



**DOCUMENTO COMPLEMENTARIO AL INFORME
“SITUACIÓN Y TENDENCIAS EN EL USO DE LA IA EN
EL SECTOR DE LA DEFENSA”**

**Evolución y tendencias del uso de la
inteligencia artificial en el sector
espacial de defensa y seguridad**



Gonzalo León

Catedrático emérito de la UPM

Miembro del Foro de Empresas Innovadoras (FEI)

Septiembre 2025

Tabla de contenido

Resumen ejecutivo	3
1. Objetivos	8
2. Situación del sector espacial militar	15
2.1. Características generales	15
2.2. Competición geopolítica y tecnológica en el espacio entre grandes potencias	21
3. Aplicación de la IA en el sector espacial de defensa	26
3.1. Áreas relevantes de aplicación	26
3.2. Mejora del conocimiento del dominio espacial (SDA)	34
3.2.1. Objetivos generales de SDA	34
3.2.2. Automatización de tareas rutinarias	37
3.2.3. Uso de agentes inteligentes	40
3.2.4. Creación de conjuntos de datos sintéticos	42
3.2.5. Detección de satélites con comportamientos anómalos	45
3.2.6. Previsible evolución de SDA potenciado por IA	47
3.3. Análisis inteligente de imágenes satelitales	48
3.3.1. Relevancia en defensa	48
3.3.2. Optimización de la observación de la Tierra con IA en constelaciones	54
3.4. Defensa de la navegación satelital GNSS	59
3.4.1. Sistemas de navegación satelital	59
3.4.2. Perturbaciones de la señal satelital	62
3.4.3. Uso de la IA para la defensa de la navegación satelital	66
3.5. Ajustes de la órbita para evitar colisiones	72
3.6. Mantenimiento predictivo de satélites	77
3.7. Optimización de comunicaciones militares espaciales	78
3.7.1. Objetivos del uso de la IA para comunicaciones militares espaciales	78
3.7.2. Caso de Starlink en defensa	78
3.7.3. Caso de IRIS ² de la UE	84
3.8. Simulación basada en IA e interoperabilidad de datos espaciales	88
3.9. Plataformas pseudo satelitales a gran altitud	91
3.10. Gemelos digitales de sistemas espaciales	93
3.11. Robótica espacial potenciada por la IA	98
4. Situación de Europa en la IA espacial de defensa	103
4.1. Capacidades europeas en el sector espacial	103
4.1.1. Capacidades europeas en el desarrollo de componentes y sistemas espaciales y su relación la IA	103
4.1.2. Capacidades europeas en el desarrollo de aplicaciones de IA en el sector espacial de la defensa	106

4.2. Capacidades españolas en el sector espacial	110
4.2.1. Sector espacial español	110
4.2.2. Política de defensa espacial española.....	113
4.2.3. Satélite Paz	117
4.2.4. Desarrollo de nuevos satélites militares	118
4.2.5. Apoyo a nuevas empresas de base tecnológica en el sector espacial	121
4.2.6. DAFO de situación de España para el uso de la IA en el sector espacial de la defensa	123
4.3. Impacto del informe Draghi sobre la competitividad europea en el contexto del sector espacial.....	126
5. Evolución previsible de la IA espacial en defensa hasta 2030	130
5.1. Eventos disruptivos	130
5.2. Imbricación de la IA con las tecnologías cuánticas en el espacio.....	132
6. Conclusiones y recomendaciones de actuación	138
6.1. Conclusiones	138
6.2. Recomendaciones	141
7. Referencias	146
ANEXO 1. Listado de acrónimos	153
ANEXO 2. Programas nacionales de espacio.....	156
ANEXO 3. Satélites militares de Francia, Alemania, Italia y Suecia.....	157
ANEXO 4. Ejemplos de proyectos de I+D españoles de uso de IA en el sector espacial.....	158
ANEXO 5. Actividades de la NASA en Inteligencia Artificial	167
ANEXO 6. Evolución de las capacidades de procesamiento a bordo en satélites utilizando IA	169
1. Introducción	169
2. Procesadores específicos para el espacio.....	171

Resumen ejecutivo

La importancia del sector espacial es creciente, tanto en el ámbito civil como en el militar, y alcanza a un número elevado de países. Conscientemente o no, millones de ciudadanos de todo el mundo son usuarios de diversas aplicaciones espaciales. A lo largo de su historia, el sector espacial ha servido de impulso al desarrollo de tecnologías y aplicaciones disruptivas, tanto en el segmento espacial como en el terreno para su control y operación con el desarrollo de plataformas satelitales, aisladas o formando parte de constelaciones, incluyendo la tecnología de lanzadores, así como en el de aplicaciones basadas en la explotación de datos espaciales en múltiples sectores, incluyendo la defensa y seguridad.

Esta relevancia se observa no únicamente en términos cuantitativos en el incremento constante del volumen de mercado, sino también en su relevancia para la sociedad. Baste para ello con referirse a la relevancia que han alcanzado los sistemas de navegación satelital, de la observación del planeta, o de su uso en sistemas de telecomunicaciones satelitales digitales ya sea en órbitas geoestacionarias (GEO) como los basados en órbitas bajas (LEO) mediante constelaciones de decenas o miles de satélites.

Actualmente, más de 20.000 objetos, desde satélites hasta desechos espaciales, orbitan la Tierra, y una oleada de nuevos lanzamientos de satélites comerciales previstos podría triplicar este tráfico en pocos años. Ello conlleva no solo nuevas posibilidades de disponer de aplicaciones civiles y militares más avanzadas, sino también la necesidad de gestionar y proteger un espacio muy poblado con el incremento de riesgos asociados derivados de impactos con otros satélites o desechos espaciales, o de ataques intencionados.

El sector espacial se puede agrupar en tres subsectores con características diferenciadas:

- **Sector civil.** Incluye las actividades espaciales gubernamentales no relacionadas con la defensa, incluido el lanzamiento y la gestión de satélites, la realización de investigaciones científicas y la exploración del sistema solar.
- **Sector de defensa y seguridad nacional.** Los sectores de defensa y seguridad espacial se consideran comúnmente agrupados como un sector de "seguridad nacional" que participan conjuntamente en la operación de activos espaciales con fines de inteligencia tanto para apoyar las operaciones militares como las de aplicación de la ley (seguridad interior y de fronteras).
- **Sector comercial.** Incluye todas las actividades relacionadas con el espacio, incluidos los bienes, servicios y actividades, proporcionados por empresas del sector privado con capacidad legal para ofrecer sus productos a clientes no gubernamentales (ya sean otras empresas o, de forma muy incipiente, a ciudadanos).

Como dato relevante, de los satélites orbitando la Tierra en 2023 el 70% eran militares o de doble uso. Es muy previsible que, dada la situación actual de confrontación geopolítica y de conflictos militares existentes, junto con los procesos de integración del dominio espacial con el terrestre, aéreo y marítimo en los sistemas militares de mando y control desde una perspectiva multidominio, este número se incremente en los próximos años. Concretamente, se estima alcanzar los 2.500 satélites militares en los próximos diez años.

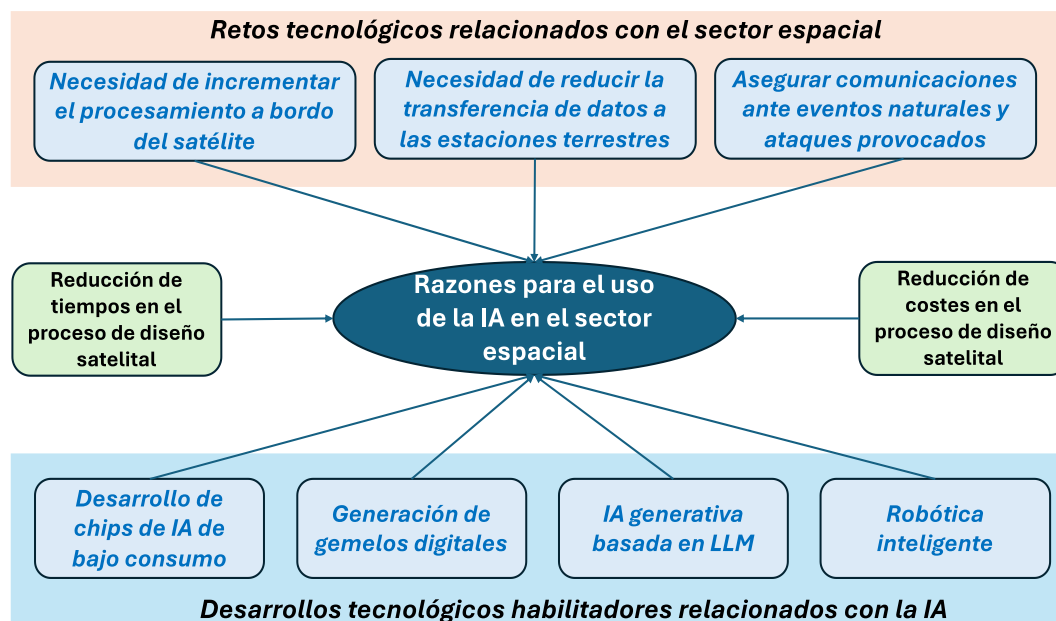
El creciente papel que está jugando la tecnología espacial en los conflictos armados del siglo XXI ha fortalecido la relevancia del espacio: desde las telecomunicaciones, la observación de la Tierra a la navegación espacial, incluyendo el desarrollo de armas cibernéticas o cinéticas espaciales que inhabiliten o destruyan respectivamente a satélites, las grandes potencias se han dotado de organizaciones específicas en sus fuerzas armadas. Este es el caso de Estados Unidos con la creación de la USSF (US Space Force) o el cambio de denominación en España del “Ejército del Aire” a “Ejército del Aire y del Espacio”; mucho más que un mero cambio de nombre.

No es extraño por ello que en la Estrategia Espacial de la UE para Seguridad y Defensa se preste atención preferente a estas amenazas como parte de la Brújula Estratégica de la Unión: “En el contexto geopolítico actual de creciente competencia de poder e intensificación de las amenazas, la UE está tomando medidas para proteger sus activos espaciales, defender sus intereses, disuadir las actividades hostiles en el espacio y reforzar su postura estratégica y su autonomía”.

También el espacio ha sido objeto de atención en el informe Draghi presentado en septiembre de 2024 sobre la necesidad de abordar el reto de la competitividad europea en el que el espacio emerge como un sector clave de carácter dual.

El presente documento tiene como objetivo general analizar la estructura del desarrollo y uso de la inteligencia artificial (IA) en el sector espacial de la defensa y la seguridad, enfatizando el papel que tiene y puede tener en los próximos años. Desde esta perspectiva, se considera a la IA como una tecnología habilitadora cuyo uso será creciente al integrarse en el proceso de desarrollo de objetos espaciales y en múltiples aplicaciones finalistas.

Las razones para el uso de la IA en el sector espacial se indican de forma esquemática en la siguiente figura:



La IA emerge como la tecnología más relevante para abordar los retos tecnológicos propios del sector espacial como el de disponer de mayor capacidad de procesamiento a bordo, reducir inteligentemente la transferencia de datos a tierra, y asegurar las comunicaciones ante eventos naturales o provocados.

Asimismo, se aprovechan desarrollos tecnológicos relacionados con la IA en conjunción con la microelectrónica, la impresión aditiva o la robótica adaptadas al dominio espacial para la mejora del proceso de diseño. El objetivo perseguido es permitir el desarrollo de sistemas espaciales con menores costes y tiempos que empleando los métodos habituales.

En la situación descrita existen muchas áreas de problemas en las que se está explorando el uso de la IA. El siguiente listado resume aquellas en las que se centra el presente documento sin pretender ser exhaustivo, pero aportando diversos ejemplos de uso:

- 1. Mejora del conocimiento del dominio espacial (SDA).*
- 2. Defensa de la navegación satelital.*
- 3. Análisis inteligente de imágenes satelitales.*
- 4. Ajustes automáticos de la órbita para evitar colisiones.*
- 5. Mantenimiento predictivo de satélites.*
- 6. Optimización de comunicaciones militares espaciales.*
- 7. Ciberseguridad espacial.*
- 8. Marcos comunes para la simulación e interoperabilidad de datos espaciales.*
- 9. Integración de IA con tecnologías cuánticas.*
- 10. Desarrollo de gemelos digitales de satélites y sistemas espaciales*

El informe realiza de manera muy preliminar un análisis DAFO (Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades) a las que se enfrenta España para dar un salto cualitativo en sus capacidades de uso de IA en el ámbito del sector espacial de la defensa. Este análisis debe completarse y detallarse para alimentar las recomendaciones que se proponen.

Del presente documento pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- 1. La UE es una potencia espacial reconocida en el contexto mundial con una estrategia pública definida a nivel comunitario y por muchos de los Estados miembros, y apoyada por un sector industrial potente y diversificado, y la existencia de diversos centros públicos de investigación.*
- 2. Los programas comunitarios espaciales de navegación (Galileo), observación (Copérnico) o la constelación IRIS2 en desarrollo para dotar a la UE de servicios de comunicación gubernamentales son exponentes del interés político existente.*
- 3. La existencia de la Agencia Europea del Espacio desde hace décadas, aunque formalmente diferenciada de la UE, se ha constituido en un elemento esencial para el desarrollo, lanzamiento y operación de múltiples plataformas satelitales de alta tecnología para la UE. Sin embargo, su funcionamiento en base a retornos industriales garantizados para sus miembros dificulta conseguir una mayor eficiencia y plazos de actuación reducidos.*
- 4. Persiste una debilidad europea en el acceso al espacio que, basado en Ariane 6 y Vega C, es comparativamente caro (sin cohetes reutilizables) y dependiente de otras potencias, sobre todo de Estados Unidos y, en especial de los cohetes lanzadores de SpaceX (actualmente de Falcon 9 y en el futuro de Starship).*
- 5. El sector europeo espacial de la defensa está fragmentado con múltiples países promoviendo programas basados en su industria nacional y con competencias limitadas por parte de la Comisión Europea. Como ha demostrado la guerra de Ucrania no se dispone de un sistema propio paneuropeo para aplicaciones de seguridad y defensa que alimente la inteligencia militar común (IRIS2 no estará disponible hasta 2030).*

6. *El uso de la IA en el desarrollo de plataformas y cargas útiles (p.ej. mediante gemelos digitales) y en el desarrollo de aplicaciones espaciales (p.ej. de procesamiento de datos como imágenes) depende de tecnologías no europeas en el desarrollo de procesadores a bordo y de herramientas software.*
7. *La creciente relación del espacio con las tecnologías de comunicaciones cuánticas y su integración con la IA s va a acelerar y múltiples empresas europeas han comenzado a participar en desarrollos experimentales con objeto de disponer de sistemas operativos de comunicaciones cuánticas satelitales seguras al final de la presente década.*

Sin pretender ser exhaustivo, el informe ha cubierto algunos ejemplos recientes del uso avanzado de la IA en el dominio espacial de la defensa. Entre ellos, se destacan:

- ✓ *Mejora de la comprensión del dominio espacial en un contexto congestionado de miles de objetos de todo tipo, misión y tamaño.*
- ✓ *Reducción de los peligros de colisión con restos de objetos espaciales, problema creciente cuyas técnicas y procedimientos es necesario automatizar.*
- ✓ *Detección y eliminación de objetos con comportamientos anómalos en constelaciones de miles de satélites en un contexto de militarización del espacio.*
- ✓ *Uso de IA generativa para facilitar la planificación de operaciones espaciales con interacción multimodal del sistema con operadores humanos.*
- ✓ *Uso de aprendizaje automático para la toma de decisión a nivel táctico y estratégico en el sector espacial de la defensa.*
- ✓ *Mejora de la defensa contra ciberataques (interferencias y suplantación) en los sistemas de navegación satelital.*
- ✓ *Desarrollo de gemelos digitales espaciales para acelerar el diseño y las labores de mantenimiento preventivo y aumentativo de los activos espaciales alimentados por grandes conjuntos de datos y técnicas de simulación potenciadas por la IA.*
- ✓ *Uso de la robótica inteligente en el espacio para facilitar la realización de funciones espaciales sin intervención humana con robot fijos o móviles.*

El documento se centra, finalmente, en la situación de la Unión Europea (UE) y, particularmente, en la contribución que pueda hacerse desde España al desarrollo tecnológico de la IA en el espacio con fines militares desde una visión realista. En función de las conclusiones presentadas, y con el objetivo general de reforzar la posición española en el uso de la IA en el sector espacial de la defensa, se proponen las siguientes recomendaciones de actuación para las AAPP y la industria.

- **R1.** *Elaborar un mapa actualizado de requisitos y necesidades de las FAS españolas sobre el uso de la IA en el espacio, por lo menos hasta 2035.*
- **R2.** *Elaborar un mapa actualizado de capacidades duales de la industria y del sector público de investigación de IA en el dominio espacial y su previsible evolución hasta 2035.*
- **R3.** *Poner en marcha un programa de tecnología e innovación específico para incrementar el uso de la IA en el sector espacial en el contexto de la implementación de la Estrategia Tecnológica de la Defensa y del Plan Nacional de la Agencia Española de Espacio para los próximos años.*

- **R4.** *Acelerar el desarrollo de plataformas de diseño apoyadas por la IA para soportar el ciclo de vida digital integrado de sistemas y plataformas espaciales reduciendo los plazos de desarrollo y facilitando el mantenimiento posterior.*
- **R5.** *Financiar el lanzamiento de proyectos espaciales de carácter experimental en el uso de la IA en el espacio de alto riesgo tecnológico con implicación de las FAS que permita construir las capacidades que España requiere para la siguiente década en base a pequeños satélites de validación tecnológica.*
- **R6.** *Incrementar la participación española en programas voluntarios de exploración de tecnologías duales en el espacio implicando el uso de la IA en la Agencia Europea del Espacio (ESA), en el Horizonte Europa (HE), en el Fondo Europeo de la Defensa (EDF) y en la Agencia Europea de la Defensa (EDA) en colaboración con otros socios internacionales europeos.*
- **R7.** *Fortalecer el ecosistema de innovación espacial de la defensa apoyado en el uso dual de la IA con la participación de empresas digitales, startups y centros de investigación alejados hasta ahora del sector espacial.*
- **R8.** *Incrementar la participación en actividades de tecnologías duales disruptivas basadas en el uso de la IA en el marco de la OTAN con impacto en el sector espacial.*
- **R9.** *Explorar la interacción entre la IA y las tecnologías cuánticas en el contexto del despliegue de la red de comunicaciones cuánticas nacional y europea con la máxima participación de la academia, la industria y las FAS.*
- **R10.** *Mejorar la ciberseguridad y resiliencia de los sistemas satelitales desde perspectivas complementarias aprovechando la capacidad de procesamiento a bordo para ejecutar algoritmos de IA.*
- **R11.** *Elaborar directrices éticas para el uso de la IA en defensa espacial, alineadas con la Brújula Estratégica de la UE, con las regulaciones de la OTAN, y con las directrices que emanen del uso responsable de la IA militar (REAIM).*
- **R12.** *Desarrollar la infraestructura tecnológica necesaria para soportar el desarrollo automatizado basado en IA de sistemas espaciales de la defensa.*
- **R13.** *Promover la captura, desarrollo y retención de talento especializado para asegurar que España posee los recursos humanos necesarios y formados para atender las futuras necesidades de desarrollos de IA para el sector espacial de la defensa.*

1. Objetivos

En una sociedad altamente tecnificada como la actual, al menos desde la perspectiva de los países avanzados, la **importancia del sector espacial** es creciente. Aunque sólo un grupo reducido de países poseen las capacidades necesarias para desarrollar, poner en órbita y operar satélites cubriendo toda la cadena de valor, la capacidad de desarrollo y uso de **aplicaciones basadas en la información satelital** tanto en el ámbito civil como en el militar alcanza a un número muy superior de países. Conscientemente o no, **millones de ciudadanos de todo el mundo son diariamente usuarios de aplicaciones satelitales**.

Para la *Comisión Europea* (JOIN, 2023) el **ámbito espacial comprende todo elemento pertinente para el funcionamiento de los sistemas espaciales y la prestación de servicios espaciales en la UE y los Estados miembros**. Esta definición incluye, por ejemplo, el entorno del espacio ultraterrestre, las diversas órbitas y vehículos espaciales y la información conexa sobre los sistemas a los que pertenecen, la infraestructura terrestre y de lanzamiento, los enlaces por radiofrecuencia, las terminales de usuario y los aspectos cibernéticos. También incluye el sector espacial industrial subyacente.

El **sector espacial**, fundamentalmente focalizado en el desarrollo y operación de sistemas espaciales relacionados con el planeta Tierra ha servido de **impulso al desarrollo de tecnologías y aplicaciones disruptivas**. Este hecho se ha producido tanto en el segmento espacial como en el terreno para su control y operación, incluyendo la tecnología de cohetes lanzadores, y tanto en el desarrollo de plataformas satelitales, aisladas o formando parte de constelaciones, como en el de aplicaciones basadas en la explotación de datos espaciales en múltiples sectores, desde la agricultura o el medio ambiente a la defensa y seguridad (O'Connor y Curley, 2025).

Muchas de las tecnologías que sustentan el desarrollo tecnológico en el sector espacial son de **carácter dual**, es decir, utilizables tanto para el desarrollo de productos y servicios en los mercados civiles como en los militares. De hecho, puede considerarse que el sector espacial en su conjunto es un **sector eminentemente dual** en el que las plataformas satelitales, cargas útiles y muchas de las aplicaciones basadas en información satelital tienen un uso civil y militar.

Durante muchas décadas fueron entidades gubernamentales como las **agencias espaciales** nacionales (p.ej. la NASA en Estados Unidos, la ESA en la UE, la CNSA en China, o Roscosmos en Rusia) las que asumieron el protagonismo y la financiación del sector espacial en estrecha interacción con las prioridades geopolíticas de los gobiernos a las que pertenecían, pero con capacidad de definir la hoja de ruta del desarrollo tecnológico necesario dentro de sus límites presupuestarios.

Ha sido en las dos últimas décadas cuando ha emergido con fuerza un **sector comercial del espacio**, primero en el campo de las aplicaciones de datos espaciales, pero que hoy día abarca desde lanzadores, a satélites o constelaciones de satélites, o a misiones lunares. Son ahora las entidades gubernamentales en Europa y Estados Unidos las que han subcontratado múltiples servicios a entidades privadas para lanzar y operar plataformas satelitales.

Históricamente, la evolución tecnológica del sector espacial se ha aprovechado de la capacidad de **cooperación a nivel internacional** impulsando la ciencia espacial como un bien común de la humanidad. El ejemplo que demostró la bondad de este enfoque fue con el desarrollo y operación de la **Estación Espacial Internacional (ISS)** con la de un uso dual ligado a la necesidad de cubrir intereses nacionales de seguridad y defensa.

Este proceso, impulsado inicialmente por el deseo de mejora del conocimiento científico, también empieza a despertar el interés sobre la posible **“explotación” del espacio con fines comerciales**. A ello se añade el reconocimiento de su indudable valor en el posicionamiento geopolítico por parte de las grandes potencias al formar el espacio un dominio más dentro de un enfoque multidominio integrado de la defensa.

Al desarrollo tecnológico específico se han dedicado esfuerzos muy importantes por parte de las agencias espaciales de muchos países desarrollados en una competición por el **desarrollo de la tecnología** y por el **incremento del prestigio** como nación científica y tecnológicamente avanzada que se remonta a mediados del siglo XX entre Estados Unidos y la Unión Soviética en medio de la Guerra Fría, y a la que se incorporó la Unión europea. Ya en el siglo XXI emerge China como potencia espacial y, en menor medida, India, Japón, Corea del Sur y otros países desarrollados.

La relevancia del sector espacial se observa no solo en términos cuantitativos medidos por el **incremento constante del volumen del mercado espacial**, sino también en su **relevancia para la sociedad**. Baste para ello con referirse a la relevancia y penetración que han alcanzado los sistemas de navegación satelital como el GPS o el Galileo, empleados por millones de ciudadanos, de las aplicaciones derivadas de la observación del planeta, o de su uso en los sistemas de telecomunicaciones satelitales digitales ya sea en órbitas bajas (LEO)¹ basada en constelaciones de miles de satélites, como en órbitas medias (MEO), geoestacionarias (GEO), incluso, con el desarrollo de sistemas que posicionan satélites en varias de ellas.

A ello se suma el impacto que la tecnología espacial tiene para permitir la **exploración del espacio profundo**, desde las misiones a la Luna, nuestro satélite natural, hasta el conocimiento de otros planetas, de los satélites que les orbitan en el sistema Solar, o de otros objetos más pequeños, asteroides o cometas, pero con potencial impacto en nuestro planeta. Alienta con ello el deseo del ser humano de **conocer el universo**.

Como ejemplo de la cooperación internacional, la puesta en órbita terrestre de la **“Estación Espacial Internacional” (ISS)**, marco de colaboración durante décadas entre países competidores en muchos otros dominios desde el año 2000², supuso unir sus esfuerzos en una plataforma compartida de experimentación. En la actualidad, se suman los esfuerzos desarrollados por otras potencias emergentes como es el caso de China con

¹ Las órbitas se clasifican por la altitud a la superficie de la Tierra en bajas (entre 150 y 2.000 Km), medias (entre 2.000 y 35.786 km) y geoestacionarias (de 35.768 Km con lo que su periodo es igual al de rotación de la Tierra).

² La ISS es un proyecto de colaboración multinacional entre cinco agencias espaciales participantes: NASA (Estados Unidos), Roscosmos (Rusia), JAXA (Japón), ESA (Europa), y la CSA/ASC (Canadá).

el lanzamiento en 2021 de la estación “**Palacio Celeste**” (*Tiangong*) que ya orbita la Tierra a 450 Km de altura y que puede alojar a tres tripulantes (véase la figura 1) ³.

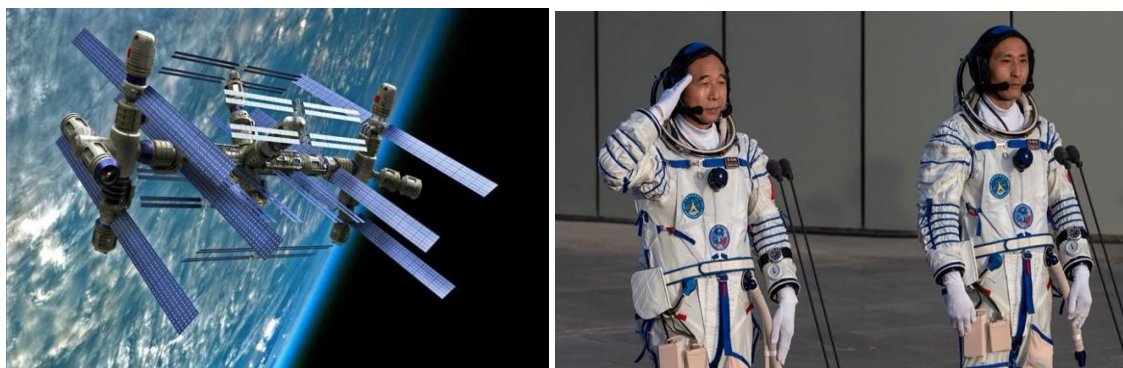


Figura 1. Estación espacial Tiangong de China y astronautas chinos. Fuente: <https://es.wired.com/articulos/china-desafia-a-estados-unidos-con-su-estacion-espacial-tiangong>

Igual que en el caso de la ISS, la estación de China, *Tiangong*, también está **abierta a la cooperación internacional**, pero dadas las crecientes tensiones geopolíticas y el propio proceso de construcción y puesta en órbita de sistemas tecnológicos duales se va a producir una nítida separación entre los países que colaboren en el futuro en la ISS “occidental” o sus sucesoras⁴ (puede que no todos los que cooperen ahora, y es probable que no sea China) y en *Tiangong* en la que, muy probablemente, ni Estados Unidos ni la Unión Europea colaboren en ella.

Desgraciadamente, las tensiones existentes complican esta colaboración espacial y **retrasará el desarrollo científico en el espacio**. No necesariamente ocurrirá así en el tecnológico que tendrá otros impulsores alrededor del planeta Tierra como se analizará en este documento centrado en la aplicación en el espacio de la **inteligencia artificial**.

La evolución de la **relevancia del espacio en el ámbito dual** también se pone de manifiesto en programas ambiciosos de las grandes potencias para la ubicación de **bases permanentes en la Luna**. Tampoco parece que las **futuras bases lunares** se planteen como un impulso a la cooperación internacional abierta en el espacio a pesar de los propósitos iniciales⁵. Lo que sí ocurrirá, como ya ha sucedido en otros grandes programas

³ Comparativamente, solo tiene un 40% del peso de la ISS que con un tamaño mayor puede alojar a siete astronautas. <https://cnnespanol.cnn.com/2023/10/06/china-duplicara-tamano-estacion-espacial-reux>

⁴ No está clara la continuidad de la ISS a partir de 2030 con su reentrada controlada al océano Pacífico en 2031. La NASA ya está trabajando en su reemplazo a través de estaciones espaciales comerciales privadas, como Axiom Space, Starlab y Orbital Reef, que se espera entren en operación a finales de esta década para continuar la presencia humana en órbita baja. El programa *Commercial Low Earth Orbit Destination (CLD)* nació con la idea de garantizar estaciones comerciales certificadas para albergar astronautas de la NASA, pero se encuentra en revisión. <https://newspaceconomy.ca/2025/08/09/the-current-status-of-nasas-commercial-low-earth-orbit-destinations-program/>

⁵ China parece la nación más adelantada, y su *Estación Internacional de Investigación Lunar (ILRS)* en colaboración con Rusia se plantea como un laboratorio abierto con la idea de cooperar con

espaciales, es que servirán de **aceleradores del desarrollo tecnológico** en los que la IA, la robótica o las comunicaciones tendrán un enorme peso⁶. También marcarán en el bloque occidental la forma en la que el sector privado penetra en estos programas con sus propias inversiones y condicionantes.

El carácter dual queda de manifiesto en actuaciones como la iniciada por la agencia militar de Estados Unidos **DARPA** con la puesta en marcha el estudio **LunA-10** (*10-Year Lunar Architecture [Capability Study]*)⁷, cuyos primeros resultados se han publicado en mayo de 2024 (DARPA, 2024). Su objetivo es «desarrollar tecnologías que operen conjuntamente para ofrecer servicios comerciales a futuros usuarios lunares». O sea, tecnologías que permitan mantener una presencia humana en la Luna a largo plazo, como por ejemplo sistemas de transmisión de energía, comunicaciones y transmisión de datos, navegación, plantas para fabricar elementos de una base lunar a partir del suelo lunar, etc. (Marín, 2024).

El desarrollo de tecnología específica que requiere es abrumador e implicará enormes esfuerzos económicos y de recursos humanos como se indica en la figura 2 con algunos ejemplos de comunicaciones, generación de oxígeno o movilidad.

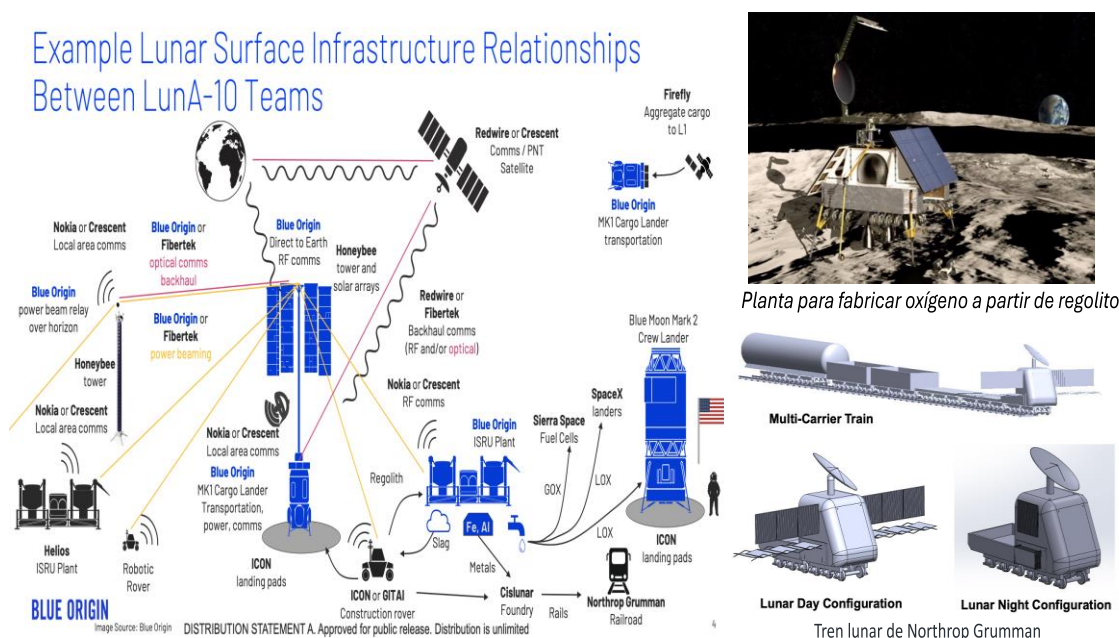


Figura 2. Ejemplos de tecnologías propuestas en el proyecto Lun-A 10 de DARPA. Fuente: <https://www.darpa.mil/research/programs/ten-year-lunar-architecture-luna-10-capability-study>

científicos de otros países (hasta 5.000) a partir de 2035. <https://www.xataka.com/espacio/china-quiere-alajar-a-5-000-cientificos-todo-mundo-su-futura-base-lunar-primeros-a-partir-2035>

⁶ Para darse cuenta de esta ambición tecnológica (y política), la base lunar de China, IRLS que se ubicará en el polo sur lunar, cerca de los depósitos de hielo, contará con viviendas, laboratorios, herramientas de minería espacial, antenas de comunicación y toda una infraestructura energética basada en paneles solares y un reactor nuclear. El video de <https://www.youtube.com/watch?v=pZ5hlWCnYE> con una entrevista a Wu Weirin (diseñador del Programa de Exploración Lunar de China) es bastante explícito de su nivel de ambición.

⁷ <https://www.darpa.mil/research/programs/ten-year-lunar-architecture-luna-10-capability-study>

La NASA ha incluido el desarrollo de la base lunar en su programa **Artemis (Fase IV)**. Después de la misión Artemis III que llevará a las primeras personas cerca del Polo Sur de la Luna, se pretende que los astronautas de **Artemis IV** puedan vivir y trabajar en la primera estación espacial lunar de la humanidad, **Gateway**, lo que permitirá nuevas oportunidades para la ciencia y la preparación para las misiones humanas a Marte⁸.

También, desde la perspectiva europea, la Agencia Europea del Espacio (ESA) ha desarrollado el concepto de **base lunar** como se puede ver en la figura 3, aunque su realización se ve lejos en el horizonte. Por hora Europa se contenta con un simulador (proyecto LUNA)⁹.



Figura 3. Concepto de base lunar de la ESA (impresión artística). Fuente:
https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/07/Artist_impression_of_a_Moon_Base_concept

En las páginas anteriores he querido poner de manifiesto que **el impulso al desarrollo de la tecnología y su adaptación en el espacio** no es una moda ni un proceso de aplicación inmediata, sino que refleja un hecho más profundo y a largo plazo: es la consecuencia del deseo por la humanidad de **“conquistar el espacio” cercano a nuestro planeta e integrarlo en la economía mundial**.

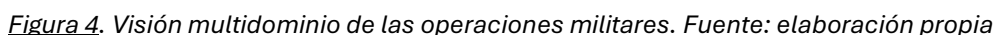
Un elemento clave para comprender la relevancia geopolítica alcanzada por el sector espacial y las limitaciones en la cooperación internacional se basa en que **la tecnología espacial posee un carácter dual**, hecho evidente desde su inicio en el siglo XX. Por ello,

⁸ <https://www.nasa.gov/general/nasas-artemis-iv-building-first-lunar-space-station/>

⁹ La Agencia Espacial Europea (ESA) y el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) inauguraron en septiembre de 2024 LUNA, una instalación de simulación lunar que promete revolucionar la preparación para las misiones tripuladas a la Luna. LUNA recrea de manera realista la superficie lunar y está destinada a entrenar a astronautas y probar tecnologías avanzadas. Facilitará la investigación, el desarrollo y las pruebas integradas de la tecnología espacial en condiciones realistas, proporcionando información valiosa para las próximas misiones lunares. https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/Inauguracion_de_la_instalacion_analogica_lunar_ESA-DLR

La **confrontación geopolítica** (y potencialmente militar) entre EEUU, China y Rusia y, en menor medida, con la UE, y otros países con capacidades espaciales como Corea del Sur, Canadá, India y Japón se unirán en esta confrontación alineándose en diferentes bloques con un **incremento del control de las tecnologías críticas implicadas**. Me parece que la rápida militarización del espacio y la negativa de las grandes potencias a mantener los intereses mundiales globales como primer objetivo mientras impulsan el estado del arte tecnológico espacial, conducirán a incrementar la inestabilidad geopolítica¹⁰.

Desde el punto de vista de la defensa, **el dominio espacial se integra con los dominios clásicos de mar, tierra y espacio**, y con los menos clásicos de ciberespacio y sociocognitivo como se indica en la figura 4 en una **visión multidominio** muy influenciado por la integración de tecnologías maduras y el aprovechamiento de tecnologías duales.



SEPTIEMBRE 2025 13

No se ha pretendido con la elaboración de este documento abordar el problema geopolítico del sector espacial en su conjunto, ni tampoco abordar todas las tecnologías implicadas, pensando en la conquista del espacio exterior, sino en **adoptar una perspectiva tecnológica mucho más focalizada** en el tiempo y uso de la IA.

Concretamente, el presente documento tiene como **objetivo general analizar la estructura del desarrollo y uso de la inteligencia artificial (IA) en el sector espacial de la defensa y la seguridad**, enfatizando el papel que tiene y puede tener en los próximos años. Desde esta perspectiva, se considera a la IA como una tecnología habilitadora cuyo uso será creciente al **integrarse en el proceso de desarrollo de objetos espaciales y en múltiples aplicaciones finalistas**.

Aunque el enfoque inicial es global, el documento se centrará posteriormente en la **situación de la Unión Europea (UE)** y, particularmente, en la contribución que pueda hacerse desde **España** al desarrollo tecnológico de la IA en el espacio con fines militares desde una visión realista. Con ello, se pretenden abordar los siguientes **objetivos específicos**.

