

OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E SAÚDE ESPACIAL: UMA REVISÃO SOBRE SUA APLICAÇÃO EM AMBIENTES EXTREMOS

Gabriel Matheus Dutra Santos, Ana Luiza Ribeiro do Carmo, Edward Silva Ferraz, Fiorella Lilian Villegas Yaranga, José Emanuel Figueredo Lopes Lacerda, Marco Mammoli

Instituto Geração de Marte (IGM)/Departamento de pesquisa, Rua Eurípedes Bezerra, 03, Vila Cruzado – 65073 – 604 - São Luís - MA, Brasil, gabriel_mds_@hotmail.com, analuizacarmo6@gmail.com, edwardfkcf@gmail.com, fiorellavillegasyaranga@gmail.com, jfigueredolopesl@gmail.com, 9marcomam@gmail.com

Resumo

O lema “Ninguém fica para trás”, central na Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), expressa a necessidade de alinhar ciência, tecnologia e inovação às demandas globais de sustentabilidade. Nesse contexto, a saúde espacial desponta como um campo estratégico que extrapola a fronteira da exploração do espaço, oferecendo soluções concretas para desafios enfrentados na Terra. O desenvolvimento de tecnologias para ambientes extremos representa avanços para missões espaciais e oportunidades de aplicação em cenários terrestres. Através de revisão narrativa da literatura entre saúde espacial e os ODS, compreende-se como inovações originalmente pensadas para ambientes confinados, isolados e de recursos limitados podem inspirar políticas públicas e promover inclusão social. Dessa forma, a saúde espacial configura-se como um laboratório avançado para o desenvolvimento sustentável e para a melhoria da qualidade de vida em escala planetária.

Palavras-chave: Saúde Espacial. ODS. Ambientes Extremos.

Área do Conhecimento: Ciências biológicas – Biomedicina

Introdução

A saúde espacial emergiu nas últimas décadas como um campo estratégico em que o conhecimento produzido para sustentar a vida humana fora da Terra retorna em soluções com potencial de alto impacto social, ambiental e econômico. Desde a corrida espacial do século XX, tecnologias projetadas para ambientes extremos vêm sendo sistematicamente transladas para aplicações terrestres, inaugurando um ciclo virtuoso de inovação orientada a problemas públicos (Williams *et al.*, 2009). No marco da Agenda 2030 e da Space2030, a Organização das Nações Unidas (ONU) propõe que o espaço seja compreendido como indutor transversal do desenvolvimento sustentável, alinhando missões, infraestrutura e dados espaciais às metas globais de inclusão, resiliência e equidade (UNOOSA, 2024). Nesse enquadramento, saúde espacial não se limita à medicina aeroespacial; ela integra engenharia de sistemas, biotecnologia, psicologia, ciência de dados e políticas públicas. O resultado é um repertório de tecnologias e protocolos que, testados sob microgravidade, isolamento e restrição de recursos, podem informar soluções de alto desempenho para contextos terrestres de vulnerabilidade, emergências humanitárias e sistemas de saúde em regiões remotas (Maiwald *et al.*, 2021).

Uma primeira frente emblemática é a telemedicina, cuja evolução no programa espacial consolidou fundamentos técnicos e operacionais hoje ubíquos na saúde digital. Entre as lições aprendidas destacam-se arquiteturas de comunicação redundantes, *workflows* clínicos assíncronos, protocolos de triagem e *follow-up* orientados por risco, além da integração com dispositivos vestíveis de monitoramento fisiológico (Nicogossian *et al.*, 2001). A literatura de saúde global demonstra que, quando esses elementos migram do ambiente orbital para a Terra, verificam-se ganhos em acesso e continuidade de cuidado, especialmente em áreas rurais e em crises humanitárias, desde que acompanhados de governança de dados, interoperabilidade e capacitação local (Dietrich *et al.*, 2018). Ao mesmo tempo, o aprendizado operacional de missões em ambientes confinados, fornece um *Blue*

print para redes de tele assistência em territórios remotos, barcos-hospitais, bases polares e assentamentos em áreas de difícil acesso (Nicogossian *et al.*, 2001; Dietrich *et al.*, 2018).

