- dieta equilibrada, con baja concentración de sal (el exceso puede contribuir o facilitar la pérdida ósea), pero con una alta concentración de calcio y rica en proteínas (BUCKEY et al. 2006).
- programa de ejercicios de resistencia de alta intensidad con pocas repeticiones y en poco tiempo (BUCKEY et al. 2006). Sin embargo, también se ha demostrado que una carga mecánica de baja magnitud y alta frecuencia, experimentada en la actividad de control postural, es anabólica para el hueso y puede mitigar la pérdida ósea experimentada por los astronautas (NAGARAJA, 2014). También hay un Sistema de Entrenamiento Híbrido (HTS: Hybrid Training System) para mantener el tónus muscular y evitar la atrofia del sistema musculoesquelético de un astronauta (SHIBA, 2015).

Figura 3 - Hybrid Training System (HTS).



Fuente: NASA.

- entrenamiento aeróbico para el acondicionamiento cardiorrespiratorio antes y durante los viajes espaciales (QUIRINO et al. 2012). Hay algunos obstáculos a superar para que el astronauta pueda pisar en la estera. En primer lugar, deben engancharse, para no flotar. Para que el astronauta corra en el espacio, es necesario sujetarlo en la estera para que una armadura (cinturón) pase sobre sus hombros y alrededor de la pelvis, sujetándolo a ellos. Dos arneses laterales conectan la armadura a la estera y esta conexión puede ser ajustada de acuerdo con la carga que el astronauta quiera. Más carga significa que el arnés tira más de la persona hacia la estera: es como tratar de correr con una mochila más pesada. Los astronautas necesitan ajustar su velocidad y la carga correcta para que la carrera no sea incómoda. La estera tiene un sistema de aislamiento de vibraciones para que el corredor no transmita la carga a la estructura de la estación espacial.

- ejercicios físicos como: abducción y aducción de la cadera, ejercicios de extensión del tronco, acuclillarse y flexión plantar del tobillo utilizando una máquina conocida como Dispositivo Avanzado de Ejercicio Resistivo (ARED: *Advanced Resistive Exercise Device*), donde se utilizan cilindros de vacío accionados por pistón de resistencia ajustable para proporcionar carga a los astronautas y mantener la fuerza y la masa muscular durante largos períodos en el espacio.
- el uso de suplementos y medicamentos como el calcio, la vitamina D y los bifosfonatos (BUCKEY et al, 2006).
- control del calcio urinario y sérico, así como de los marcadores de resorción y formación ósea (BUCKEY et al. 2006). La reabsorción ósea causada por las misiones espaciales aumenta el calcio sérico y urinario y el riesgo de nefrolitiasis. La forma más fácil de prevenir el riesgo de cálculos renales es aumentar el consumo de agua (SMITH, 2015).
- exposición intermitente de la tripulación a un ambiente gravitatorio durante el vuelo espacial: la centrifugación es una forma plausible de generar gravedad artificial. En el espacio, es posible crear “gravedad artificial” rotando la estación espacial. Se crea un sistema rotativo que produce el mismo efecto que la gravedad, ya que produce una fuerza (fuerza centrífuga), que actúa para tirar los habitantes hacia fuera. Este proceso puede ser usado para simular la gravedad. Ajustando ciertos parámetros de una estación espacial, como el radio y el índice de rotación, se puede crear una fuerza en las paredes exteriores que iguale igualaría a la fuerza de la gravedad. Así, las paredes exteriores de la estación espacial serían el suelo en la estación espacial. La “fuerza” centrífuga empuja los objetos hacia fuera, pero la fuerza de la estación espacial proporciona una “fuerza centrípeta” opuesta que empuja hacia dentro. Esto sería similar a caminar sobre la superficie de un planeta (si la estación espacial está girando a la velocidad correcta). Sin embargo, las grandes fuerzas de Coriolis también estarían presentes, y los objetos caerían en curvas en lugar de líneas rectas (ANDERSON, 2015).

Figura 4 - *Advanced Resistive Exercise Device (ARED)*.



Fuente: NASA.

#### 4 CONCLUSIÓN

La exposición al entorno de microgravedad espacial descondiciona al astronauta, causando una atrofia del sistema musculoesquelético con disminución de volumen y de la fuerza muscular y pérdida de masa ósea. Estas adaptaciones fisiológicas ocurren poco después de su llegada al ambiente de microgravedad. Estos cambios tienen un potencial perjudicial para el sistema musculoesquelético del astronauta, con un mayor riesgo de fractura al regresar a la Tierra, y el potencial de perjudicar la eficacia de la misión en el espacio. La intervención terapéutica antes, durante y después de los viajes aeroespaciales, mediante una dieta equilibrada y un programa de ejercicios definido, debe ser implementada para evitar el deterioro osteomuscular del astronauta.



