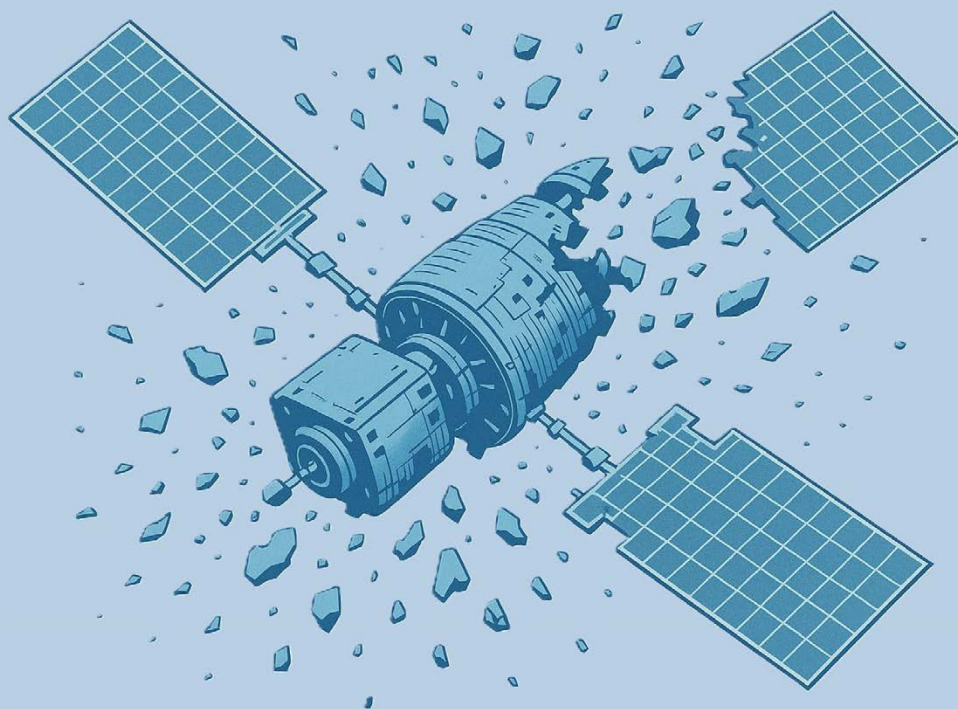


INFORME DE POLÍTICAS

Sostenibilidad del entorno orbital: desafíos y oportunidades para España



El presente documento destaca algunas de las ideas más importantes debatidas en las dos mesas redondas del encuentro *Diálogos ciencia y política para el asesoramiento científico: la reentrada de satélites, efectos ambientales y de gobernanza*, celebrado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales el pasado 9 de abril de 2026. La elección por parte del Grupo de Trabajo para el Asesoramiento Científico al Gobierno de la reentrada de satélites como protagonista de la jornada se debe a sus potenciales impactos medioambientales y de gobernanza.

El informe de políticas *La reentrada de satélites: efectos ambientales y gobernanza* es una publicación del Grupo de Trabajo para el Asesoramiento Científico al Gobierno, compuesto por la Confederación de Sociedades Científicas de España (COSCE), la Conferencia de Rectores de Universidades Españolas (CRUE), la Federación de Asociaciones Científico Médicas Españolas (FACME), el Instituto de España (IdE) y la Alianza de Centros Severo Ochoa y Unidades María de Maeztu (SOMMa), y presidido por la Oficina Nacional de Asesoramiento Científico (ONAC) y la Oficina Nacional de Prospectiva y Estrategia (ONPE).



Ha sido elaborado mediante la autoría y coordinación del académico de número de la Real Academia de Ingeniería de España y responsable científico de Navegación de la Agencia Espacial Europea (ESA), Javier Ventura. Y su publicación ha contado con la colaboración de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT).



Salvo que se indique lo contrario, se autoriza la reutilización de este documento bajo la licencia **Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)** <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>.

Esto significa que se permite la reutilización siempre que se otorgue el crédito adecuado y se indiquen los posibles cambios realizados.

Para cualquier uso o reproducción de fotografías u otro material que no sea propiedad del autor, deberá obtenerse el permiso directamente de los titulares de los derechos de autor.

Más información en www.onac.gob.es

AUTOR

Javier Ventura-Traveset Bosch, académico de número de la Real Academia de Ingeniería de España y responsable científico de Navegación de la Agencia Espacial Europea (ESA).

EXPERTOS

Diálogo 1: Sostenibilidad del entorno espacial: reentrada de satélites y gobernanza nacional e internacional

- **Ana Judith Martín de la Fuente**, secretaria del Consejo Interministerial de Organismos Modificados Genéticamente (CIOMG) de la Dirección General de Producciones y Mercados Agrarios del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- **Diego Vicente Orzáez Calatayud**, investigador científico en el Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas Primo Yufera (CSIC-UPV).