- ✓ Analizar las **grandes cifras del mercado espacial en defensa** en el contexto de su uso dual en 2024, y estimar su previsible evolución hasta 2030.
 - Análisis comparativo por regiones.
 - Análisis comparativo por segmentos del mercado.
- ✓ Analizar las **grandes cifras del mercado espacial de la IA en defensa**, y estimar su previsible evolución hasta 2030. Asimismo, y en la medida de lo posible:
 - Análisis comparativo por regiones.
 - Análisis comparativo por segmentos del mercado.
- ✓ Describir las grandes **áreas de aplicación del uso de la IA en el espacio**.
 - Áreas tecnológicas de IA empleadas actualmente.
 - Ejemplos de problemas abordados en cada una de ellas.
 - Evolución previsible hasta 2030.
 - Tendencias tecnológicas relevantes hasta 2030.
 - Estimación de la aparición de eventos tecnológicos disruptivos relacionados con la IA en defensa durante la presente década.
- ✓ Analizar los **actores relevantes y sus interdependencias** en la cadena de valor de sistemas y aplicaciones de la IA en el sector espacial de defensa.
 - Empresas.
 - Debe prestarse atención a que el carácter dual mencionado anteriormente hace que muchos de los actores tengan actividades en el ámbito civil y militar.
 - Universidades y centros de investigación con actividad relevante
- ✓ Determinar la **situación en la UE y su previsible evolución**.
 - Política tecnológica espacial de la UE y de la Agencia Europea del Espacio (ESA) en relación con la IA.
 - Relación con la política de defensa.
 - Capacidades y limitaciones del sector industrial espacial de la defensa europeo.
 - Posicionamiento europeo en el contexto internacional.
 - Posicionamiento español en el contexto europeo e internacional.
- ✓ Extraer **conclusiones** que alimenten la elaboración de **recomendaciones concretas de actuación**.
 - Para la UE.

- Para España.

El documento se complementa con **seis anexos**. El primero incluye una lista de **acrónimos** empleados, el segundo los **programas gubernamentales de espacio** existentes en España, el tercero los **satélites militares** utilizados por algunos países, y el cuarto una **selección de proyectos españoles del sector espacial con uso relevante de la IA**. En el quinto anexo se describen los **proyectos de la NASA** relacionados con la IA, y en el sexto la evolución de las **capacidades de procesamiento a bordo**.

2. Situación del sector espacial militar

2.1. Características generales

El sector espacial se puede agrupar en **tres subsectores** con características diferenciadas: **civil**, de **seguridad nacional** para su uso en defensa e inteligencia, y **comercial** ya sea en modelos de negocio entre empresas (B2B) o para proporcionar servicios comerciales a un consumidor final (B2C).

Cada subsector citado opera con sus propios objetivos y activos, aunque dependen de una **base industrial, de talento cualificado y de infraestructura espacial** que puede ser común en base a la caracterización dual de muchas de las tecnologías implicadas y a la necesidad de optimizar los recursos de operación y explotación¹¹.

- **Sector civil.** Incluye las actividades espaciales gubernamentales no relacionadas con la defensa, incluido el lanzamiento y la gestión de satélites, la realización de investigaciones científicas y la exploración del sistema solar.
 - En todos los países suelen existir unidades gubernamentales orientadas al espacio. En los Estados Unidos, casi todas las misiones espaciales civiles son administradas o dirigidas por la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio) y la NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica).
 - En la UE la organización depende de cada país, pero suelen coordinarse por agencias nacionales focalizadas en el espacio y, especialmente, con el apoyo de la Agencia Europea del Espacio (ESA), aunque formalmente no sea una entidad de la UE.
 - En el caso español, la reciente creación de la Agencia Española del Espacio y la existencia de algunos centros específicos ligados al espacio y la defensa como es el INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) proporcionan la base de apoyo gubernamental.
- **Sector de defensa y seguridad nacional.** Los sectores de defensa y seguridad espacial se consideran comúnmente agrupados como un sector de "seguridad nacional" que participan conjuntamente en la operación de activos espaciales con fines de inteligencia tanto para apoyar las operaciones militares como las de aplicación de la ley (seguridad interior y de fronteras).
 - En el caso de los Estados Unidos es el Departamento de Defensa quien supervisa las misiones espaciales en apoyo de las operaciones militares, junto a varias agencias de la comunidad de inteligencia del país y la NASA.

¹¹ https://www.spacefoundation.org/space_brief/space-sectors/

- En el caso de la UE, la Comisión Europea dispone desde hace unos años de la Dirección General de Industria de Defensa y Espacio (DEFIS) que se encarga de la competitividad y la innovación de la industria europea de defensa garantizando la evolución de una base tecnológica e industrial fuerte en la UE.
- **Sector comercial.** Incluye todas las actividades relacionadas con el espacio, incluidos los bienes, servicios y actividades, proporcionados por empresas del sector privado con capacidad legal para ofrecer sus productos a clientes no gubernamentales (ya sean otras empresas o, de forma incipiente, a ciudadanos como es el acceso directo al satélite para comunicaciones móviles desde los teléfonos del usuario final).
 - Las actividades espaciales de carácter comercial van desde el desarrollo de componentes y sistemas en programas espaciales gubernamentales o no, el lanzamiento o la operación de sistemas espaciales, la provisión de servicios de comunicación por satélite, los de explotación de datos para diversos sectores (p.ej. agricultura, medio ambiente), hasta recientemente, el incipiente turismo espacial.

Actualmente, más de **20.000 objetos**, desde satélites hasta desechos espaciales, orbitan la Tierra, y una oleada de nuevos lanzamientos de satélites comerciales previstos podría triplicar este tráfico en pocos años. Ello conlleva no solo nuevas posibilidades de actuación civil y militar, sino también el **incremento de riesgos asociados** derivados de impactos con los desechos espaciales.

La situación actual del sector espacial se caracteriza por un **interés creciente del espacio en defensa y seguridad** aprovechando el desarrollo y empleo de tecnologías duales que ha permitido reducir costes y acelerar el desarrollo de nuevos satélites, sondas y vehículos robóticos de exploración al espacio profundo. Como dato relevante, de los satélites orbitando la Tierra en 2023 el 70% eran militares o de doble uso. Solamente **en 2023 se lanzaron 107 satélites militares con lo que su número total supera los 900.**

Es muy previsible que, dada la situación actual de confrontación geopolítica y de conflictos militares existentes, junto con los procesos de **integración del dominio espacial con el terrestre, aéreo y marítimo en los sistemas militares de mando y control desde una perspectiva multidominio**, este número se incrementa en los próximos años, se estima alcanzar los 2.500 satélites militares en los próximos diez años.

Esta evolución del sector espacial también se refleja desde un punto de vista económico. La figura 5 presenta en grandes cifras la **situación del mercado del sector espacial en defensa y seguridad** en el año 2023¹².

Las grandes cifras indicadas en la figura 5 implican un volumen global de negocio de **58.400 millones de dólares de Estados Unidos**¹³ en el año 2023 de los que los ingresos de la industria alcanzaron los 40.200 millones de dólares incluyendo no solo satélites, sino

¹² Debe tenerse en cuenta que existen diferencias apreciables entre los datos presentados por los diferentes informes consultados por el Grupo de Trabajo para la elaboración de este documento. En todo caso, se trata de información abierta dado que no se ha adquirido ni encargado ningún estudio específico.

¹³ Si no se indica nada en contra, las referencias a dólares en el presente informe se corresponderán con dólares de Estados Unidos.

también servicios, operaciones y terminales de usuario. La distribución del volumen de mercado por países refleja una **situación fuertemente concentrada en unos pocos países**: Estados Unidos, China, Rusia, y Francia, seguidos a bastante distancia por Japón, Reino Unido, la UE (programas comunitarios), y Alemania.



<https://nova.space/press-release/global-space-defense-and-security-investment-set-to-continue-major-growth-trend-over-coming-decade/>

Figura 5. Volumen del mercado global del sector espacial militar en 2023. Fuente: <https://nova.space/press-release/global-space-defense-and-security-investment-set-to-continue-major-growth-trend-over-coming-decade>

Centrando el análisis en los aspectos clave del **mercado de satélites militares** en 2024 existen discrepancias apreciables entre los informes consultados. Como ejemplo, el informe de “*The Business Research Company*” estima que en 2024 se han alcanzado los 63.600 millones de dólares y estima que en 2028 se alcanzarán los 74.400 millones de dólares con un CAGR moderado del 4% (véase figura 6);

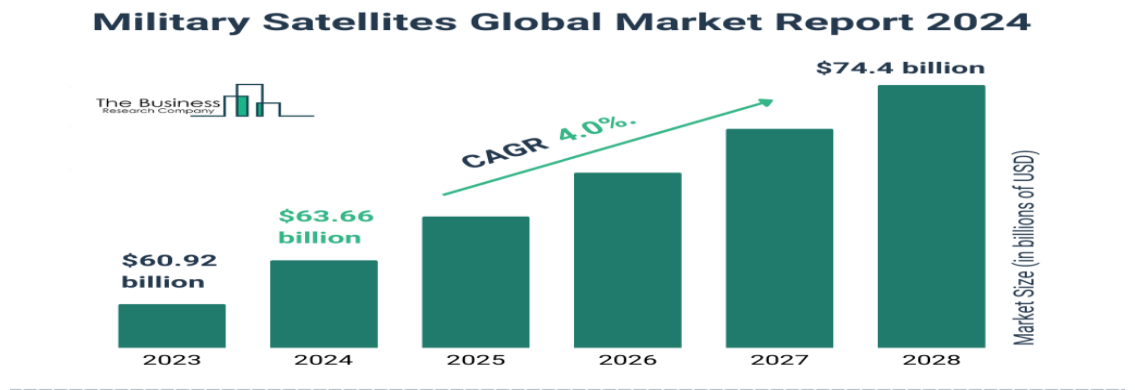


Figura 6. Mercado global de satélites militares en 2024. Fuente: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/military-satellites-global-market-report>

No es muy distinta de la situación estimada por la consultora “markets and markets” hasta 2030, año en el que espera que se alcancen los 88.600 millones de dólares con una CAGR del 7,4% (véase la figura 7).

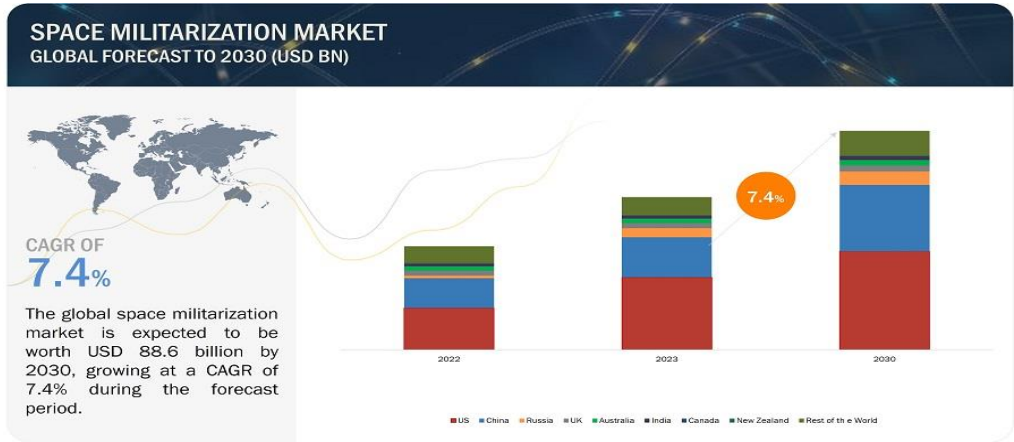


Figura 7. Evolución estimada del mercado espacial de defensa. Fuente:
<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/space-militarization-market-145370586.html>

Se observa en la figura que el peso de Estados Unidos y China es muy superior a los demás países en los que no aparece explícitamente la UE. Otros informes como el de *Precedence Research* estiman cifras más bajas.

Para *Fortune Business Insights* el **tamaño mundial del mercado de satélites militares** se valoró en 17.110 millones de dólares US en 2024. Se espera que el mercado crezca a 18.440 millones en 2025 y alcance los 30.020 millones para 2032 a una tasa compuesta anual de 7.2% más de 2025-2032. **América del Norte dominó el mercado de satélites militares con una cuota de mercado de 38.28% en 2024.** En la figura 8 puede verse la distribución de este mercado por tipo de órbita. La mayor parte de los satélites de uso militar estaban en 2024 en órbita baja (LEO).

Global Military Satellite Market Share, By Orbit Type, 2024

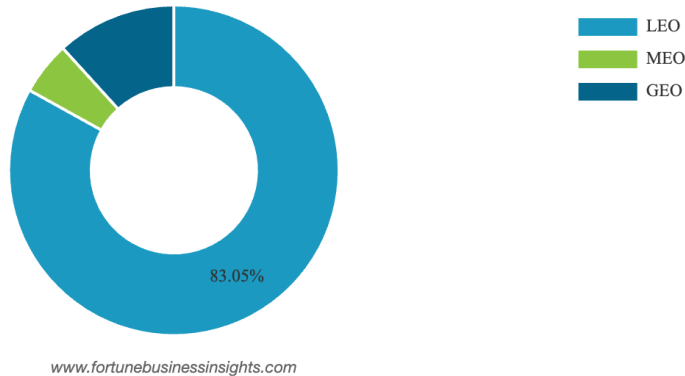


Figura 8. Mercado de satélites militares por tipo de órbita. Fuente:
<https://www.fortunebusinessinsights.com/es/military-satellite-market-106401>

Finalmente, referido a los países de la OCDE (OECD, 2023), la figura 8 (arriba) muestra la clasificación de satélites por su uso. La mayor parte son de **uso comercial**, aunque debe

tenerse en cuenta que los catalogados como “*gobierno*” suelen ser de uso dual civil y militar. En la figura 9 se ve la clasificación por los diferentes usos.

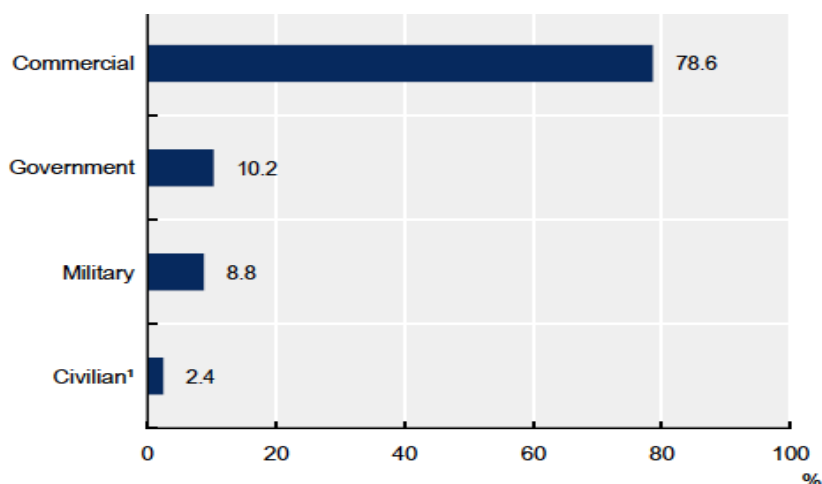


Figura 9. Distribución de satélites por objetivo en 2022. Fuente: OECD (2023)

El mayor número de satélites se corresponde con **satélites pequeños** (“*smallsats*”) con una masa en el lanzamiento entre 181 y 500 Kg situados en órbitas bajas¹⁴. Dado el proceso de miniaturización de las tecnologías implicadas, este tamaño permite incorporar las **cargas útiles** necesarias para la mayor parte de las misiones espaciales en defensa de observación o de comunicaciones. Los satélites militares sólo suponían en 2022 el 8,8% del número total.

El crecimiento más alto del segmento de satélites pequeños (CAGR más alta) se debe a la **creciente demanda de pequeños satélites para las capacidades C4ISR de las fuerzas de defensa en todo el mundo**. Los países están realizando grandes inversiones en constelaciones satelitales pequeñas para misiones de seguimiento de misiles de comunicación segura y aplicaciones de reconocimiento basadas en el espacio.

No se trata sólo de un esfuerzo por parte de potencias espaciales como China y Estados Unidos. Muchos otros países están intentando disponer de satélites militares de vigilancia lo más pronto posible aprovechando mejoras tecnológicas y menores costes. En muchos casos, estos satélites pequeños se lanzan para **vigilancia militar de zonas geográficas concretas**. Por ejemplo, en diciembre de 2024, Corea del Sur anunció sus planes para lanzar su tercer satélite de reconocimiento militar utilizando un cohete SpaceX como parte de su iniciativa para desplegar cinco satélites espía para 2025 para una mayor vigilancia de Corea del Norte¹⁵. También en febrero de 2025, el gobierno del Reino Unido firmó un contrato de aproximadamente 166,8 millones de dólares con Airbus para la fabricación y

¹⁴ Una órbita terrestre baja (LEO) es, como su nombre indica, una órbita que está “relativamente cerca de la superficie de la Tierra”. Normalmente se encuentra a una altitud de menos de 1000 km, pero podría ser tan baja como 160 km.

https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/03/Low_Earth_orbit

¹⁵ El satélite contará con sensores de radar de apertura sintética (SAR) para la monitorización en todo tipo de condiciones meteorológicas, con pequeños satélites que pesan menos de 500 kg programados para el lanzamiento entre 2026 y 2028.

<https://www.fortunebusinessinsights.com/es/military-satellite-market-106401>

desarrollo del sistema satelital **Oberon** con dos satélites de 400 Kg con radares de apertura sintética (SAR) diseñados para inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR) basados en el espacio que estarán operativos en 2027¹⁶. Completará con ellos las capacidades ISR con el satélite **Tyche** lanzado en 2024¹⁷ y se completará con nuevos lanzamientos hasta 2031.

También España ha anunciado en 2025 el comienzo del programa de desarrollo de dos satélites de observación denominados **Paz-2** dotados con radares SAR que fabricará **Airbus**. El primero de ellos entrará en servicio en 2031¹⁸.

La **evolución en el número de objetos espaciales** es muy rápida por lo que la gravedad del problema también. Las últimas estadísticas disponibles de la ESA (julio de 2025) indican que hay 54.000 objetos espaciales mayores de 10 cm (incluyendo aproximadamente 9.300 activos). Además, flotan en el espacio 1,2 millones de desechos espaciales entre 1 y 10cm y 140 millones entre 1mm y 1cm. En la figura 10 (arriba) puede verse su evolución en el tiempo atendiendo al **origen del objeto espacial**, y en la figura 10 (abajo) esta misma evolución atendiendo a la **masa del objeto**.

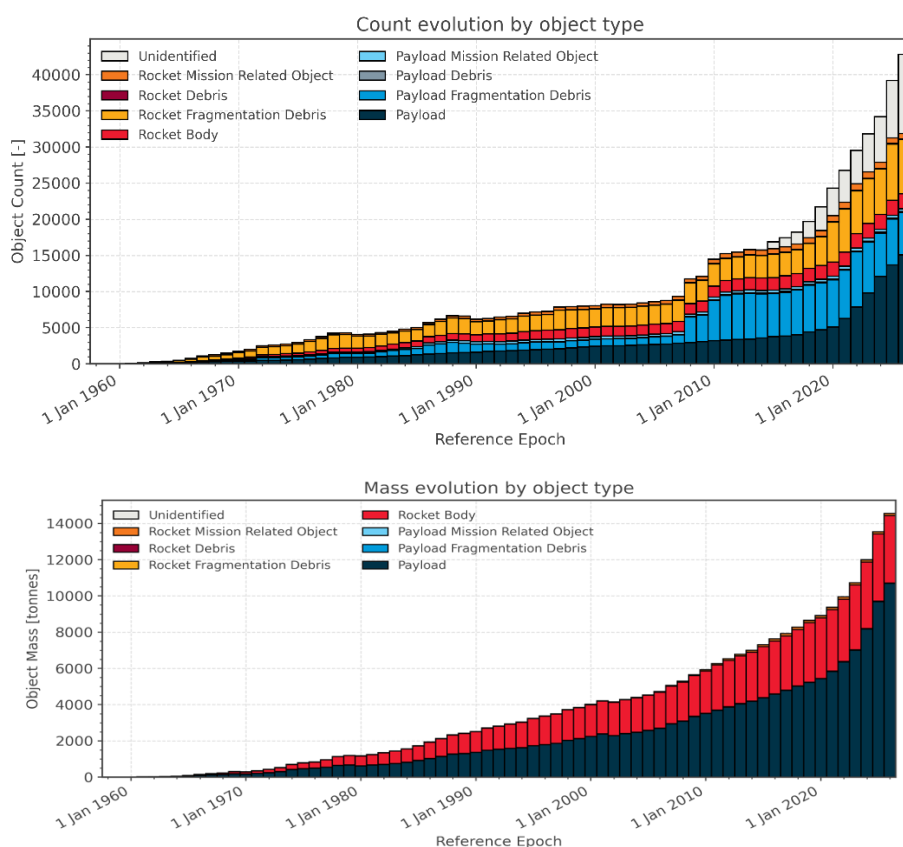


Figura 10. Evolución en el tiempo de objetos espaciales. Arriba: tipo de objeto. Abajo: masa del objeto. Fuente: <https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics/>

¹⁶ <https://delta13news.com/reino-unido-adjudica-a-airbus-el-contrato-de-los-satelites-oberon/>

¹⁷ <https://www.gov.uk/government/news/uk-space-command-successfully-launches-first-military-satellite>

¹⁸ <https://www.defensa.com/espana/airbus-seleccionada-hisdesat-para-liderar-desarrollo-fabricacion>

De acuerdo con los datos de 2025 de la **Oficina de las Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Exterior** (*United Nations Office for Outer Space Affairs*), 2025, el total acumulado de satélites lanzados al espacio entre 1957 y 2017 fue de 7.997. Este número se compara con los 8.221 satélites lanzados al espacio entre principios de 2022 y finales de 2024¹⁹.

2.2. Competición geopolítica y tecnológica en el espacio entre grandes potencias

Desde el inicio de la denominada “*carrera espacial*” a mediados del siglo XX, la **militarización del espacio** siempre ha sido un tema candente a pesar de que ha sido considerado por las Naciones Unidas como un espacio abierto a la cooperación y a la paz.

A nivel mundial, el **Tratado sobre el Espacio Ultraterrestre (OST)** de 1967 que todavía se encuentra en vigor²⁰, tiene un **efecto disuasorio limitado** sobre el uso de armas no nucleares en el espacio u otras armas de destrucción masiva, pero **no contempla otros usos militares del espacio que la tecnología ha hecho posible desde entonces**²¹. También, producto de la ampliación del OST efectuada en 1979, se ha aprobado impedir que los estados se arroguen la soberanía de la Luna o partes de ella, y de otros objetos en el espacio²².

No es tan evidente que el acuerdo tácito del uso pacífico del espacio pueda preservarse en el futuro, como demuestra el hecho de la emergencia y despliegue (afortunadamente, aun no el uso) de **armas antisatélite (ASAT)**. El incremento de satélites militares y el despliegue de diversos tipos de ASAT podría tener consecuencias importantes para la seguridad mundial, lo que, a su vez, podría dar lugar a una posible **aceleración de la carrera armamentista en el espacio** como ya ocurre en otros dominios como es el de los sistemas aéreos no tripulados.

Un factor que ha adquirido gran relevancia es el **carácter dual** que tiene la tecnología de acceso al espacio mediante **lanzamientos múltiples** (hasta 60 satélites se lanzan

¹⁹ <https://ourworldindata.org/grapher/cumulative-number-of-objects-launchedinto-outer-space?time=earliest..2017>

²⁰ Existen diversos Tratados de la Naciones Unidas (*Tratados y Principios de las Naciones Unidas sobre el Espacio Ultraterrestre* <https://www.unoosa.org/pdf/publications/STSPACE11S.pdf>) que inciden en el uso pacífico del espacio.

²¹ De hecho, en 2007, no impidió que China destruyera con éxito un viejo satélite meteorológico con un misil balístico, y la India hizo lo mismo poco después. En noviembre de 2021, una prueba ASAT rusa dio como resultado unas 1.500 piezas de escombros que planteaba riesgos sustanciales para la ISS y los activos espaciales. <https://logos-pa.com/insights/the-ever-growing-link-between-space-and-defence/>

²² El Acuerdo firmado en 1979 declara que la Luna y otros objetos celestes en el espacio son patrimonio de la humanidad. Este acuerdo se encargó de ampliar varios artículos del Tratado sobre el Espacio Ultraterrestre (de 1967), entre ellos el artículo 2, según el cual ningún Estado puede reclamar la soberanía sobre ninguna parte del espacio, y el artículo 4, que limita considerablemente las actividades militares en la Luna y otros cuerpos celestes. <https://www.nationalgeographicla.com/espacio/2024/10/semana-mundial-del-espacio-estos-son-los-tratados-internacionales-que-regulan-la-exploracion-espacial>

simultáneamente para desplegar la constelación de Startlink) y con **recuperación y reutilización de algunas de las fases** para reducir los costes de futuros lanzamientos. No sólo el propio cohete (en parte, reutilizable) puede lanzar satélites civiles o militares, sino que puede **combinarlos en un mismo lanzamiento** y depositarlos en diferentes órbitas.

El cohete **Starship**²³ de la empresa *Space-X* supondrá un salto cualitativo una vez entre en fase de operación rutinaria²⁴. La décima prueba ejecutada en agosto de 2025 fue un éxito, aunque serán necesarias muchas más, y abre la puerta a su uso comercial con menores costes de lanzamiento mediante la reutilización de algunas fases y poder transportar cargas de gran magnitud²⁵. Se espera usar **Starship** como *módulo de alunizaje* en la misión *Artemis 3*, prevista para 2027.



Figura 11. Lanzamiento del 10º vuelo de prueba de Starship en agosto de 2025. Fuente: <https://www.lavanguardia.com/vida/20250827/11004600/spacex-lanza-exito-gigantesco-cohete-starship-completa-mision-defectos.html>

El **incremento de lanzamientos de satélites militares por las grandes potencias es constante**. Tanto Rusia como China y Estados Unidos han incrementado sus lanzamientos en 2024. En la figura 12 se ve una imagen del quinto lanzamiento hecho público de **satélites militares rusos** desde el cosmódromo de *Plesetsk* en 2024, precedido en ese

²³ <https://www.spacex.com/vehicles/starship>

²⁴ El Starship de SpaceX es un sistema de dos etapas completamente reutilizable, diseñado para el transporte de carga y tripulación a la Luna, Marte y más allá. Con una altura total de 120-122 metros y 9 metros de diámetro, su primera etapa (Super Heavy) tiene 33 motores Raptor, mientras que la segunda etapa (Ship) posee 6 motores. Su gran potencia y reutilización lo convierten en el cohete más grande y poderoso del mundo, con una capacidad de carga de hasta 150 toneladas en configuraciones reutilizables. <https://inspenet.com/articulo/starship-de-spacex-exploracion-espacial/>

²⁵ En el lanzamiento de prueba de agosto de 2025 se ha probado la puesta en órbita de ocho cargas de pago simuladas para demostrar el despliegue de satélites.

año de tres lanzamientos de cohetes portadores Soyuz-2.1b y un cohete portador Angará-1.2²⁶.

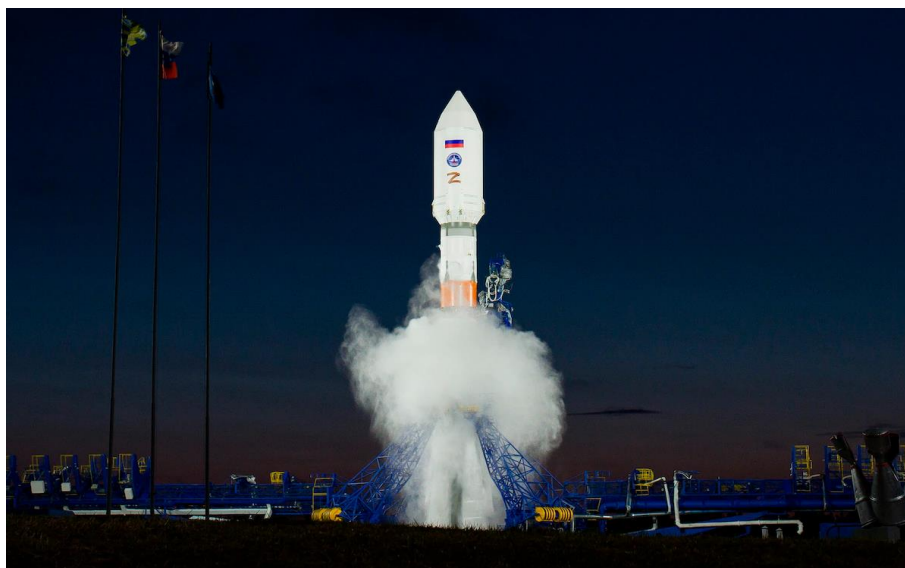


Figura 12. Cohete Soyuz-2.1b lanzado el 17 de mayo de 2024 desde el cosmódromo Plesetsk en Rusia. Fuente: <https://www.instagram.com/fronteraspacial/reel/C7Dql1iBizP/>

En la sección de *Objetivos* de este documento se ha indicado que **la IA se ha incorporado a la competición espacial dibujando una nueva frontera en la tecnología militar transformando rápidamente las operaciones espaciales militares**. En este contexto, tanto Estados Unidos como China están invirtiendo fuertemente en mejorar sus capacidades impulsadas por la IA para obtener ventajas estratégicas en este dominio crítico.

Estoy convencido de que **todos estos satélites militares incorporan tecnología de IA** para la automatización y procesamiento de datos en las comunicaciones, navegación y observación militar, ya sea en el segmento espacial como en el terreno, así como para el cifrado de la información. A ello debe añadirse el uso de la IA en el proceso de ingeniería digital para el desarrollo de componentes y sistemas, incluyendo las cargas útiles, así como en la integración y prueba de activos espaciales.

En los próximos años, a medida que la IA siga potenciando y transformando las operaciones espaciales militares, la **competición por el dominio de la IA en el espacio** se intensificará, incorporando en esta carrera a nuevos países con capacidades militares como India, Japón, la UE o Corea del Sur, directamente a través de sus agencias gubernamentales o empleando empresas privadas²⁷.

²⁶ En total, según el Ministerio de Defensa, Rusia ha lanzado en lo que va de año 12 cohetes portadores con 37 satélites desde los cosmódromos de *Plesetsk* y *Vostochni* en Rusia, y *Baikonur*, en Kazajistán.

²⁷ Es interesante resaltar que el gobierno de Estados Unidos ha encargado en octubre de 2024 a *SpaceX* el lanzamiento de nueve satélites en una constelación de órbita baja por 733.5 M\$ para incrementar las capacidades de comunicaciones e inteligencia militar. El acuerdo incluye dos contratos: el primero implica siete misiones para que la Agencia de Desarrollo Espacial (SDA)

Los actores implicados deberán conciliar el avance tecnológico, la seguridad nacional y la estabilidad mundial con implicaciones significativas para la influencia geopolítica y las capacidades militares para evitar escaladas involuntarias y garantizar el uso pacífico del espacio para todas las naciones. **El diálogo y la cooperación internacionales continuos sobre la IA en el espacio serán esenciales** para establecer normas, promover la transparencia y mitigar los riesgos potenciales asociados con estas nuevas y poderosas capacidades.

El **espacio**, en distancias cercanas al planeta, **se ha convertido en un dominio disputado entre las grandes potencias**. Baste observar en la figura 13 (obtenida de la UE) que las amenazas para el uso del espacio no proceden solo de las características naturales del espacio (p.ej. la existencia de una radiación que puede inutilizar los sistemas o la existencia de asteroides que pueden provocar impactos a enormes velocidades²⁸), sino de otras muchas procedentes del ser humano, desde los ciberataques hasta las armas cinéticas antisatélite, o, desde un punto de vista menos maduro, los brazos robóticos que pueden “robar” o desplazar un satélite de su órbita inicial.

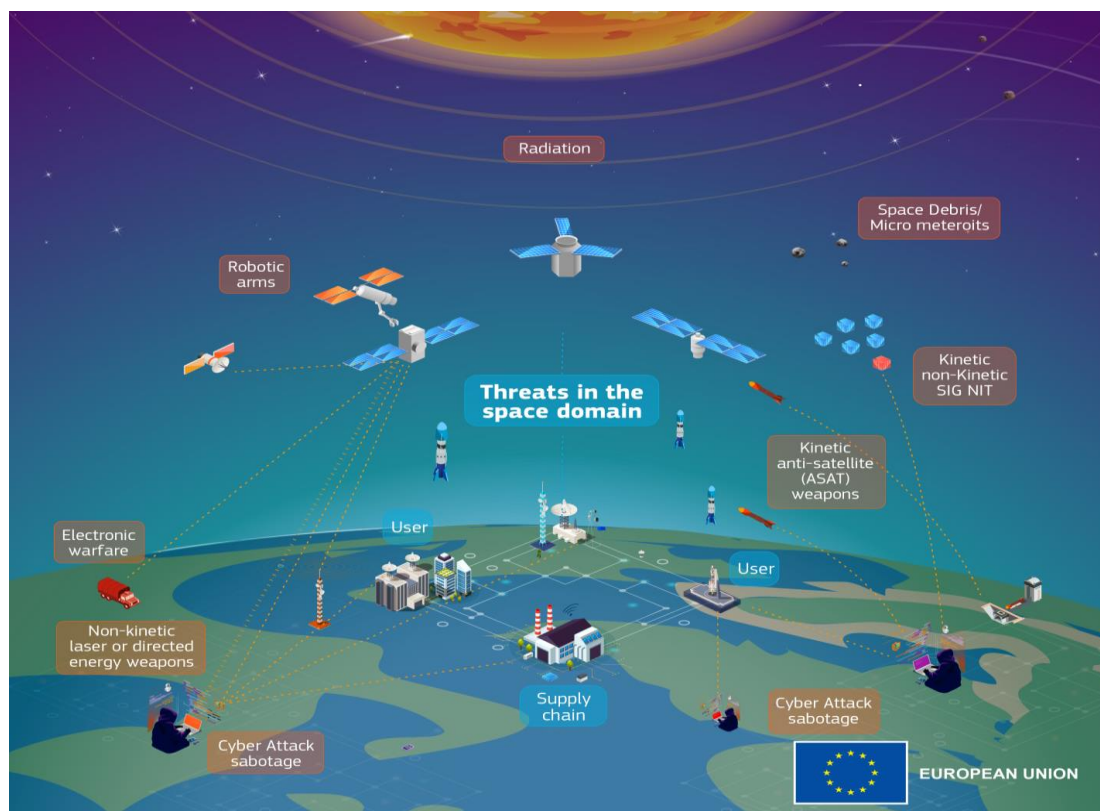


Figura 13. Amenazas en el espacio. Fuente: https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space/eu-space-strategy-security-and-defence_en

despliegue satélites de seguimiento de misiles y retransmisión de datos, mientras que el segundo implica dos misiones para que la Oficina Nacional de Reconocimiento opere los satélites espía del gobierno. La SDA pretende lanzar 30 satélites militares hasta 2029. <https://thedefensepost.com/2024/10/22/spacex-us-military-satellites/>

²⁸ Es interesante indicar que, si bien el tamaño del objeto es relevante, lo es más la velocidad a la que se produce un impacto porque la energía cinética depende del cuadrado de esa velocidad.

La situación de partida es preocupante. Según informes de inteligencia no clasificados citados en Berkowitz (2024), **Rusia y China están adquiriendo u operando varios sistemas de armas cibernéticas, EW, de energía cinética, de energía dirigida, nucleares y orbitales antisatélite (ASAT)**. El gobierno de los EE. UU. también ha confirmado recientemente que Rusia ha desarrollado y se está preparando para desplegar un arma antisatélite con armas nucleares en órbita. Además, Irán y Corea del Norte operan capacidades cibernéticas, de guerra electrónica (EW) y de misiles que pueden interferir con los activos y operaciones espaciales. Las cuatro naciones mencionadas han llevado a cabo operaciones de ciberguerra naval contra el sistema de navegación y posicionamiento americano GPS.

No es extraño por ello que en la **Estrategia Espacial de la UE para Seguridad y Defensa**²⁹ aprobada en marzo de 2023 (EU, 2023) se preste atención preferente a estas amenazas como parte de la *Brújula Estratégica* de la Unión. Como se indica en el documento: “En el contexto geopolítico actual de creciente competencia de poder e intensificación de las amenazas, la UE está tomando medidas para proteger sus activos espaciales, defender sus intereses, disuadir las actividades hostiles en el espacio y reforzar su postura estratégica y su autonomía”. La figura 14 representa esquemáticamente este uso en el que se combinan satélites de comunicaciones, de navegación o de observación de la Tierra.