Outra vertente estruturante diz respeito aos sistemas de suporte à vida (*Life Support Systems*), que perseguem fechamentos de ciclo para água, ar e nutrientes. Tecnologias como o *Water Recovery System* e módulos de biorregeneração de recursos, concebidas para habitats espaciais, têm sido reestruturadas para contextos terrestres de escassez hídrica, com ganhos de eficiência energética e sanitária (PNUD; OMS, 2022). Em paralelo, avanços em ciência de plantas e microbiologia aplicada a ambientes controlados oferecem evidências de produtividade, segurança e estabilidade nutricional em condições de baixo insumo, de modo a subsidiar soluções de agricultura vertical e produção local de alimentos em cidades e acampamentos temporários (De Micco *et al.*, 2023). A transposição de tecnologias energéticas, complementa o quadro, sustentando operações médicas e comunicação em cenários off-grid (ESA, 2023; NASA, 2025). Combinados, esses componentes constituem uma caixa de ferramentas replicável para emergências climáticas e infraestrutura mínima de saúde pública.

A dimensão humana da saúde espacial, é igualmente central quando se pensa transferibilidade. Evidências de psicologia e psiquiatria do espaço documentam estressores típicos (isolamento, monotonia, privação sensorial, disritmia circadiana) e suas consequências no humor, sono e tomada de decisão (Kanas; Manzey, 2022). Revisões sistemáticas de adaptação a ambientes profissionais extremos indicam que fatores como seleção, treinamento, protocolos de comunicação e liderança situacional mitigam riscos psicossociais e sustentam desempenho em missão (Le Roy *et al.*, 2023). Além disso, a literatura recente enfatiza marcadores e contramedidas com recorte de sexo/gênero, abordando especificidades de risco ósseo, cardiovascular e imunológico em missões de longa duração (Hughes-Fulford *et al.*, 2024). Essa base empírica dialoga diretamente com operações terrestres em ambientes isolados, e com políticas de saúde ocupacional e de proteção psicossocial em desastres.

Por fim, a consolidação da saúde espacial como motor da Agenda 2030 exige integração programática entre agências espaciais, ministérios da saúde, universidades e setor privado, com mecanismos de transferência tecnológica que considerem capacidades locais e coprodução de conhecimento. Dessa forma, compreende-se a saúde espacial como campo interdisciplinar e estratégico, apresentando seus principais eixos de atuação e apontando sua relevância para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (UNOOSA, 2024).

Metodologia

A metodologia adotada neste estudo baseia-se em uma revisão narrativa da literatura, conduzida entre junho e agosto de 2025. Foram exploradas bases de dados acadêmicas internacionais, como *PubMed*, *Scopus* e *Web of Science*, além de documentos oficiais produzidos por organismos multilaterais (ONU, OMS, PNUD) e agências espaciais de referência (NASA e ESA). A seleção dos materiais considerou relevância temática, credibilidade institucional e pertinência direta com a interface entre saúde espacial e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Optou-se por não aplicar recortes temporais rígidos, de modo a abarcar tanto os primeiros registros históricos de telemedicina e contramedidas fisiológicas em missões espaciais quanto avanços mais recentes relacionados a biotecnologia, saúde digital e sistemas de suporte à vida.

A segunda etapa metodológica consistiu na triagem, leitura integral e categorização do material identificado. Essa categorização foi organizada em quatro eixos principais: social, ambiental, econômico e institucional, correspondendo às dimensões mais recorrentes na literatura de integração entre saúde espacial e ODS. Para cada eixo foram extraídas informações sobre tipos de tecnologias ou protocolos, contexto espacial de origem (ISS, missões análogas, simulações em microgravidade), mecanismos de transferência para cenários terrestres e indicadores de impacto relatados. Essa sistematização permitiu comparar estudos de diferentes áreas, integrando evidências dispersas em uma narrativa coerente e abrangente.

Por fim, aplicou-se uma análise integrativa, buscando não apenas descrever os achados, mas também avaliar convergências, lacunas e tendências futuras. A análise foi guiada por perguntas centrais: (i) de que forma tecnologias e práticas derivadas da saúde espacial têm contribuído para metas específicas dos ODS? (ii) quais barreiras de acesso, governança e financiamento limitam sua aplicação em escala global? (iii) quais agendas de pesquisa e cooperação internacional se mostram prioritárias para ampliar os impactos positivos identificados? A resposta a essas questões foi construída

de maneira crítica, combinando a síntese da literatura revisada com recomendações oriundas de relatórios técnicos e documentos de políticas globais.