Diálogo 2: Innovación para la sostenibilidad de los servicios satelitales

- **Teresa Riesgo**, secretaria general de Innovación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MICIU).
- **Eduardo Antonio Ahedo Galilea**, catedrático de ingeniería aeroespacial de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M).

Resumen ejecutivo

La sostenibilidad del entorno orbital se ha convertido en un requisito esencial para garantizar que las actividades espaciales se desarrollen de forma segura, económicamente viable, justa y respetuosa con el medio ambiente, y con una protección adecuada para los observatorios astronómicos, y todo ello en un contexto de un crecimiento sin precedentes del sector. La proliferación de satélites impulsada por el despliegue de grandes constelaciones (denominadas megaconstelaciones) y la creciente participación de actores privados han incrementado significativamente la presión sobre determinadas regiones orbitales, especialmente la órbita terrestre baja.

En la actualidad, miles de satélites activos, tanto públicos como privados, conviven con otros miles de objetos inactivos y millones de fragmentos de residuos espaciales. Esta situación aumenta cada vez más los riesgos para la seguridad de las operaciones espaciales, la sostenibilidad de las infraestructuras críticas dependientes del espacio y la preservación a largo plazo del entorno orbital. Entre los principales desafíos destacan el aumento de la probabilidad de colisiones (el riesgo de fenómenos de cascada colisional, conocidos como síndrome de Kessler, que podrían provocar un colapso de la órbita baja terrestre, especialmente entre los 500 km y los 700 km de altitud), la creciente complejidad de la gestión del tráfico espacial y el incremento de maniobras evasivas; los impactos, riesgos de seguridad y efectos de contaminación atmosférica asociados a las reentradas atmosféricas; y la necesidad de garantizar un acceso equitativo y sostenible a los recursos orbitales.

Ante esta situación, resulta clave reducir tanto la cantidad total de residuos y objetos inactivos que ya se encuentran en órbita, como garantizar la sostenibilidad de las nuevas misiones, minimizando la generación de nuevos residuos espaciales. Este objetivo puede abordarse mediante múltiples estrategias, las cuales abarcan ámbitos tan diversos como la generación de conocimiento en torno a la aerodinámica de las reentradas, la actualización del marco regulatorio para adaptarlo a la nueva realidad del sector, la modernización de la gestión del tráfico espacial, la implementación de criterios de economía circular, el análisis de impacto durante todo el ciclo de vida, los nuevos enfoques de vigilancia y monitorización y la puesta en marcha de mecanismos de mitigación y eliminación activa de residuos, entre otros.

Todas estas estrategias se engloban en tres dimensiones clave de la actividad espacial: la ambiental, la de innovación y la de gobernanza. Este informe de políticas analiza los principales retos y las oportunidades para España en estas dimensiones. De este análisis se desprende que, a pesar de los desafíos existentes, el país se encuentra en una posición privilegiada para impulsar avances y aprovechar las oportunidades asociadas a las necesidades de sostenibilidad orbital gracias a su capacidad científica e industrial consolidada, a su participación activa en programas europeos de referencia, al desarrollo de marcos normativos propios, a la disponibilidad de infraestructuras estratégicas de vigilancia y seguimiento espacial, y a su implicación en misiones y proyectos de vanguardia.

1. Introducción

Desde el lanzamiento de Sputnik 1 en 1957, el número de satélites en órbita ha experimentado un crecimiento muy significativo, especialmente durante la última década. Esto ha provocado un considerable incremento de la ocupación del entorno espacial cercano, donde miles de satélites activos conviven con una cantidad similar de objetos inactivos y millones de fragmentos de residuos espaciales. Esto se debe a que, en ausencia de intervención, los residuos no desaparecen, sino que se acumulan progresivamente.

Esta acumulación de objetos en órbita ya ha causado, al menos, 650 eventos de

fragmentación¹, explosiones, colisiones y anomalías que han generado aún más residuos espaciales, en un círculo vicioso que cada vez se vuelve más problemático. Actualmente, la Agencia Espacial Europea (ESA) estima² que la órbita terrestre alberga unos 54.000 objetos de tamaño superior a 10 cm (incluyendo satélites activos), alrededor de 1,2 millones de fragmentos entre de 1 cm y 10 cm, y hasta 140 millones de partículas entre 1 mm y 1 cm. Además, es importante destacar que incluso los fragmentos más pequeños representan un riesgo significativo debido a sus elevadas velocidades orbitales, lo que puede provocar daños severos sobre satélites operativos y otras infraestructuras espaciales.



Figura 1: estadísticas recientes (enero 2026) sobre la situación del entorno espacial. **Fuente:** ESA.

1. European Space Agency (ESA) (2025), *ESA's Annual Space Environment Report 2025*, ESA Space Debris Office, European Space Operations Centre (ESOC), Darmstadt, Germany, Issue 9.1, October 2025.

2. European Space Agency, *Space Debris by the Numbers*, ESA, https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers.