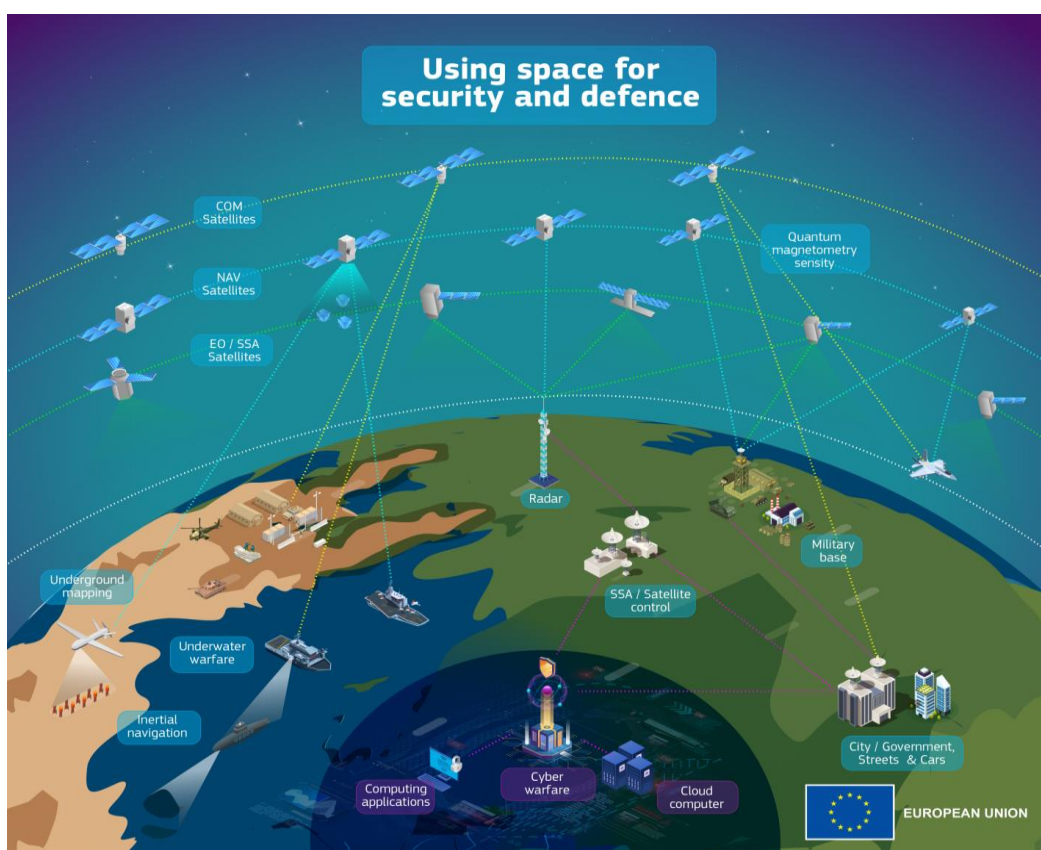


Figura 14. Estrategia espacial de seguridad y defensa de la UE. Fuente: https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space/eu-space-strategy-security-and-defence_en

²⁹ EU Space Strategy for Security and Defence for a stronger and more resilient European Union. https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-strategy-security-and-defence-stronger-and-more-resilient-eu-2023-03-10_en

En resumen, nos encontramos en un momento en el que **el dominio y explotación del sector espacial se ha convertido en un factor decisivo desde la perspectiva de la defensa**. Un ámbito en el que la tecnología juega un papel esencial y en el que, gracias a la consideración dual de muchas de ellas, los avances son muy rápidos. No es extraño, por ello, que **la inteligencia artificial (IA) juega y jugará un papel esencial** como se aborda explícitamente en la siguiente sección.

3. Aplicación de la IA en el sector espacial de defensa

3.1. Áreas relevantes de aplicación

La aplicación de la **IA como una tecnología habilitadora de uso militar** alcanza todos los sectores de defensa y seguridad, y entre ellos el sector **espacial**, tanto en su uso de forma aislada en aplicaciones que se ejecutan en objetos espaciales como en su interacción con sistemas terrestres.

La **rápida evolución del nivel de madurez** de técnicas de IA como el aprendizaje automático (*machine learning*, *ML*) o la IA generativa está haciendo que su uso sea creciente, a pesar de tratarse de su aplicación en un **entorno complejo** como es el espacial en el que los errores acaecidos en un sistema tecnológico en órbita son muy caros y difíciles de resolver, como lo es también lo es el mantenimiento preventivo. Ello ha conducido a emplear una **visión conservadora del uso de la tecnología en el espacio asegurando su máxima madurez**.

No es extraño por ello que se produzca un **doble fenómeno**: por una parte, se está procediendo al **rediseño de soluciones preexistentes** para obtener mejores prestaciones derivadas del uso de IA (p.ej. con el empleo de técnicas de aprendizaje automático y por la incorporación de la IA al propio proceso de diseño mediante el uso de gemelos digitales), y, por otra parte, se abordan mediante la IA soluciones a problemas que no la tenían previamente sin ella (p.ej. algunas de las derivadas del uso de la IA generativa como es el uso de interfaces tipo *ChatGPT* basadas en modelos grandes de lenguaje (*Large Language Models*, *LLM*), adaptados a las necesidades de defensa y seguridad en el espacio).

Desde una visión conceptual se ha querido representar en la figura 15 los **grandes impulsores del uso de la IA en el espacio**. En la parte central se han indicado dos *meta impulsores* ligados a la necesidad de **reducir el coste y el tiempo de desarrollo** de un satélite u otro objeto espacial y, al mismo tiempo, **mantener la máxima confianza en los procesos de verificación y validación** de componentes y subsistemas, procesos típicos en el sector espacial. Ambos elementos no dependen exclusivamente de la IA, pero con ella adquieren una relevancia y factibilidad mayor.

En la parte superior de la figura 15 se han indicado tres **retos tecnológicos** cuyo abordaje requiere disponer de nuevas tecnologías:

- 1) Necesidad de **incrementar las capacidades de procesamiento a bordo** del satélite o nave espacial para poder disponer de sistemas espaciales más inteligentes en su propia gestión de la plataforma y de las cargas útiles, incluyendo la cooperación entre satélites en una constelación, sin que eso implique incrementos significativos del peso, volumen y consumo energético.

- 2) Necesidad de **reducir la transferencia de datos** capturadas por las cargas de pago a las estaciones terrestres con el objetivo de reducir la dependencia de los enlaces satelitales y poder hacer un filtrado de datos en el propio satélite para mantener únicamente los relevantes.
- 3) Asegurar **sistemas de comunicaciones de banda ancha robustos**, protegidos tanto ante eventos naturales en el espacio como la radiación, o frente a ciberataques provocados para inhabilitar el funcionamiento del satélite.

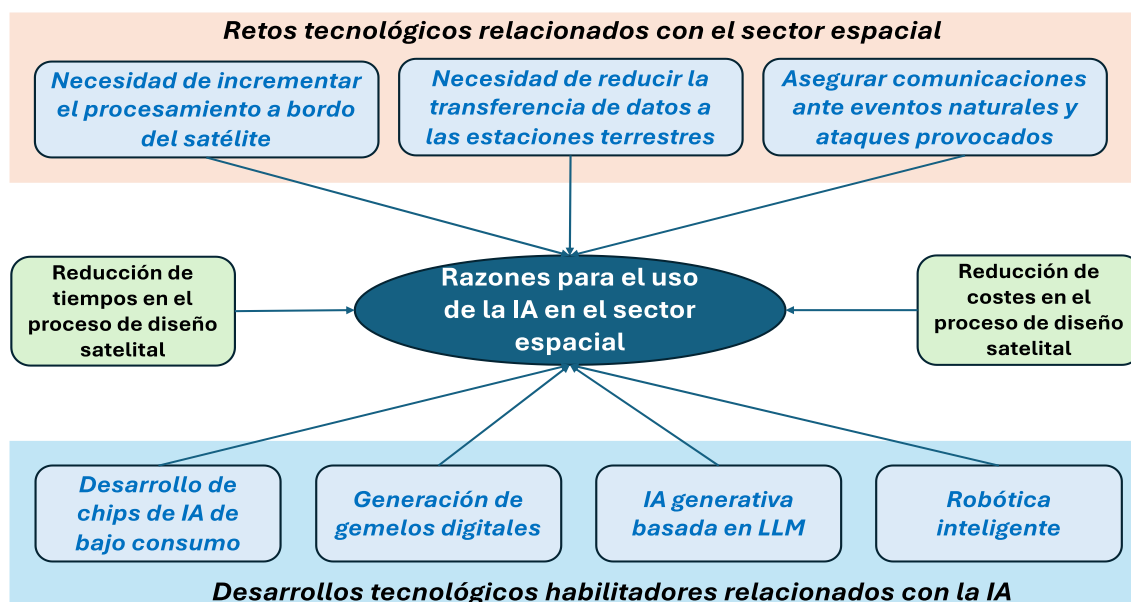


Figura 15. Impulsores del uso de la IA en el espacio. Fuente: Elaboración propia

En la parte inferior de la figura 15 pueden verse cuatro **desarrollos tecnológicos relacionados con la IA** que sirven de “*habilitadores*” frente a los retos indicados en la parte superior. Ninguno de ellos ha sido especialmente desarrollado para el sector espacial, y menos aún para el sector de la defensa, pero su maduración va a permitir **acelerar su introducción en el desarrollo de las plataformas y las cargas útiles de satélites militares**. Los desarrollos tecnológicos identificados son:

- **Desarrollo de chips de altas prestaciones**, resistentes a las condiciones espaciales y de bajo consumo para el (re)entrenamiento de modelos de IA y para la computación de inferencias. Aunque parte de los algoritmos de IA pueden entrenarse previamente en estaciones en tierra antes de enviarse al espacio, seguirán existiendo necesidades de ejecución de esos algoritmos para la obtención de inferencias, reentrenamiento y mejora progresiva de prestaciones en las aplicaciones de IA asociadas a las cargas útiles³⁰.

No todos los procesadores son adecuados para el espacio. Se requieren chips resistentes a la radiación, y estos generalmente presentan una mayor redundancia,

³⁰ El concepto de “carga útil” (*payload*) era originalmente un término procedente del sector marítimo referido a la *carga que genera ingresos en un barco*. En términos espaciales, se refiere a aquellos elementos de la nave espacial dedicados específicamente a producir datos de la misión y luego transmitir esos datos a la Tierra. Incluye elementos como cámaras, sistemas de comunicación, etc. https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/About_Payload_Systems

pero una potencia computacional significativamente menor que sus equivalentes funcionales terrestres. Estos chips están contruidos con materiales resistentes a la radiación como el *silicio sobre aislante (SOI)* y emplean técnicas como la redundancia de diseño y el endurecimiento del material para garantizar su confiabilidad y longevidad en misiones espaciales.

El **Anexo 6** de este documento desarrolla con mayor detalle la evolución de los chips satelitales para procesamiento a bordo orientados a la ejecución de algoritmos de IA.

- Generación de **gemelos digitales ciber-físicos** para facilitar y acelerar el proceso de diseño rápido de sistemas espaciales sobre la base de un modelo digital preciso del sistema a diseñar u operar.

El término **ciber-físico** se refiere a que algunos de estos modelos pueden tener una interfaz con un subsistema real del satélite ya construido (p.ej. de la plataforma satelital) frente al que interacciona el modelo digital de un sistema en desarrollo (p.ej. una nueva carga de pago).

Este tema será tratado con mayor extensión en una sección posterior del presente documento.

- Uso de la **IA generativa** basada en el uso de modelos grandes de lenguaje (LLM) adaptados a las necesidades del espacio y la defensa, aprovechando la tendencia en reducir el tamaño y número de parámetros y, por tanto, las necesidades de computación. Con ello, se pretende que el satélite pueda tomar sus propias decisiones capturando datos, interpretándolos y actuando de acuerdo con el entrenamiento previo.

La tecnología **Dynamic Targeting**, desarrollada en el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de la NASA, permite que los satélites interpreten datos de manera similar a un humano y tomen decisiones autónomas sobre cómo responder ante ellos. Como ejemplo, el satélite *CogniSAT-6*³¹ observa el área situada 500 kilómetros por delante de su trayecto orbital. Equipado con una cámara que capta luz visible e infrarroja, el satélite inclina su sensor hacia adelante entre 40 y 50 grados. Así obtiene una vista anticipada de la zona que sobrevolará poco después. Un algoritmo avanzado, entrenado para identificar nubes, examina esta imagen y determina si la región está despejada. Si el área está libre de obstáculos, el satélite ajusta su orientación para capturar la imagen planificada exactamente al pasar sobre el objetivo. Si se detectan nubes, cancela la toma y conserva la capacidad de almacenamiento para datos realmente útiles. Este proceso, desde la adquisición de la imagen anticipada hasta la toma final, se completa en 60-90 segundos (Bahamonde, 2025) (Rijlaarsdam, 2024).

Otra línea de trabajo relacionada es la **incorporación de Dynamic Targeting en constelaciones de satélites**. El análisis de imágenes realizado a bordo de un

³¹ *CogniSAT-6* es un pequeño satélite tipo *Cube-sat* lanzado por la NASA en marzo de 2024.
<https://ubotica.com/press-release-cognisat-6-breakthrough/>

satélite líder podría compartirse rápidamente con otros satélites de la formación, permitiendo una reacción coordinada y eficiente ante fenómenos de interés.

El uso de la IA en el espacio será tratado con mayor extensión en una sección posterior del presente documento.

- Desarrollo de **robótica inteligente espacial** para facilitar la ejecución de operaciones en el satélite u otras naves espaciales basado en **brazos robóticos** para reparación de módulos, gestión de vehículos autónomos asociados, o la recogida de desechos espaciales, entre otros muchos.

Desde la perspectiva robótica se ha pasado de desarrollar de **rovers y sondas robóticas para la exploración de otros cuerpos celestes** (como los iniciales rovers de Marte) teledirigidas, con movimientos lentos y una capacidad de reacción limitada por el tiempo de espera de las órdenes desde el centro de control³² a disponer de **sistemas más inteligentes**.

Concretamente, el objetivo es incorporar sistemas de visión por computador que permiten identificar obstáculos y trazar rutas seguras, de algoritmos de aprendizaje automático que analizan datos geológicos en tiempo real para decidir qué muestra es más prometedora científicamente, y de sistemas de diagnóstico que monitorizan la salud del vehículo y pueden intentar solucionar problemas sin intervención humana. El rover “*Perseverance*” ya disponía de capacidades de IA con un sistema de navegación autónoma (*AutoNav*) y con algoritmos de IA para el procesamiento de imágenes (*AEGIS, Autonomous Exploration for Gathering Increased Science*). También la ESA ha llevado a cabo esta evolución. El programa de exploración robótica de Marte, con misiones como *ExoMars*, incorpora tecnologías de navegación y operación autónoma.

La robótica espacial ha avanzado con la **incorporación de robots en el propio satélite**. Como ejemplo, de esta tendencia, el *Laboratorio de Investigación Naval (NRL)* de los Estados Unidos, en colaboración con *DARPA*, ha desarrollado un **sistema de robótica espacial capaz de realizar mantenimiento a satélites en órbita**. El desarrollo tecnológico, denominado *Carga Robótica Integrada* (IRP, por sus siglas en inglés), es la pieza central del programa de *Robótica para el Mantenimiento de Satélites Geoestacionarios (RSGS)*. Diseñada para inspeccionar, reparar y actualizar satélites en órbita se espera que el sistema sea lanzado en 2026 a bordo del *Vehículo Robótico de Misión* (MRV) de *Northrop Grumman*, marcando el inicio de una era donde **los robots a bordo serán sistemas habituales para el mantenimiento en el espacio**³³.

Abordar el conjunto de los elementos indicados en la figura 15 implica disponer de una **“hoja de ruta” a medio y largo plazo** que se realimente en base a la experiencia derivada de su uso y del desarrollo y maduración de nuevas tecnologías. Se trata de un **proceso de**

³² Un “rover” en Marte que se encuentra con un obstáculo inesperado debe detenerse y esperar instrucciones. El diálogo entre Marte y la Tierra puede tardar más de 20 minutos.
<https://www.computing.es/inteligencia-artificial/ia-y-robotica-la-alianza-inteligente-que-conquista-las-fronteras-del-espacio/>

³³ <https://inspenet.com/noticias/robotica-espacial-mantenimiento-de-satelites/>

innovación continua salpicado de innovaciones disruptivas que aparecen en el tiempo de vez en cuando.

Esta hoja de ruta de desarrollos tecnológicos basados en la IA no puede circunscribirse al **segmento espacial** (es decir, a las plataformas y cargas útiles embarcados en un satélite o nave espacial), sino que también afectaría al **segmento terrestre** al entender el sistema espacial como un conjunto. En este sentido, los **objetivos prioritarios** en los que se actualmente se realiza el mayor esfuerzo para la introducción de la **IA en el sector espacial** son los siguientes:

- Crear o modernizar sistemas espaciales terrestres resistentes, virtuales y automatizados para optimizar el diseño de las misiones para lograr su éxito. Este aspecto ha cobrado un enorme interés a medida que la complejidad de las cargas útiles en satélites o constelaciones de satélites se vuelven mucho más grandes y complejas.
- Desarrollar sistemas de conocimiento del dominio espacial (SDA) y de gestión del tráfico espacial (STM) más seguros, resistentes, altamente precisos e inteligentes para anticipar y reaccionar ante las amenazas y mantener el espacio seguro para todos.
- Aprovechar la robótica inteligente para garantizar misiones de inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR) junto a las de observación de la Tierra (EO) más seguras, rápidas y mejoradas para extraer mayor valor e información de grandes cantidades de datos espaciales.
- Explotar de forma inteligente el enorme conjunto de datos procedentes de la operación de satélites u otras naves espaciales que se pueden generar de sus cargas útiles o de la propia operación del satélite.

No es extraño que la IA también haya empezado a utilizarse en las **plataformas pseudo satelitales a gran altitud** (*High Altitude Pseudo Satellite, HAPS*) situadas en la estratosfera (a mayor altitud que un avión, pero menor a la que se sitúa un satélite convencional) optimizando sus capacidades en varias áreas clave; entre ellas:

- *Automatización y gestión*: La IA permite el control de vuelo autónomo, la navegación y la asignación adaptativa de recursos, lo que mejora la eficiencia de HAPS y reduce los costos operativos.
- *Procesamiento de datos*: Los HAPS pueden actuar como centros de datos aéreos, aprovechando la IA para la computación periférica para analizar grandes conjuntos de datos en tiempo real, apoyando aplicaciones como IoT y recuperación ante desastres.
- *Conectividad y escalabilidad*: Los HAPS impulsados por IA mejoran el rendimiento, la latencia y la fiabilidad de la red, al tiempo que gestionan de forma eficiente las tareas de informática periférica móvil para zonas remotas o desatendidas.
- *Defensa y vigilancia*: la IA mejora la integración de sensores para la recopilación de datos en tiempo real y la toma de decisiones en operaciones de defensa.

A pesar de todos estos avances la **experiencia ha demostrado que llevar al espacio aplicaciones de IA muy extendidas en el planeta Tierra no es sencillo**. De hecho, el modelo de disponibilidad tecnológica conocido como **TRL** (*“Technology Readiness Level”*)

fue ideado por la NASA para asegurar que la tecnología estaba “suficientemente madura” para poder ser embarcada en una misión espacial con los menores riesgos posible y evitar problemas posteriores. Refleja una **concepción conservadora** de la adopción de la tecnología en el sector espacial con sistemas avanzados robustos y maduros.

Un ejemplo en este sentido es disponer de **modelos grandes de lenguaje (LLM) adaptados para su ejecución en las condiciones existentes en sistemas espaciales**. De hecho, no fue hasta el 11 de julio de 2024, cuando comenzó a funcionar la **primera herramienta de IA generativa en el espacio**: un modelo de lenguaje grande (LLM) diseñado con el objetivo de ayudar a los astronautas a bordo de la *Estación Espacial Internacional (ISS)* para apoyar (y automatizar) los procedimientos de mantenimiento, reparación, y ejecución de experimentos³⁴.

Por su parte la *Agencia Europea del Espacio (ESA)* como parte del programa de **Preparación para el Futuro de la Investigación Avanzada en Sistemas de Telecomunicaciones (ARTES)** ha financiado un estudio con el objetivo de conocer la forma en la que la industria puede usar la IA generativa para **transformar los procesos de diseño de sistemas de comunicaciones con satélites**³⁵. Los objetivos concretos del estudio son:

- Desarrollar una mejor comprensión de los posibles beneficios y limitaciones del uso de la IA generativa para el diseño relacionado con las comunicaciones satelitales.
- Identificar las herramientas y técnicas de última generación que se utilizan actualmente en la IA generativa en otros dominios de la industria con la intención de clasificar cuáles de ellas son aplicables al dominio de las comunicaciones por satélite y qué adaptaciones podrían requerir para hacerlas específicas para aplicaciones relacionadas con las comunicaciones por satélite.
- Proponer una hoja de ruta de desarrollo correspondiente para adaptar dichas herramientas al diseño de comunicaciones por satélite, incluidos los plazos estimados y los costes de desarrollo.

En un entorno tan complejo como es el espacial **pasará tiempo hasta que el uso de estas técnicas de diseño basado en el uso de la IA se adopte** de manera general, se establezcan los procesos incorporados a los estándares del ciclo de vida de desarrollo de productos y sistemas, se reduzcan sus riesgos, y se incorporen a los procesos de verificación y validación en las fases de desarrollo y de aceptación de producto. Obviamente, será más sencillo emplear técnicas de IA en las actividades espaciales de desarrollo y de operación de misiones que se realicen desde estaciones terrenas que las que se puedan realizar en el espacio por sistemas autónomos.

Aunque el análisis realizado previamente en este documento sobre la complejidad del uso de la IA en el sector espacial es válido tanto para el sector civil del espacio como en el de la defensa, es en este último en el que algunos de los elementos indicados cobran mayor

³⁴ Supuso el rediseño de una aplicación RAG de LLM para reducir drásticamente su tamaño y necesidades de computación y energía, para su uso en entornos espaciales <https://www.airandspaceforces.com/generative-ai-space-big-deal/>

³⁵ El estudio de carácter exploratorio está coordinado por *Applied Data Science Partners (ADSP)* <https://connectivity.esa.int/news/european-space-agency-kicks-groundbreaking-generative-ai-project-satellite-communication-design>

relevancia e incorporan **requisitos adicionales**. Estos requisitos específicos afectan, sobre todo, en los aspectos de percepción del entorno del satélite, de ciberseguridad, de cifrado de datos, y de resiliencia de la plataforma.

Más concretamente, en la figura 16 se han representado las **áreas concretas de aplicación de la IA en el sector espacial de la defensa** en las que se focaliza el presente informe y en las que existen experiencias publicadas en los últimos años³⁶.



Figura 16. Áreas de aplicación de la IA en el sector espacial de la defensa. Fuente: elaboración propia

Por razones de espacio y de valoración de su particular relevancia se han limitado a **once grandes áreas de aplicaciones** en las que, desde mi punto de vista, **la IA juega un papel relevante**. Algunas de ellas afectan a la plataforma espacial (satélite) mientras que otras están más enfocadas a ser ejecutadas en el segmento terreno. Brevemente, las áreas identificadas son las siguientes:

1. **Mejora del conocimiento del dominio espacial (SDA).** Su objetivo es comprender y gestionar los activos espaciales situados en el espacio y su posición real con objeto de identificar objetos, amenazas y reducir riesgos de operación.

³⁶ Debe tenerse en cuenta que el presente documento se ha elaborado exclusivamente mediante fuentes abiertas y, por tanto, no con fuentes clasificadas. Esta limitación tiene dos consecuencias: 1) pueden existir desarrollos basados IA en el sector espacial de defensa que no se hayan publicado y que indiquen un estado de uso y experiencia de herramientas y sistemas de IA más avanzado que el que aquí se indica, y 2) algunas de las informaciones procedentes de fuentes gubernamentales pueden, por el contrario, indicar resultados más avanzados o exitosos de los reales como parte de objetivos de desinformación. Sin posibilidades de verificación, he asumido que lo indicado en las referencias empleadas es veraz y, en todo caso, se han indicado las fuentes de información empleadas a pie de página o en la sección de referencias.

2. **Defensa de la navegación satelital.** El objetivo es disponer de métodos que permitan conocer si la señal de navegación GNSS está alterada o imposible de obtener ofreciendo técnicas de navegación alternativas a otros objetos aéreos o no para no depender de la señal satelital.
3. **Análisis inteligente de imágenes satelitales.** Capacidad de procesamiento de imágenes tomadas desde el satélite, ya sea desde el propio satélite o en estaciones terrenas para identificar objetos determinados de interés, y alimentar con la información obtenida la toma de decisiones en plataformas específicas basadas en IA. Puede formar parte de subobjetivos de SDA o para seguridad marítima apoyada por satélites.
4. **Ajustes automáticos de la órbita para evitar colisiones.** Conocimiento de la distancia y ajustes de la órbita de los satélites desde estaciones terrenas o por el mismo satélite para evitar impactos con otros objetos en el espacio (p.ej. desechos espaciales o asteroides).
5. **Mantenimiento predictivo de satélites.** Utilización de algoritmos de IA para planificar los procesos de mantenimiento en base al análisis de series temporales de datos combinados con otros en tiempo real.
6. **Optimización de comunicaciones militares espaciales.** Conseguir comunicaciones robustas de banda ancha, inmunes a interferencias naturales en el medio espacial o provocadas por el hombre.
7. **Ciberseguridad espacial.** La relevancia de los datos hacia o desde satélites, ya sean datos generados por las cargas útiles a bordo (p.ej. imágenes) o señales de control formando parte de redes de navegación o comunicaciones ha hecho que se conviertan en un objetivo de ciberataques, en gran medida, impulsados por otros gobiernos. Ello ha obligado a mejorar los sistemas de defensa frente a ciberataques.
8. **Robótica espacial inteligente.** Robots autónomos fijos (p. ej. brazos robóticos) o móviles (p.ej. antropomórficos cooperando con humanos, vehículos de explotación espacial) para realizar múltiples misiones sin intervención humana con el mayor nivel de autonomía posible.
9. **Marcos comunes para la simulación e interoperabilidad de datos espaciales.** El uso de diversas plataformas y aplicaciones satelitales de uso militar se beneficia de la posibilidad de compartir datos obtenidas entre fuerzas armadas aliadas. Como sucede en el ámbito terrestre, la interoperabilidad de los datos espaciales es un elemento clave para disponer de sistemas y aplicaciones multifuente y multiproveedor.
10. **Integración de IA con tecnologías cuánticas.** Su objetivo es analizar la forma en la que la IA puede integrarse con el uso de tecnologías cuánticas (comunicaciones, sensores o computación) en aplicaciones espaciales. Aunque se trata de un área en un estado experimental, merece la pena indicar las posibilidades y experiencias en marcha porque es previsible que su maduración (sobre todo, en comunicaciones y sensores cuánticos) va a ser rápida.
11. **Desarrollo de gemelos digitales de sistemas espaciales.** Su objetivo es aprovechar las técnicas de ingeniería digital para disponer de modelos de datos y de simulación que permitan explorar opciones y acelerar los tiempos de desarrollo y mantenimiento de sistemas espaciales (plataformas satelitales, cargas útiles, modelos de entornos espaciales, etc.).

No se trata de áreas totalmente disjuntas, sino que **una correcta gestión global de los activos espaciales implica disponer de técnicas complementarias y de la explotación compartida de los datos obtenidos.** Así, por ejemplo, el análisis inteligente de imágenes

satelitales no se limita a las que el satélite pueda tomar de zonas de la Tierra con la máxima resolución y su interpretación (ámbito clásico de la observación táctica militar), sino también las que pueda tomar de otros objetos espaciales cercanos para evitar colisiones (fortuitas o intencionadas) como parte del conocimiento del dominio espacial.

Debe tenerse en cuenta como elemento transversal la tendencia en el **incremento progresivo de las capacidades de computación en el propio satélite**, motivada por la miniaturización microelectrónica con chips específicos para el espacio, entre ellos para la ejecución de algoritmos de IA (p.ej. extracción de inferencias) que requieren menores consumos energéticos, modelos de lenguaje pequeños y la necesidad de una mayor integración del segmento espacial y terreno en el procesamiento de datos reduciendo los flujos de datos hacia el planeta Tierra.

Como resultado de todo ello, la **evolución del mercado relacionado con el uso de la IA en el espacio** es muy rápida. De acuerdo con empresas consultoras, el mercado de exploración de IA en el espacio está valorado en 2025 en 6.700 millones de dólares. Además, se espera que el mercado crezca a una CAGR del 27,1% para alcanzar ventas globales de 57.900 millones de dólares en 2034³⁷.

3.2. Mejora del conocimiento del dominio espacial (SDA)

3.2.1. Objetivos generales de SDA

La **mejora del conocimiento del dominio espacial** (*Space Domain Awareness, SDA*) en base a información capturada sobre los objetos situados en el espacio y su posición real se ha convertido en un objetivo básico para comprender y gestionar los activos espaciales con el fin de **identificar amenazas y reducir riesgos** en la operación y funcionamiento de estos activos, ya se trate de riesgos y amenazas naturales o provocados.

El concepto de SDA no es nuevo y se remonta a la *Guerra Fría* en la que tanto la Unión Soviética (URSS) como Estados Unidos “debían” conocer dónde se situaban (la órbita), y de qué tipo y misión eran los satélites lanzados por la potencia contrincante. De hecho, aún persisten en el espacio sistemas satelitales de esa época que no fueron diseñados para un entorno espacial congestionado y competido como el actual. En ese periodo la gestión del SDA se realizaba desde estaciones terrenas, suficientes para hacer el seguimiento de un pequeño número de satélites.

El origen cercano del problema actual del SDA está motivado por la proliferación de objetos en el espacio: desde las constelaciones de centenares a miles de satélites situados en órbitas bajas o medias, en mayor medida que los geoestacionarios cuyo número es menor, el incremento paulatino de desechos espaciales, y la mayor disponibilidad de fuentes de datos comerciales y conexas. Todo ello requiere emplear nuevos enfoques para la innovación y gestión de satélites y sus “sistemas terrestres” asociados para **conocer su situación real y poder tomar decisiones a tiempo**. En todos ellos, la IA va a jugar un papel esencial al permitir la automatización de las operaciones cuyo volumen de información supera las que puede manejar un operador humano.

Es en este contexto en el que el concepto de “**comprensión del dominio espacial**” ha adquirido gran importancia; implica la supervisión, la comprensión y el análisis de todas

³⁷ <https://uk.finance.yahoo.com/news/ai-space-exploration-market-outlook-135200243.html?guccounter=1>

las actividades y objetos del dominio espacial, incluidos los satélites, los desechos y los sistemas espaciales. Se extiende más allá de la **conciencia situacional espacial (SSA)** (*Space Situational Awareness*)³⁸ al incorporar las intenciones, capacidades y comportamientos (anómalos o no) de los objetos espaciales para mejorar la seguridad, la protección y la planificación estratégica de las misiones.

Concretamente, **los sistemas SDA permiten prevenir colisiones y detectar amenazas** en un contexto de cooperación internacional, al mismo tiempo que aprovecha tecnologías como la IA y la detección por radiofrecuencia (RF) para mejorar el despliegue y la gestión de las operaciones espaciales.

Aunque conceptualmente el objetivo del SDA es dual, civil y militar, porque así son las misiones de los objetos espaciales en un momento determinado, **ha sido en el contexto de la defensa en la que ha cobrado mayor relevancia** puesto que son unidades militares las que operan los sensores empleados para recopilar datos (e inteligencia) de cualquier objeto en el espacio para saber qué es y cómo podría afectar la seguridad de los activos espaciales de un país. Utilizando los datos procedentes de los sensores es posible determinar si un objeto es un **satélite artificial** (construido por el hombre) o son **desechos naturales o artificiales**.

Mediante el seguimiento y la vigilancia continua de los objetos espaciales, la SSA proporciona datos esenciales sobre sus posiciones, órbitas y características. El **SSA y el SDA están estrechamente interconectados**, y cada concepto se complementa entre sí para proporcionar una comprensión completa del entorno espacial.

A medida que el espacio se convierte en un dominio disputado de interés militar, los ejércitos de las grandes potencias deben ser capaces de **identificar** intenciones maliciosas de satélites de otras potencias **y responder** rápidamente, ya sea protegiendo los activos espaciales propios, o deshabilitando los de los otros actores. No se trata de un análisis teórico sobre potenciales riesgos futuros: en 2022, China, utilizando sus satélites de clase *Shijian*, demostró la **capacidad de empujar a otros satélites fuera de sus órbitas de misión** (Tingley, 2022).

La información obtenida de SDA sirve de base para elaborar una **imagen completa del entorno espacial**, lo que permite a los operadores de satélites identificar patrones, detectar cambios en los comportamientos y **evaluar los riesgos potenciales asociados con las actividades espaciales**.

Los operadores espaciales utilizan una **combinación de sensores terrestres** (radar y sitios ópticos) y **sensores espaciales** (satélites con señal a bordo o cargas útiles ópticas) para obtener SDA en objetos en el espacio. En la figura 17 pueden verse algunos de los métodos empleados para obtener esa información: 1) sistemas electroópticos, 2) detección pasiva por radiofrecuencia (RF), y 3) radares basados en estaciones terrestres. Estos sistemas no son incompatibles y cada uno tiene ventajas e inconvenientes en función del tamaño y tipo de objetos, la distancia a la que orbitan, las condiciones de noche o día, etc.

³⁸ <https://dragonflyaerospace.com/understanding-space-situational-awareness/>

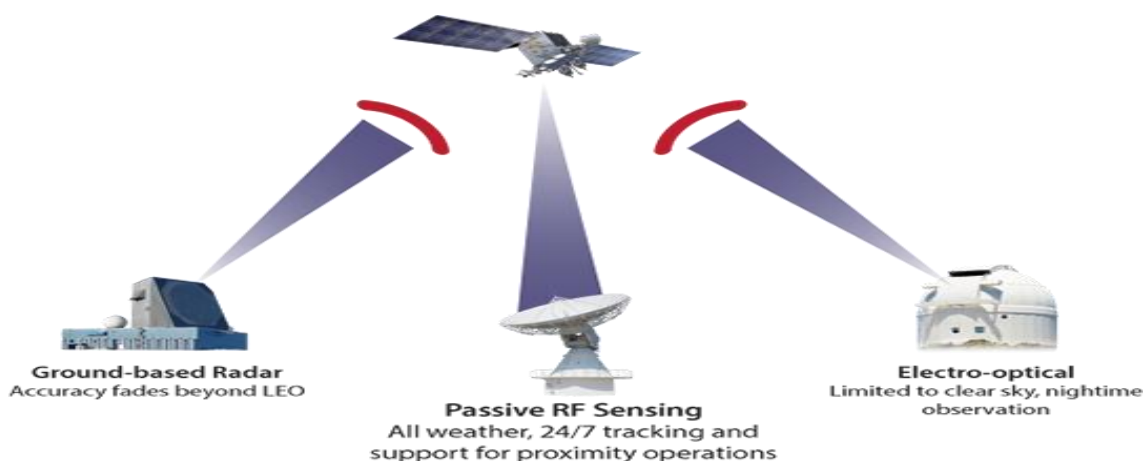


Figura 17. Métodos de radiofrecuencia para la captura de datos SDA de un satélite. Fuente: <https://www.kratosdefense.com/systems-and-platforms/space-systems/military-and-government/space-domain-awareness>

Para complicar la situación del dominio espacial, **no existe un marco regulatorio que rija el lanzamiento y la operación de satélites**. Dada la importancia de los satélites para las operaciones militares, en 2018, la OTAN reconoció formalmente estas dinámicas como un **reto crítico** en 2018³⁹ (di Mare, 2021).

La existencia de **múltiples dominios**, monitorizados permanentemente por **numerosos sensores** y que generan una **enorme cantidad de datos**, representa un gran riesgo para las actividades de vigilancia, reconocimiento y seguimiento (ISR) con el riesgo de perder información crítica. El uso de IA puede ayudar al operador a través de diferentes funcionalidades y alertas (Zhang et al., 2024).

En el área de ISR ya se utilizan técnicas de *big data* y sistemas de alerta basados en reglas, pero el inconveniente es que la definición de patrones y reglas nunca está completa. **Solo se puede detectar lo que se haya definido antes**. Para resolver esta barrera se emplean técnicas de IA, entrenando al sistema con los datos disponibles para identificar alertas cuando se detecten desviaciones.

Realmente, las técnicas de SDA se han convertido en la base **para el razonamiento y toma de decisiones en el espacio**. El incremento de la complejidad del SDA hace que **el uso de la IA se haya convertido en una técnica esencial** (Kratos, 2024). Para hacerse una idea de la complejidad, la Fuerza Espacial de Estados Unidos rastrea casi 45.000 objetos en órbita; si se tienen en cuenta factores como las condiciones atmosféricas y el clima solar, las variaciones en el campo gravitatorio de la Tierra, los cálculos necesarios para predecir las órbitas y advertir sobre posibles colisiones superan rápidamente la potencia computacional disponible (Tran et al., 2024), (Waterman, 2024).

El uso de técnicas de IA ofrece a los analistas de inteligencia **mayor capacidad para el análisis de los datos** lo que, a su vez, permite simplificar la planificación de misiones, la optimización de recursos y la toma de decisiones en entornos espaciales complejos.

³⁹ *Brussels Summit Declaration* (Issued by the Heads of State and Government participating in the meeting of the North Atlantic Council in Brussels 11–12 Jul. 2018).

Un estudio de RAND (Zhang et al., 2024) identificó cinco funciones SDA en las que la IA puede aliviar los cuellos de botella: **mantenimiento del catálogo** (incluida la resolución de pistas no correlacionadas); **determinación de la órbita**; **evaluación de la conjunción**; **tareas, programación y priorización de sensores**; y **recopilación e integración de datos**.

Aunque las herramientas de IA tienen el potencial para enfrentarse a los retos de la SDA, el impacto de estas herramientas en el éxito general de la misión de la SDA todavía no se comprende bien. Esta falta de comprensión es una barrera para planificar y optimizar la integración de estas herramientas en la práctica diaria.

3.2.2. Automatización de tareas rutinarias

De las funciones SDA mencionadas en la sección anterior, la de **mantener actualizado el catálogo de objetos espaciales** y resolver las "*pistas no correlacionadas*" de nuevos objetos lanzados al espacio, sigue siendo una de las tareas de SDA más laboriosas; constituye la **base para la toma de decisiones posteriores**.

La **automatización de las tareas rutinarias** presenta otra oportunidad para el software de conocimiento del dominio espacial basado en IA. Por ejemplo, si un sensor SDA en un satélite fijo está rastreando un objeto, y ese objeto sale del campo de visión del sensor, es necesario que haya una **transferencia de custodia a un sensor diferente**. De lo contrario, se podría perder el rastro del objeto. Esta operación se puede automatizar con un sistema más inteligente que tenga en cuenta la situación de los objetos y los sensores. Téngase en cuenta que algunos objetos en el espacio también pueden moverse, romperse o para algún otro razón se disocian de su "pista conocida". Cuando ocurren estas disociaciones se requiere que los operadores asignen manualmente sensores y vuelvan a correlacionar el objeto con su pista conocida.

Más allá de la captura de datos relacionados con SDA desde diversos sensores se requiere **procesarlos para proporcionar inteligencia utilizable**. Si bien algunos procesamiento de datos están automatizados, como ocurre en Estados Unidos con los elementos del programa de telescopios **GEODSS** (*Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance*)⁴⁰, gran parte de ellos todavía se realizan manualmente por analistas humanos.