Resultados

A revisão da literatura evidenciou que a saúde espacial tem produzido contribuições concretas em múltiplas dimensões, confirmando sua relevância como campo interdisciplinar e estratégico. No eixo social, destacam-se a telemedicina, os sistemas de monitoramento remoto e os dispositivos portáteis de diagnóstico, todos inicialmente testados em astronautas e hoje aplicados em comunidades isoladas e em crises humanitárias. Essas tecnologias ampliam o acesso a serviços de saúde, reduzem desigualdades territoriais e fortalecem políticas de saúde ocupacional (Nicogossian *et al.*, 2001; Dietrich *et al.*, 2018). A literatura revisada mostra ainda que os aprendizados obtidos em missões espaciais sobre isolamento e confinamento têm sido aplicados em estratégias de suporte psicossocial e educação em saúde, favorecendo a resiliência de populações em situações extremas. Além disso, a inclusão de mulheres e grupos diversos em missões espaciais e análogas trouxe avanços importantes na compreensão de riscos diferenciados e no fortalecimento da equidade (Hughes-Fulford *et al.*, 2024). Esse movimento de inclusão impacta positivamente a formulação de políticas públicas voltadas à diversidade e amplia o acesso a carreiras científicas, reduzindo assim desigualdades históricas.

Na dimensão ambiental, tecnologias de suporte à vida como o *Water Recovery System* e módulos de reciclagem de ar e nutrientes mostram grande potencial de adaptação a cenários terrestres, contribuindo para mitigação de crises hídricas e para a gestão sustentável de recursos (Pnud; Oms, 2022; De Micco *et al.*, 2023). A literatura indica que a adaptação desses sistemas para comunidades sem acesso a saneamento pode reduzir drasticamente a incidência de doenças de veiculação hídrica. Além disso, satélites e sistemas de sensoriamento remoto desempenham papel essencial no monitoramento climático, auxiliando na prevenção de desastres naturais e na formulação de políticas de resiliência (Redvers, 2021). Essas contribuições reforçam o vínculo entre inovação espacial e sustentabilidade ambiental, mostrando como soluções inicialmente desenvolvidas para ambientes confinados podem inspirar projetos de cidades resilientes e de agricultura sustentável em solos degradados.

No campo econômico, os resultados indicam a geração de empregos altamente qualificados em biomedicina, fisioterapia aeroespacial e engenharia de suporte à vida. Essa criação de postos de trabalho reflete não apenas a expansão de novas áreas do conhecimento, mas também a formação de cadeias produtivas associadas à inovação. *Spinoffs* de tecnologias desenvolvidas para missões espaciais impactam diretamente setores como saúde digital, alimentos e energia, estimulando a inovação e a competitividade global (Williams *et al.*, 2009; Ross-Nazzari, 2015). Além disso, empresas privadas têm utilizado o *know-how* derivado da saúde espacial para desenvolver produtos comerciais voltados ao bem-estar e à longevidade, ampliando o alcance social dessas tecnologias. Modelos de economia circular baseados em sistemas fechados de reciclagem, testados em habitats espaciais, também estão sendo adaptados a cadeias produtivas terrestres (Krittanawong *et al.*, 2023; Asrar; Chapman, 2025), contribuindo para práticas mais limpas e sustentáveis em escala industrial.

Por fim, a dimensão institucional evidencia o papel das alianças globais, da diplomacia científica e da cooperação internacional no avanço da saúde espacial. Programas multilaterais como a Agenda Space 2030 reforçam a importância de parcerias para democratizar o acesso a essas inovações e garantir seu uso pacífico e sustentável (Unoosa, 2024; Santomartino *et al.*, 2023). Essa dimensão envolve ainda a criação de marcos regulatórios comuns, a padronização de protocolos de pesquisa em ambientes extremos e a integração de países em desenvolvimento em grandes projetos internacionais. Tais esforços fortalecem a governança global e asseguram que os benefícios da saúde espacial não fiquem restritos a poucos países, mas possam ser compartilhados de forma equitativa, promovendo justiça social e colaboração científica em escala planetária.