2. Dimensión ambiental

La creciente proliferación de megaconstelaciones podría elevar el número de satélites activos hasta los entre 50.000 y 100.000 en 2030³. En este contexto, la retirada de los satélites al final de su vida útil mediante reentradas controladas y su consiguiente desintegración en la atmósfera se ha vuelto indispensable para garantizar la sostenibilidad del entorno orbital y minimizar el riesgo de impactos en superficie mediante el enfoque de diseño para la destrucción (design for demise). Por ello, en los próximos años se espera que este proceso aumente de forma significativa, con proyecciones que apuntan a entre cuatro y cinco reentradas por hora al final de la década frente a las aproximadamente dos diarias que se producen en la actualidad.

Si estas proyecciones se cumplen, las reentradas diarias aumentarían hasta un 6.000% sobre las cifras actuales, lo que, dado su posible impacto atmosférico, suscita una creciente preocupación. Esto se debe a que la desintegración de los satélites y la ablación de los materiales que los constituyen libera compuestos químicos cuya acumulación podría alterar la composición de la atmósfera. Aunque este impacto ambiental es uno de los riesgos menos visibles de la actividad espacial, podría convertirse en uno de los más significativos, principalmente al aluminio, que representa cerca del 40% de la masa de la mayoría de los satélites y vehículos espaciales.

Al alcanzar la mesosfera (entre 50 km y 85 km de altitud), la ablación experimentada por los satélites y las etapas superiores de los cohetes lanzadores provoca el desprendimiento de partículas de este metal, que pueden seguir descendiendo hacia la estratosfera (entre 20 km y 50 km de altitud). De hecho, en 2023, vuelos de la NASA a 19 km de altitud detectaron presencia de metales de origen claramente antropogénico en el 10% de las partículas de aerosol estratosférico analizadas⁴.

A diferencia del hierro, presente de forma natural en el polvo meteorítico, las partículas de aluminio pueden catalizar la activación del cloro atmosférico, lo que impacta en la capa de ozono y altera las propiedades de los aerosoles estratosféricos que influyen en el clima terrestre. Además, la deposición de material reentrante ablacionado, enfocada en las regiones polares por la circulación atmosférica, puede aumentar significativamente la concentración en superficie de ciertos metales pesados como el cobre en ecosistemas polares y marinos, con sus consecuentes impactos ambientales. Solo con el despliegue completo de las constelaciones ya planificadas para 2035-2040, se estima que la masa antropogénica reentrante se aproximará a la de origen meteorítico natural, lo que podría suponer un punto crítico para la química estratosférica y el balance radiativo⁵.

3. Leonard Schulz, Karl-Heinz Glassmeier, Moritz Herberhold, Adam Mitchell, Daniel M. Murphy, John M.C. Plane, Ferdinand Plaschke, *Space waste: An update of the anthropogenic matter injection into Earth's atmosphere*, Advances in Space Research, Volume 77, Issue 9, 2026, Pages 9589-9616, ISSN 0273-1177, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2026.03.026>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117726003509>

4. D.M. Murphy, M. Abou-Ghanem, D.J. Cziczo, K.D. Froyd, J. Jacquot, M.J. Lawler, C. Maloney, J.M.C. Plane, M.N. Ross, G.P. Schill, & X. Shen, *Metals from spacecraft reentry in stratospheric aerosol particles*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 120 (43) e2313374120, <https://doi.org/10.1073/pnas.2313374120> (2023), <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2313374120>

5. L. Schulz, K.-H. Glassmeier, M. Herberhold, A. Mitchell, D.M. Murphy, J.M.C. Plane, & F. Plaschke, *Space waste: An update of the anthropogenic matter injection into Earth's atmosphere*, Adv. Space Res., <https://doi.org/10.1016/j.asr.2026.03.026> (2026), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117726003509>

La información disponible sobre reentradas proporciona una base sólida para impulsar acciones de mitigación de riesgos. Sin embargo, la aerodinámica y la termoquímica de las reentradas (que incluye fragmentación, ablación y transferencia de calor) y la química atmosférica de las sustancias liberadas presentan aún importantes áreas de incertidumbre científica. Los modelos de predicción actuales se fundamentan en experimentos a pequeña escala realizados en túneles de alta entalpía, cuya extrapolación a fenómenos de escala real comporta limitaciones que afectan a la precisión de los resultados. Cerrar esta brecha de conocimiento ofrecería una predicción más precisa de los riesgos y un diseño de soluciones más eficientes.

2.1 Oportunidades y recomendaciones ambientales

La brecha de conocimiento en torno a los procesos químico-físicos que gobiernan las reentradas hace que una de las principales vías para impulsar la sostenibilidad del entorno orbital consista en adquirir el

máximo conocimiento posible sobre todos los aspectos del proceso. Con este objetivo, España participa activamente en la investigación sobre tecnologías y efectos de las reentradas través de la misión DRACO (Destructive Reentry Atmospheric Characterization Observer), liderada por la Agencia Espacial Española (AEE) e Indra-Deimos en el marco de la ESA.