A medida que más "sensores" se conectan y el número de objetos a vigilar crece, **las capacidades de los equipos de analistas humanos podrían verse superadas** por el volumen de datos que deben procesar y las restricciones temporales para hacerlo. En el ámbito militar existe, además, una presión para tomar las decisiones que se deriven del análisis a la mayor brevedad posible para evitar ataques intencionados.

El segundo elemento clave para un sistema de SDA preciso es la **capacidad de determinación precisa de la órbita de un objeto ubicado en el espacio**. Cuando los

⁴⁰ GEODSS utiliza telescopios de un metro equipados con tecnología de cámaras digitales de alta sensibilidad, desarrollada bajo un programa conocido como Deep STARE. Cada sitio GEODSS operativo tiene tres telescopios que se utilizan en conjunto o por separado. Estos telescopios son capaces de "ver" objetos 10.000 veces más tenues de lo que el ojo humano puede detectar. <https://www.spaceforce.mil/About-Us/Fact-Sheets/Article/2197760/ground-based-electro-optical-deep-space-surveillance/>

datos de seguimiento de la trayectoria real de un satélite no son precisos, se resiente la calidad de las tareas de seguimiento (p.ej. generación de advertencias, selección de sensores para observaciones o envío de actualizaciones).

Un estudio de RAND (Tran et al., 2024) se basa en el **uso de dos redes neuronales “ligeras” trabajando conjuntamente**. El enfoque permitió actualizar los estados de la órbita lo suficientemente rápido como para sostener operaciones en tiempo real. Mientras una red predice la posición futura de un objeto, la otra red cuantifica la exactitud de esa predicción. Esas dos redes, utilizadas conjuntamente, agilizan la predicción de posibles colisiones de satélites. Al poder actualizar la situación de miles de objetos en tiempo casi real y marcar solo los que aún necesitan análisis detallado, el sistema libera a los analistas de trabajo rutinario para centrarse únicamente en los casos difíciles.

Otro cuello de botella cognitivo es la programación de tareas y priorización de sensores. Es decir, **decidir qué radar, telescopio o antena debe apuntar dónde y cuándo**. Para abordar este objetivo se han comenzado a desarrollar en el MIT agentes inteligentes con entrenamiento reforzado con “recompensas” cada vez que su horario nocturno maximiza la custodia de objetos espaciales respetando las ventanas de visibilidad y el clima (Siew y Linares, 2022).

El **Proyecto de Innovación Espacial Global (GSIP)** de la *Unidad de Innovación de Defensa (DIU)* de DARPA⁴¹ está creando prototipos de dos plataformas para la visualización y el análisis de datos. Uno de los principales objetivos de GSIP es **aprovechar la IA para recopilar, analizar y visualizar una red global de datos de sensores comerciales y gubernamentales, terrestres y espaciales**. Otra prioridad clave de este proyecto incorpora una arquitectura de referencia abierta para permitir el desarrollo de capacidades de terceros con proveedores de naciones clave aliadas de Estados Unidos.

Existen herramientas como *DEEP-Sight (Data Exploitation and Enhanced Processing)*⁴², *KnownSpace*⁴³, o *ARC* de Katalyst⁴⁴ que están siendo ampliadas y rediseñadas para automatizar **mejor el procesamiento de los datos de los sensores SDA mediante técnicas de aprendizaje automático**, lo que permite obtener información útil para los analistas humanos de forma más rápida que lo que puede ofrecer un procesamiento manual, aumentarán el conjunto de herramientas gubernamentales actualmente en uso y mejorarán el apoyo a las misiones de SDA.

Los sistemas clave para el seguimiento incluyen las **redes nacionales de vigilancia** (como es, por ejemplo, la *Red de Vigilancia Espacial de EE. UU.*), o el **Programa Europeo de Conciencia Situacional Espacial** que es un componente esencial del *Programa Espacial*

⁴¹ <https://www.diu.mil/latest/commercial-space-industry-providing-tools-to-advance-and-augment-space>

⁴² <https://nstxl.org/riverside-research-leading-three-nontraditional-organizations-on-space-domain-prototype/>

⁴³ <https://www.kratosdefense.com/systems-and-platforms/space-systems/military-and-government/space-domain-awareness>

⁴⁴ <https://www.katalystspace.com/arc>

de la UE al proporcionar un conocimiento y una comprensión exhaustiva de los riesgos espaciales para las aplicaciones de comunicación, navegación y observación⁴⁵.

En la figura 18 pueden verse esquemáticamente las ideas del marco “ExoAnalytic’s Open Operations Rapid Technology for Data Visualization (OORT-DV)” construido sobre el Motor de Análisis Común (CAE9), que albergará un conjunto de aplicaciones de Arquitectura Orientada a Servicios (SOA) desarrolladas comercialmente.

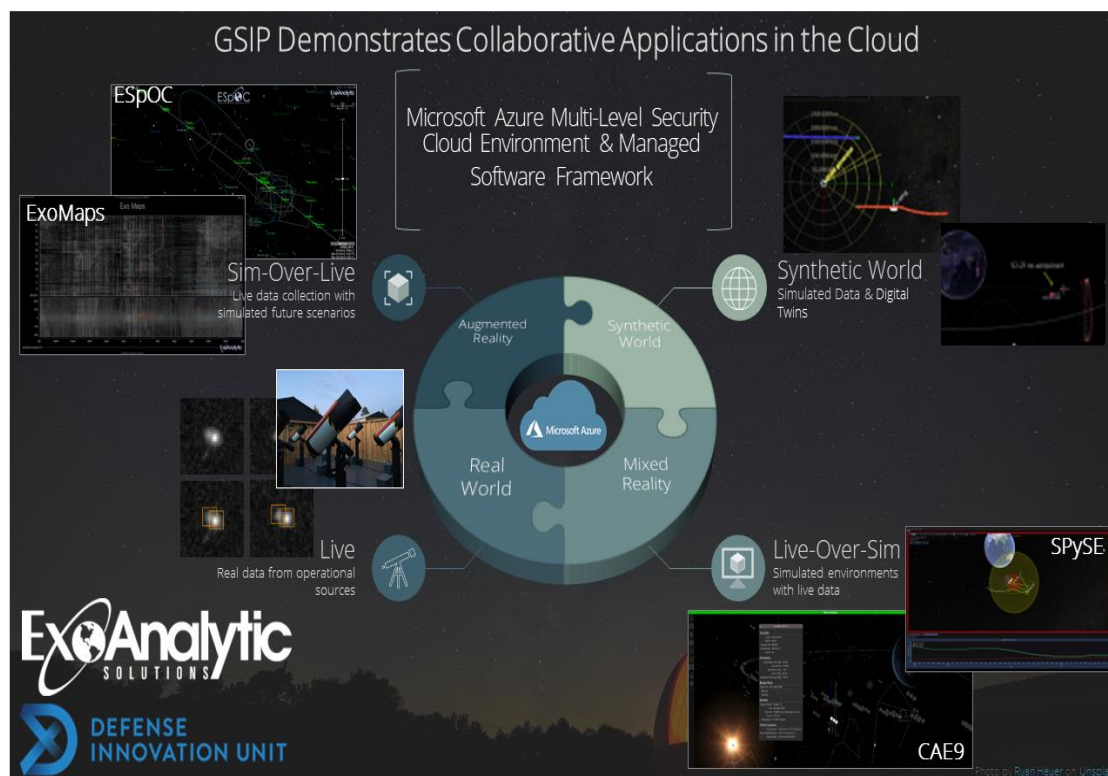


Figura 18. Prototipo de ExoAnalytic. Fuente: <https://www.diu.mil/latest/commercial-space-industry-providing-tools-to-advance-and-augment-space>

Desde un punto de vista militar el conocimiento del dominio espacial junto a las capacidades contra espaciales ofensivas y defensivas, con un enfoque especial en la protección y defensa contra ataques cinéticos, no cinéticos, electrónicos y cibernéticos dirigidos a satélites y estaciones terrestres forman parte de las **redes de defensa espaciales**.

El objetivo final pretendido en el caso de Estados Unidos es el **incremento de la potencia de combate espacial** que “dote de capacidades de disuasión a la seguridad nacional para contrarrestar las amenazas y la agresión y prevalecer en los conflictos en el espacio para obtener, mantener y explotar la superioridad espacial”⁴⁶. En definitiva, se trata de trasladar al dominio espacial los mismos **objetivos de superioridad** militar pretendidos en otros dominios como el terrestre, marítimo, aéreo, o ciber.

⁴⁵ <https://www.euspa.europa.eu/eu-space-programme/ssa>

⁴⁶ <https://www.ssc.spaceforce.mil/Program-Offices/Space-Domain-Awareness-Combat-Power>

En la figura 19 puede verse como concibe Estados Unidos la combinación de todos ellos en la denominada “Red de vigilancia espacial”, parte del *Space Domain Awareness & Combat Power*⁴⁷.

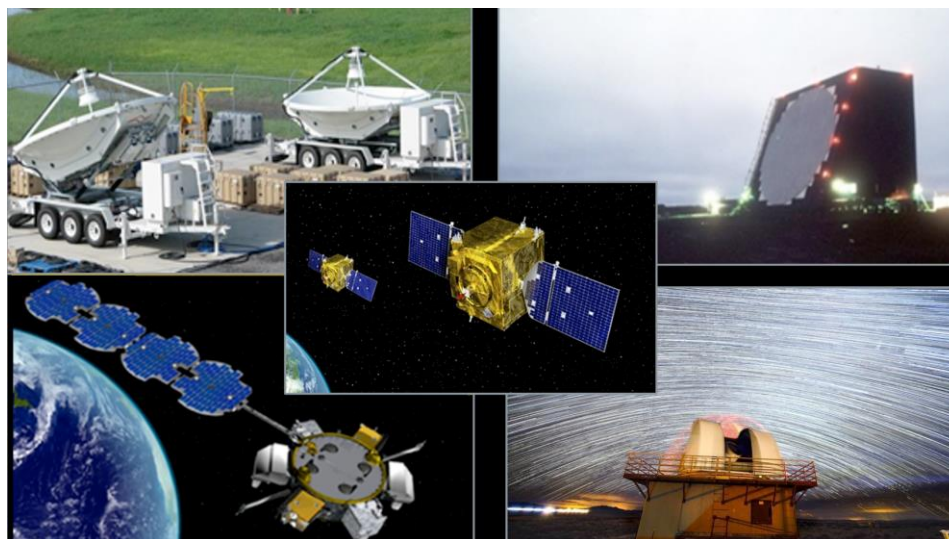


Figura 19. Red de vigilancia espacial de EE.UU. Fuente: <https://www.ssc.spaceforce.mil/Program-Offices/Space-Domain-Awareness-Combat-Power>

Se presentan en las siguientes secciones tres enfoques complementarios del uso de la IA como ejemplo de los varios que existen asociados a SDA: el **uso de IA generativa** para disponer de **agentes inteligentes** para operaciones espaciales, el **uso de datos sintéticos** para calcular distancias entre satélites en constelaciones, y la **detección de satélites con comportamientos anómalos** en constelaciones de satélites.

3.2.3. Uso de agentes inteligentes

En los últimos dos años **el uso de los grandes modelos de lenguaje (LLM)** se está **expandiendo** más allá de las aplicaciones basadas en texto para convertirse en **agentes inteligentes de lenguaje** capaces de realizar acciones en función del contexto del sistema en el que se integran. Al aprovechar la información contextual disponible, los LLM pueden tomar decisiones informadas y realizar tareas de forma autónoma (Rodríguez-Fernández et al., 2024).

El objetivo pretendido, no es solo entrenar a un LLM concreto, sino generar inferencias solicitadas de manera autónoma por un “**agente inteligente**”. Ejemplos comunes incluyen LLMs que se conectan a un navegador web o a una API externa para dar respuestas más precisas. Esta idea empieza a aplicarse también al mundo físico, creando **sistemas que actúan como agentes robóticos impulsados por LLM y planificadores de movimiento** (p.ej. para generar trayectorias de conducción para automóviles autónomos).

⁴⁷ La Oficina Ejecutiva del Programa de Comando de Sistemas Espaciales (PEO) está enfocada en la operación de sistemas cibernéticos, terrestres y espaciales que detectan, advierten, caracterizan, atribuyen y predicen rápidamente amenazas a los sistemas espaciales nacionales, aliados y comerciales, al mismo tiempo que brindan capacidades de disuasión de seguridad nacional para contrarrestar las amenazas identificadas que prevalecen en un conflicto espacial. <https://www.ssc.spaceforce.mil/Program-Offices/Space-Domain-Awareness-Combat-Power>

No es extraño que se haya empezado a experimentar su uso en la **planificación y operación de misiones espaciales**. Los LLM pueden ser utilizados como base para agentes autónomos inteligentes capaces de tomar decisiones y acciones basadas en el procesamiento de datos numéricos e información procedente de entornos complejos. En la figura 20 puede verse uno de estos **agentes inteligentes (AI-based agents)** en los que se propone utilizar una aplicación basada en LLM (por ejemplo, del tipo de *ChatGPT*) como **operador autónomo (agente LLM) de un sistema espacial**.

El sistema obtiene, a una pregunta del usuario (*user prompt*), el **estado actual de la misión** obtenida desde el **entorno de simulación (KSPDG⁴⁸)**, y responde con una acción motivada a realizar, expresada como una llamada a la función (p.ej. con el vector de aceleración específico) y la justificación textual detrás de la acción (véase a la izquierda de la figura la “*LLM reply*”).

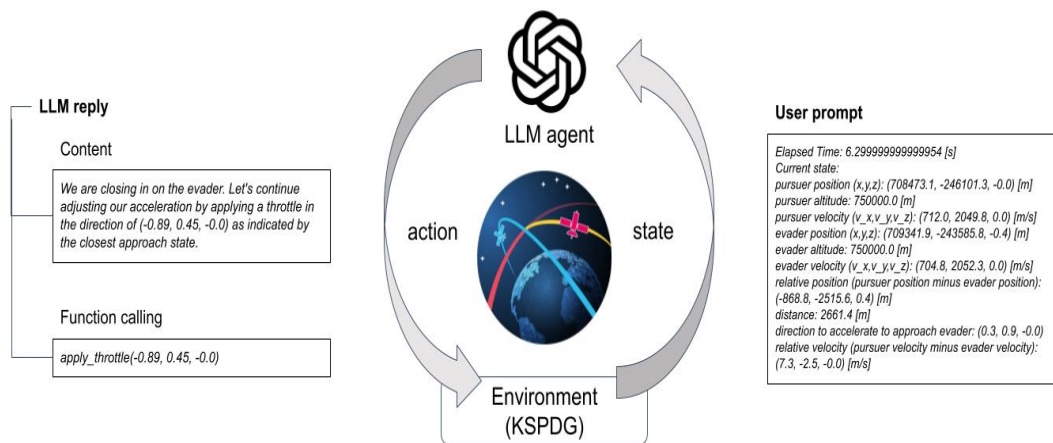


Figura 20. Uso de una aplicación LLM como un operador autónomo de un sistema espacial.
Fuente: Rodríguez-Fernández et al., 2024

Los resultados obtenidos por Rodríguez-Fernández et al. (2024) ponen de manifiesto las **limitaciones de los métodos tradicionales del aprendizaje por refuerzo (reinforcement learning, RL)** en aplicaciones espaciales y las **ventajas de utilizar un agente inteligente LLM**. Brevemente, el problema surge porque los algoritmos de RL suelen requerir un gran número de simulaciones y una “función de recompensa” bien definida para “aprender” políticas de control efectivas. Sin embargo, en el ámbito espacial, las simulaciones suelen ser escasas y difíciles de realizar, y definir una **función de recompensa** adecuada puede ser compleja si no se dispone de grandes conjuntos de datos.

Los LLM aprovechan su base de conocimientos previamente entrenada que se puede ajustar a tareas específicas con volúmenes relativamente pequeños de datos. Esto hace que los LLM sean especialmente adecuados para aplicaciones espaciales, donde **los datos y las simulaciones son limitados y, muchas veces confidenciales**. A ello contribuye también la importancia que están adquiriendo los LLM “abiertos” (como LLAMA

⁴⁸ *Kerbal Space Program (KSP)* es un popular videojuego de exploración espacial reconocido por su física realista, mecánica orbital y diseño de cohetes. El juego permite a los jugadores explorar un sistema espacial ficticio ofreciendo una gran libertad para diseñar sus naves espaciales, misiones espaciales y de exploración espacial. *Kerbal Space Program Differential Games suite (KSPDG)* es un conjunto de juegos diferenciales, de tipo escenarios de persecución-evasión, codificados dentro del motor de juego de KSP que facilitan el uso de diversas técnicas de IA, incluido el aprendizaje por refuerzo multiagente. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10115968>

de META) frente a los “cerrados” propietarios de determinadas empresas comerciales que no se pueden manipular directamente por otras empresas. En todo caso, se trata de **experiencias iniciales** cuyo uso futuro dependerá de disponer de **modelos LLM ligeros**, no solo abiertos, que requieran pocos recursos de computación para poder operar con las limitaciones existentes en el espacio.

Como ejemplo de estos usos, en escenarios en los que un satélite sufre un ataque directo o a un evento disruptivo, los operadores pueden perder el enlace de teledata, dejando al satélite aislado y vulnerable. En tales casos, **los agentes de IA a bordo podrían detectar de forma autónoma actividades anómalas**, como perder la custodia de un satélite objetivo rastreado o encontrar interferencias en las comunicaciones, y reasignar dinámicamente la energía a subsistemas no esenciales para poder realizar maniobras defensivas o evasivas críticas. Al mismo tiempo, puede gestionar los sistemas de comunicaciones para restablecer contacto con operadores terrestres (Huynh, 2025).

Asimismo (Rodríguez-Fernández et al., 2024), se debe explorar el uso de **sistemas de IA generativa multimodales** (*Large Multimodal Models, LMMs*) en un entorno de simulación incorporando entradas visuales, como capturas de pantalla de la simulación, junto con datos de telemetría. En el futuro, este enfoque podría conducir a una **solución más generalizable** para las misiones espaciales no cooperativas, en las que es posible que no se disponga de observaciones precisas del objeto espacial.

Finalmente, el uso de sistemas de **generación automática de código** desarrollados en el ámbito de la IA generativa puede emplearse para **crear agentes autónomos para el control de naves espaciales** con lo que se aceleraría aún más el desarrollo de sistemas de control y operación de objetos espaciales. En resumen, el uso de la IA va a permitir simplificar la automatización de muchas operaciones espaciales que impliquen un conocimiento detallado y preciso del dominio espacial en el que se realizan.

De la experiencia y los resultados obtenidos en el uso de aprendizaje automático para SDA, RAND (Zhang et al., 2024) extrajo los siguientes resultados:

- *Debido a las crecientes demandas y a la naturaleza cambiante de la misión de la SDA, las herramientas de ML tienen una alta oportunidad de impacto para los operadores de SDA.*
- *Sin embargo, las herramientas de ML no pueden abordar todos los desafíos de la misión SDA, pero los cambios en los procesos sí pueden ayudar a que estas herramientas logren un mayor impacto.*
- *Lograr impactos significativos de la IA requiere pasar a una arquitectura que permita continuar el desarrollo y despliegue de IA/ML.*
- *El desarrollo de herramientas de ML que admita tareas de sensores más optimizadas podría tener un impacto en cascada en el resto de la misión de la ASD.*
- *Una mejor cuantificación del riesgo y la tolerancia a la incertidumbre puede respaldar la mejora del rendimiento de herramientas de IA/ML centradas en la predicción y clasificación.*

3.2.4. Creación de conjuntos de datos sintéticos

El desarrollo de un sistema basado en algoritmos de IA implica la **creación o disponibilidad de un conjunto elevado de datos confiables para entrenar, validar o probar un modelo de red neuronal**. Para las aplicaciones SDA, el conjunto de datos necesarios puede proceder del mundo real recopilados por operadores SDA o **datos sintéticos** producidos mediante técnicas de modelado y simulación. Aunque las

herramientas de análisis utilizadas por los operadores de SDA para producir datos del mundo real también aprovechan las técnicas de modelado y simulación, el algoritmo exacto empleado, los parámetros de calibración del modelo y las suposiciones que sirven de base para su construcción se consideran **información clasificada**.

Los datos sintéticos se refieren a datos generados artificialmente que imitan las propiedades estadísticas y los patrones de los datos del mundo real. En el contexto de la exploración espacial, los datos sintéticos se crean utilizando algoritmos, simulaciones y modelos avanzados para replicar escenarios encontrados en misiones espaciales, estudios planetarios y operaciones satelitales. A diferencia de los datos del mundo real, que a menudo están limitados por problemas de accesibilidad, costo y privacidad, **los datos sintéticos se pueden adaptar a necesidades específicas, ofreciendo una flexibilidad y escalabilidad sin precedentes.**

Los conceptos clave incluyen⁴⁹:

- **Generación algorítmica:** Uso de modelos estadísticos y de aprendizaje automático para producir conjuntos de datos que se asemejan a fenómenos del mundo real.
- **Datos basados en simulación:** Creación de datos a través de entornos virtuales que replican las condiciones del espacio, como la gravedad cero o las temperaturas extremas.
- **Preservación de la privacidad:** Garantizar que la información confidencial no quede expuesta mediante el uso de datos sintéticos en lugar de datos del mundo real.

Un ejemplo en el ámbito militar del uso de sistemas de IA en SDA es el de proporcionar un apoyo rápido a un operador para **reaccionar a un misil antisatélite** lanzado por un adversario durante un conflicto. Los equipos humanos pueden tener dificultades para determinar cómo **evitar el misil a tiempo** mientras protegen el satélite de los objetos que lo rodean. Sin embargo, algoritmos de IA entrenados adecuadamente pueden evaluar los datos relativos a la **trayectoria del misil**, analizar las **acciones potenciales** a la luz de los efectos posteriores y **recomendar maniobras y contramedidas**, de forma suficientemente rápida para que el equipo humano pueda responder de manera efectiva. En último término, pueden llevarlas a cabo sin intervención humana.

Las **técnicas de generación de datos sintéticos para IA** pueden ser muy variadas, desde el uso de modelos estadísticos tradicionales hasta técnicas avanzadas de aprendizaje profundo con consecuencias éticas sobre el uso de estos datos para la toma de decisiones (Hao et al., 2024). Concretamente, los LLM han surgido como un enfoque revolucionario para generar conjuntos de datos sintéticos. Modelos dotados de capacidades de aprendizaje en contexto y su amplio conocimiento lingüístico preentrenado se han empleado para producir conjuntos de datos sintéticos. **Esta capacidad facilita el entrenamiento de modelos en dominios más pequeños, como el espacial, abordando de manera efectiva el reto de la escasez de datos.**

⁴⁹ https://www.meegle.com/en_us/topics/synthetic-data-generation/synthetic-data-for-space-exploration

Como ejemplo de este enfoque (Tran et al., 2024) se han utilizado **datos sintéticos para conocer la distancia entre satélites de la constelación de Starlink**. Una vez generado un conjunto de datos sintéticos, la siguiente fase es utilizar los datos para diseñar y optimizar una red neuronal empleada para predecir la distancia de máxima aproximación entre el par combinado de satélites Starlink. En este caso, se ha utilizado una **red neuronal bayesiana (BNN)**⁵⁰ que proporciona un marco adecuado para **modelar la incertidumbre en las predicciones de redes neuronales**, lo que las hace particularmente útiles en tareas en las que la cuantificación de la incertidumbre es esencial como es el caso de SDA.

La figura 21 presenta los resultados relativos a la **precisión del modelo** que representa los valores reales frente a los valores medios previstos. Esta figura muestra cómo **las predicciones se alinean con un modelo perfecto** de forma significativamente mejor cuando la verdadera distancia de aproximación más cercana es grande.

Un aspecto relevante es el **post procesamiento de la salida BNN** y cómo un operador puede interpretar la medida de incertidumbre. La herramienta ESP proporciona al operador estimaciones de la distancia de máxima aproximación y una incertidumbre, lo que permite la toma de decisiones basadas en el nivel de aceptación del riesgo del operador.

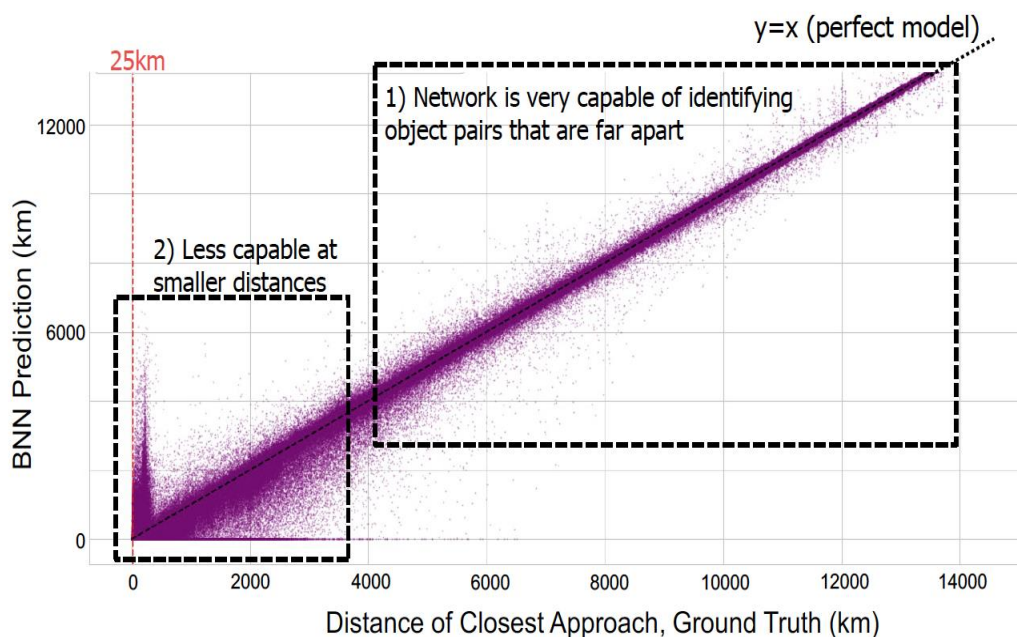


Figura 21. Precisión del modelo frente a valores reales. Fuente: Tran et al., 2024

⁵⁰ BBN es un enfoque probabilístico de las redes neuronales que amplía las redes neuronales estándar mediante la incorporación de principios bayesianos. Una de las principales ventajas de las BBN es su capacidad para proporcionar estimaciones de incertidumbre junto con sus predicciones. La incertidumbre epistémica se refiere a la incertidumbre relacionada con la incapacidad de un modelo para capturar completamente los patrones dentro de sus datos de entrenamiento. En términos generales, ningún modelo es perfecto para reproducir el proceso estadístico que está tratando de representar, y la incertidumbre epistémica caracteriza el grado en que un modelo no lo consigue. La incertidumbre epistémica a menudo se puede reducir aumentando la cantidad de datos que se entrenan en un modelo aprovechando arquitecturas de modelos más sofisticadas o modificando algoritmos de optimización (Jospin et al., 2022).

La generación de datos sintéticos también se ha empleado en el ámbito de la observación de la Tierra. **SD4EO**⁵¹ es un proyecto de estudio que tiene como objetivo **demostrar el beneficio de utilizar datos de simulación basados en la física y herramientas de generación de datos** basadas en IA en aplicaciones con datos de observación de la Tierra.

La idea es disponer de **datos simulados capaces de replicar de manera realista las condiciones físicas**. Estos datos pueden proporcionar imágenes sintéticas que imitan las adquisiciones de imágenes reales, lo que permite la reproducción del rendimiento de detección de diferentes tipos de sensores. Los datos simulados pueden ser particularmente beneficiosos en la **categorización de objetivos**. El estudio busca establecer elementos fundamentales para el ambicioso objetivo de incorporar datos de simulación en las analíticas de observación de la Tierra impulsadas por IA (AI4EO), y explorar si esta fuente de datos adicional puede complementar las mediciones reales obtenidas por los sensores de EO.

En todo caso, seguirán produciéndose avances en el uso de la IA en los próximos años que **reducirán los problemas en la generación de datos sintéticos**. Entre ellos (Hao, 2024):

- **Adopción de modelos generativos más avanzados.** Un posible enfoque implica el uso de modelos generativos avanzados, como las redes generativas adversarias (GAN) o los autocodificadores variacionales (VAE). Estos modelos poseen capacidades de aprendizaje más sólidas, lo que permite un modelado más preciso de la compleja distribución de datos del mundo real. Al emplear estos modelos avanzados, es posible evitar mejor los problemas de cambio de distribución, mejorar la diversidad de los datos generados y simular de manera más efectiva el ruido y la incertidumbre presentes en el mundo real.
- **Integración de la experiencia específica del dominio para mejorar el realismo de los datos sintéticos.** La integración de conocimientos específicos de dominio, como gráficos por computadora, física y ciencia cognitiva, puede contribuir a mejorar el realismo de los datos sintéticos. Una comprensión más profunda de las leyes físicas detrás de escena y los procesos cognitivos puede conducir a una generación más precisa de varios escenarios, lo que hace que los datos sintéticos se acerquen más a las situaciones del mundo real.

En resumen, en los próximos años será posible **almacenar y procesar datos reales de operaciones espaciales y combinarlos con datos sintéticos**, para mejorar el entrenamiento de LLM adaptados al espacio, y con ello las inferencias y predicciones obtenidas por los modelos de IA empleados. Recuérdese que esta información seguirá siendo clasificada.

3.2.5. Detección de satélites con comportamientos anómalos

Otro ámbito de interés relacionado con SDA y facilitado por el uso de algoritmos de IA es la **detección de satélites con comportamientos anómalos en constelaciones de satélites**. Dado el crecimiento previsto en el lanzamiento de satélites para los próximos

⁵¹ El proyecto comenzó en octubre de 2023 y está liderado por GMV NSL Ltd (Reino Unido), en asociación con la empresa española GMV SGI y la Universidad de Valencia, España.
<https://eo4society.esa.int/projects/sd4eo/>

años⁵², se necesita emplear tecnologías de IA para monitorizar las constelaciones de satélites y rastrear el creciente número de objetos en el espacio.

Agatha es una herramienta de IA desarrollada por *Slingshot Aerospace* para identificar satélites atípicos dentro de grandes constelaciones en órbita baja (LEO)⁵³. La tecnología se desarrolló en un programa de DARPA sobre el uso de la IA para generar **información sobre el dominio espacial y encontrar naves espaciales anómalas en grandes constelaciones de satélites**.

Agatha utiliza diversas técnicas de IA para procesar los datos de entrada⁵⁴ con el fin de **detectar diferencias en las características y comportamiento de los satélites** y señalar aquellos con comportamientos potencialmente peligrosos, cambios en el perfil de la misión, o mal funcionamiento. La herramienta analiza datos astrométricos, contextuales y fotométricos de alta resolución, así como las ubicaciones y las horas de las comunicaciones de los satélites con la Tierra. La herramienta, entrenada con conjunto de datos de 60 años de constelaciones simuladas, ha permitido en su uso con datos reales encontrar **valores atípicos en constelaciones comerciales operativas del mundo real**.

El "*factor de interés*" es la medida final de distinción que realiza la herramienta sobre un satélite basada en un conjunto de algoritmos y flujos de datos, que, en última instancia, proporcionan la base para señalar **satélites atípicos individuales**. La figura 22 presenta un esquema representando las **relaciones entre satélites de diversas constelaciones**. Obsérvese que algunos de ellos (puntos rojos) se han considerado por la herramienta como "anómalos".

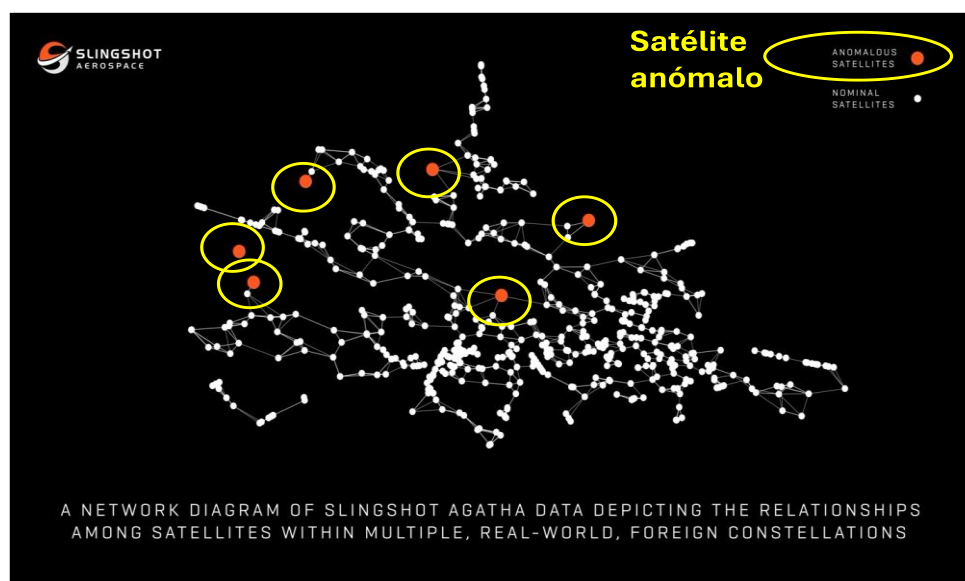


Figura 22. Diagrama de Agatha representando las relaciones entre satélites de diversas constelaciones. Fuente: <https://www.slingshot.space/news/slingshot-darpa-agatha-ai>

⁵² A principios de 2023, la Unión Internacional de Telecomunicaciones había recibido solicitudes para más de 300 constelaciones que representarían más de 1 millón de satélites.

⁵³ <https://www.slingshot.space/news/slingshot-darpa-agatha-ai>

⁵⁴ Procedentes de Slingshot Global Sensor Network, Slingshot Seradata así como fuentes de datos de terceros

Después de identificar una serie de satélites anómalos dentro de esas constelaciones, la empresa *Slingshot Aerospace* confirmó con los respectivos operadores de satélites que los satélites identificados diferían de los demás en hardware, misión y/o parámetros operativos. Es obvio el interés militar en defensa espacial que puede tener este tipo de herramientas. En la figura 23 se puede ver el uso de **Agatha** para detectar un satélite atípico entre uno de los **grupos de satélites de reconocimiento militar Yaogan "tripleto" de China**.

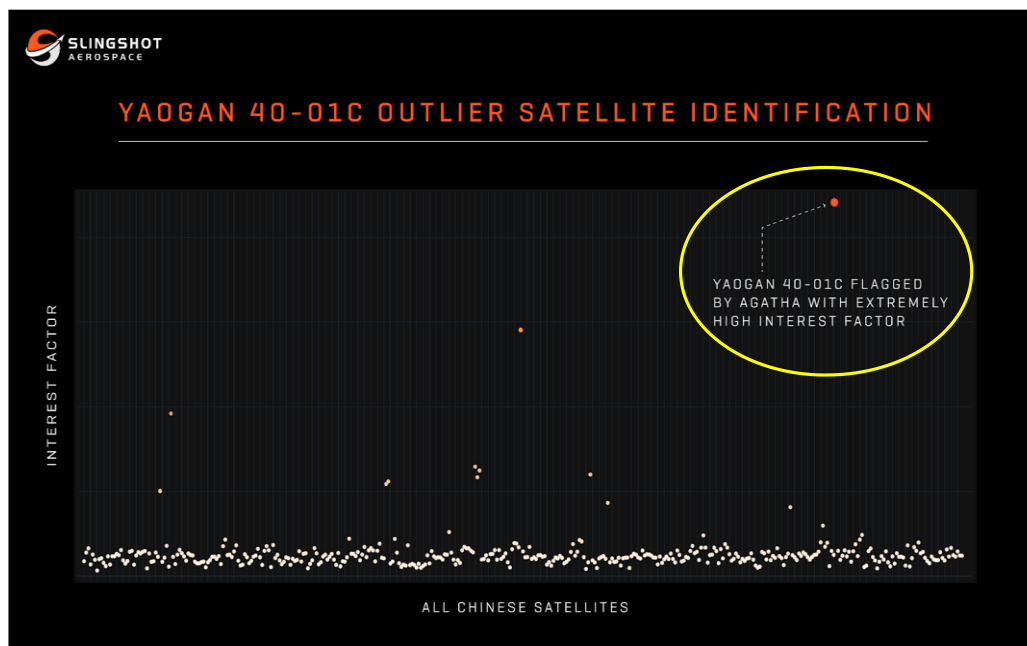


Figura 23. Fuente: <https://www.slingshot.space/news/slingshots-agatha-ai-identifies-outlier-satellite-in-group-of-chinese-reconnaissance-satellites>

3.2.6. Previsible evolución de SDA potenciado por IA

El informe de CSET (Huynh, 2025) para conseguir una mejora sustancial en la gestión de SDA empleando IA, recomienda abordar tres áreas complementarias:

En primer lugar, implementar **herramientas de IA maduras con un rendimiento operativo comprobado**, como redes neuronales livianas para la determinación de órbitas en tiempo real y la clasificación de conjunciones. En primer lugar, implementar **herramientas de IA maduras con un rendimiento operativo comprobado**, como redes neuronales livianas para la determinación de órbitas en tiempo real y la clasificación de conjunciones.

En segundo lugar, adquirir **bancos de pruebas de simulación de alta fidelidad y gemelos digitales**, equipados con canalizaciones de integración e implementación continuas, para validar algoritmos en diversos escenarios orbitales. Estos entornos virtuales facilitan las verificaciones funcionales de nuevos algoritmos, ensayos de ataques adversarios y ejercicios de trabajo en equipo humano-máquina sin poner en peligro los activos en vivo.

En tercer lugar, implementar **programas de capacitación específicos** que generen confianza en los operadores en las herramientas de IA. Estos programas deben incorporar

técnicas de IA explicables como **LIME** (*Local Interpretable Model-Agnostic Explanations*)⁵⁵ para aclarar por qué los modelos marcan ciertos riesgos de conjunción o recomiendan tareas específicas, preservando la supervisión y la responsabilidad humanas.