## REFERÊNCIAS

- ALBI, E. *et al.* Impact of Gravity on Thyroid Cells. **International Journal of Molecular Sciences**, Basileia, v. 18, n. 5, 2017. Disponível em: [https://www.wizdom.ai/publication/10.3390/IJMS18050972/title/impact\\_of\\_gravity\\_on\\_thyroid\\_cells](https://www.wizdom.ai/publication/10.3390/IJMS18050972/title/impact_of_gravity_on_thyroid_cells). Acessado em: 12 mar 2019, doi: 10.3390/ijms18050972.
- ANDERSON, R. **Can artificial gravity be created in space?** 2015. Disponível em: <http://curious.astro.cornell.edu/about-us/150-people-in-astronomy/space-exploration-and-astronauts/general-questions/927-can-artificial-gravity-be-created-in-space-intermediate>. Acesso em: 19 ago 2018.
- ARENTSON-LANTZ, E. J.; ENGLISH, K. L.; PADDON-JONES, D.; FRY, C. S. Fourteen days of bed rest induces a decline in satellite cell content and robust atrophy of skeletal muscle fibers in middle-aged adults. **Journal of Applied Physiology, Rockville**, v. 120, n. 8, 2016. Disponível em: <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/jappphysiol.00799.2015>. Acessado em: 02 dez 2017, doi:10.1152/jappphysiol.00799.2015.
- BAILEY J. F. *et al.* From the international space station to the clinic: how prolonged unloading may disrupt lumbar spine stability. **The Spine Journal**. Boston, v. 18, n. 1, 2018. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28962911>. Acessado em: 05 fev 2018. doi: 10.1016/j.spinee.2017.08.261.
- BUCKEY, J. C. J. Bone loss: managing calcium and bone loss in space. In: \_\_\_\_\_. **Space physiology**. New York: Oxford University Press, 2006a. cap 1, p. 3-32.
- BUCKEY, J. C. J. Muscle loss: approach to maintaining strength. In: \_\_\_\_\_. **Space physiology**. New York: Oxford University Press, 2006b. cap. 4, p. 77-100.
- CANCEDDA, R. The skeletal system. In: FITTON, B; BATTRICK, B. **A world without gravity: research in space for health and industrial processes**. Paris: European Space Agency, 2001. p. 83-92.
- CANN, C. Response of the skeletal system to spaceflight. In: Churchill, S. E. **Fundamentals of space life sciences**. Malabar: Krieger publishing company, 1997. p. 83-103.
- CERVINKA, T.; SIEVÄNEN, H.; HYTTINEN, J.; RITTWEGGER, J. Bone loss patterns in cortical, subcortical, and trabecular compartments during simulated microgravity. **Journal of Applied Physiology, Rockville**, v. 117, n. 1, 2014. Disponível em: <https://journals.physiology.org/doi/pdf/10.1152/jappphysiol.00021.2014>. Acessado em: 05 jul 2017. doi:10.1152/jappphysiol.00021.2014.
- CLEMENT, G. Muscle-skeletal system in space. In: \_\_\_\_\_. **Fundamentals of space medicine**. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 173- 204.
- EVETTS, S. N., *et al.* Post space mission lumbo-pelvic neuromuscular reconditioning: a European perspective. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**, Nova Iorque, v. 85, n. 7, 2014. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/content/asma/asem/2014/00000085/00000007/art00014>. Acessado em: 07 ago 2016.
- GARCIA, H. D.; HAYS, S. M.; TSUJI, J. S. Modeling of blood lead levels in astronauts exposed to lead from microgravity-accelerated bone loss. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**. Nova Iorque, v. 84, n. 12, 2013.
- HARGENS, A. R.; VICO, L. Long-duration bed rest as an analog to microgravity. **Journal of applied physiology**, v. 120, n. 8, p. 891-903, 2016.
- LANG, T. F. *et al.* Cortical and trabecular bone mineral loss from the spine and hip in long-duration spaceflight. **Journal of bone and mineral research: the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research**, Washington/DC, v. 19, 2006a.
- LANG, T. F. *et al.* Adaptation of the proximal femur to skeletal reloading after long-duration spaceflight. **Journal of bone and mineral research: the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research**, Washington/DC, v. 21, 2006b.
- QUIRINO, D; PEDRO, L. A influência da microgravidade na musculatura esquelética: alterações musculares e intervenção terapêutica. **Saúde & Tecnologia**, v. 4, n. 8, 2012.
- KAWASHIMA, S. *et al.* Human adductor muscles atrophy after short duration of unweighting. **European journal of applied physiology**, v. 92, n. 4-5, p. 602-605, 2004.
- KRAINSKI, F. *et al.* The effect of rowing ergometry and resistive exercise on skeletal muscle structure and function during bed rest. **Journal of Applied Physiology, Rockville**, v. 116, n. 12, 2013. Disponível em: <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/jappphysiol.00803.2013>. Acessado em: 20 abr 2017. doi: 10.1152/jappphysiol.00803.2013.