Se trata de una misión espacial diseñada para destruirse de forma controlada durante su reentrada para poder recoger datos en tiempo real que permitan estudiar el fenómeno. Se trata de un hito metodológico, ya que no solo estudiará cómo se destruye un satélite, sino también en qué productos se transforma. Con su lanzamiento previsto en 2027 a bordo del cohete de la empresa española PLD Space, DRACO situará a España como uno de los actores internacionales de referencia en modelización de reentradas.

Dentro de esta misión, el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) está llevando a cabo experimentos para caracterizar la desintegración del aluminio



Figura 2: concepción artística de la misión DRACO de la ESA. **Crédito:** ESA.

en condiciones mesosféricas mediante espectroscopía de emisión desde aeronaves. Estas pruebas permitirán, por primera vez, cuantificar qué fracción del metal pasa a fase gaseosa (la más relevante para los impactos atmosféricos) y cuál permanece en forma particulada.

Otro aspecto ambiental clave para la sostenibilidad orbital radica en el propio diseño de los satélites. Hasta ahora, este diseño se ha centrado en optimizar su rendimiento, su coste y su tiempo de desarrollo, por lo que no incorpora criterios de sostenibilidad ambiental ni evaluaciones del ciclo de vida completo de forma sistemática sistemática, incluidas estrategias para minimizar su impacto sobre los lugares de observación astronómica y radioastronómica. Por ello, otra forma de limitar el impacto ambiental de las reentradas y de toda la operativa espacial en general reside en implementar opciones más sostenibles en todos los puntos posibles del proceso. Con este objetivo, España acogerá, en cooperación con la ESA, un centro de análisis del ciclo de vida espacial (*life cycle assessment*, o LCA) y ecodiseño para evaluar el impacto ambiental

de toda la actividad espacial, desde la fase de diseño hasta la reentrada. Esta iniciativa sitúa a España a la vanguardia de una tendencia global: integrar la sostenibilidad en la fase de concepción de los proyectos, no como requisito de cumplimiento final, sino como criterio de diseño desde el inicio.

Por último, el paradigma de lanzar, operar y desechar que ha dominado la industria espacial también está siendo cuestionado por sus insostenibles implicaciones ambientales y económicas. Frente al procedimiento habitual de usar y tirar, surge la economía circular espacial. Se trata de un conjunto de aproximaciones que van desde la extensión de la vida útil de satélites mediante servicios de reabastecimiento en órbita (ya operativos en algunos casos comerciales) hasta la reparación, el reciclaje de componentes e incluso la fabricación orbital. La reutilización de cohetes, que hace una década resultaba impensable y hoy se ha convertido en el estándar operativo de SpaceX, ilustra que los planteamientos en apariencia futuristas pueden volverse normativos en la industria en pocos años.

RECOMENDACIONES AMBIENTALES

- Impulsar la investigación científica sobre la ablación atmosférica de materiales aeroespaciales y sus productos de degradación, así como con el desarrollo de modelos que permitan estimar con más rigor el impacto ambiental global de las reentradas, tomando como referencia la evidencia generada por misiones internacionales pioneras en este ámbito, como DRACO.
- Fomentar la incorporación de metodologías de análisis de ciclo de vida y de principios como el de “no causar un perjuicio significativo” (*do no significant harm*, DNSH) en la evaluación y certificación de materiales y proyectos espaciales, para lograr estándares de sostenibilidad basados en datos verificables.
- Promover el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías con menor huella atmosférica, así como capacidades orientadas a la economía circular en órbita (reabastecimiento, extensión de vida útil y reciclaje).
- Aprovechar el conocimiento científico y las capacidades industriales existentes para impulsar la innovación en servicios en órbita (*on-orbit servicing*) que aceleren la sostenibilidad del ecosistema sostenible.

3. Dimensión de innovación

Otra vía de avance hacia la sostenibilidad del entorno orbital reside en la innovación tecnológica, un campo que ofrece múltiples líneas de investigación y desarrollo con potencial complementario. Estas líneas abarcan desde tecnologías de manipulación y reubicación de objetos orbitales, concebidas para trasladar residuos a órbitas de menor

densidad o facilitar su reentrada controlada (retirada activa de residuos), hasta proyectos de demostración que exploran nuevos materiales, procesos de fabricación y estrategias operativas orientadas a mejorar la sostenibilidad integral del entorno orbital a lo largo de todo el ciclo de vida de las misiones.