Pensando hacia el futuro de la SDA, disponer de capacidad de procesamiento IA a bordo abre la puerta a técnicas y procedimientos innovadores para operaciones satelitales. Al igual que ocurre con los “enjambres de drones”, **un conjunto de satélites potenciados por IA podría volar en formación cerrada**, lo que permite introducir conceptos como **satélites de defensa para proteger activos de alto valor en órbita**. En entornos disputados, estas formaciones podrían detectar, evaluar y responder a amenazas cercanas, como el reposicionamiento de un satélite defensor entre un objeto que se aproxima y una plataforma protegida, sin esperar comandos terrestres.

Pensando hacia el futuro de la SDA, disponer de capacidad de procesamiento IA a bordo abre la puerta a técnicas y procedimientos innovadores para operaciones satelitales. Al igual que ocurre con los “enjambres de drones”, **un conjunto de satélites potenciados por IA podría volar en formación cerrada**, lo que permite introducir conceptos como **satélites de defensa para proteger activos de alto valor en órbita**. En entornos disputados, estas formaciones podrían detectar, evaluar y responder a amenazas cercanas, como el reposicionamiento de un satélite defensor entre un objeto que se aproxima y una plataforma protegida, sin esperar comandos terrestres.

3.3. Análisis inteligente de imágenes satelitales

3.3.1. Relevancia en defensa

Las **operaciones militares terrestres** en el nivel **táctico** dependen, en gran medida, del conocimiento detallado y actualizado del terreno para los procesos de toma de decisiones. Desde comienzos del siglo XX se ha empleado la “**fotografía aérea**” como base de un análisis manual posterior en el que la experiencia del humano era esencial. Este proceso se siguió desarrollando con “**aviones espías**” volando a gran altura para obtener imágenes sin ser detectados como ejemplifica el caso del *Lockheed U-2* que se sigue utilizando desde la Guerra Fría con mejoras continuas en sus cámaras⁵⁶. Posteriormente, con la mejora de las tecnologías espaciales y el uso de cámaras de todo tipo (no solo ópticas) se incorporó el **análisis de imágenes espaciales**.

Los sistemas de “**observación de la Tierra**” mediante **satélites empleando cámaras de creciente resolución embarcadas** (como “*cargas útiles*” del satélite) deben considerarse como **sistemas duales**. Es el tipo de observación deseada y el procesamiento de la información obtenida la que determina su uso **civil** (p.ej. para conocer los efectos de desastres naturales sobre el terreno) o **militar** (p.ej. para conocer la disposición de fuerzas enemigas y tipo de material en una determinada zona de combate).

Su historia es antigua y se remonta a 1946 (Frackiewicz, 2025)⁵⁷. Actualmente, los satélites llevan **sensores que detectan la radiación electromagnética reflejada o emitida desde**

⁵⁵ <https://medium.com/latinxinai/explicabilidad-de-modelos-de-ml-lime-f9d0dceb5154>

⁵⁶ <https://www.bbc.com/mundo/vert-fut-55283333>

⁵⁷ Las primeras imágenes espaciales fueron capturadas en 1946 desde un cohete suborbital V-2 estadounidense a unos 105 km de altitud y la primera fotografía satelital real de la Tierra fue tomada el 14 de agosto de 1959 por el satélite estadounidense Explorer 6.

la superficie de la Tierra. La mayoría de los satélites de imágenes utilizan **sensores pasivos** que dependen de la luz solar como fuente de iluminación (capturando la radiación visible, infrarroja o térmica reflejada), mientras que otros utilizan **sensores activos** que emiten su propia señal (como pulsos de radar) y miden el retorno.

Desde el punto de vista de la defensa, los **satélites** ofrecen ventajas críticas para funciones de **inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR)**, lo que permite al ejército **saber, detectar, responder, y estar siempre preparado** ante amenazas si esta información es capturada con la suficiente resolución, enviada y procesada a tiempo para la toma de decisiones.

Una de las aplicaciones de imagen por satélite más empleadas en defensa es la **detección de objetos** a mayor distancia escaneando amplias áreas geográficas, con flexibilidad para cambiar a una vigilancia persistente para misiones de reconocimiento. Aunque el tipo de cámaras son similares, las resoluciones empleadas en imagen satelital para aplicaciones civiles pueden estar entre 10m y 30m y en aplicaciones militares pueden llegar a 50cm. El tamaño del terreno equivalente de un píxel de la imagen (por ejemplo, 30 m para Landsat, 50 cm para WorldView) determina el objeto más pequeño que se puede distinguir. Una resolución espacial más alta (tamaño de píxel más pequeño) revela más detalles.

En la figura 24 puede verse la imagen satelital de los daños sufridos por los edificios de la fábrica metalúrgica Azovstal en Mariúpol (Ucrania) en marzo de 2022 al comienzo de la guerra.



Figura 24. Imagen satelital de daños en los edificios de la fábrica metalúrgica Azovstal en Mariúpol, Ucrania, en marzo de 2022. Tecnologías Maxar. Fuente: <https://www.c4isrnet.com/battlefield-tech/space/2024/05/06/national-geospatial-intelligence-agency-creating-space-intel-hub/>

Actualmente, el uso de la IA forma parte de lo que se conoce como **análisis geoespacial con aprendizaje automático para la toma de decisiones tácticas**. En pocas palabras, se trata de integrar la IA para fusionar la información procedente de sensores en el espacio, combinarlos con información desde sensores terrestres, extraer inteligencia de forma autónoma y construir modelos predictivos de lo que observan. El uso de la IA para **combinar imágenes satelitales con inteligencia de señales** podría proporcionar una visión integrada de movimientos militares, lo que permitiría realizar evaluaciones de

amenazas más rápidas y precisas. A partir de ellas se dispondría, potencialmente, de nuevos medios para **proporcionar información filtrada a los responsables políticos**.

El concepto de análisis del terreno forma parte de la denominada **Preparación Inteligente del Campo de Batalla** (*"Intelligence Preparation of the Battlefield"*) o **IPB** que se define como *"el proceso sistemático de analizar las variables de la misión del enemigo, el terreno, el clima y las consideraciones civiles en un área de interés para determinar su efecto en las operaciones ... dando como resultado productos de inteligencia que se utilizan durante el proceso de toma de decisiones militares (MDMP) para ayudar a desarrollar cursos de acción (COA)"*⁵⁸.

Un ejemplo de uso se puede ver en la figura 25 en la que **el análisis geoespacial del terreno** permite proponer las decisiones tácticas más apropiadas para un pelotón en sus maniobras para evitar emboscadas. Las cuatro imágenes de la figura se corresponden con: 1) mapa de calor de la posición probable de contacto con el enemigo, 2) rutas preferidas hacia las posiciones de emboscada, 3) dirección de viaje más probable del enemigo hacia su objetivo, y 4) mejores posiciones de emboscada.

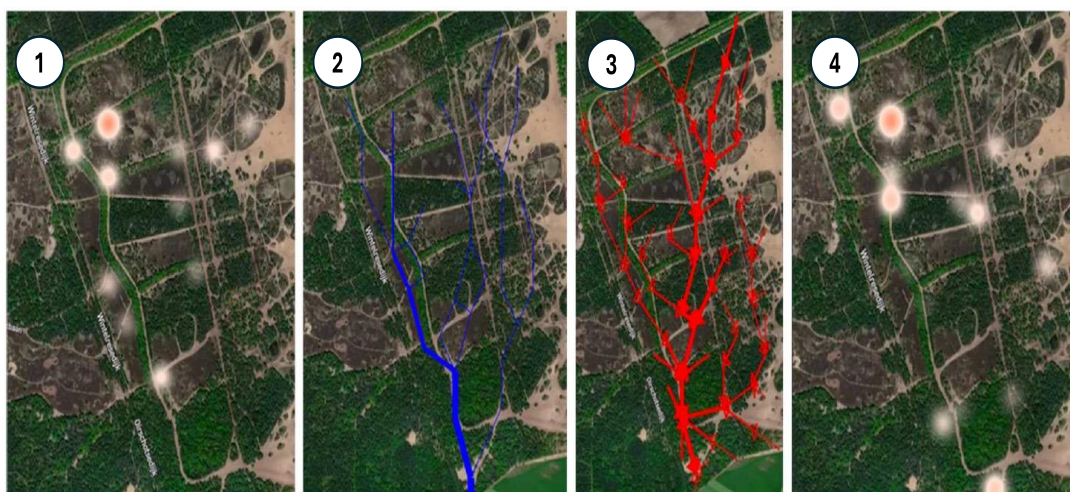


Figura 25. Análisis geoespacial para decisiones tácticas de un pelotón. Fuente:

<http://www.schadd.com/Papers/2021GeospatialanalysisforMachineLearninginTacticalDecisionSupport.pdf>

Existen otras plataformas más complejas y recientes como el sistema **ViDAR**⁵⁹ que puede detectar y rastrear múltiples objetos a altitudes de hasta 10.000 m y requiere solo unos pocos píxeles para detectar a una persona o un pequeño dron, lo que proporciona un conocimiento inmediato de la situación. El sistema utiliza sensores electroópticos e infrarrojos habilitados por IA para **detectar, geolocalizar, clasificar y rastrear objetivos de interés** en entornos desafiantes, ampliando el área de cobertura 220 veces en comparación con el campo de visión estrecho de una cámara electroóptica típica.

La figura 26 permite ver una zona escaneada (arriba) y la interfaz de usuario del operador (abajo) visualizando la trayectoria de un avión.

⁵⁸<http://www.schadd.com/Papers/2021GeospatialanalysisforMachineLearninginTacticalDecisionSupport.pdf>

⁵⁹ <https://shield.ai/vidar/>

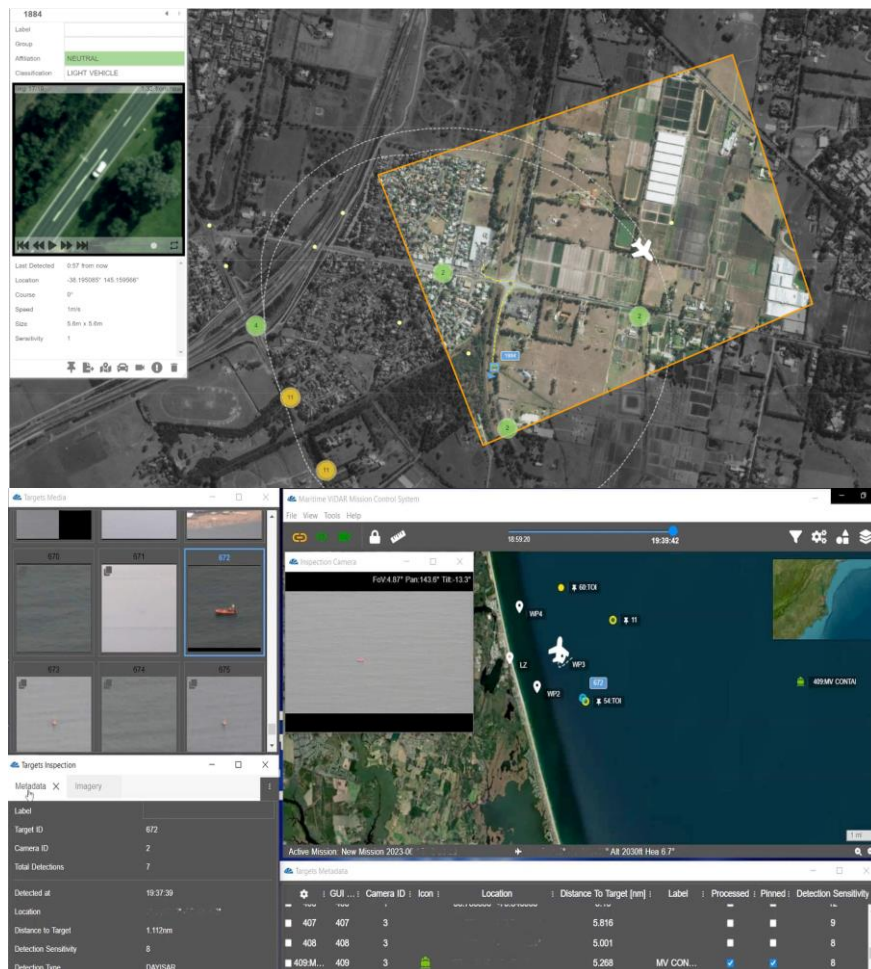


Figura 26. Sistema ViDAR. Fuente: <https://shield.ai/vidar/>

Las tendencias actuales en el procesamiento de imágenes satelitales en aplicaciones duales son (Frąckiewicz, 2025):

- **Detección de objetos y extracción de características:** Los modelos de visión de IA se utilizan para identificar y contar automáticamente todo, desde edificios y carreteras (para mapeo), árboles (para silvicultura), tipos de cultivos específicos (para agricultura), vehículos y aviones (para inteligencia). Esta automatización puede procesar imágenes a escala, marcando cambios o generando bases de datos de características. Un ejemplo es detectar sitios de minería ilegal en una selva tropical, tarea que sería demasiado tediosa manualmente.
- **Detección y alerta de cambios:** la IA sobresale en la comparación de imágenes a lo largo del tiempo para encontrar cambios. Los algoritmos pueden examinar las imágenes diarias de una zona de conflicto y alertar a los analistas cuando se detectan nuevos daños en un edificio o la aparición de vehículos donde no había ninguno. Esta tendencia evoluciona hacia la monitorización en tiempo real. Las empresas de satélites están invirtiendo en IA para proporcionar análisis como servicio: en lugar de limitarse a vender imágenes en bruto, ofrecen *suscripciones a alertas*.
- **Análisis predictivo y modelado:** Las nuevas herramientas de IA prometen un análisis más rápido e incluso predictivo, utilizando la gran cantidad de imágenes para anticipar

eventos. Utilizando series temporales de imágenes como entrada, los modelos de IA podrían predecir patrones de crecimiento urbano, resultados de rendimiento de cultivos o impactos de sequía. La combinación de datos satelitales con modelos de IA podría predecir escenarios como "es probable que haya una sequía aquí que podría provocar disturbios civiles".

- **Interfaces de lenguaje natural:** Se pretende hacer que la consulta de imágenes satelitales sea más accesible. En lugar de requerir que un experto en SIG escriba código, se podría preguntar a un sistema de IA en lenguaje natural: *"encuentre todas las imágenes donde el lago de esta región está en su extensión más baja en los últimos 5 años"* y la IA lo obtendría. Algunos grandes modelos de lenguaje se están ajustando para tales tareas geoespaciales.
- **Datos de entrenamiento para IA:** Los datos son clave para entrenar modelos; afortunadamente, existen décadas de imágenes satelitales etiquetadas (por ejemplo, de esfuerzos de mapeo). La IA también debe manejar datos multispectrales y de radar, más complejos que las fotos naturales. La naturaleza de "caja negra" de la IA puede ser un problema: los analistas deben confiar, pero verificar los resultados de la IA, especialmente en usos críticos como la inteligencia militar.

La ejecución de estas aplicaciones en estaciones terrestres implica recibir un **volumen de imágenes muy elevado** lo que, a su vez, requiere transferir enormes cantidades de datos en tiempos limitados a estaciones terrestres con la necesidad de disponer de canales de comunicación de gran ancho de banda. La solución a este problema proviene de la **mejora de la capacidad de computación a bordo** combinada con técnicas de IA que se puedan ejecutar en los propios satélites. El análisis y el filtrado de datos permite **reducir el flujo de datos** haciendo que parte del procesamiento se realice en el propio satélite.

Proyectos de desarrollo sobre **computación en el borde (edge computing) en el espacio** se están realizando en Estados Unidos. Como ejemplo, el *Centro para el Avance de la Ciencia en el Espacio*, que gestiona el *Laboratorio Nacional de la Estación Espacial Internacional (ISS)*, ha acordado en mayo de 2024 la realización de un proyecto con **LEOcloud**⁶⁰ (proveedor de servicios espaciales en la nube) con el objetivo de demostrar su infraestructura de computación espacial en el borde "como servicio" (*Space Edge™ Infrastructure as a Service*). **LEOcloud** instalará su **microcentro de datos virtualizado Space Edge** de primera generación en la ISS⁶¹.

En enero de 2025 *Voyager* ha anunciado un proyecto junto con *LEOcloud* para avanzar en la **tecnología de computación en el borde en el espacio con un enfoque en tecnología de neuro procesamiento**. El proyecto, tiene la intención de mejorar la fusión profunda de datos impulsada por la IA, la investigación y el desarrollo de microgravedad y las operaciones autónomas para usuarios finales comerciales y de defensa.

Por su parte, la ESA ha experimentado el uso de la IA para crear **nuevas capacidades en mini satélites inteligentes** desde 2022. Un ejemplo en este sentido (misión ya terminada)

⁶⁰ <https://www.leocloud.space/>

⁶¹ <https://drive.google.com/file/d/1xwg21LPM9belRqI4MeQRkt7VBmfNbrRX/view>

ha sido **FSSCat**⁶². Se trató de una misión innovadora de **dos CubeSats 6U**⁶³ **federados** en apoyo de los servicios de Medio Ambiente Terrestre y Marino de Copernicus. Permitió medir la humedad del suelo, la extensión y el espesor del hielo, y la detección de zonas de deshielo. La figura 27 permite ver los objetivos generales de la misión de la ESA ligados a la IA (arriba) y los dos satélites desarrollados (abajo). La IA se ha empleado para mejorar las capacidades espectrales y la eficiencia del envío de datos a la Tierra⁶⁴.



Figura 27. Misión FSSCat/ Φ -sat-1. Fuente: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/fsscat>

⁶² FSSCat fue el ganador del premio *Copernicus Masters Sentinel Small Sat Challenge 2017* promovido por la ESA. El objetivo de este concurso era definir, implementar y validar una misión de observación de la Tierra complementaria al programa Copernicus, con un presupuesto limitado a 1 millón de euros. <https://earth.esa.int/eogateway/missions/fsscat/description>

⁶³ Un satélite 6U es un CubeSat compuesto por seis unidades, "bloques" estandarizados de aproximadamente 10 cm³. De ahí viene el nombre de la clasificación de los satélites, los cubos que componen su estructura más que su forma completa. un CubeSat de 6U mide aproximadamente 30 cm x 20 cm x 10 cm. <https://brightascension.com/what-is-a-6u-cubesat-and-when-would-you-use-one/>

⁶⁴ https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/06/FSSCAT

3.3.2. Optimización de la observación de la Tierra con IA en constelaciones

La tecnología de observación de la Tierra desde el espacio está avanzando desde dos perspectivas complementarias: la mejora en la capacidad de procesamiento a bordo empleando sistemas de IA para analizar la información obtenida y reducir el flujo de datos a Tierra como se ha presentado en la sección anterior, y la **transición desde emplear satélites individuales a constelaciones de satélites**.

Un ejemplo relevante en este sentido es el de la constelación desarrollada por la empresa de Estados Unidos *Maxar Technologies* denominada **WorldView Legion**⁶⁵. Se trata de una **constelación de seis satélites de observación** (cuatro ya en órbita lanzados dos en mayo y dos en octubre de 2024 y otros dos se han lanzado en abril de 2025)⁶⁶ con un **uso dual civil y militar**. Una vez que los seis satélites de **WorldView Legion** estén en pleno funcionamiento, la constelación de *Maxar* podrá recopilar más de 6 millones de kilómetros cuadrados de imágenes de la Tierra por día, incluidos hasta 3,6 millones de kilómetros cuadrados de imágenes de 30 cm. *Maxar* ya dispone de 80 satélites en órbita y proporciona imágenes de inteligencia a 40 gobiernos, entre ellos a Ucrania para ayudar a determinar objetivos rusos⁶⁷.

La nueva constelación de *Maxar* representa una mejora sustancial frente a las capacidades actuales diseñada para transformar las imágenes satelitales de alta resolución, ofreciendo una **cobertura, tasas de revisita y claridad de imagen muy superior** para una amplia gama de aplicaciones.

- Defensa e inteligencia: la alta frecuencia de revisitas sobre el mismo punto permite la supervisión en tiempo real para la toma de decisiones urgentes.
- Respuesta ante desastres: Las imágenes rápidas de las áreas afectadas proporcionan datos precisos para los esfuerzos de rescate y recuperación.
- Planificación urbana: Las imágenes detalladas ayudan a diseñar y optimizar la infraestructura.
- Monitorización ambiental: Las imágenes de alta resolución respaldan los estudios de los ecosistemas y el impacto del cambio climático

Como ejemplo de la resolución alcanzada en la figura 28 puede verse una imagen capturada desde estos satélites. La imagen muestra **buques de grano en Siria** con detalles como las grúas para cargar la carga, el puente de navegación en la popa y las líneas de amarre unidas al embarcadero.

⁶⁵ <https://ongeo-intelligence.com/blog/worldview-legion-advanced-satellite-imaging>

⁶⁶ <https://www.maxar.com/press-releases/maxar-successfully-launches-fifth-and-sixth-worldview-legion-satellites>

⁶⁷ El uso de imágenes detalladas con fines militares hace también que su uso esté sometido a decisiones de los gobiernos en función de sus planteamientos geoestratégicos. El 7 de marzo de 2025 Maxar ha comunicado que no puede proporcionar sus fotos a Ucrania (utilizadas con fines militares, pero también para la protección de civiles). La decisión se produce sólo unos días después de que la administración Trump confirmara la suspensión del intercambio de información y datos de inteligencia con el ejército ucraniano.

<https://legrandcontinent.eu/es/2025/03/07/la-administracion-trump-prohibe-a-maxar-compartir-sus-imagenes-de-satelite-con-ucrania/>

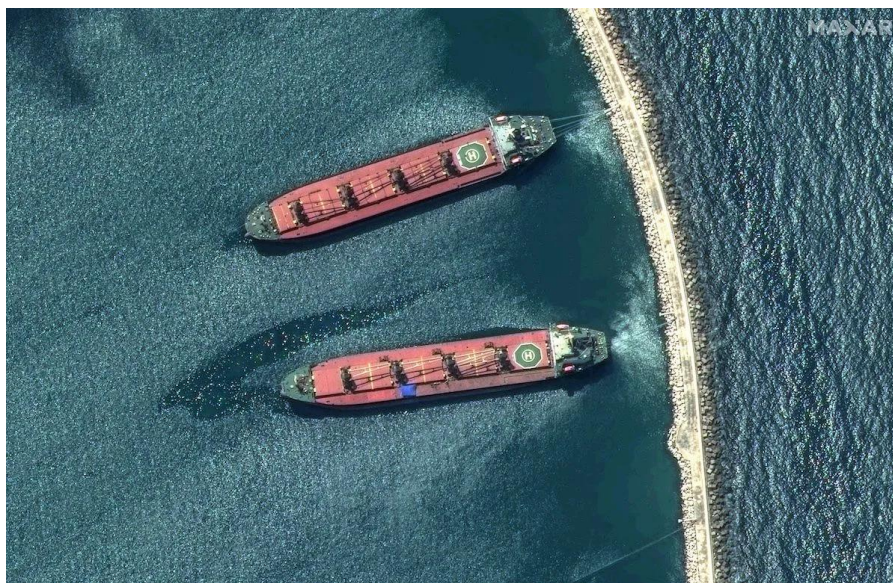


Figura 28. Imagen capturada por la constelación WorldView Legion. Fuente: <https://ongeo-intelligence.com/blog/worldview-legion-advanced-satellite-imaging>

Un parámetro crítico para aplicaciones de defensa (inteligencia) es la **resolución alcanzada por la imagen** lo que, a su vez, permitirá o no un análisis posterior más preciso. La **resolución espacial de las imágenes satelitales** juega un papel vital en la determinación del nivel de detalle con el que se pueden observar los objetos en la imagen (distancia mínima a la que dos puntos distintos de la superficie de la Tierra pueden reconocerse como entidades separadas). Esencialmente, cuanto mayor sea la resolución, más pequeños serán los objetos que se pueden discernir en la imagen⁶⁸. La mejora en la resolución alcanzada en el caso de *WorldView Legion* puede verse en la figura 29. A la izquierda con una resolución de 0,30 m y a la derecha de 1,20 m

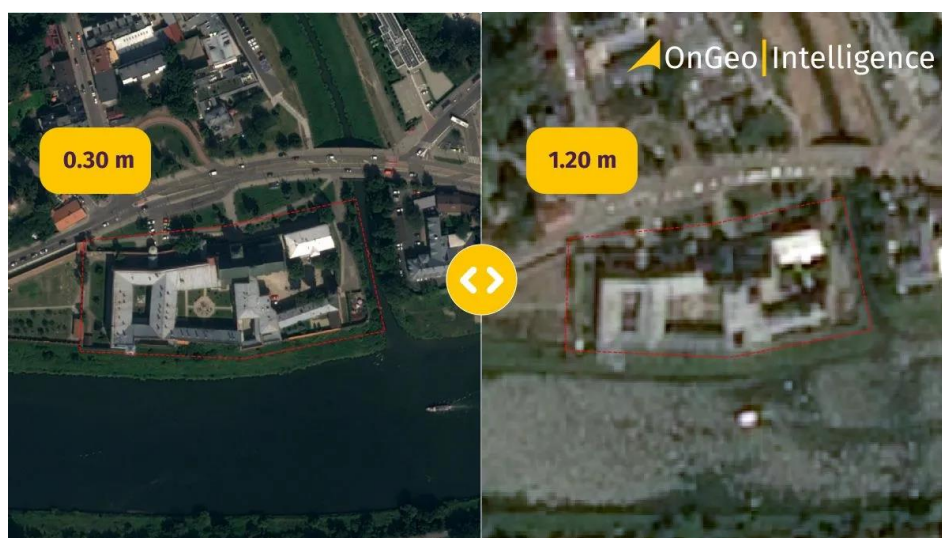


Figura 29. Diferencias en la resolución de imágenes. Fuente: <https://ongeo-intelligence.com/blog/satellite-image-resolution>

⁶⁸ Si la resolución es de 1 metro, cada píxel de la imagen representa un área cuadrada con una longitud de lado de 1 metro en la superficie de la Tierra

Una tendencia relevante es que **los usuarios no solo quieren disponer de imágenes, sino también el análisis de esas imágenes** para lo que la combinación de técnicas de IA con *big data* es imprescindible. Mediante la integración de herramientas avanzadas con imágenes en tiempo real, los usuarios pueden extraer información procesable de forma rápida y precisa. Obsérvense las diferencias en detalle en función de la resolución del satélite en la figura 30.

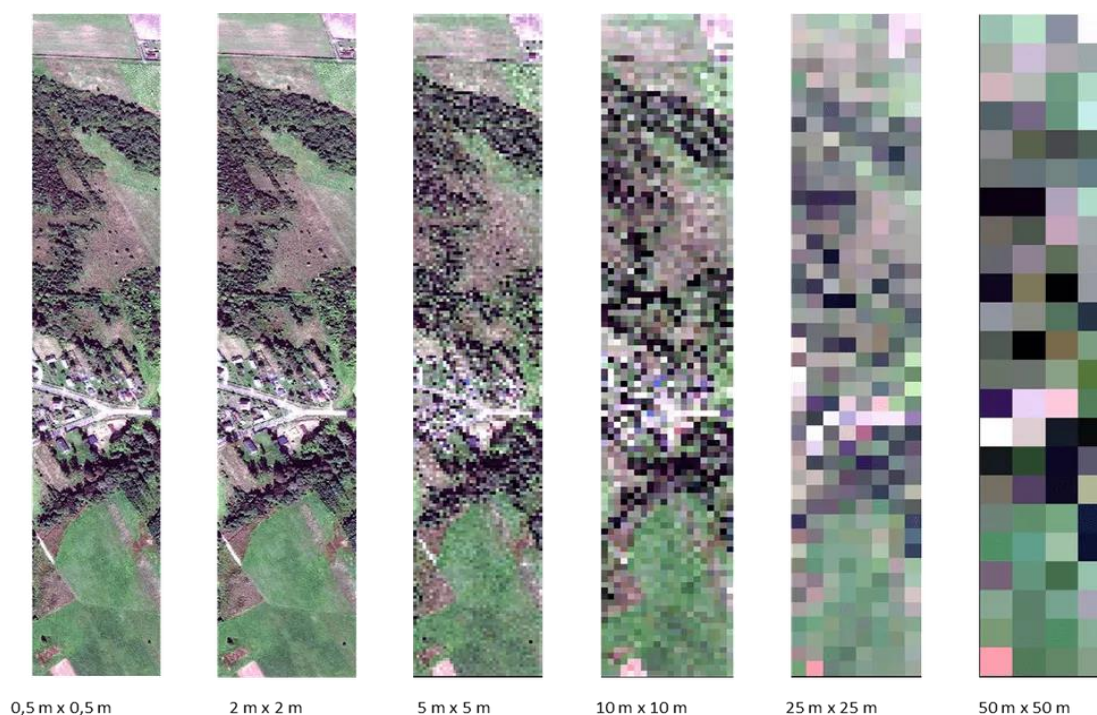


Figura 30. Resoluciones de imágenes espaciales. Fuente: <https://ongeo-intelligence.com/blog/satellite-image-resolution>

La empresa Maxar consigue estas resoluciones y el consiguiente análisis aprovechando su archivo de más de 125 petabytes de datos de observación de la Tierra con análisis basado en inteligencia artificial.

También la IA se está empleando en sistemas de visión empleadas para la **observación de la Tierra en aplicaciones duales** con el objetivo de reducir el volumen de información enviada incrementando la capacidad de procesamiento a bordo.

En junio de 2025 *Maxar Intelligence* anunció el lanzamiento de **Sentry^{TM69}**, una solución de **monitorización persistente** única en su tipo que ofrece inteligencia operativa estratégica y de amenazas a escala global para una ventaja de decisión en tiempo real. **Sentry** integra capacidades impulsadas por IA como la orquestación de constelaciones de múltiples fuentes, la fusión geoespacial y modelos avanzados de aprendizaje automático para análisis automatizados. Está diseñado específicamente para monitorizar cientos de áreas en todo el mundo para resolver problemas complejos, como anticipar amenazas o proteger la infraestructura industrial.

Unos de los casos en los que esta técnica ha demostrado utilidad es el de la **identificación de naves encubiertas** (“buques oscuros”) que se ha basado tradicionalmente en la

⁶⁹ <https://www.maxar.com/press-releases/maxar-launches-sentry-a-breakthrough-persistent-monitoring-suite-that-delivers-predictive-intelligence-at-global-scale>

descarga de imágenes ópticas de alta resolución capturadas por cámaras de observación de la Tierra. Sin embargo, dado que la capacidad de transmisión de datos como el almacenamiento son muy limitados, no siempre se pueden transmitir a una estación terrestre. Y cuando se reciben deben ser analizadas por humanos para identificar buques con la información del sistema **AIS** (*Automatic Identification System*).⁷⁰

Como ejemplo, el sistema **AIRIS** (*Artificial Intelligence Retraining In Space*) de *Mitsubishi Heavy Industries* (véase la figura 31) de cámaras junto a un detector de objetos basado en IA. Cuando la cámara escanea la superficie de la Tierra, en lugar de enviar automáticamente todos esos datos para su procesamiento en una estación terrena, AIRIS despliega su IA para detectar los objetos considerados como objetivos (“barcos oscuros”), y selecciona y transmite solo datos de las áreas donde se encuentran esos objetos reduciendo fuertemente el flujo de datos.

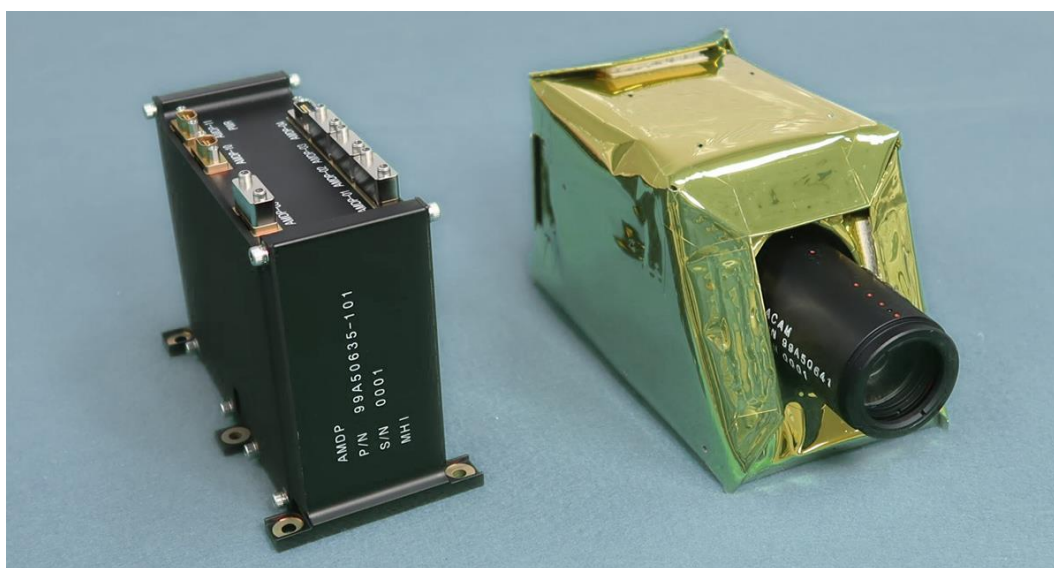


Figura 31. AIRIS: Cámara satelital de Mitsubishi (derecha) y detector inteligente (izquierda). Fuente: <https://spectra.mhi.com/how-ai-can-help-satellites-track-dark-ships-from-space>

En la figura 32 puede verse esquemáticamente el **ciclo de trabajo** empleado. AIRIS ha sido seleccionado como uno de los temas de demostración del **Programa de Demostración de Tecnología Satelital Innovadora** llevado a cabo por la *Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)*. Está previsto que se lance en el año 2025 a bordo del satélite de demostración RAISE-4 de JAXA.

⁷⁰ AIS es un sistema de seguimiento costero de corto alcance que se utiliza actualmente en los buques. Fue desarrollado para proporcionar información de identificación y posicionamiento tanto a buques como a estaciones costeras. El AIS funciona tomando su posición y movimientos a través del sistema GPS de las embarcaciones o un sensor interno integrado en una unidad AIS. A continuación, esa información se recopila junto con la información programable de la unidad AIS (por ejemplo, el número de identidad del servicio móvil marítimo (MMSI), el nombre del buque, el destino, el tipo de carga) y se transmite en segundo plano a intervalos regulares, al tiempo que recibe información AIS de otros buques. [https://shipping.nato.int/nsc/operations/news/2021/ais-automatic-identification-system-overview#:~:text=The%20Automatic%20Identification%20System%20\(AIS,both%20vessels%20and%20shore%20stations.](https://shipping.nato.int/nsc/operations/news/2021/ais-automatic-identification-system-overview#:~:text=The%20Automatic%20Identification%20System%20(AIS,both%20vessels%20and%20shore%20stations.)

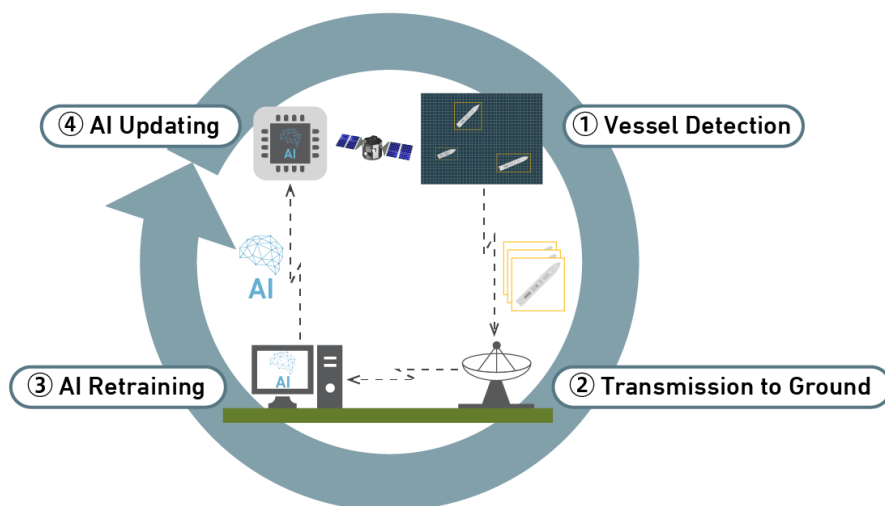


Figura 32. Ciclo de trabajo del sistema AIRIS. Fuente: <https://spectra.mhi.com/how-ai-can-help-satellites-track-dark-ships-from-space>

Este mismo enfoque de IA se está empezando a utilizar en pequeños satélites (Chintalapati et al., 2024). Como un ejemplo más de uso de la IA vale la pena mencionar el desarrollo de **Φsat-2** de la Agencia Europea del Espacio (ESA)⁷¹. Se trata de un mini satélite de tipo “6u CubeSat” diseñado para demostrar cómo las tecnologías de IA pueden **optimizar la observación de la Tierra (EO) desde el espacio** mejorando las capacidades de procesamiento a bordo. La figura 33 se corresponde con una imagen del satélite lanzado.

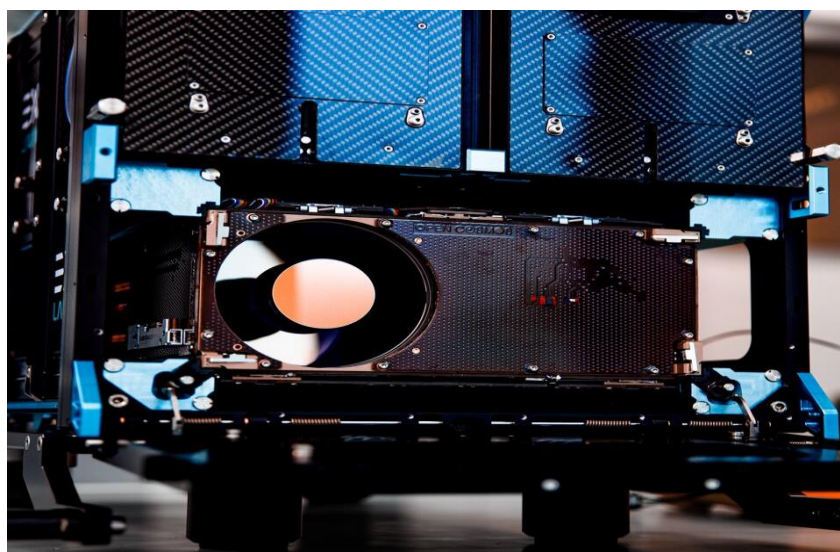


Figura 33. Imagen del satélite Φsat-2 de la Agencia Europea del Espacio (ESA). Fuente: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Phsat-2/New_satellite_demonstrates_the_power_of_AI_for_Earth_observation

El satélite **emplea herramientas de IA y sistemas de imágenes multispectrales** diseñados para 1) eliminar imágenes que están nubladas, 2) detectar y clasificar

⁷¹ Φsat-2 ha sido lanzado en agosto de 2024 a bordo de un SpaceX Falcon 9 con seis aplicaciones de IA. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Phsat-2

embarcaciones marítimas, 3) transformar imágenes de una forma a otra para la generación de mapas en tiempo real, 4) detectar anomalías en los ecosistemas marinos y detectar incendios forestales, y 5) herramientas para comprimir imágenes a bordo y reconstruirlas en tierra para reducir la descarga de datos.