- LEBLANC, A. *et al.* Bone mineral and lean tissue loss after long duration space flight. **Journal of Musculoskeletal Neuronal Interactions**, Attiki, v. 1, 2000.
- NAGARAJA, M. P.; JO., H. The Role of Mechanical Stimulation in Recovery of Bone Loss-High versus Low Magnitude and Frequency of Force. **Life, Basileia**, v. 4, n. 2, 2014. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25370188>. Acessado em: 27 mai 2016, doi: 10.3390/life4020117.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/163.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/163.html). Acesso em: ago. 2018.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/1001.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/1001.html). Acesso em: ago. 2018.
- PREMAOR, M. O.; FURLANETTO, T. W. Hipovitaminose D em adultos: entendendo melhor a apresentação de uma velha doença. **Arquivos Brasileiros de Endocrinologia & Metabologia, ABE&M**, Rio de Janeiro, v. 50, n. 1, p. 25-37, 2006.
- QUÍMICA Fisiológica, 2017. Disponível em: <http://quimicafisiologicaufrj.blogspot.com/2017/07/metabolismo-do-calcio-e-fosfato.html>. Acesso em: ago. 2018.
- RILEY, D. A. *et al.* Skeletal muscle fiber, nerve, and blood vessel breakdown in space-flown rats. **The FASEB Journal, Rockville**, v. 4:, n. 1, 1990, doi: doi.org/10.1096/fasebj.4.1.2153085.
- SHIBA, N. *et al.* Electrically Stimulated Antagonist Muscle Contraction Increased Muscle Mass and Bone Mineral Density of One Astronaut - Initial Verification on the International Space Station. **PLoS One**, San Francisco, v. 10, n. 8, 2015. 21 ago. 2015. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0134736>. Acessado em 09 fev 2017. doi:10.1371/journal.pone.0134736.
- SIBONGA J. D. *et al.* **Evaluating Bone Loss in ISS Astronauts. Aerospace Medicine and Human Performance**, Alexandria, v. 86, n. 12, 2015. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26630194>. Acessado em: 14 jun 2016, doi: 10.3357/AMHP.EC06.2015.
- SHACKELFORD, L. C. Musculoskeletal response to space flight. In: BARRATT M. R., POOL, S. L. **Principles of clinical medicine for space flight**. New York: Springer Science and Business Media, 2008. p. 293-306.
- SMITH, S. M. *et al.* Bone metabolism and renal stone risk during International Space Station missions. **Bone**, Rockville Pike, v. 81, 2015. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26456109>. Acessado em: 27 ago 2016, doi: 10.1016/j.bone.2015.10.002.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE ENDOCRINOLOGIA E METABOLOGIA. **Vitamina D: novos valores de referência**. Disponível em: <https://www.endocrino.org.br/vitamina-d-novos-valores-de-referencia/>. Acesso em: 31 jul 2018.
- TEIXEIRA, R. C. M. Atmosfera e espaço. In: TEMPORAL, W. **Medicina aeroespacial**. Rio de Janeiro: Luzes, 2005. cap. 3, p. 75-76.
- UDDIN, S. M., QIN, Y. X. Enhancement of osteogenic differentiation and proliferation in human mesenchymal stem cells by a modified low intensity ultrasound stimulation under simulated microgravity. **PLoS One**. San Francisco, v. 8, n. 9, 2013. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0073914>. Acessado em: 04 set 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0073914.
- VICO, L. *et al.* Cortical and Trabecular Bone Microstructure Did Not Recover at Weight-Bearing Skeletal Sites and Progressively Deteriorated at Non-Weight-Bearing Sites During the Year Following International Space Station Missions. **Journal of bone and mineral research: the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research**, Washington/DC, v. 30, n. 10, 2017. Disponível em: <https://asbmr.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jbmr.3188>. Acessado em: 09 out 2018, doi: 10.1002/jbmr.3188.
- VITAMINA D: novos valores de referência. **Sociedade Brasileira de Endocrinologia e Metabologia**, 2017. Disponível em: <https://www.endocrino.org.br/vitamina-d-novos-valores-de-referencia/>. Acesso em: jul. 2018.
- WILLIAMS, D. *et al.* Acclimation during space flight: effects on human physiology. **Canadian Medical Association Journal**, Ottawa, n. 13, p. 1317-23, jun. 2009.
- ZHANG, X.; WANG, P.; WANG, Y. Radiation activated CHK1/MEPE pathway may contribute to microgravity-induced bone density loss. **Life Sciences in Space Research**, Rockville Pike, v. 81, 2015. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26553637>. Acessado em: 08 ago 2016. doi: 10.1016/j.lssr.2015.08.004.