Figura 3: principales ejes estratégicos de mitigación frente a la problemática de la basura espacial. **Fuente:** ESA

El principal reto en el ámbito de la innovación es la dicotomía entre lo técnicamente posible y lo viable a nivel operativo y económico. Por ejemplo, aunque muchas tecnologías de eliminación activa de residuos espaciales han alcanzado niveles de madurez tecnológica (TRL) suficientes para su demostración, el despliegue operativo todavía enfrenta barreras importantes. Esto provoca que el coste actual de estas misiones siga siendo un factor limitante: estudios y estimaciones sitúan el seguimiento y retirada de un único objeto de gran tamaño en cifras que pueden superar varios cientos de millones de euros,

mientras que los modelos de negocio que permitirían su viabilidad comercial todavía se encuentran en una fase temprana de desarrollo.

Avanzar hacia esa viabilidad económica requerirá una reducción sustancial de los costes. En este contexto, el diseño óptimo de misiones multiobjetivo y reutilizables constituye una línea de acción clave, donde la reducción del consumo de combustible mediante tecnologías de propulsión eficiente (como la propulsión eléctrica de alto impulso específico) se perfila como uno de los

enfoques más prometedores para que estas misiones puedan escalar al ritmo que exige el creciente desafío de la sostenibilidad del entorno orbital.

Otro problema especialmente acusado en España es convertir el conocimiento científico en innovación industrial. Los grupos de investigación con capacidades relevantes en materiales aeroespaciales, propulsión eléctrica, aerotermodinámica, dinámica orbital y modelización atmosférica no siempre tienen mecanismos eficaces para conectar con las empresas que puedan desarrollar industrialmente esas capacidades. Esta brecha resulta especialmente crítica en la sostenibilidad orbital, de nuevo, asolada por una velocidad de escalado tecnológico insuficiente.

En cuanto a la seguridad de las operaciones de aproximación y contacto para la retirada activa de residuos, los retos principales residen en el desarrollo de sistemas autónomos de guiado, navegación y control. Dichos desarrollos requieren tecnologías avanzadas de LIDAR y visión óptica, algoritmos de control robusto (apoyados en inteligencia artificial), y el desarrollo de potentes ordenadores que tengan un bajo consumo y una alta resistencia a la radiación.

3.1 Oportunidades y recomendaciones en innovación

La primera gran oportunidad para la sostenibilidad del entorno orbital está en las tecnologías de eliminación activa de residuos. Estas se dividen en tres grandes categorías con diferentes niveles de madurez y casos de aplicación.

1. Tecnologías de contacto: son aquellas en las que los objetos satelitales son capturados físicamente y trasladados a una órbita final (cementerio o próxima a reentrada). En este campo, los brazos robóticos representan el enfoque más avanzado, y también el mejor alineado con aplicaciones de servicio en

órbita. Son adecuados para residuos de gran tamaño y su reto principal para una captura exitosa es el posible movimiento descontrolado del satélite inactivo. Misiones como Adras-J de Astroscale y ClearSpace-1 de la ESA (en la que participan empresas europeas) demostrarán próximamente la captura de objetos reales en órbita. Por su parte, España lidera la misión CAT (CAPture Payload Bay), que busca demostrar un modelo más viable y escalable de retirada activa de residuos mediante satélites previamente preparados para su captura.

Para que estas misiones se vuelvan comercialmente sostenibles, la futura infraestructura espacial deberá incorporar, desde la fase de diseño, interfaces y estándares comunes para el desorbitado, así como servicios orbitales. España ya ha avanzado en esta dirección con las interfaces MICE (*Mechanical Interface for Capture at End-of-Life*), instaladas en satélites de Copernicus. La misión de demostración se lanzará en 2030 y aspira a probar una retirada activa más sencilla, segura y económica, capaz de reducir la complejidad de las operaciones y de abrir el camino a un mercado comercial de retirada de residuos y servicios en órbita.



Figura 4: ClearSpace-1, la primera misión europea de retirada activa de basura espacial. **Crédito:** ESA.

2. Tecnologías sin contacto: estas dependen de otras fuerzas para mover los objetos satélites y su ventaja diferencial es que eliminan el riesgo de colisión accidental durante la captura. Hay dos tecnologías principales, ambas con un nivel de madurez intermedio. La primera es el Ion Beam Shepherd, una tecnología de origen español, desarrollada en las Universidades Politécnica y Carlos III de Madrid, que desorbita suavemente un satélite inactivo mediante el empuje generado por un chorro de plasma emitido desde un satélite 'pastor' situado a entre 10 m y 20 m de distancia. La segunda requiere el impacto de un rayo láser sobre el satélite, que puede actuar a baja potencia mediante presión fotónica, o a alta potencia, aprovechando el empuje que crea el material ablacionado. El equipo del rayo láser puede estar en Tierra, en un satélite o en un globo en la estratosfera. Esta última tecnología está siendo investigada en la Universidad de Sevilla.

3. Kits de desorbitación pasiva: como velas de frenado aerodinámico y amarras electrodinámicas de frenado magnético. Ambas tecnologías han alcanzado un nivel de desarrollo de demostración en órbita. El concepto de las amarras electrodinámicas también es de origen español y actualmente se está desarrollando en la Universidad Carlos III de Madrid. Ambos tipos de kits pueden integrarse fácilmente en el diseño original de los satélites para facilitar su reentrada autónoma, o acoplarse a satélites inactivos y desplegarse. Esta segunda opción resultar especialmente prometedora si el desarrollo de los servicios en órbita va acompañado de una estandarización del diseño de los satélites que incluya conectores y placas de acoplamiento universales.