De particular interés es la aplicación denominada **Sat2Map**. Se ha diseñado empleando técnicas de IA avanzadas (*Cycle-Consistent Adversarial Networks*)⁷² para **transformar imágenes satelitales en mapas de calles**, lo que permite la generación y entrega de datos cartográficos casi en tiempo real. Cuando el satélite **ϕsat-2** orbita sobre un área afectada y toma imágenes, estas son analizadas por el procesador a bordo para identificar las calles y generar un mapa correspondiente. Esta capacidad de mapeo en tiempo real es importante para los servicios de seguridad y emergencia. La ESA planea probar inicialmente la aplicación *Sat2Map* en el sudeste asiático para demostrar su potencial para **ayudar en la gestión de crisis**.

3.4. Defensa de la navegación satelital GNSS

3.4.1. Sistemas de navegación satelital

Un **Sistema de Navegación satelital** tiene como objetivo proporcionar servicios continuos de **posicionamiento, navegación y temporización (PNT)** a usuarios civiles, comerciales y de seguridad nacional en todo el mundo. La **navegación satelital del tipo GNSS**⁷³ incluye el **GPS** de los Estados Unidos, el **GLONASS** de Rusia, el **Galileo** de Europa y el **BeiDou** de China.

Un sistema de navegación satelital se emplea habitualmente para **conocer la posición de un objeto en 3D y guiarle en su recorrido** en base a la información recibida en tiempo real desde cuatro o más satélites lanzados para este fin. De hecho, en el mundo civil se emplea habitualmente tanto para el posicionamiento de personas o vehículos terrestres como también aviones y buques, tripulados o no, en multitud de aplicaciones combinados con cartografía.

Este uso es válido en la medida en la que la señal procedente desde cuatro satélites para poder determinar correctamente la posición de un objeto con la precisión necesaria se reciba correctamente, no está alterada ni debilitada para poder recibirse e interpretarse. **Este supuesto no siempre va a ser cierto en entorno de defensa.**

Aunque el **GPS** (*Global Positioning System*) fue el primero, data de 1978, ha sido superado en precisión por *Galileo* o *BeiDou* mucho más modernos. Eso ha conducido a su propia evolución (Weeden, 2025) como se indica en la figura 34.

⁷² *CycleGAN* es una forma de IA generativa de la categoría de modelos de traducción de imagen a imagen no supervisados. Básicamente, la traducción de imagen a imagen implica transformar una imagen de entrada de un dominio (por ejemplo, fotos) a una imagen de salida en otro dominio (por ejemplo, una pintura o, en este caso, un mapa).

⁷³ El acrónimo GNSS se refiere a “*Sistemas Mundiales de Navegación por Satélite*” (*Global Navigation Satellite Systems*)

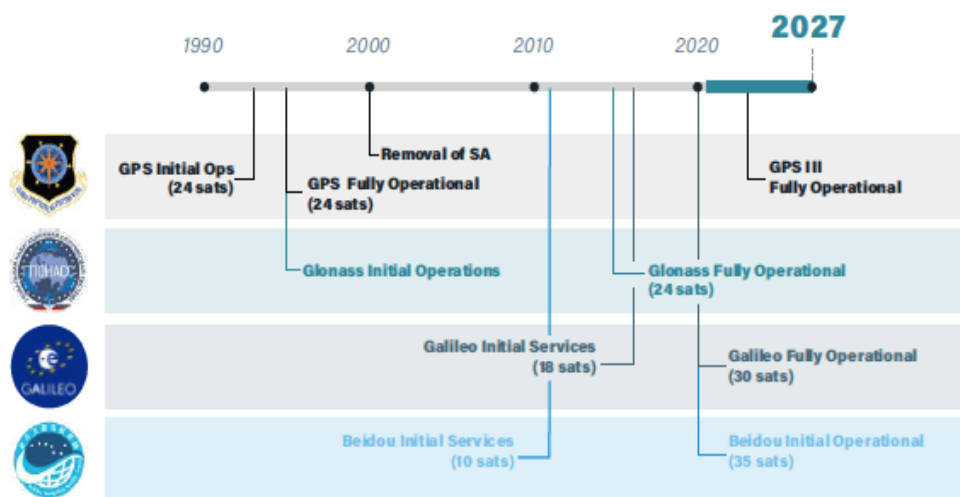


Figura 34. Evolución de los sistemas de navegación GNSS. Fuente: TEDAE (Cifras y tendencias /2023 del sector espacial español)

GPS III, lanzado por primera vez en 2018, ofrece tres veces la precisión y ocho veces el rendimiento anti-interferencias de las generaciones anteriores de GPS, con un satélite GPS III lanzado por SpaceX en 2025. La modernización del GPS incluye la señal civil común L1C para la interoperabilidad con Galileo y un sistema terrestre OCX de próxima generación para manejar nuevas señales y seguridad. Está previsto que en 2030 toda la constelación de satélites GPS haya pasado a la generación GPS III (Frąckiewicz, 2025a).

El **Servicio de Posicionamiento Estándar** (SPS, *Standard Positioning Service*) abierto a todos) generalmente ofrece una precisión horizontal de ~ 3 a 5 metros en buenas condiciones, mientras que el **Servicio de Posicionamiento Preciso encriptado** (PPS, solo militares de Estados Unidos y aliados) es aún más preciso. La modernización está introduciendo **M-Code**, una señal militar robusta con una anti-interferencias superior. Con todo ello, los satélites GPS III son tres veces más precisos que sus predecesores y ocho veces más resistentes a las interferencias.

Estas mejoras también se están llevando a cabo en el caso del sistema de navegación Galileo⁷⁴, aunque los satélites desplegados actualmente son mucho más modernos que los iniciales lanzados por GPS.

El **uso de inteligencia artificial (IA) en el sistema de navegación Galileo**, específicamente en su señal gubernamental **PRS**, se relaciona con mejorar la seguridad, precisión y robustez de las señales en entornos críticos. Galileo PRS, diseñado para administraciones públicas y aplicaciones sensibles como defensa, seguridad y emergencias, utiliza IA para gestionar datos complejos, optimizar la navegación y proteger contra interferencias o ciberataques.

La IA ayuda a gestionar datos GNSS fusionados con sensores inerciales y otros sistemas, optimizando la precisión y resistencia frente a interferencias como las de interferencia y suplantación de la señal satelital. Además, se utiliza en la monitorización y análisis de señales para garantizar la autenticidad y protección de datos cifrados,

⁷⁴ https://defence-industry-space.ec.europa.eu/two-new-galileo-satellites-more-robust-and-reliable-space-services-2024-04-29_en

esenciales para aplicaciones militares y de defensa garantizando la autenticidad y seguridad de las señales. Concretamente:

- Uso de modelos predictivos para la monitorización y predicción de actividad ionosférica, mejorando la precisión en condiciones adversas.
- Procesamiento avanzado de señales mediante técnicas como modulación *BOC* (*Binary Offset Carrier*), que optimiza la robustez y eficiencia espectral del sistema.

La inteligencia artificial (IA) impacta positivamente en la **interoperabilidad del servicio PRS de Galileo** con otros sistemas de navegación satelital GNSS al optimizar la integración de datos y mejorar la resiliencia del sistema. Tecnologías de IA como **el aprendizaje automático permiten fusionar señales GNSS de múltiples constelaciones** (Galileo, GPS, GLONASS) **y sensores adicionales**, garantizando precisión y robustez incluso en condiciones adversas. Además, la IA facilita la detección de interferencias y la autenticación de señales, fortaleciendo la cooperación entre sistemas globales para aplicaciones críticas como defensa y transporte.

Los **satélites Galileo de segunda generación (G2G)**, y los primeros lanzamientos se esperan alrededor de 2026-2027. Dispondrá de doce satélites (dos familias de seis satélites) en desarrollo por *Thales Alenia Space (TAS)* y *Airbus Defence and Space (ADS)*⁷⁵. Estos satélites G2G serán más grandes y pesados (2,3 toneladas) que los actuales, y contarán con propulsión eléctrica (véase figura 35).

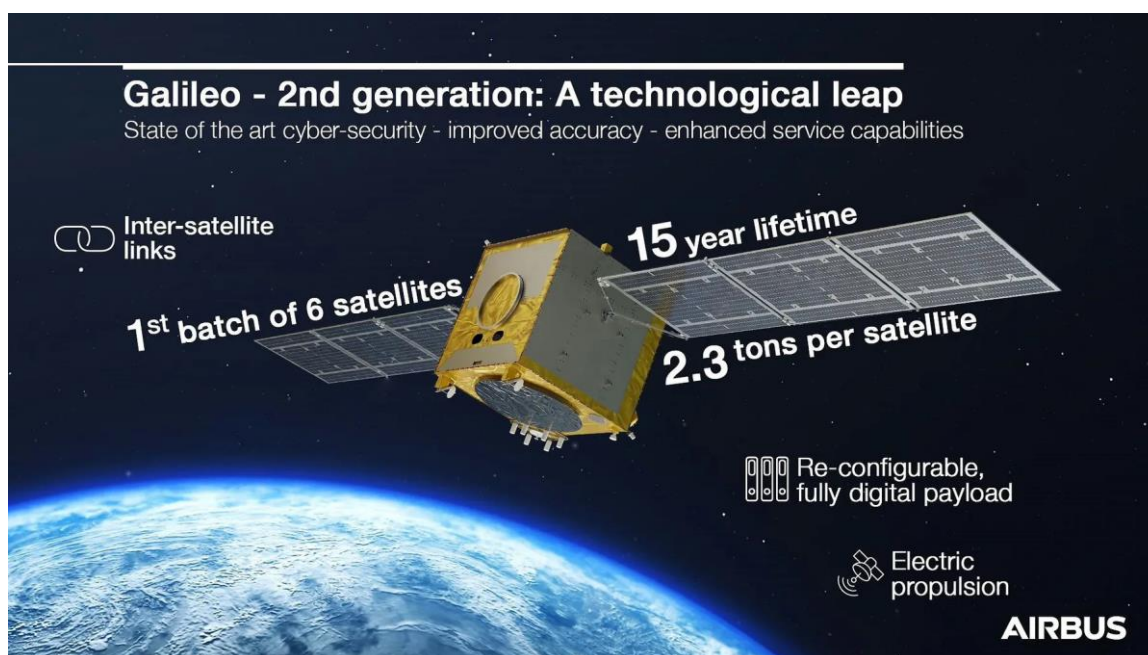


Figura 35. Características del programa G2G. Fuente:

<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2023-12-airbus-starts-galileo-second-generation-satellite-production>

Concretamente, los satélites de G2G incorporarán mejoras sustanciales como:

⁷⁵ https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Future_and_Evolutions

- **enlaces entre satélites:** los satélites pueden comunicarse directamente entre sí para el comando, control y verificación cruzada del rendimiento, lo que reduce la dependencia de las estaciones terrestres y mejora la resiliencia del sistema),
- **antenas avanzadas y nuevos tipos de señales** para aumentar aún más la precisión (resoluciones del orden de centímetros),
- **confiabilidad:** mecanismos sofisticados para proteger las señales de interferencias, mejorando la robustez e integridad del sistema.
- **flexibilidad** con cargas de pago digitales y reconfigurables en órbita, lo que permitirá introducir nuevas señales y servicios en respuesta a las necesidades de los usuarios y la evolución de la tecnología.

En la figura 36 puede verse uno de estos satélites G2G desarrollado por *Airbus* en *Friedrichshafen (Alemania)* en la cámara limpia de pruebas durante el proceso de integración.



Figura 36. Satélite de G2G en pruebas de sala limpia en Friedrichshafen. Fuente: <https://www.spacevoyaging.com/news/2024/05/16/next-generation-of-galileo-satellites-is-quickly-taking-shape/>

3.4.2. Perturbaciones de la señal satelital

Actualmente, la **perturbación de la navegación satelital se ha convertido en un objetivo** de potencias militares, de grupos terroristas o de la ciberdelincuencia organizada dada su consideración como **tecnología dual** relevante tanto para vehículos no tripulados (UAV, UGV, USV), o dispositivos de internet de las cosas (IoT). Un ciberataque a los sistemas de navegación satelital de un dron o de un barco se refiere a la **perturbación intencionada de la señal**, fundamentalmente GPS, utilizada **con el objetivo de impedir o degradar el funcionamiento de un sistema adversario**. El número de ciberataques es creciente como se puede ver en la figura 37 (Weeden, 2025) con datos de 2024 en **zonas conflictivas del planeta**.

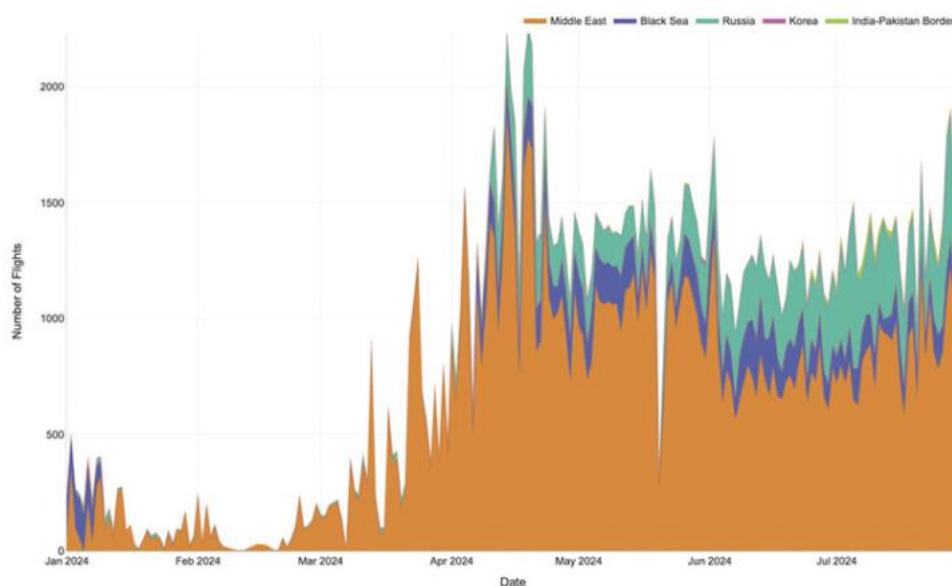


Figura 37. Número estimado de vuelos afectados por interferencias de la señal GPS en 2024.
Fuente: <https://csps.aerospace.org/papers/us-policy-decisions-shaped-civil-and-commercial-use-gps>

Algunos datos demuestran la relevancia del problema de interferencia GPS (*jamming*) son los incidentes en zonas de alto riesgo como el Estrecho de Ormuz, el Mar Negro, el Mediterráneo oriental, el Mar Rojo y otros puntos críticos regionales. Solo en el **Mar rojo**, se ha pasado de cero buques afectados en el cuarto trimestre de 2024 a más de 180 en el primer trimestre de 2025 y 890 buques afectados en el segundo trimestre (Glen, 2025). Las anomalías detectadas frente a la costa de Sudán posiblemente estaban relacionadas con una mayor colaboración militar entre Irán y Sudán. La interferencia afectó el seguimiento de los buques, lo que sugiere la planificación de **esfuerzos estratégicos para enmascarar las actividades marítimas**.

La denominada “**guerra electrónica de navegación**” (**Navigation Warfare, NAVWAR**) representa un dominio crítico dentro del espectro más amplio de la *Guerra Electrónica* (EW) (centrándose sobre las capacidades de posicionamiento, navegación y sincronización (PNT) esenciales para las operaciones militares y civiles.

NAVWAR abarca un **conjunto de medidas ofensivas y defensivas destinadas a explotar, engañar, interrumpir o proteger los sistemas de navegación por satélite**, principalmente los GNSS. Estas constelaciones de satélites se utilizan para servicios comerciales y militares y proporcionan servicios de navegación a usuarios de todo el mundo⁷⁶. En la figura 36 se pueden ver todos los elementos que intervienen en NAVWAR.

Un aspecto singular de NAVWAR es su **dilema de doble uso**. Las mismas capacidades que permiten las operaciones militares podrían degradar las operaciones de las fuerzas amigas y dañar los sistemas civiles. El uso generalizado de GNSS en varios sectores significa que las tecnologías NAVWAR tienen implicaciones mucho más allá del campo de batalla, afectando a todo, desde la aviación comercial hasta los servicios de emergencia. Esta

⁷⁶ https://defense-update.com/20240614_navwar-introduction.html

interconexión exige un enfoque de NAVWAR, que permita equilibrar las capacidades ofensivas con los riesgos potenciales para la infraestructura civil.

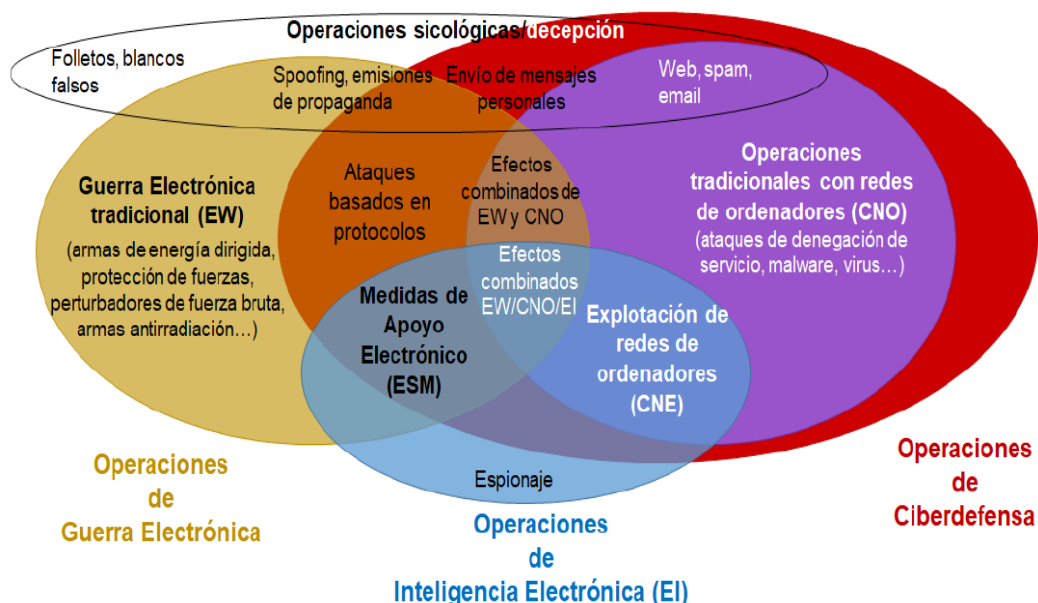


Figura 38. Ámbito de actuación de la guerra electrónica. Fuente: RAND CORPORATION⁷⁷ (adaptada de <https://cyberdefensereview.army.mil/CDR-Content/Articles/Article-View/Article/1136055/convergence-of-cyberspaceoperations-and-electronic-warfare-effects>)

La señal de navegación puede ser alterada de forma intencionada empleando diversos métodos. Los más empleados son las **interferencias** (“jamming”) y la **suplantación** (“spoofing”).

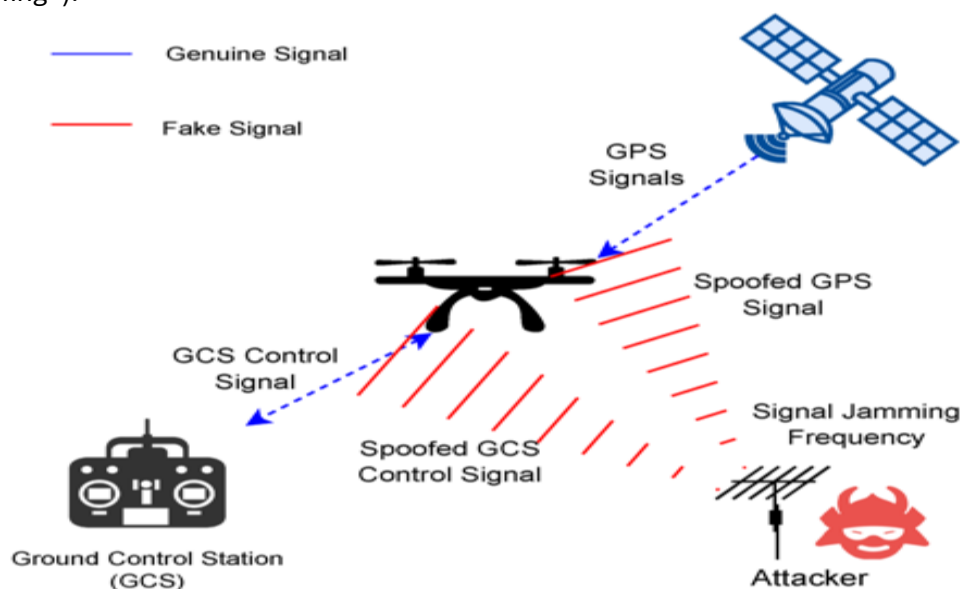


Figura 39. Ciberataques de navegación sobre un dron.

⁷⁷ Redefining Information Warfare Boundaries for an Army in a Wireless Word. United States Army. RAND Corporation monograph series. 2013.

En la figura 39 puede verse su uso en el caso de **ataques a un dron** interfiriendo la señal GPS del satélite o suplantando la señal de control enviada al dron por el operador. Estos ciberataques han llevado, en la práctica, a la reducción de la navegación GPS en zonas conflictivas.

- **GPS jamming (interferencia).** Ataque basado en enviar una señal que impide al UAV el cálculo de su posición real. Se basa en que una señal de potencia relativamente baja puede anular las señales GNSS mediante interferencias. Uso de un pequeño dispositivo para generar y transmitir una señal en la misma frecuencia empleada por el receptor legítimo con el objetivo de interferir con las señales GPS legítimas. Existen muchos tipos de equipos comerciales para generar interferencias (denominados “jammers”).
- **GPS spoofing (suplantación).** Ataque significativo mediante el envío de señales falsas a cualquier sistema inteligente que utilice señal GNSS para posicionamiento y navegación. Se basa en enviar una señal errónea intencionada al receptor del sistema para generar un cálculo erróneo de la posición para hacerle creer al objeto que está en otra posición.

En la figura 40 puede verse una situación real de acciones de **negación de servicio de navegación** sobre señales de posicionamiento global sobre una zona de Ucrania. La **complejidad de estos ciberataques** sobre la señal de navegación satelital ha quedado de manifiesto en el paso dado por el ejército de Ucrania para “confundir” a drones rusos sobre su posición, cambiar sus coordenadas y planes de vuelo, y atacar objetivos de Rusia.

La técnica de detección empleada normalmente implica analizar las características de la señal detectada (tales como intensidad y patrones de correlación) para identificar discrepancias indicativas derivadas de suplantación o interferencias. Por ejemplo, los ataques de suplantación suelen presentar varios picos de correlación en vez de uno solo por lo que se podrían identificar en un análisis inteligente de la señal.



Figura 40. Negación de servicios de navegación satelital en junio de 2024. Fuente: Izquierda: <https://gpsjam.org/?lat=43.14742&lon=40.08740&z=2.4&date=2024-12-12> Derecha: <https://www.gpsworld.com/hawkeye-360-tech-reveals-early-gps-interference-in-ukraine/#:~:text=Technology%20from%20HawkEye%20360%20Inc.%20has%20detected%20and,that%20might%20threaten%20military%20and%20civil%20navigation%20applications>

Las técnicas empleadas contra ataques del tipo **suplantación**, sobre todo, a la señal GPS sobre sistemas no tripulados se basan en el **análisis de la señal de reloj con efecto Doppler y mecanismos de cifrado**. Se trata de sistemas complejos que reducen la precisión de la posición al emplear muchos sensores mecánicos que acumulan errores y suelen generar múltiples alarmas de falsos positivos.

3.4.3. Uso de la IA para la defensa de la navegación satelital

Frente a las limitaciones de las técnicas actuales, **el uso de IA ofrece muchos mejores resultados** y se ha convertido en una herramienta indispensable para detectar si la señal de navegación ha sido alterada o, incluso, permitir la navegación sin ella empleando técnicas de aprendizaje automático y aprendizaje profundo (Ghanbarzade y Soleimani, 2025).

Panella (2024) describe diversas técnicas de navegación basadas en el uso de la IA.

- Integración de datos con IA en sistemas de navegación.
- Sistemas de navegación inercial y navegación basada en IA.
- Navegación visual e integración de IA.
- Capacidades autónomas y seguridad en la navegación basada en IA.
- Técnicas avanzadas de IA para la detección de suplantación (spoofing).

Integración de datos con IA en sistemas de navegación

Los sistemas de navegación basados en IA requieren la fusión de datos de varios sensores a bordo y de algoritmos de aprendizaje automático (ML). Al integrar información de unidades de medición inercial (IMU), cámaras, radares, LIDAR⁷⁸ y otras fuentes de datos ambientales como barómetros y magnetómetros, **la IA permite obtener una comprensión integral del entorno de la aeronave**.

Estos sistemas de navegación basados en IA procesan constantemente datos de sensores, identifican patrones, toman decisiones en tiempo real y se ajustan a las condiciones cambiantes, todo ello sin depender de la entrada de satélites. Los modelos de aprendizaje automático se entrenan con amplios conjuntos de datos de dinámica de vuelo, condiciones ambientales y posibles escenarios de navegación, lo que permite a la IA "aprender" a interpretar los datos de los sensores para garantizar un vuelo estable, seguro y preciso.

Además, las redes de aprendizaje profundo permiten que los sistemas de navegación basados en IA predigan y reconozcan problemas en tiempo real como obstáculos, cambios climáticos repentinos o interferencias hostiles. Estos sistemas pueden ajustar dinámicamente las trayectorias de vuelo y optimizar la eficiencia del combustible, el éxito de la misión y la seguridad general.

Sistemas de navegación inercial y navegación basada en IA

⁷⁸ Se trata de una técnica de teledetección activa que utiliza un sensor embarcado en diferentes tipos de plataformas que emite pulsos de luz ininterrumpidamente y capta sus retornos, también denominados ecos o rebotes. Midiendo el tiempo que tarda en regresar ese pulso de luz, se puede calcular la distancia recorrida y, de esa forma, obtener la información tridimensional de los elementos. <https://pnoa.ign.es/pnoa-lidar/tecnologia-lidar>

Un componente clave de la navegación basada en IA en entornos sin posibilidad de usar GNSS es la integración de **sistemas de navegación inercial (INS)**. El INS utiliza acelerómetros y giroscopios para calcular la posición de la aeronave mediante el seguimiento de la velocidad, la aceleración y la orientación. Sin embargo, los sistemas INS tradicionales son propensos a desviarse con el tiempo. Los sistemas de navegación basados en IA pueden **mitigar esta deriva**, ya que la IA monitoriza continuamente los errores acumulados y los recalibra para mantener un posicionamiento preciso.

La combinación de INS y navegación basada en IA permite un control muy preciso sobre la trayectoria de la aeronave, ajustando dinámicamente la trayectoria de vuelo en función de datos en tiempo real. Los modelos de aprendizaje automático ayudan a la IA a reconocer patrones de deriva y errores de sensores, lo que permite la autocorrección y reduce la dependencia de entradas externas como las señales de satélite.

Navegación visual e integración de IA

La navegación visual es otro aspecto crucial de la navegación basada en IA en entornos sin GNSS. Al aprovechar las técnicas de visión artificial, los sistemas de IA utilizan cámaras o radares tipo LIDAR para detectar puntos de referencia, características del terreno y estructuras artificiales hechas por el hombre (p.ej. edificios, puentes). **Estas señales visuales permiten a la aeronave establecer su posición en relación con el entorno, lo que permite la navegación sin señales GNSS.**

En áreas urbanas, por ejemplo, donde las señales GNSS pueden verse interrumpidas por edificios altos o interferencias, los sistemas de navegación basados en IA pueden usar datos visuales para identificar y seguir carreteras, ríos u otros puntos de referencia reconocibles. Estos sistemas también pueden "aprender" de misiones anteriores, mejorando continuamente sus capacidades de navegación en entornos similares.

Capacidades autónomas y seguridad en la navegación basada en IA

A medida que las capacidades de la navegación basada en IA continúan evolucionando, la seguridad sigue siendo una prioridad absoluta. Una de las ventajas más significativas de la IA en los sistemas de control de vuelo es el potencial de mayores niveles de autonomía. Los sistemas de navegación basados en IA pueden permitir que las aeronaves no tripuladas operen con una mínima intervención humana, incluso en entornos complejos donde las señales GNSS no son fiables o no están disponibles.

La redundancia y los sistemas de seguridad son cruciales en el diseño de los sistemas de navegación basados en IA para garantizar un funcionamiento continuo, incluso si fallan uno o más sensores. Los algoritmos de IA también supervisan el estado de los sensores, empleando técnicas de mantenimiento predictivo para evitar posibles fallos de funcionamiento del sistema. Este nivel de autonomía y seguridad garantiza que los sistemas de navegación basados en IA puedan funcionar eficazmente en los entornos más desafiantes, ofreciendo una solución fiable para misiones en las que los pilotos humanos corren peligro o no pueden intervenir.

Técnicas avanzadas de IA para la detección de suplantación (*spoofing*)

La **mejora de la detección de la suplantación de la señal (*spoofing*)** con IA está basada en el análisis de patrones en grandes conjuntos de datos que permiten reconocer sutiles diferencias que se les escapan a los métodos convencionales. Dos posibles enfoques:

- **Aprendizaje automático supervisado.** Se basa en detectar ataques del tipo de suplantación de la señal GPS utilizando los ficheros de registros (*logs*) de los UAV. Esta técnica permite obtener una alta tasa de detección sin necesidad de HW especial.
- **RNN profunda (*DeepPOSE*)** (Aftatah y Zebbara, 2024). Se basa en reconstruir de forma precisa la trayectoria del UAV en presencia de medidas GPS con ruido debido a un ataque. Combina redes neuronales convolucionales y recurrentes. En la figura 41 se puede ver la arquitectura de alto nivel del sistema ***DeepPOSE*** basado en un estimador de la posición y el detector de suplantación de la señal GPS.

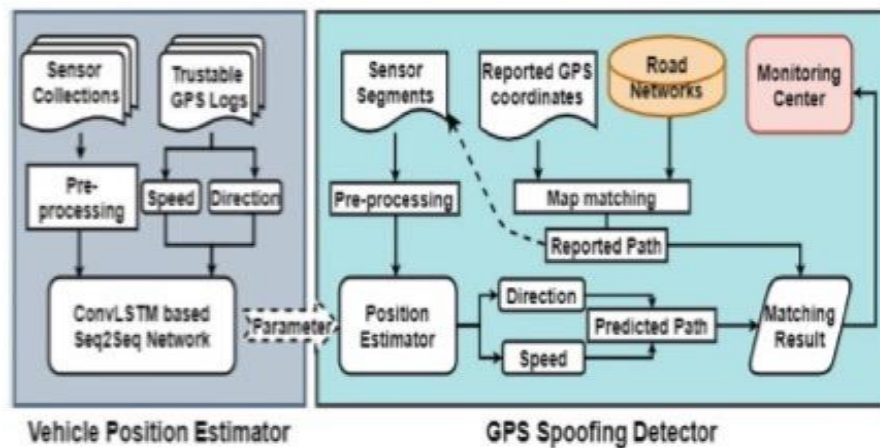


Figura 41. Arquitectura del sistema *DeepPOSE*. Fuente: Aftatah y Zebbara (2024)

A pesar de estos avances persisten **limitaciones frente a ataques combinados de interferencia y suplantación**. De hecho, el uso de sistemas basados en IA solo se ha probado en contextos concretos no generalizables, persisten altas tasas de falsos positivos, y se requiere su validación frente a todo tipo de señal GNSS. Por estos motivos, se han desarrollado métodos para **rastrear la posición de aeronaves incluso cuando no puedan transmitir su posición GPS** utilizando solo su **dirección de aeronave de 24 bits** transmitida y la hora de recepción de equipos espaciales como cargas útiles.

Un ejemplo es el desarrollo por *Aireon* (2024) de una solución de multilateración que permite la determinación independiente de la posición de las aeronaves equipadas con ADS-B a bordo de los **satélites Iridium**⁷⁹. Para ello se emplea una aplicación de **multilateración de área amplia por satélite (SWAM)** que utiliza mediciones de diferencia de tiempo de llegada (TDOA) a partir de la detección simultánea de transmisiones ADS-B en múltiples cargas útiles, interferencias GPS y suplantación de identidad.

El sistema de ***Aireon*** se ha ensayado en los países bálticos, sobre la base de aeronaves con valores bajos de la categoría de integridad de posición (PIC) notificados (correlacionado con aeronaves con grandes radios de incertidumbre de posición horizontal de su GPS). Los resultados obtenidos demuestran que un número significativo de las aeronaves estaban experimentando interferencias con el GPS en el Báltico. Obsérvese en la figura 42 cómo **la detección se ha incrementado fuertemente**

⁷⁹ Iridium es una empresa global de comunicaciones por satélite que proporciona acceso a servicios de voz y datos en cualquier lugar de la Tierra. Consta de 66 satélites de comunicaciones que giran alrededor de la Tierra en 6 órbitas bajas LEO a una altura aproximada de 780 km de la tierra. Cada una de las 6 órbitas consta de 11 satélites equidistantes entre sí. <https://www.iridium.com/>

comparando la situación antes de la invasión de Ucrania, un poco tras ella, y a finales de 2023.

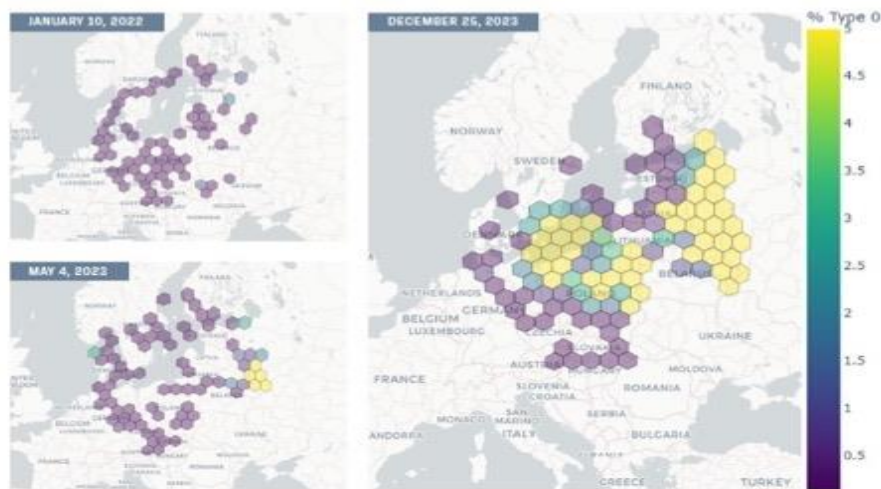


Figura 42. Evolución de la detección de interferencias y suplantación de la señal GPS en el Báltico (datos de Mayo de 2024). Fuente:

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://aireon.com/wp-content/uploads/2024/05/Aireon-White-Paper_GPS-Interference_May2024.pdf&ved=2ahUKEwj8zo_D4PCKAxVphP0HHQsGBI4QFnoECBoQAAQ&usg=AOvVaw0VLvsbSC56L8pbBgJy0fO1

Probablemente, sistemas reales en entornos degradados sin posibilidad de usar navegación satelital GNSS requerirán combinar diversas técnicas de IA para mejorar los resultados. Conseguirlo supone encarecer el coste de los sistemas satelitales lo que es un reto para su uso comercial.

Uso de relojes atómicos para PNT

Otro elemento necesario es la mejora de la precisión de la sincronización en sistemas de posicionamiento, navegación y control de tiempo (PNT). En este sentido, la **incorporación de relojes atómicos en satélites** representa un avance crucial para garantizar una sincronización ultra precisa y confiable. Estos relojes, basados en fenómenos cuánticos, permiten medir el tiempo con una exactitud sin precedentes, lo que resulta esencial en operaciones que demandan alta precisión y robustez, como las maniobras tácticas militares, las telecomunicaciones críticas y la vigilancia en el espacio.

Los relojes atómicos proporcionan una **resiliencia operativa que refuerza la estabilidad de los sistemas PNT ante interferencias electromagnéticas y ciberataques**. Además, su compatibilidad con tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y la criptografía cuántica les permite integrarse en redes de comunicación y análisis en tiempo real, mejorando así las capacidades operativas y estratégicas.

El sistema de navegación Galileo ofrece, desde enero de 2023, una **precisión** horizontal de hasta 20 cm (y 40 cm en vertical, convirtiéndose en la primera constelación de navegación por satélite en ofrecer esta precisión de forma gratuita las 24 horas del día en la mayor parte del planeta en condiciones nominales. Galileo usa su sistema de tiempo (Galileo System

Time, GST), mantenido por un conjunto de **relojes atómicos ultra precisos** con una exactitud de nanosegundos (una milmillonésima parte de un segundo)⁸⁰.

El empleo de **enlaces láser entre satélites** para la transmisión de datos podría marcar un antes y un después en el sector de posicionamiento, navegación y sincronización temporal (PNT). A diferencia de las señales de radio tradicionales, los enlaces ópticos ofrecen una mayor resistencia a interferencias, capacidad de transferencia de datos y una precisión sin precedentes, con una exactitud espacial a nivel milimétrico y temporal en el rango de los picosegundos.