Discussão

A análise dos resultados permite afirmar que a saúde espacial transcende os limites da biomedicina para se consolidar como vetor de inovação sistêmica em prol do desenvolvimento sustentável. Ao mesmo tempo em que tecnologias derivadas de missões espaciais oferecem soluções práticas para a Terra, observa-se a necessidade de superar barreiras relacionadas a custos, regulação e

desigualdades de acesso entre países desenvolvidos e em desenvolvimento (Kanas; Manzey, 2022). Tais obstáculos limitam a escala de implementação e reforçam a urgência de estratégias de financiamento inclusivas, baseadas em mecanismos multilaterais e parcerias público-privadas. Além disso, a falta de harmonização entre legislações nacionais sobre o uso de tecnologias espaciais dificulta a cooperação em larga escala e atrasa a implementação de inovações em contextos locais.

Outro aspecto fundamental refere-se à avaliação dos impactos de longo prazo. Apesar dos benefícios já evidenciados, faltam estudos longitudinais que mensurem efeitos socioeconômicos, ambientais e culturais da aplicação dessas tecnologias em comunidades vulneráveis. Questões éticas também se destacam, incluindo a privacidade de dados em sistemas de monitoramento remoto, a segurança cibernética dos dispositivos utilizados e os riscos ambientais da exploração espacial. Para enfrentar tais dilemas, recomenda-se a formulação de marcos regulatórios robustos que conciliem inovação e responsabilidade socioambiental, acompanhados de instrumentos de governança que assegurem transparência, participação social e fiscalização independente (Asrar; Chapman, 2025).

O fortalecimento de programas de formação e a ampliação de redes internacionais de pesquisa configuram-se como caminhos prioritários para a democratização do acesso. Iniciativas de capacitação em países em desenvolvimento, bolsas de estudo e missões análogas acessíveis permitem a inserção de novos atores e fortalecem a cooperação interdisciplinar. A cooperação Sul-Sul e o intercâmbio de tecnologias entre países em desenvolvimento podem reduzir assimetrias históricas e acelerar a adoção de soluções inovadoras, reforçando a dimensão inclusiva da saúde espacial (Le Roy *et al.*, 2023). Nesse contexto, a criação de plataformas globais de partilha de dados e de programas conjuntos de pesquisa poderá acelerar a difusão do conhecimento e potencializar impactos em escala planetária.

Conclusão

A análise final deste estudo reforça que a saúde espacial deve ser compreendida como um campo interdisciplinar capaz de contribuir de maneira decisiva para o avanço dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. As evidências reunidas demonstram que tecnologias inicialmente desenvolvidas para missões espaciais, como sistemas de telemedicina, protocolos de monitoramento fisiológico e estratégias de reciclagem de recursos, têm aplicabilidade direta em cenários terrestres de vulnerabilidade. Essas soluções não apenas ampliam o acesso à saúde e promovem maior segurança alimentar e hídrica, como também abrem caminhos para políticas públicas mais resilientes e inclusivas. No entanto, para que tais benefícios sejam plenamente alcançados, torna-se necessário superar barreiras estruturais, como altos custos de implementação, lacunas regulatórias e desigualdade no acesso entre países com diferentes níveis de desenvolvimento.

Em complemento, este estudo conclui que a integração entre ciência espacial e desenvolvimento sustentável deve ser entendida como investimento estratégico no futuro coletivo da humanidade. A construção de marcos regulatórios globais, o fortalecimento da cooperação internacional e a ampliação de programas de capacitação são passos essenciais para democratizar o acesso a essas inovações. Ao mesmo tempo, é imprescindível que governos e instituições assumam compromissos de longo prazo para transformar a saúde espacial em ferramenta de equidade social, justiça ambiental e progresso tecnológico. Assim, reafirma-se que investir no espaço é, sobretudo, investir em soluções concretas e duradouras para os desafios que a Terra enfrenta no presente e enfrentará nas próximas décadas. seu artigo respeitando a data limite para tal, que será rigorosamente respeitada.

Referências

ASRAR, F. M.; CHAPMAN, H. J. Innovative use of space-based technologies to address climate change and related global health crises. **The Journal of Climate Change and Health**, v. 21, p. 100406, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joclim.2024.100406>.

DE MICCO, V.; AMITRANO, C.; MASTROLEO, F.; ARONNE, G.; BATTISTELLI, A.; CARNERO-DIAZ, E.; DE PASCALE, S.; DETRELL, G.; DUSSAP, C. G.; GANIGUÉ, R.; JAKOBSEN, Ø. M.; POULET, L.; VAN HOUT, R.; VERSEUX, C.; VLAEMINCK, S. E.; WILLAERT, R.; LEYS, N. Plant and microbial science and technology as cornerstones to Bioregenerative Life Support Systems in space. **npj Microgravity**, v. 9, n. 1, p. 69, 24 ago. 2023. DOI: [10.1038/s41526-023-00317-9](https://doi.org/10.1038/s41526-023-00317-9).