Todas estas tecnologías y los retos que afrontan para culminar su desarrollo e implantación abren la puerta a múltiples oportunidades al alcance del sistema científico-industrial español.

Otra oportunidad clave para España en el ámbito de la innovación reside en su red de infraestructuras científico-técnicas singulares (ICTS), que puede convertirse en un activo estratégico para atraer empresas internacionales que necesiten probar materiales, componentes o sistemas en condiciones representativas de la reentrada. Ley 15/2010, de 10 de diciembre, de prevención de la contaminación lumínica y del fomento del ahorro y eficiencia energéticos derivados de instalaciones de iluminación, y las infraestructuras astronómicas singulares disponibles en Canarias (en cuya financiación participan decenas de países) añaden una dimensión adicional: España también puede liderar la protección del entorno orbital desde la perspectiva de la preservación y protección del patrimonio astronómico a través de sus ICTS y del Foro Europeo de Estrategia sobre Infraestructuras de Investigación.

RECOMENDACIONES EN INNOVACIÓN

- Impulsar las misiones de demostración de tecnologías de eliminación activa de residuos que han demostrado viabilidad técnica en contextos académicos para acelerar su transición hacia aplicaciones operativas.
- Promover líneas de investigación en sistemas de propulsión eficiente y sistemas autónomos de control que contribuyan a reducir el consumo de combustible y mejorar la precisión de las operaciones de reentrada para impulsar la escalabilidad económica.
- Impulsar el desarrollo conceptual de misiones multiobjetivo y plataformas reutilizables de servicio orbital para distribuir costes y optimizar la eficiencia operativa de las campañas de eliminación de residuos a largo plazo.
- Facilitar nuevos modelos de negocio viables para los servicios de eliminación de residuos espaciales, que incluyan marcos de responsabilidad compartida para incentivar a los operadores de satélites a participar activamente en la gestión del ciclo de vida de sus activos orbitales.
- Fomentar la consolidación de capacidades científico-técnicas especializadas en sostenibilidad orbital (materiales aeroespaciales, aerotermodinámica, química atmosférica y sistemas de propulsión) a través de programas de investigación colaborativos que atraigan talento y recursos internacionales hacia este ámbito emergente.

4. Dimensión de gobernanza

El marco regulatorio que rige las actividades espaciales fue diseñado durante la Guerra Fría, cuando el número de actores era reducido y casi exclusivamente gubernamental. En la actualidad, aquella arquitectura jurídica, dominada por tratados de las Naciones Unidas de las décadas de 1960 y 1970, se enfrenta a un entorno radicalmente distinto: centenares de actores privados, miles de satélites en órbita y una interdependencia creciente entre los servicios espaciales y la economía global. El resultado es una gobernanza fragmentada, voluntarista y con escasa capacidad vinculante.

El Tratado del Espacio Exterior de 1967 establece principios fundamentales, como la no apropiación de cuerpos celestes y la prohibición de armas de destrucción masiva en órbita, pero no contempla la gestión cotidiana del tráfico orbital, la responsabilidad de los operadores privados ni los estándares de diseño de satélites. A esto se suma una fragmentación entre las recomendaciones de la ONU, las normativas nacionales de potencias espaciales como Estados Unidos, Francia y China, y los marcos voluntarios de agencias como la ESA.

El resultado es que una misma colisión potencial puede generar una alerta en un sistema europeo, pero no en otros del mundo, lo que subraya la ausencia de estándares operativos comunes. Además, en algunas regiones del mundo se está produciendo una tendencia hacia la desregulación, lo que genera una presión competitiva a la baja: si Europa impone requisitos estrictos de sostenibilidad y otros actores no lo hacen, las empresas europeas podrían verse en desventaja sin que el entorno orbital mejore globalmente.

La regulación en sostenibilidad orbital enfrenta así una disyuntiva estructural: normas más exigentes elevan los estándares

medioambientales, pero pueden penalizar a las industrias que las adoptan si no son universalmente aplicadas. Esta tensión es especialmente acuciante en el ámbito de las megaconstelaciones, donde el tiempo de despliegue y el coste por satélite son factores competitivos decisivos.

A todo esto, hay que sumar el vacío regulatorio sobre la mesosfera, la capa atmosférica donde se produce gran parte de la ablación, la cual no está protegida por ningún convenio internacional. Esto la convierte en un espacio indefinido entre la normativa aeronáutica (hasta 30 km, poco después del fin de la estratosfera) y la legislación espacial (desde entre 80 km y 90 km, donde empieza la termosfera). Dado que la circulación atmosférica transporta esos materiales desde la mesosfera hacia la estratosfera, este vacío tiene implicaciones directas sobre la capa de ozono y el equilibrio radiativo del planeta.