China ya dispone en 2025 de **enlaces láser de alta velocidad en órbita entre satélites** de 400 gigabits por segundo que reducen la necesidad de estaciones terrestres. *Laser Starcom*, una empresa aeroespacial comercial establecida en Beijing en 2020, anunció en marzo de 2025 que había logrado un enlace de comunicaciones de 400 gigabits por segundo entre dos satélites separados 640 kilómetros⁸¹. La compañía también informó que los enlaces satelitales se mantuvieron estables a lo largo del tiempo, con errores de seguimiento de menos de cinco microradianes (0.0002865 grados).

Europa no está dormida. La *Agencia Espacial Europea (ESA)* está trabajando con socios para desarrollar su **sistema satelital basado en láser de red digital y óptica de alto rendimiento (HydRON)**⁸² y tiene como objetivo demostrar redes de comunicaciones ópticas en órbita a velocidades de hasta 100 Gb/s y superiores. Se espera que esta velocidad de datos, según la ESA, sea escalable en última instancia a un terabit por segundo. La **ESA** ha dado un paso clave en el **desarrollo de tecnologías ópticas para navegación** con la firma de un contrato con un consorcio europeo, liderado por la alemana OHB System para un estudio de definición de concepto (Fase A/B1) y el predesarrollo de tecnologías críticas que podrían culminar en un **demostrador en órbita para la sincronización temporal y el posicionamiento por vía óptica (OpSTAR)**⁸³.

En la figura 43 se puede ver la arquitectura del sistema demostrador sobre *HydRON* que la ESA pretende poner en marcha para demostrar la interconectividad entre los activos espaciales y terrestres, brindando servicios de transporte óptico de datos de baja latencia y/o alta capacidad. Esto permitirá la integración de sistemas de comunicación por satélite en infraestructuras de redes terrestres, apoyando futuras arquitecturas de redes híbridas.

⁸⁰ Los cuatro relojes atómicos a bordo de cada satélite Galileo, aunque también son altamente precisos, tienden a desviarse debido a sus características físicas, la radiación, las irregularidades térmicas y otros factores inherentes a los desafíos del espacio. Por eso, cada 100 minutos los relojes en vuelo se sincronizan con GST.

https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Seis_datos_sobre_Galileo_que_te_sorprendieran

⁸¹ Sus dos satélites, Guangchuan 01 y 02, se lanzaron a la órbita terrestre baja (LEO) en noviembre de 2024 en un cohete comercial Zhuque-2 desarrollado por la compañía Landspace con sede en Beijing. <https://spectrum.ieee.org/satellite-internet-china-crosslink>

⁸²

https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/ESA_s_HydRON_project_for_space-based_optical_communications_moves_forward

⁸³ <https://actualidad aeroespacial.com/esa-impulsa-la-navegacion-por-laser-con-el-programa-opstar/>

El cronograma de implementación de **HydRON-DS** apunta a un lanzamiento en 2027, seguido de una fase de demostración en órbita (IOD) durante 2028-2029.

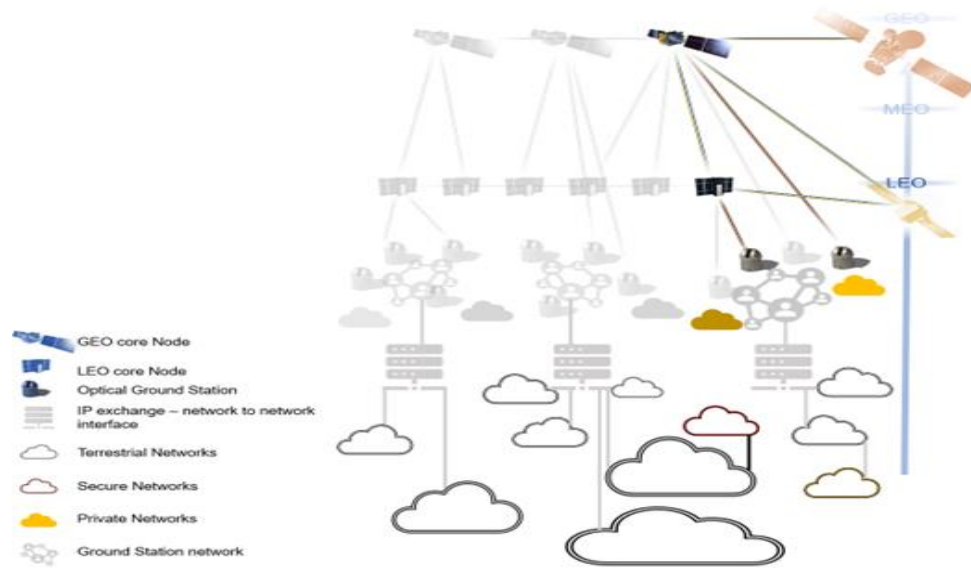


Figura 43. Demostrador HydRON de la ESA de un enlace óptico de alta velocidad. Fuente: <https://connectivity.esa.int/opening-high-throughput-optical-network-demonstration-system-hydronds-element-3-user-segment-and-evolution>

También se han realizado experiencias de **transmisión láser desde un satélite a una estación terrena**. El MIT en Estados Unidos ha desarrollado **TBIRD** (*TeraByte InfraRed Delivery*)⁸⁴, una carga útil compacta en un pequeño satélite que demostró un **enlace espacio-tierra de 200 Gb/s en 2023** y abordó algunos de los desafíos adicionales de transmitir a través de la atmósfera, incluida la dispersión o distorsión de la turbulencia atmosférica del haz. La figura 44 muestra la **carga útil de comunicaciones láser TBIRD** (caja cuadrada) a bordo de un pequeño satélite en órbita terrestre baja que establece un enlace óptico a una estación terrestre en California (círculo).



Figura 44. Experiencia TBIRD. Fuente: <https://www.ll.mit.edu/r-d/projects/terabyte-infrared-delivery-tbird>

⁸⁴ <https://www.ll.mit.edu/r-d/projects/terabyte-infrared-delivery-tbird>

3.5. Ajustes de la órbita para evitar colisiones

La creación de **modelos de IA basados en datos de código abierto para rastrear multitud de objetos en la órbita terrestre** permite detectar **maniobras de satélites** que pueden evitar colisiones entre objetos espaciales o detectar el lanzamiento de misiles desde el espacio. Se estima que hay más de 500.000 piezas de desechos espaciales más grandes que una canica, con millones de fragmentos más pequeños flotando en la órbita de la Tierra. La acumulación de desechos espaciales plantea un problema crítico, que podría **inutilizar ciertas órbitas y aumentar riesgos de colisión** (Shah, 2024). Más concretamente, en la figura 45 se distinguen diversos tipos de **desechos (basura) espaciales**.

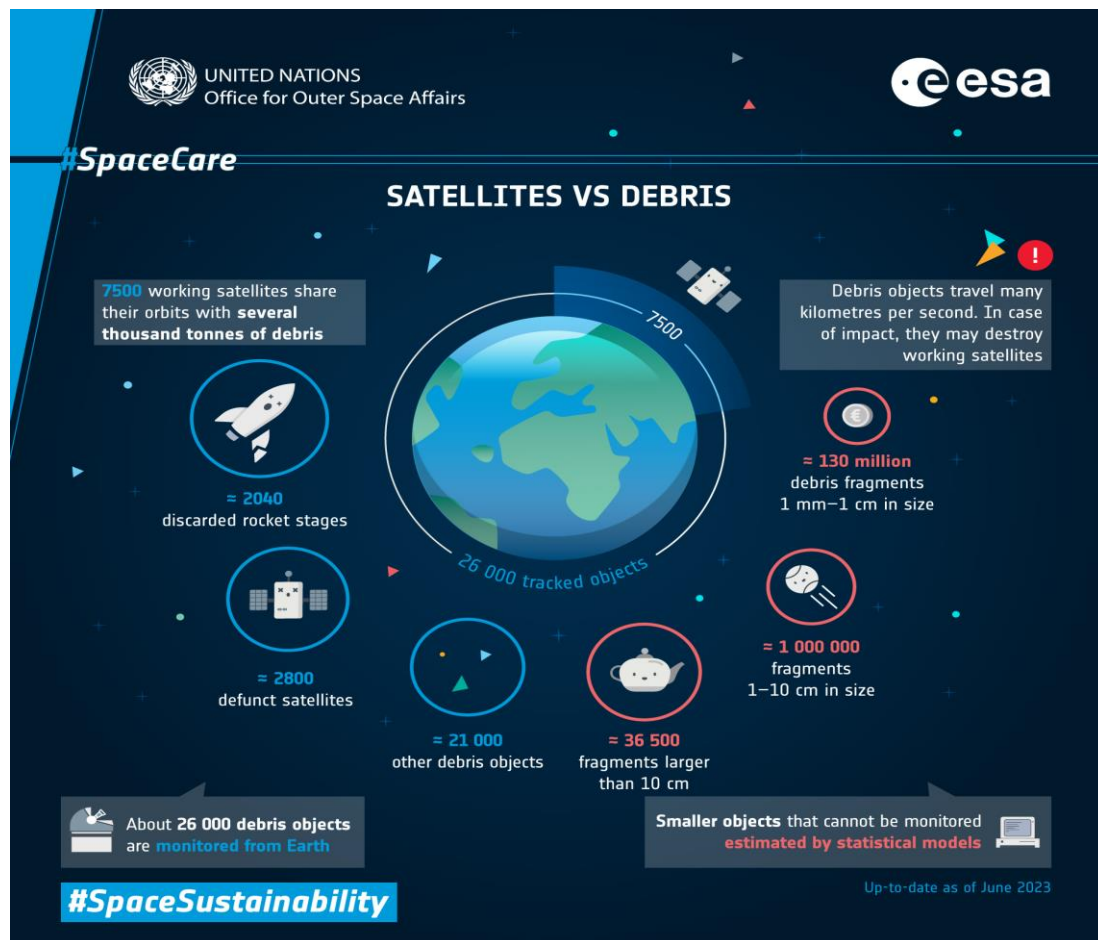


Figura 45. Comparación entre satélites y desechos espaciales a junio de 2023. Fuente: <https://www.unoosa.org/oosa/en/informationfor/media/unoosa-and-esa-release-infographics-and-podcasts-about-space-debris.html>

- **Satélites difuntos:** Satélites que han completado sus misiones y ya no están operativos. Incluye los satélites que funcionan mal o están obsoletos, pero que siguen en órbita.
- **Etapas de cohetes:** Secciones de cohetes que se desechan después de haber completado sus tareas. Estas piezas desechadas del cohete pueden permanecer en órbita durante décadas, dependiendo de su altitud y velocidad.

- **Fragmentos de colisiones:** Cuando colisionan satélites, cohetes u otros objetos espaciales, se rompen en miles de pedazos más pequeños. Estos fragmentos, a menudo denominados "escombros rastreables", pueden permanecer en órbita durante mucho tiempo.
- **Escombros no rastreables:** Escombros más pequeños que no se pueden rastrear fácilmente, como manchas de pintura, pernos y aislamiento. Aunque son pequeños, estos objetos pueden representar un peligro debido a sus altas velocidades.

Uno de los aspectos más preocupantes del problema de los desechos espaciales es la posibilidad de que se desarrolle el denominado *síndrome de Kessler*, una **cascada de colisiones** que se perpetúa a sí misma y genera más y más desechos. Este escenario se produce cuando la colisión de dos objetos de escombros crea una nube de fragmentos más pequeños, que luego pueden colisionar con otros objetos, creando aún más escombros. El consiguiente bucle de retroalimentación podría eventualmente hacer que ciertas regiones orbitales sean demasiado peligrosas para las operaciones de satélites, haciendo que grandes **franjas del espacio orbital de la Tierra sean efectivamente inutilizables**⁸⁵.

Tradicionalmente, **la vigilancia de los desechos espaciales se ha basado en radares y telescopios ópticos** para detectar y rastrear objetos en órbita. Si bien estos métodos han sido efectivos hasta cierto punto, tienen **limitaciones** en términos de precisión, cobertura y procesamiento de datos en tiempo real.

La IA tiene el potencial de transformar el mapeo de desechos espaciales de varias maneras mejorando la **velocidad y precisión de detección, y automatizando el proceso**. Los algoritmos de IA pueden procesar grandes cantidades de datos recopilados de satélites, sensores terrestres y telescopios mucho más rápido y con mayor precisión que los analistas humanos. Estos algoritmos son capaces de identificar objetos pequeños, predecir sus trayectorias y detectar posibles colisiones, proporcionando información crítica para evitar futuros accidentes espaciales.

Los sistemas de reconocimiento de imágenes impulsados por IA pueden analizar datos de cámaras y telescopios espaciales, distinguiendo entre escombros reales y otros objetos en el espacio, como asteroides o meteoroides. Al utilizar modelos de aprendizaje automático entrenados en grandes conjuntos de datos, **la IA puede mejorar continuamente sus capacidades de detección, proporcionando un mapeo más preciso y en tiempo real de los desechos espaciales**⁸⁶.

La figura 46 clasifica diversas técnicas existentes (basadas o no en IA). Parece que son las **técnicas de IA de aprendizaje por reforzamiento** (*Reinforcement learning, RL*) las que parecen más prometedoras para aplicaciones espaciales donde el acceso a grandes volúmenes de datos es un problema.

⁸⁵ Estas situaciones ya han ocurrido. La prueba antisatélite china de 2007 y la colisión de 2009 entre un satélite ruso inactivo y un satélite comercial de comunicaciones pusieron de manifiesto la realidad de esos acontecimientos. Estos incidentes aumentaron significativamente el volumen de desechos espaciales, demostrando cómo incluso colisiones relativamente pequeñas pueden conducir a un aumento dramático en el número de fragmentos de desechos en órbita. <https://flypix.ai/blog/space-debris-removal-technology/>

⁸⁶ <https://flypix.ai/blog/space-debris-mapping/>

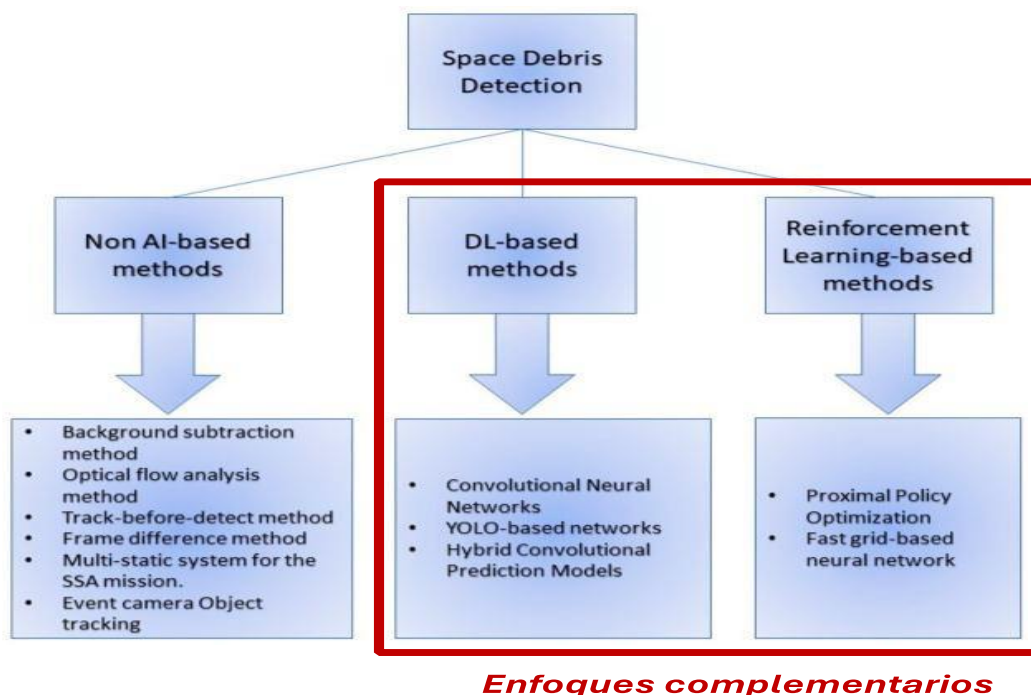


Figura 46. Técnicas empleadas para la detección de desechos espaciales. Fuente:

Concretamente, **se ha empleado la IA en los siguientes casos:**

- Seguimiento impulsado por IA. Los sistemas impulsados por IA están revolucionando el seguimiento de escombros mediante el análisis de grandes conjuntos de datos en tiempo real. Los algoritmos de aprendizaje automático predicen el movimiento de escombros, priorizan los objetivos de alto riesgo y proporcionan información procesable para las misiones de remoción de escombros. Esto mejora la eficiencia y reduce los riesgos de colisión, lo que hace que la gestión orbital sea más precisa.
- Sistemas autónomos de captura. Las naves espaciales guiadas por IA equipadas con brazos robóticos o remolcadores pueden identificar y capturar escombros de forma autónoma. Mediante el uso de la visión artificial, estos sistemas se adaptan al movimiento impredecible de los residuos, lo que permite una eliminación precisa con una mínima intervención humana. Este enfoque ya se está probando en proyectos como la misión ClearSpace-1 de la ESA.
- Láseres terrestres o espaciales guiados por IA. Su función es empujar suavemente pequeños escombros hacia las rutas de reentrada sin causar fragmentación. Los conceptos futuros incluyen enjambres de satélites impulsados por IA que trabajan en colaboración para rastrear, capturar y transportar escombros.
- Prevención mediante predicción. La IA también es vital para prevenir nuevos desechos. Al predecir las colisiones de satélites y optimizar la eliminación al final de su vida útil, los operadores pueden mitigar los riesgos. El diseño impulsado por la IA garantiza que las futuras naves espaciales se construyan teniendo en cuenta la sostenibilidad.

En los próximos años **estas técnicas de evitación de colisiones van a crecer impulsados por los cambios regulatorios anunciados.** En el caso de la UE, la propuesta de Regulación de la Comisión Europea de junio de 2025 “sobre la seguridad, la resiliencia y la

sostenibilidad de las actividades espaciales en la Unión” (Comisión Europea, 2025) va a forzar a los operadores a disponer de estos sistemas. Desde el punto de vista de la defensa, esta propuesta de “Ley del espacio” de la UE se apoya en la comunicación de 2023 de la Comisión Europea y del Alto Representante (JOIN, 2023) denominada “EU Space Strategy for Security and Defence”. Expresamente, la propuesta de Regulación indica:

*“Para proteger el entorno espacial, es necesario garantizar que los vehículos de lanzamiento y las naves espaciales produzcan la menor cantidad de desechos. La prevención de los residuos también está en consonancia con el enfoque de prevención como primera fase de la jerarquía de residuos establecida por la Directiva marco sobre residuos. Por consiguiente, deben preverse **obligaciones en la fase de diseño, así como durante la vida orbital**. Esta necesidad también se reconoce a nivel internacional, donde la Organización Internacional de Normalización (ISO) ha adoptado varias normas. Por lo tanto, la autorización para llevar a cabo actividades espaciales debe estar vinculada a la presentación por parte de los operadores espaciales de planes específicos en materia de desechos espaciales para demostrar cómo los vehículos de lanzamiento y los vehículos espaciales limitarían la creación de desechos”.*

*“Debido al aumento de los desechos y el tráfico en órbita, **el uso de un servicio espacial de CA⁸⁷ es imprescindible para todas las naves espaciales**. Este requisito es necesario para garantizar el mantenimiento diario del vehículo espacial en la posición. Una suscripción obligatoria a un servicio espacial de CA debe ser el núcleo de los requisitos de seguridad espacial. Como resultado, la entidad encargada de prestar el servicio espacial de CA tendría que demostrar ciertas capacidades”.*

La ESA lanzó en 2020 un **proyecto para estimar el riesgo de colisión y mitigación mediante técnicas automatizadas de IA** (CREAM, *Collision Risk Estimation and Automated Mitigation*)⁸⁸. El objetivo de CREAM (Thomson, 2025) es reducir la carga de trabajo de los operadores, el número de falsas alertas y el tiempo de respuesta de las medidas para evitar colisiones, al tiempo que mejora la seguridad de la misión. Una de las características de CREAM es su capacidad para conectar diferentes tipos de organizaciones involucradas en operaciones espaciales que pueden comunicarse a través del sistema, agilizando lo que antes era un proceso fragmentado y a menudo frustrante. El proyecto ha entrado ahora en una fase crítica de operaciones de prueba de sistemas terrestres y demostraciones en órbita.

En línea con lo previsto en la Regulación de la UE ya existen diversas soluciones comerciales para evitar colisiones proporcionadas por empresas como “servicio”. Como ejemplo de una de las soluciones comerciales basadas en IA para la detección de desechos se puede mencionar **Neuraspace⁸⁹**: una solución de **software como servicio (SaaS) basada en aprendizaje automático** que aborda los retos críticos de la monitorización del tráfico espacial y la gestión de desechos para evitar colisiones y optimizar las maniobras al permitir la toma de decisiones automatizada. En la figura 47 puede verse su uso desde una perspectiva conceptual.

⁸⁷ CA se refiere a “Collision Avoidance” (Evitación de colisiones)

⁸⁸

https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/CREAM_avoiding_collisions_in_space_through_automation

⁸⁹ <https://blog.neuraspace.com/ai-for-stm-chiara-manfletti>

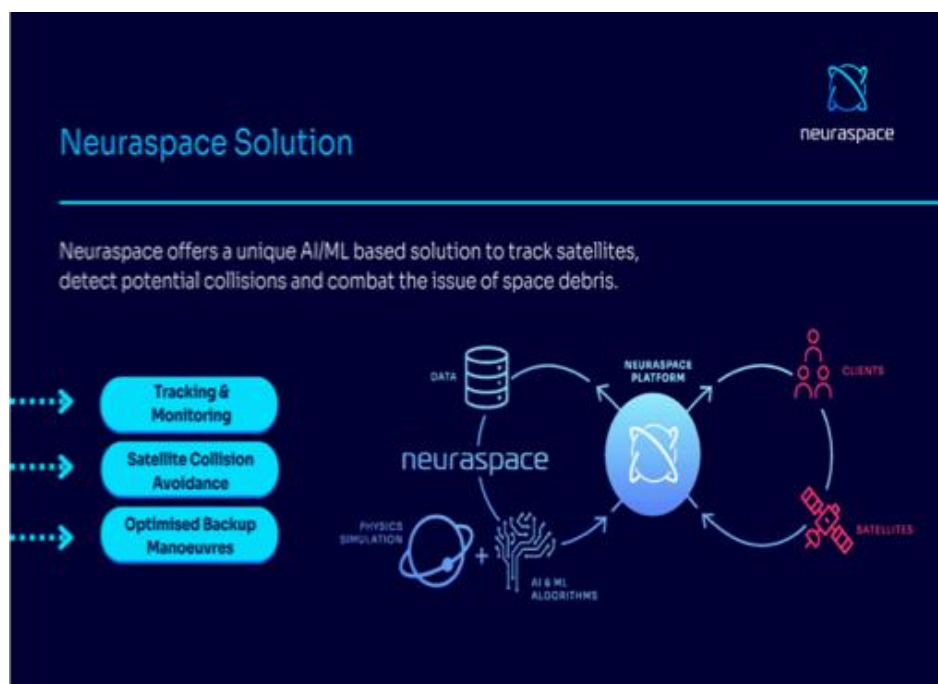


Figura 47. Solución basada en IA de Neuraspace para el seguimiento de satélites. Fuente: <https://blog.neuraspace.com/ai-for-stm-chiara-manfletti>

Neuraspace está desarrollando desde 2025 software impulsado por IA con el apoyo de la Agencia Espacial Europea para ayudar a los operadores a **aprovechar mejor las señales de navegación para el seguimiento de satélites y la prevención de colisiones**. El proyecto tiene como objetivo demostrar una forma computacionalmente eficiente de mejorar la relación señal-ruido del GPS a bordo y otros receptores del *Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)*, que la mayoría de los operadores de satélites ya utilizan para rastrear sus naves espaciales⁹⁰.

Las soluciones comerciales desarrolladas por empresas suelen combinar diversos aspectos de la gestión del dominio espacial. En el caso de la figura 47 los componentes principales de **Neuraspace** son:

- Fusión de datos: recopila e integra datos de diversas fuentes como desechos espaciales, mensajes de detección de colisiones, archivos de eventos, etc.
- IA y aprendizaje automático (ML): analiza datos complejos e identifica patrones para predicciones de colisiones más precisas y mitigación de riesgos.
- Automatización para la optimización de recursos: herramienta de IA que automatiza los procesos de toma de decisiones, proporcionando información y sugerencias basadas en limitaciones y prioridades del operador.
- Dinámica orbital: utiliza su conocimiento del entorno espacial para optimizar las operaciones de la misión y la gestión de riesgos. incluye la determinación precisa de la órbita, el análisis de conjunción, la optimización de la maniobra y el análisis predictivo.

⁹⁰ <https://spacenews.com/neuraspace-tackles-gnss-signal-noise-with-esa-funded-satellite-collision-avoidance-project/>

3.6. Mantenimiento predictivo de satélites

El **uso de la IA para facilitar el mantenimiento preventivo** es bien conocido en múltiples aplicaciones en sectores industriales. Era lógico que tras su progresiva maduración tecnológica también se usase en el sector del espacio si se adaptase la tecnología a su ejecución en satélites o naves espaciales combinado con el uso de modelos digitales del objeto espacial. Para ello, el mantenimiento predictivo se beneficia de los avances en el **análisis de grandes volúmenes de datos**, y la **simulación** combinados con el uso de interfaces de **realidad virtual (RV)** y **realidad aumentada (RA)** en las interfaces del modelo con el operador.

La IA está desempeñando un papel cada vez más importante en el **software de simulación militar**. Los algoritmos de IA pueden crear entornos de formación dinámicos y receptivos que se adaptan a las acciones de los alumnos, proporcionando una experiencia más personalizada. Esta tecnología permite la simulación de tácticas y comportamientos enemigos, haciendo que los escenarios sean más desafiantes y realistas. Además, los análisis basados en IA pueden evaluar el desempeño de los alumnos en tiempo real, ofreciendo información valiosa sobre áreas de mejora y ayudando a los comandantes a tomar decisiones informadas con respecto a la preparación de las tropas.

Esto ha sucedido en el caso de la **Estación Espacial Internacional (ISS)**. Un ordenador especializado (*Hewlett Packard Enterprise (HPE) Spaceborne Computer-2*) fue lanzado en febrero de 2021 a la ISS con el fin de proporcionar la **infraestructura para llevar a cabo experimentos avanzados**⁹¹, empleando soluciones basadas en IA y aprendizaje automático en el espacio (véase figura 48).



Figura 48. Spaceborne Computer-2 de Hewlett Packard Enterprise en la ISS. Fuente: <https://spacenews.com/booz-allen-deploys-advanced-language-model-in-space/>

El ordenador está vinculado a la nube *Azure de Microsoft* a través de las estaciones terrestres de la NASA y HPE y permite procesar datos en órbita y enviar a la Tierra solo la información relevante, con lo que se reducen los tiempos de transmisión de datos.

El rendimiento de los sistemas de IA depende en gran medida de la **calidad y representatividad de los datos utilizados para entrenarlos**. En el contexto de la

⁹¹ Realización de múltiples experimentos de investigación en campos como la secuenciación de ADN, el procesamiento de imágenes, la recuperación de desastres naturales, la impresión 3D y tecnología 5G.

exploración espacial, obtener datos de entrenamiento completos e imparciales puede ser un desafío. La naturaleza única y a menudo impredecible de los entornos espaciales significa que los sistemas de IA pueden encontrar situaciones muy diferentes a sus datos de entrenamiento.

3.7. Optimización de comunicaciones militares espaciales

3.7.1. Objetivos del uso de la IA para comunicaciones militares espaciales

La historia de los **satélites de comunicaciones militares** es muy antigua. Desde sus orígenes en 1958⁹² hasta el momento actual, la situación ha evolucionado enormemente. Actualmente, son múltiples los satélites de comunicaciones, generalmente situados en órbitas geoestacionarias que proporcionan sistemas y servicios de comunicaciones robustas a agencias militares o de seguridad de muchos países. En algunos casos, se trata de **sistemas duales** que, en determinadas condiciones, son capaces de proporcionar también comunicaciones civiles.

Con el desarrollo y despliegue de **constelaciones de satélites de comunicaciones en órbitas bajas**, empieza a tener relevancia el uso de la IA para la **optimización del rendimiento del diseño de constelaciones de satélites**. En el futuro el diseño de la órbita de los satélites deberá satisfacer demandas regionales diferenciadas, aprovechando el uso de algoritmos de IA basados en técnicas de aprendizaje por refuerzo y aprendizaje profundo para automatizar los necesarios ajustes orbitales y una asignación de recursos más precisos.

Disponer de una **constelación de satélites optimizada** permite, mientras se mantiene la comunicación, velocidad y eficiencia de cobertura, la mejora de la cobertura en regiones clave, mal cubiertas con métodos tradicionales, como son las zonas subdesarrolladas y las zonas marítimas en las que el despliegue de estaciones terrestres se ha convertido en un reto. Mediante el ajuste de las capas orbitales y las densidades de los satélites e incorporando en el diseño la distribución de las estaciones terrenas y datos de densidad de población, **la IA permite optimizar la utilización de los recursos existentes sin aumentar el número total de satélites**.

3.7.2. Caso de Starlink en defensa

La constelación de banda ancha comercial más desarrollada hasta el momento es la desplegada por la empresa **SpaceX** denominada **Starlink**. Su ritmo de lanzamiento es muy rápido (los primeros 60 satélites fueron lanzados en mayo de 2019) y en agosto de 2025 está formada por **8.094 satélites en órbita**, de los cuales 8,075 estaban en funcionamiento⁹³, Este despliegue tan rápido de la constelación se debe a lanzamientos múltiples (60 satélites por lanzamiento) empleando cohetes *Falcon 9* de la propia empresa SpaceX cómo se ve en la figura 49.

⁹² El *Signal Corps Orbiting Relay Experiment (Score)* fue el primer satélite utilizado para investigar las comunicaciones entre la órbita terrestre y la superficie. Lanzado el 18 de diciembre de 1958, el satélite se colocó en una órbita de 185 x 1484 km con una inclinación de 32,3°, permaneciendo unido a la etapa final del vehículo de lanzamiento. Llevaba una grabadora y transmitía un mensaje grabado hablado por el presidente *Eisenhower* a 132 MHz. Las baterías se agotaron después de 13 días, período durante el cual se demostró la viabilidad de tales comunicaciones.

⁹³ <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html>

Con la red en funcionamiento proporciona servicios de Internet casi global a consumidores, empresas y agencias gubernamentales con un ancho de banda suficiente para múltiples aplicaciones⁹⁴. En julio de 2025 Starlink había superado los **seis millones de clientes** en 140 países.



Figura 49. Un cohete SpaceX Falcon 9 está preparado para poner en órbita los satélites Starlink desde Cabo Cañaveral en Florida. (Image credit: SpaceX). Fuente: <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html>

Un satélite de Starlink orbita a unos 550 Km de la Tierra y tiene una **vida útil de aproximadamente cinco años**. SpaceX espera llegar a tener **hasta 42.000 satélites operativos en su constelación**. Como es habitual, estos satélites han evolucionado. El despliegue de la constelación se está realizando mediante **lanzamientos simultáneos de decenas de satélites** como se puede ver en la figura 50.



Figura 50. Satélites de Starlink antes de desplegarse en el espacio. Fuente: Pultarova, 2025.

⁹⁴ Las velocidades de descarga para los usuarios de Starlink están entre 25 y 220 Mbps, y la mayoría experimenta velocidades superiores a 100 Mbps, y las velocidades de carga están entre 5 y 20 Mbps.

La **versión más moderna del satélite Starlink es la V2** que estará operativa desde 2025 con un peso de 800 kg en el lanzamiento (comparado con los 260 Kg de la versión actual), una capacidad de datos cuatro veces mayor que sus predecesores, y con la capacidad de proporcionar servicios directamente a dispositivos celulares. El proceso de mejora continua y la empresa ya ha anunciado la siguiente versión **V3** con unas prestaciones, si se confirmasen, que le permitiría competir con servicios de fibra óptica⁹⁵.

Una constelación de satélites de comunicaciones como Starlink tiene un uso dual. En zonas en conflicto, la destrucción de las infraestructuras de telecomunicaciones ante ataques ha hecho que diversas **empresas tecnológicas privadas han proporcionado sistemas y servicios cruciales a los ucranianos y sus fuerzas armadas a lo largo de la guerra**. Los roles más visibles para estas empresas han sido en el campo de la conectividad a Internet (*Starlink/SpaceX*), pero también en la computación en la nube (*Amazon, Microsoft, Google*) o en el hardware como drones (*DJI*) o múltiples aplicaciones software para mejorar o adaptar al contexto militar sistemas heredados procedentes de mercados civiles⁹⁶.

El caso más conocido del uso militar de *Starlink* es el de la **guerra en Ucrania** provocada tras la invasión de Rusia en 2022⁹⁷. *Starlink* es una **tecnología inherentemente dual** que se ha convertido en una herramienta fundamental: su uso no se restringe al ámbito civil, sino que también **se ha extendido al ámbito militar**.

El acuerdo para la implementación de su uso fue extremadamente **eficiente** (el acuerdo inicial de *Starlink* se hizo en *Twitter*, y solo necesitó dos días para que el envío inicial del hardware llegara a Ucrania). Otra lección positiva fue su **rápida adopción por parte de las fuerzas civiles y militares**. Debido a que las tecnologías comerciales se desarrollan para el mercado masivo, la barrera para la adopción es mucho menor en comparación con las tecnologías específicas de defensa a medida.

⁹⁵ En junio de 2025 Space X ha anunciado el desarrollo de los satélite Starlink V3 que estarán optimizados para el lanzamiento mediante el vehículo *Starship* de SpaceX (aún en pruebas). Cada lanzamiento Starlink V3 en *Starship* está planeado para añadir 60 Tbps de capacidad a la red Starlink, más de 20 veces la capacidad añadida con cada lanzamiento *V2 Mini* en Falcon 9. Cada satélite Starlink V3 tendrá 1 Tbps de velocidad de bajada y 160 Gbps de capacidad de subida, lo que es más de 10 veces la bajada y 24 veces la capacidad de subida de los satélites Starlink V2 Mini. El satélite V3 también tendrá casi 4 Tbps de capacidad combinada de backhaul RF y láser. Además, los satélites Starlink V3 utilizarán los ordenadores, módems, conformación de haz y conmutación de próxima generación de SpaceX. <https://www.infobae.com/tecnologia/2025/07/18/asi-es-starlink-30-la-apuesta-de-elon-musk-para-competir-con-la-fibra-optica/>

⁹⁶ <https://www.gssc.it/en/publication/technological-change-in-the-war-in-ukraine-what-lessons-for-nato-allies/>

⁹⁷ El gobierno ucraniano solicitó terminales Starlink el 26 de febrero de 2022, solo dos días después de que comenzara la invasión, y las primeras llegaron al país el 28 de febrero. A principios de abril de 2022, SpaceX y la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional anunciaron que habían entregado conjuntamente unos 5.000 terminales Starlink a Ucrania, y que SpaceX había proporcionado directamente más de 3.000 de ellos. El número ha crecido desde entonces, hasta los 25.000. <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html>

En el caso de Ucrania, los hospitales, las escuelas y las fuerzas pudieron aprovechar al máximo la herramienta tecnológica sin una gran capacitación previa⁹⁸. La figura 51 permite ver a un soldado ucraniano con un **terminal Starlink** que, en algunos casos, han caído en manos rusas⁹⁹.



Figura 51. Soldado ucraniano con un terminal de Starlink. Fuente: Reuters (incluida en https://www.elespanol.com/omicron/defensa-y-espacio/20241230/nueva-estrategia-elon-musk-starlink-ucrania-alia-operador-movil-dar-conexion-internet/912659111_0.html)

La gobernanza de su uso en este contexto no ha sido sencilla como se ha demostrado con los diversos problemas y dependencias creadas al gobierno ucraniano en su relación con Estados Unidos y con SpaceX por el control de la red y la prohibición del uso en determinadas zonas como ha sido el caso de Crimea (Bojor et al., 2024)¹⁰⁰.

Más específicamente para el ámbito militar, SpaceX ha presentado un nuevo servicio denominado **Starshield**¹⁰¹, una **red satelital segura que se basa en la tecnología de Starlink**, pero diferente de la empleada para servicios comerciales. Para contrarrestar la amenaza de armas espaciales de Rusia, que podrían ser capaces de inutilizar redes enteras de satélites, **Starshield pretende ser más resistente** a ataques sofisticados de potencias espaciales¹⁰². La empresa ha firmado recientemente un acuerdo de 2.000

⁹⁸ <https://www.belfercenter.org/publication/starlink-and-russia-ukraine-war-case-commercial-technology-and-public-purpose>

⁹⁹ <https://dsm.forecastinternational.com/2024/05/15/potential-use-of-starlink-by-russia-a-background-and-the-implications/>

¹⁰⁰ En marzo de 2025 este problema se ha radicalizado por la decisión del gobierno de Estados Unidos de impedir el uso de Starlink a Ucrania.

¹⁰¹ <https://www.spacex.com/starshield/>

¹⁰² SpaceX también está construyendo una red de cientos de satélites espía bajo un contrato clasificado con la Oficina Nacional de Reconocimiento (NRO), una agencia de inteligencia que gestiona satélites espía. La red está siendo construida por la unidad de negocio Starshield de SpaceX en virtud de un contrato de 1.800 millones de dólares firmado en 2021 con NRO.

millones de dólares con la Fuerza Aérea de los Estados Unidos para proporcionar internet por satélite con Starlink.

La constelación *Starlink* de la empresa SpaceX utiliza un **protocolo de cifrado robusto con algoritmos criptográficos** para garantizar que la señal sea segura¹⁰³. Este cifrado de alta complejidad es de tipo asimétrico y simétrico, en donde los mensajes son encriptados utilizando una clave pública, que puede ser compartida, y solo pueden ser descifrados por el receptor con una clave privada. De esta forma **todas las capas de la transmisión están aseguradas de “extremo a extremo”, desde el satélite hasta el receptor en tierra**. Además, los satélites son capaces de **cambiar de órbita de manera autónoma y eficiente**, lo que mejora la resiliencia ante posibles intentos de bloqueo o interferencia¹⁰⁴.