DIETRICH, D.; DEKOVA, R.; DAVY, S.; FAHRNI, G.; GEISSBÜHLER, A. Applications of space technologies to global health: scoping review. **Journal of Medical Internet Research**, v. 20, n. 6, e230, jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.2196/jmir.9458>.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). INTERNATIONAL SPACE STATION (ISS). **Energy systems and solar arrays.**, 2023. Disponível em: https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/International_Space_Station/Energy.

HUGHES-FULFORD, M.; CARROLL, D. J.; ALLAWAY, H. C. M.; DUNBAR, B. J.; SAWYER, A. J. Women in space: A review of known physiological adaptations and health perspectives. **Experimental Physiology**, 2 nov. 2024. DOI: 10.1113/EP091527

KANAS, N.; MANZEY, D. **Space psychology and psychiatry**. 3. ed. Springer, 2022.

KRITTANAWONG, C.; SINGH, N. K.; SCHEURING, R. A.; URQUIETA, E.; BERSHAD, E. M.; MACAULAY, T. R.; KAPLIN, S.; DUNN, C.; KRY, S. F.; RUSSOMANO, T.; SHEPANER, M.; STOWE, R.P.; KIRKPATRICK A.W.; BRODERICK, T.J.; SIBONGA, J.D.; LEE, A.G.; CRUCIAN, B.E.; Human health during space travel: State-of-the-art review. **Cells**, v. 12, p. 40, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/cells12010040>.

LE ROY, B.; MARTIN-KRUMM, C.; PINOL, N.; DUTHEIL, F.; TROUSSELARD, M. Human challenges to adaptation to extreme professional environments: A systematic review. **Neuroscience and Biobehavioral Reviews**, v. 146, p. 105054, mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2023.105054>.

MAIWALD, V.; SCHUBERT, D.; QUANTIUS, D. ZABEL, P. From space back to Earth: supporting sustainable development with spaceflight technologies. **Sustain Earth**, v. 4, p. 3, 2021.

NASA. Powering spacecraft and habitats: the role of clean energy in space exploration. Disponível em: <https://www.nasa.gov>. Acesso em: 17 ago. 2025.

NICOGOSSIAN, A. E.; POBER, D. F.; ROY, S. A. Evolution of telemedicine in the space program and earth applications. **Telemedicine Journal and e-Health**, v. 7, n. 1, p. 1-15, 2001. DOI: 10.1089/153056201300093813.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD); ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). Innovative water purification technologies for humanitarian settings. Geneva, 2022. Disponível em: <https://www.undp.org/publications>.

ROSS-NAZZAL, J. "From farm to fork": How space food standards impacted the food industry and changed food safety standards. In: WHITFIELD, J. (Ed.). **NASA's contributions to food technology**. Washington, DC: NASA, 2015. (NASA SP-2015-4803, p. 220-236).

SANTOMARTINO, R.; AVERESCH, N. J. H.; BHUIYAN, M.; COCKELL, C.S.; COLANGELO, J.; GUMULYA, Y.; LEHNER, B.; LOPEZ-AYALA, I. McMAHON, S.; MOHANTY, A.; SANTA MARIA, S.R.; URBANIAK, C.; VOLGER, R.; YANG, J.; ZEA, L. Toward sustainable space exploration: a roadmap for harnessing the power of microorganisms. **Nature Communications**, v. 14, p. 1391, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37070-2>.

UNITED NATIONS OFFICE FOR OUTER SPACE AFFAIRS.(UNOOSA) The "Space2030" Agenda: Space as a driver of sustainable development. Vienna, 26 jan. 2024. (ST/SPACE/88). Disponível em: https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2024/stspace/stspace88_0_html/st_space-088E.pdf. Acesso em: 25 ago. 2025.

Agradecimentos

*A Ciência do **NANO** e seu impacto transformador no **MACRO***

Os autores agradecem ao Instituto Geração de Marte (IGM), à Universidade Federal do Maranhão (UFMA) campus São Luís, à Metasense, além de todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.