Por otro lado, aunque el escenario ideal es que las reentradas se produzcan de manera controlada, mediante precisas maniobras de desorbitación para dirigir los restos hacia áreas seguras y deshabitadas (normalmente en el océano), puede suceder que el satélite pierda propulsión, por lo que su órbita decae de forma natural por la resistencia atmosférica y la gravedad, dando lugar a una reentrada no controlada.

Otro fenómeno que promueve las reentradas no controladas son las tormentas solares, un evento de meteorología espacial capaz de expandir la atmósfera superior y, en consecuencia, provocar la reentrada prematura e incontrolada de satélites en la órbita baja. Un ejemplo significativo tuvo lugar en febrero de 2022, cuando una tormenta geomagnética provocó la pérdida de 38 de los 49 satélites Starlink lanzados por SpaceX, que reentraron prematuramente

en la atmósfera antes de alcanzar su órbita operacional⁶.

En todos estos casos, el punto exacto de caída se determina de forma probabilística, lo que genera un riesgo residual para las personas, las infraestructuras en superficie y la aviación, cuya magnitud debe ser evaluada y mitigada mediante mecanismos apropiados de seguimiento y gestión. Aunque la probabilidad de impacto en áreas pobladas es estadísticamente muy baja hoy, el incremento en el número de reentradas eleva el riesgo agregado. España ya ha puesto en marcha un estudio para evaluar

4.1 Oportunidades y recomendaciones en gobernanza

Con el objetivo de reforzar la gobernanza de las actividades espaciales y dar respuesta a los nuevos desafíos del sector, España está tramitando una Ley de Actividades Espaciales

(impulsada por la AEE y los Ministerios de Ciencia, Innovación y Universidades y Defensa), que puede convertirse en una referencia a nivel internacional. Para lograrlo, debería incorporar requisitos de sostenibilidad vinculantes (desde el diseño hasta el fin de vida), estándares para la reentrada controlada y mecanismos de evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida completo. En paralelo, la Comisión Europea también está avanzando con su propia Ley del Espacio, que será complementada con la ley española.

Otra oportunidad reside en la iniciativa internacional Zero Debris Charter⁷ (o Carta de Cero Residuos), liderada por Europa, que busca promover una profunda transformación de las prácticas espaciales con el objetivo de limitar al máximo la generación de nuevos residuos orbitales de aquí a 2030. Aunque la carta no es jurídicamente vinculante, supone un compromiso colectivo de agencias, industrias e instituciones para adoptar medidas ambiciosas y medibles.

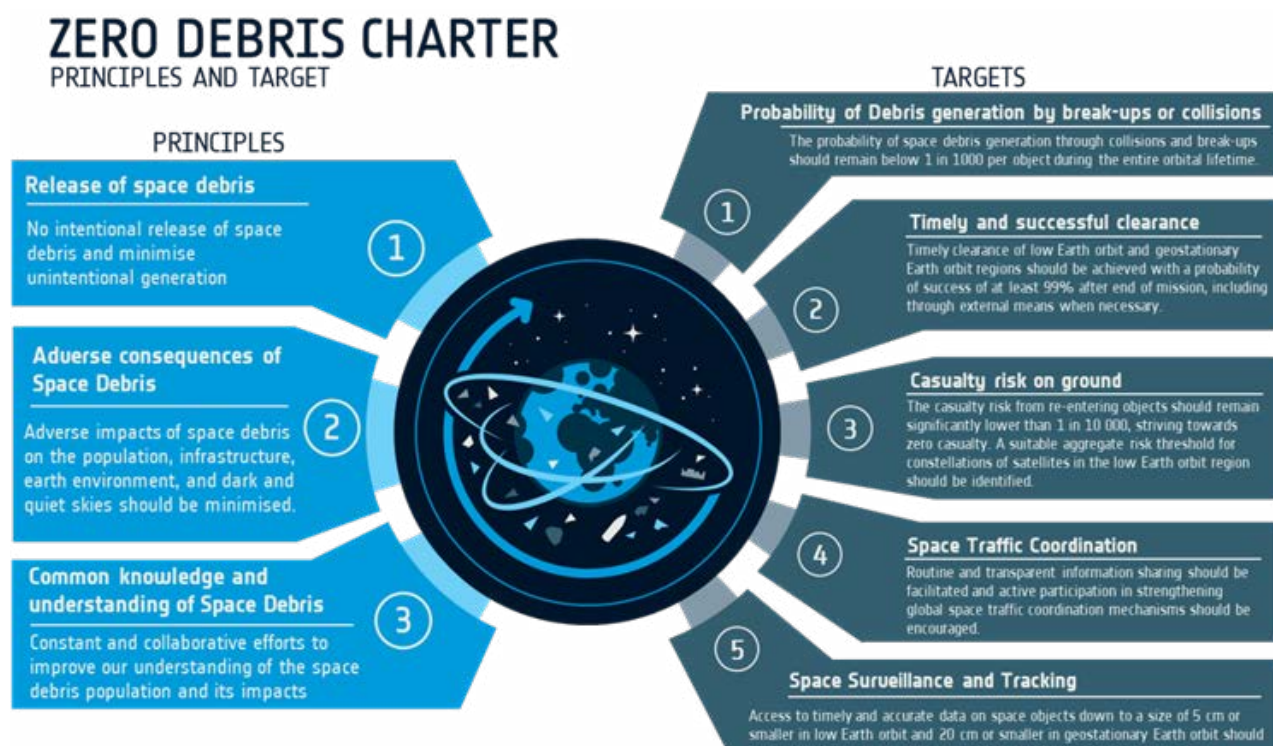


Figura 5: principios fundamentales y objetivos del Zero Debris Charter. **Crédito:** ESA

6. Fang, T.-W., Kubaryk, A., Fuller-Rowell, T.J., Wang, H. and Millward, G., 2022. Space weather environment during the SpaceX Starlink satellite loss in February 2022. Space Weather, 20(11), e2022SW003330. <https://doi.org/10.1029/2022SW003330>

7. European Space Agency (ESA) (2025), Zero Debris Technical Booklet, Zero Debris Community and ESA, European Space Agency. https://esoc.esa.int/sites/default/files/Zero_Debris_Charter_EN.pdf

Entre sus principios fundamentales destacan evitar la liberación intencionada de residuos espaciales, minimizar la generación accidental de fragmentos y la gestión responsable del final de vida de las misiones, incluyendo su retirada segura de la órbita operacional o su reentrada controlada. Estas medidas contribuyen a reducir los riesgos para las operaciones espaciales y a minimizar los posibles impactos sobre la población, las infraestructuras y el medio ambiente terrestre. Aunque España ya se ha adherido a la iniciativa, este apoyo es solo el punto de partida. Su verdadero valor estratégico consiste en transformar los compromisos de adhesión en capacidades operativas y en promover que la iniciativa evolucione de recomendación voluntaria a obligación exigible.

Las capacidades de vigilancia y monitorización de los objetos satelitales se alzan como otro ámbito clave para promover

la sostenibilidad del entorno orbital gracias a su capacidad de mitigar las colisiones indeseadas. En este sentido, España lidera y coordina el consorcio europeo de vigilancia y seguimiento del espacio (S3T, *Spanish Space Surveillance and Tracking*) junto a Francia, Italia, Alemania y Reino Unido. Además de tener su sede operativa en Torrejón de Ardoz, los activos de este consorcio incluyen el radar de Morón de la Frontera y telescopios distribuidos por distintas partes del mundo. En 2027, 12 años después de su inicio, la iniciativa incorporará un radar de tracking de precisión que permitirá el seguimiento de objetos identificados como prioritarios.

Por último, y para prevenir aún mejor las reentradas no controladas a causa de fenómenos como las tormentas solares, la AEE en cooperación con la ESA ha propuesto la creación de un centro español de meteorología espacial (*space weather*).

RECOMENDACIONES EN GOBERNANZA

- Consolidar y promover marcos regulatorios, que establezcan requisitos técnicos de sostenibilidad orbital, desarrollen estándares armonizados para la reentrada controlada dentro de plazos definidos, garanticen la pasivación total de satélites y requieran la evaluación del ciclo de vida completo de las misiones. La coordinación de estos estándares a nivel nacional e internacional, mediante acuerdos multilaterales, resulta esencial para facilitar su integración en los instrumentos regulatorios en desarrollo.
- Fomentar mecanismos de cumplimiento que combinen incentivos positivos, como la elegibilidad preferente en programas de financiación, con sistemas de responsabilidad compartida que vinculen la adhesión a iniciativas de compromiso sectorial con la viabilidad económica y regulatoria de las operaciones espaciales.
- Impulsar la armonización de criterios operativos de seguridad orbital a nivel global en cuanto a umbrales de alerta de colisión, requisitos de auditoría de sostenibilidad, seguros proporcionales al riesgo orbital y límites de densidad orbital por altitud. Estos criterios deben sustentarse en análisis cuantitativos del riesgo de colisión y sus implicaciones para la viabilidad a largo plazo del entorno espacial.
- Fortalecer las capacidades de vigilancia, predicción y monitorización del entorno orbital mediante sistemas integrados que proporcionen alertas tempranas sobre eventos de reentrada no controlada (especialmente aquellos que pudieran afectar a infraestructuras aéreas comerciales) y que conecten datos de meteorología espacial con la planificación operativa de los operadores, mejorando la capacidad de respuesta del ecosistema orbital en su conjunto.

INFORME DE POLÍTICAS

Sostenibilidad del entorno orbital: desafíos y oportunidades para España

www.onac.gob.es