En la UE no existe una posición común sobre el uso de Startlink en aplicaciones de defensa. El Gobierno italiano está avanzando en las negociaciones para un acuerdo de servicios de seguridad en telecomunicaciones de 1.500 millones de euros con *SpaceX*. Los servicios propuestos por *SpaceX* podrían incluir el cifrado de las comunicaciones telefónicas y por internet utilizadas por el Gobierno y el Ejército italianos¹⁰⁵.

Eutelsat (fusionada con la británica *OneWeb*) se ha convertido en **la única constelación de satélites operativa de cobertura mundial junto con Starlink**. *Eutelsat* dispone de 630 satélites en la órbita baja terrestre, muchos menos que los más de 8.000 que tiene *Starlink*, pero son suficientes para prestar un servicio similar en Europa¹⁰⁶.

Aunque en el desarrollo y despliegue inicial de *Starlink* no se empleaba IA, según Elon Musk en 2024¹⁰⁷, ahora se emplea en el **control de la constelación**. Los algoritmos inteligentes de este sistema optimizan continuamente los movimientos de los satélites, mejorando la calidad de la conexión de banda ancha, reduciendo la latencia y asegurando una cobertura continua. Al analizar datos en tiempo real sobre el tráfico de usuarios y la carga de la red,

<https://www.reuters.com/technology/space/musks-spacex-is-building-spy-satellite-network-us-intelligence-agency-sources-2024-03-16/>

¹⁰³ <https://portieramaryaire.com/topic/177/starlink-uso-en-defensa>

¹⁰⁴ <https://www.elestrategico.com/2025/01/09/starlink-de-spacex-el-futuro-de-las-comunicaciones-en-italia/>

¹⁰⁵ Aunque el contrato de cinco años previsto aún no se ha cerrado, los Servicios de Inteligencia y el Ministerio de Defensa italianos han aprobado el proyecto.
<https://es.euronews.com/business/2025/01/06/italia-negocia-con-spacex-un-acuerdo-de-servicios-de-seguridad-en-telecomunicaciones>

¹⁰⁶ Existen diferencias en la velocidad. *Starlink* promete banda ancha de hasta 200 megabits por segundo, mientras que la de *Eutelsat* es de 150. También se diferencian en el precio. Los terminales *OneWeb* cuestan cerca de 10.000 euros, a los que hay que añadir el precio de suscripción mensual. Mientras que *Starlink* cobra, según su web, un pago único de a partir de 349 euros con una suscripción mensual desde 29 a 40 euros, según el uso.
https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2025-03-05/starlink-elon-musk-guerra-ucrania-rusia-eeuu-europa-internet-satelite_4079269/

¹⁰⁷ <https://www.axios.com/2024/05/07/musk-spacex-starlink-no-ai>

la IA mejora la eficiencia y permite una adaptación flexible de las operaciones satelitales. También se ha indicado que **SpaceX ha implementado AI para evitar colisiones**¹⁰⁸.

En relación con la IA es necesario **distinguir entre las aplicaciones de IA que utiliza Starlink actualmente en sus satélites** y las que el despliegue de la red facilita para otros tipos de aplicaciones facilitados por la IA. Estas últimas son:

- IA en la comunicación: Los datos recopilados por los satélites de Starlink se pueden procesar con algoritmos de IA para optimizar el enrutamiento de la red, monitorear el estado del satélite y predecir las necesidades de mantenimiento. La IA también puede ayudar a Starlink a gestionar el uso del ancho de banda en miles de satélites, garantizando un rendimiento y una conectividad óptimos en todo el mundo.
- Operaciones satelitales autónomas: Estos satélites pueden operar utilizando algoritmos de IA para monitorear su propia salud, ajustar las órbitas y evitar posibles colisiones. El concepto de "*flotas de satélites autónomos*" es fundamental para reducir la necesidad de intervención humana, reducir los costos operativos y mejorar la eficiencia general de los servicios basados en el espacio.
- IA y constelaciones de satélites para IoT: Los satélites en órbita terrestre baja (LEO) pueden facilitar la comunicación en tiempo real entre dispositivos IoT de todo el mundo, desde el monitoreo de ciudades inteligentes hasta el seguimiento de cadenas de suministro.

Recientemente (Shang, 2025), se ha empezado a evaluar el uso de aprendizaje profundo para **optimizar el diseño de las mejores órbitas para una constelación de satélites LEO** (del tipo de Starlink) con el fin de mejorar la cobertura en regiones polares o remotas. El aprendizaje profundo por refuerzo se aplica para optimizar los parámetros de la órbita, y ajustar la densidad de despliegue de satélites para mejorar el rendimiento de la cobertura y la utilización de recursos en áreas prioritarias. Estos aspectos serán esenciales cuando las constelaciones futuras permitan llevar la comunicación satelital directamente al móvil como hará Starlink en el futuro con el despliegue de 6G.

Los resultados de simulación presentados por Shang (2025) parecen confirmar esta mejora comparando con las órbitas empleadas por Starlink. La figura 52 (arriba) muestra el mapa de cobertura de la trayectoria de los satélites de la constelación. La **optimización de las órbitas** permite asegurar la comunicación en regiones polares y en otras áreas poco pobladas en la que desplegar estaciones terrenas no es económicamente viable.

La figura 52 (abajo) compara la constelación original Fase 1 de Starlink con la constelación optimizada empleando el método propuesto. Aunque el número de capas orbitales ha aumentado, **el número total de satélites no ha cambiado**, lo que lleva a una disminución del número de satélites por capa orbital. Obsérvese la mejora en zonas del Polo Norte y en zonas marítimas (zonas dibujadas en naranja).

¹⁰⁸ <https://interactive.satellitetoday.com/trends-and-applications-of-ai-in-space/>

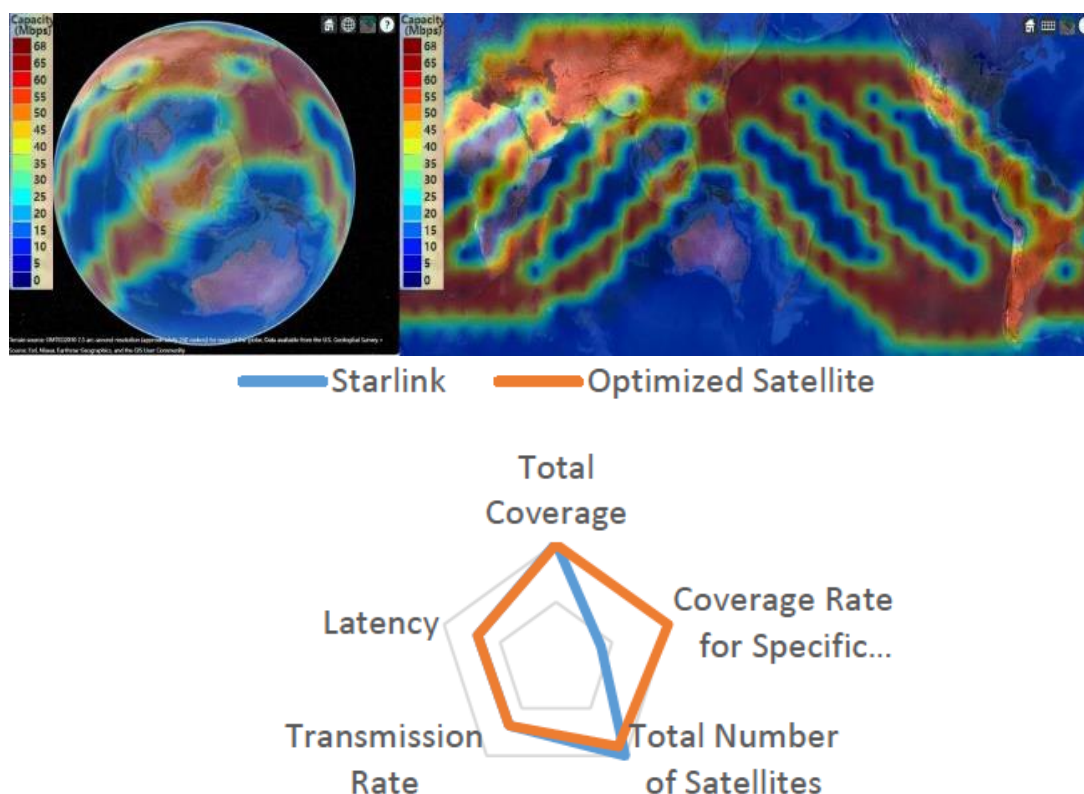


Figura 52. Optimización de las órbitas de una constelación de satélites de comunicaciones LEO. Comparación de parámetros con Starlink. Fuente: Shang (2025).

Con el incremento masivo (decenas de miles) del número de satélites en una constelación, la **optimización de las órbitas** se ha convertido en un problema imposible de resolver sin el uso de técnicas de IA. Además, los riesgos de sufrir ataques cercen por lo que la necesidad disponer de sistemas de evitación de colisiones provocadas son también crecientes. De hecho, ya hay “amenazas” chinas sobre Starlink¹⁰⁹.

En la UE no existe una posición común sobre el uso de Starlink en aplicaciones de defensa y seguridad, con algunos gobiernos negociando un acuerdo como el iniciado por el gobierno italiano, y ahora paralizado, y rechazado en otros países por la potencial dependencia generada de una empresa privada, afectando a la autonomía estratégica europea. Aunque su uso dependerá en el futuro de las relaciones entre la UE y Estados Unidos, es evidente que la **necesidad de contar con una constelación de seguridad europea propia es un objetivo fundamental** como se analiza a continuación con el caso de IRIS².

3.7.3. Caso de IRIS² de la UE

La UE no dispone por el momento de una constelación de satélites para proporcionar servicios comerciales de Internet que pueda competir con operadores comerciales de

¹⁰⁹ Investigadores militares chinos han pedido el desarrollo de armas para desactivar o destruir la red satelital Starlink de Elon Musk, citando sus capacidades avanzadas habilitadas por IA y sus posibles aplicaciones militares como amenazas para la seguridad nacional. No se ha producido ningún daño real, pero las advertencias resaltan los riesgos futuros plausibles para la infraestructura crítica. <https://oecd.ai/en/incidents/2022-05-30-4f13>

Estados Unidos (como *Starlink* de SpaceX o *Kuiper* de Amazon), aunque existen esfuerzos recientes (febrero de 2024) por parte de algunas empresas europeas para abordarlo que, en el caso mejor, tardará años en materializarse¹¹⁰.

Eutelsat (fusionada con la británica OneWeb) se ha convertido en la única constelación de satélites operativa de cobertura mundial junto con Starlink. *Eutelsat* dispone de 630 satélites en la órbita baja terrestre que son suficientes para prestar un servicio similar en Europa a pesar de diferencias en prestaciones y precios del servicio¹¹¹.

Más cercana en el tiempo es la decisión del **desarrollo de la constelación de satélites IRIS²** (*Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite*). Se trata de una iniciativa de la UE que aborda los desafíos a largo plazo de la seguridad, la protección y la resiliencia de la UE al ofrecer **servicios de conectividad mejorados a los usuarios gubernamentales**¹¹². La *Regulación* del Parlamento Europeo y del Consejo de *IRIS²* fue aprobada en marzo de 2023¹¹³.

En 2025, ante una situación de riesgo creciente, la Comisión Europea ha indicado que está dispuesta a **ampliar los países participantes en IRIS² con Ucrania, Reino Unido, Islandia y Noruega**¹¹⁴. Esta evolución de un uso dual ya ha provocado alguna reacción por parte de Rusia. Rusia ha notificado oficialmente a los reguladores internacionales que tratará a los satélites europeos que apoyan los esfuerzos militares de Ucrania como **"objetivos legítimos"**, lo que augura una intensificación de su campaña de interferencia de señales de GPS y satélite.

La nueva **constelación multi-orbital** estará formada por **290 satélites** y combinará los beneficios ofrecidos por los satélites de órbita terrestre media (MEO) y de órbita terrestre baja (LEO). se basa en una infraestructura espacial con tres capas: MEO, a 8000 km, y High-

¹¹⁰ Airbus, Thales y Leonardo están explorando planes para establecer una empresa conjunta europea en el sector satelital, con el objetivo de desafiar la red Starlink con el "Proyecto Bromo" (en honor a un volcán indonesio). La iniciativa busca crear una compañía de satélites europea independiente siguiendo el modelo del fabricante de misiles MBDA, propiedad conjunta de Airbus, Leonardo y BAE Systems. <https://dig.watch/updates/european-space-companies-launch-satellite-initiative-to-compete-with-starlink>

¹¹¹ Existen diferencias en la velocidad. Starlink promete banda ancha de hasta 200 megabits por segundo, mientras que la de Eutelsat es de 150. También se diferencian en el precio. Los terminales OneWeb cuestan cerca de 10.000 euros, a los que hay que añadir el precio de suscripción mensual. Mientras que Starlink cobra, según su web, un pago único de a partir de 349 euros con una suscripción mensual desde 29 a 40 euros, según el uso. https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2025-03-05/starlink-elon-musk-guerra-ucrania-rusia-eeuu-europa-internet-satellite_4079269/

¹¹² https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space/iris2-secure-connectivity_en

¹¹³ Regulation (EU) 2023/588 of the European Parliament and of the Council of 15 March 2023 establishing the Union Secure Connectivity Programme for the period 2023-2027 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2023.079.01.0001.01.ENG&toc=OJ%3AL%3A2023%3A079%3ATOC

¹¹⁴ <https://united24media.com/latest-news/ukraine-uk-and-norway-poised-to-join-eus-12b-iris2-satellite-program-aimed-at-reducing-reliance-on-starlink-10219>

LEO, a 1200 km, enfocadas a dar servicios de comunicaciones seguras de banda ancha en banda Ka militar; y la capa Low-LEO por debajo de los 750 km de altitud y de índole demostrativa, liderada por HISPASAT y concebida para incluir cargas de pago gubernamentales alojadas (“*hosted – payloads*”), que se beneficien del perímetro de seguridad de IRIS², e interconectadas con el resto del sistema.

Está previsto que IRIS² proporcione servicios de conectividad segura a la UE y a sus Estados miembros, así como conectividad de banda ancha para las autoridades gubernamentales, las empresas privadas y los ciudadanos europeos, al tiempo que garantiza la banda ancha de Internet de alta velocidad para hacer frente a las zonas muertas de conectividad. En caso de daños en la infraestructura terrestre debido a desastres, IRIS² actuaría como respaldo¹¹⁵.

Para aplicaciones de defensa, **IRIS² ofrecería conectividad de baja latencia y alta velocidad, lo que permitiría operaciones de combate colaborativas**. Sistemas como aviones de combate, fragatas, drones, satélites de reconocimiento, tropas terrestres y centros de mando podrían comunicarse en tiempo real sin restricciones de distancia. También puede servir como piedra angular para programas importantes como el *Future Combat Air System (FCAS)*, que integra cazas de próxima generación, drones de apoyo y una nube de combate.

Además, la red de 290 satélites actuará como relés de datos, lo que permitiría **transmitir imágenes de observación satelital a nivel mundial en tiempo real**. Esta arquitectura distribuida proporciona **resistencia frente a las amenazas antisatélite**. Por ejemplo, un misil dirigido contra un satélite tendría un impacto limitado, ya que los 289 satélites restantes seguirían funcionando.

La Comisión Europea ha adjudicado el contrato de 12 años para IRIS² al consorcio **SpaceRISE**, un grupo de empresas de satélites de la UE que incluye a Eutelsat, Hispasat y SES¹¹⁶. La implementación de **IRIS²** seguirá un enfoque incremental, en el que los servicios gubernamentales iniciales prestados a través de la capacidad satelital existente propiedad de los Estados miembros se mantendrán y compartirán ya en 2025 a través de *Govsatcom*. Con la planificación actual, **los servicios completos de conectividad por satélite gubernamental de IRIS² basados en infraestructuras de propiedad de la UE se prestarán a partir de 2030**.

La figura 53 permite ver un esquema de su disposición final de la constelación con satélites situados en diversas **órbitas medias y bajas**.

¹¹⁵ Se espera que la constelación aproveche la *Infraestructura Europea de Comunicación Cuántica (EuroQCI)*, lanzada en 2019 con la participación de los 27 países de la UE. EuroQCI tiene como objetivo crear una red de comunicación cuántica segura a escala europea. <https://incyber.org/en/article/applications-and-challenges-for-the-future-european-constellation-iris2/>

¹¹⁶ También involucra a subcontratistas de múltiples segmentos del ecosistema de las comunicaciones por satélite: Thales Alenia Space, OHB, Airbus Defence and Space, Telespazio, Deutsche Telekom, Orange, Hisdesat y Thales SIX <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/iris2-european-commission-awards-concession-contract-spacerise-consortium>

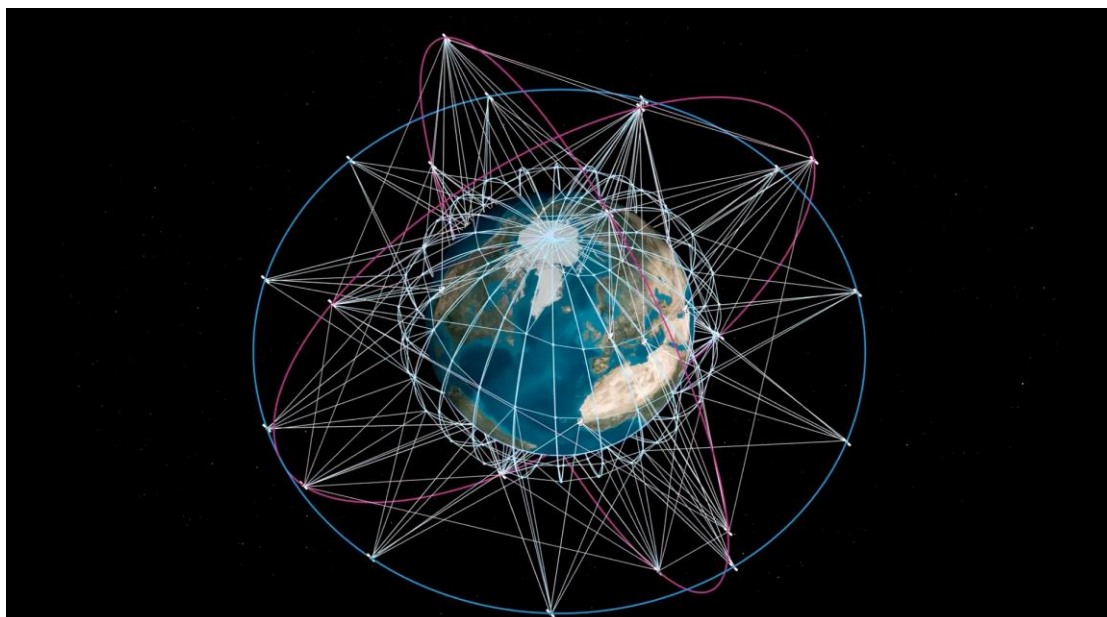


Figura 53. Constelación propuesta de IRIS². Fuente:

<https://www.euronews.com/next/2024/11/01/eu-accepts-best-and-final-offer-bid-for-satellite-mega-constellation-project>

Mientras tanto, **OneWeb** también sigue desarrollándose y en diciembre de 2024 *Airbus Defence and Space* se ha adjudicado un contrato con Eutelsat para construir la ampliación de su constelación de órbita baja (LEO) OneWeb con un total de 100 satélites, cuya entrega está prevista a partir de finales de 2026, garantizando la continuidad y la mejora del servicio para los clientes actuales y futuros. Los nuevos satélites permitirán la integración 5G en tierra, y garantizarán una arquitectura tecnológica compatible con la constelación multi órbita IRIS² que entrará en servicio en 2030¹¹⁷.

Es previsible que, al final de la presente década, las aplicaciones civiles deberían evolucionar hacia **receptores multimodo compatibles con varias constelaciones** (por ejemplo, *Starlink*, *OneWeb*, *Kuiper*) en terminales de usuario, como se ha visto en los sistemas GNSS para el mercado de la navegación satelital. Este proceso, sin embargo, será lento y muy dependiente de la consolidación del mercado de comunicaciones basadas en constelaciones de satelitales

En el futuro los sistemas de comunicaciones sufrirán un cambio disruptivo con el despliegue de **enlaces ópticos**. El empleo de **enlaces láser entre satélites para la transmisión de datos** podría marcar un antes y un después en el sector de posicionamiento, navegación y sincronización temporal (PNT). A diferencia de las señales de radio tradicionales, **los enlaces ópticos ofrecen una mayor resistencia a interferencias, capacidad de transferencia de datos y una precisión sin precedentes**, con una exactitud espacial a nivel milimétrico y temporal en el rango de los picosegundos.

El proceso de desarrollo de constelaciones satelitales en medio de conflictos militares se acelera. El operador móvil más grande de Ucrania, *Kyivstar*, comenzó a probar **servicios de mensajería**

¹¹⁷ <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2024-12/ES-Airbus-SpS-Press-Release-Airbus-awarded-Eutelsatcontract-to-build-Oneweb-low-orbit-constellation-extension.pdf>

satelital de servicio directo a celular (DTC) con *Starlink* en julio de 2025¹¹⁸. Los teléfonos móviles con redes 4G o LTE se conectarán directamente a los satélites *Starlink* en órbita para que puedan enviar y recibir mensajes de texto. La eventual red, que se lanzará a mediados de 2026, dará a los ucranianos acceso al servicio celular en las zonas montañosas y rurales del país.

Este acuerdo puede ser un movimiento coherente para Ucrania a pesar de la profundización de la dependencia con *Starlink*, quien ha amenazado en el pasado con cerrar los servicios en el país. Pero para el gobierno de Ucrania *“la soberanía en este punto se convierte en una segunda prioridad... La prioridad número uno es ganar la guerra”*.

3.8. Simulación basada en IA e interoperabilidad de datos espaciales

El uso de la IA **está transformando el campo del modelado y simulación** en casi todos los dominios. Con herramientas de IA es posible crear **simulaciones más realistas en entornos sintéticos**, con “adversarios ficticios” y entornos que pueden adaptarse en tiempo real a las acciones del usuario, mejorando la predicción de comportamientos y resultados.

Con ello, la IA puede ser utilizada para **simular situaciones en ambientes sintéticos**, lo que permite practicar, ganar experiencia y mejorar las habilidades del personal militar en un entorno seguro y controlado de toma de decisiones. Todo ello, permite a los mandos responsables **aumentar su dominio situacional y reducir el error humano**. Este tipo de técnicas, relacionados con el desarrollo de **gemelos digitales específicos** promete reducir el tiempo de desarrollo e incrementar la experimentación sobre diferentes opciones en la fase de diseño.

El uso de técnicas de modelado y simulación (M&S) está surgiendo en todo tipo de sectores, civiles y militares, y no es exclusivo del espacio. También el **uso de los gemelos digitales en los sistemas de simulación guarda estrecha relación con la IA** al permitir crear representaciones virtuales de operaciones y equipos reales. Esta funcionalidad facilitará un análisis detallado de tácticas y una evaluación continua del rendimiento, tanto a nivel individual como grupal, con retroalimentación en tiempo real.

Un nuevo concepto destacable es la estrategia conocida como **JADC2** (*Joint All-Domain Command and Control*)¹¹⁹ propuesta por Estados Unidos en 2022 que refleja la necesidad de **asegurar la interoperabilidad entre todos los dominios** incorporando las nuevas tecnologías aplicables como la IA, redes de sensores, comunicaciones avanzadas o gestión dinámica de información de datos de combate. Se trata de un esfuerzo a largo plazo que ya está conduciendo a planteamientos similares en todos los países de la OTAN. Este requisito implica disponer de una **arquitectura de referencia** sobre la que se puedan integrar diversos subsistemas de diferentes proveedores asegurando su interoperabilidad.

En la figura 54 se presenta un **esquema conceptual de alto nivel de JADC2** cuya implementación se llevará a cabo durante varios años y al que posiblemente converjan los países de la OTAN para asegurar la interoperabilidad.

¹¹⁸ <https://www.euronews.com/next/2025/07/16/does-ukraines-first-in-europe-internet-deal-with-starlink-mean-more-dependence-on-elon-mus>

¹¹⁹ <https://media.defense.gov/2022/Mar/17/2002958406/-1/-1/1/SUMMARY-OF-THE-JOINT-ALL-DOMAIN-COMMAND-AND-CONTROL-STRATEGY.pdf>

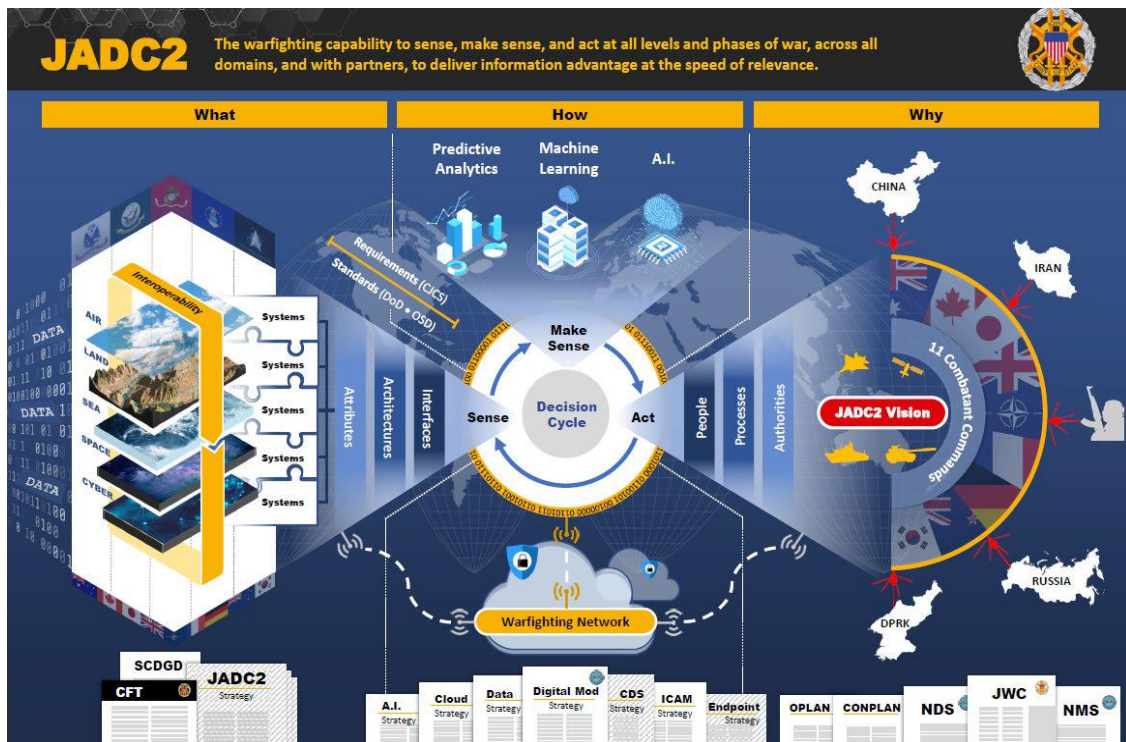


Figura 54. Esquema conceptual del Joint All-Domain Command and Control (JADC2). Fuente: <https://media.defense.gov/2022/Mar/17/2002958406/-1/-1/1/SUMMARY-OF-THE-JOINT-ALL-DOMAIN-COMMAND-AND-CONTROL-STRATEGY.pdf>

En el ámbito específico de la **conexión de C2 con los sistemas de simulación** el objetivo pretendido por la OTAN es el de **mejorar la preparación de los operadores** en los puestos de mando y control y el apoyo a las operaciones al permitir un mayor realismo y eficacia general, una disminución de los costes y riesgos, y una reducción del tiempo de preparación y respuesta. En resumen, los sistemas C2 están evolucionando rápidamente con la **integración de diversas tecnologías** y con el empleo de **arquitecturas de referencia estandarizadas** que aseguren su interoperabilidad en escenarios multidominio.

Un ámbito de creciente interés es el uso de la IA para **automatizar operaciones espaciales**. Es el caso de las Fuerzas Espaciales de los EE.UU. con el desarrollo del sistema de mando y control en satélites experimentales **R2C2 (Rapid and Resilient Command and Control)** que permite automatizar algunas funciones de los operadores de satélite. Los **servicios principales de R2C2** incluyen¹²⁰:

- Planificación automatizada de misiones.
- Programar un contacto o una maniobra de conjunción en una secuencia automatizada.
- Ejecutar una variedad de casos y situaciones para decidir el que se desee.
- Carga automática del perfil de misión seleccionado.

¹²⁰ <https://www.airandspaceforces.com/space-force-testing-ai-automate-ops/>

- Piloto TacSRT (vigilancia táctica, reconocimiento y seguimiento)¹²¹ realizada en colaboración con algunas empresas en aplicaciones de IA/ML para interpretar imágenes comerciales como fuente de datos de entrada.

En la figura 55 puede verse a operadores del 18º Escuadrón de Combate de Defensa Espacial (Fuerzas Espaciales de EE. UU.) bajo el modelo de Generación de Fuerza de la USSF, observando **datos orbitales**¹²².



Figura 55. Uso del sistema R2C2 para la automatización de operaciones. Fuente: <https://www.airandspaceforces.com/space-force-testing-ai-automate-ops/>

La **OTAN** ha establecido diversos **estándares** (conocidos como **STANAG**) para asegurar la **interoperabilidad de los sistemas de mando y control** en relación con otros tipos de sistemas como la guerra electrónica, la simulación y nube de combate.

Concretamente, se ha desarrollado una amplia **normativa técnica** para facilitar la **interoperabilidad de los sistemas de Modelado y Simulación (M&S)**, entendida aquí como la capacidad de intercambiar datos y de hacer un uso eficiente de ellos por el receptor, como las arquitecturas de alto nivel (HLA, IEEE 1516) o la norma IEEE1278 que definen la **Simulación Interactiva Distribuida (DIS)** y que se recoge asimismo en el STANAG 4603¹²³.

¹²¹ <https://www.spaceforce.mil/News/Article-Display/Article/3793014/space-force-leverages-commercial-data-analytics-to-aid-combatant-commands-in-ne/>

¹²² Base de la Fuerza Espacial Vandenberg, California, el 4 de octubre de 2024.

¹²³ El estándar **C2SIM**, adoptado por la OTAN como **STANAG 4856**, especifica los mecanismos para definir el intercambio de datos entre los sistemas de simulación y C2 y el enfoque de mensajería para lograr ese intercambio de datos (SISO-STD-019-2020 *Standard for Command and Control Systems – Simulation Systems Interoperation*).

3.9. Plataformas pseudo satelitales a gran altitud

Una tendencia que está adquiriendo gran importancia es el empleo en el ámbito de la defensa de las denominadas “**Plataformas a gran altitud**” no tripuladas (situadas en la estratosfera a una distancia de 18 Km a 22 Km de la superficie terrestre, superior a un avión, pero inferior a la de un satélite en órbita baja¹²⁴) reconocidas con las siglas de **High Altitude Platform Systems (HAPS)** o, de manera informal como “*pseudo satélites*”.

Es obvio que al reducir la altitud a la superficie de la Tierra se consiguen menores latencias, y es necesaria una menor potencia de señal en emisión y recepción, elementos básicos para múltiples **comunicaciones de banda ancha con terminales de usuario sencillos**. Estas características apoyan, especialmente, el objetivo de **incorporar 6G** al final de la presente década. Las HAPS tienen una superficie de cobertura mucho mayor que las estaciones de base terrestres y están mucho más cerca que los satélites de los usuarios terrestres (Abbasi et al., 2024).

El **mercado para los HAPS está creciendo rápidamente** tanto en el ámbito civil como en el militar. La consultora SB intelligence pronostica que el mercado de HAPS pasará de los 9.500 millones de dólares en 2024 a los 18.520 millones en 2031¹²⁵.

Los **HAPS** como concepto se pueden dividir en dos categorías principales: **soluciones aerostáticas** o más ligeras que el aire (LTA); y **aerodinámicos** o más pesados que las plataformas aéreas (HTA). Los LTA dependen de la flotabilidad para alcanzar y mantener su elevación mientras que los HTA utilizan fuerzas de sustentación aerodinámicas; estos últimos pueden dividirse aún más en dos tipos: globos y dirigibles. En la figura 56 puede verse esta idea de HAPS (Grest, 2022) ya sea empleando sistemas con grandes cargas de peso o pequeñas.

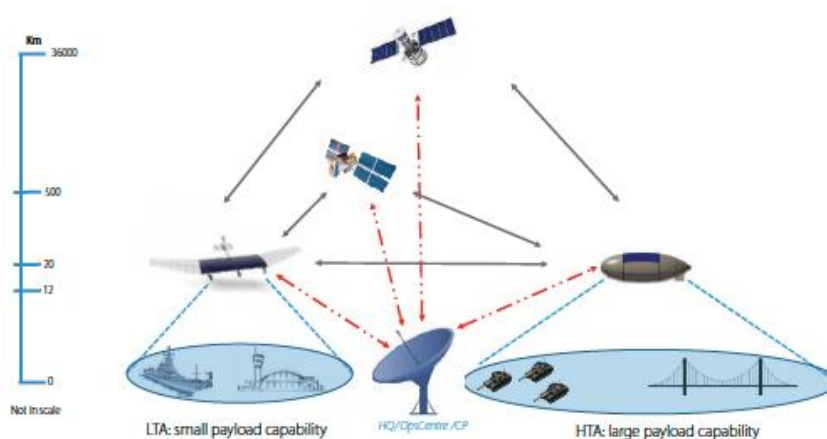


Figura 56. Concepto de HAPS. Fuente: Grest (2022).

Estos conceptos se han empezado a explorar para aplicaciones de defensa como indica el programa financiado en Estados Unidos por DARPA y la Fuerza Aérea (HAP-LTA) con sistemas como el indicado en la figura 57.

¹²⁴ La órbita baja (LEO) empieza a 100 Km de la superficie terrestre.

¹²⁵ <https://www.linkedin.com/pulse/united-states-high-altitude-pseudo-satellites-haps-ncskf/>

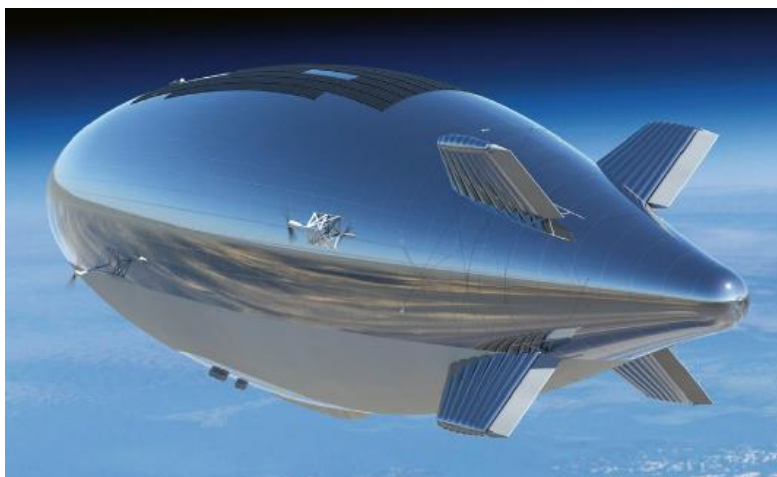


Figura 57. HAPS-LTA. Fuente: Grest (2022).

El **uso principal de las HAPS en el sector de la defensa** es el de apoyar las comunicaciones incrementando las tasas de transferencia de datos (incluyendo funciones de relé), y proporcionando un componente adicional dentro de redes integradas y servicios en la nube con reducción de costes frente a sistemas convencionales de comunicaciones satelitales LEO o GEO. También se espera que tenga utilidad en el sector de la seguridad como ha indicado *Frontex (European Border and Coast Guard Agency)* en 2023. Ya se ha planteado el uso de varios HAPS formando una red, conectada a su vez con satélites como se indica en la figura 58 (Kurt et al., 2021).

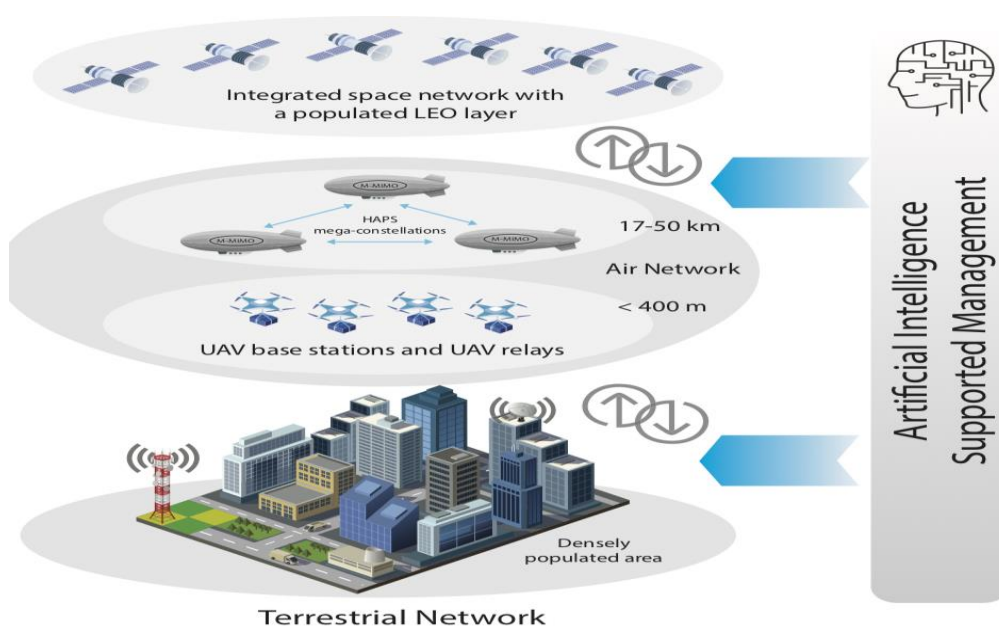


Figura 58. Redes de comunicación con varios HAPS. Fuente: Kurt et al. (2021).

La IA se utiliza cada vez más para **optimizar los pseudo satélites a gran altitud (HAPS)** para diversas aplicaciones:

- Planificación de la misión y navegación: Los marcos de IA como PDDL+ combinados con la búsqueda adaptativa de vecindarios grandes (ALNS) permiten una planificación eficiente de tareas y movimientos en entornos dinámicos, teniendo en cuenta las limitaciones climáticas y de la plataforma. El uso de aprendizaje automático se ha

empleado (Dahrou et al., 2022) para realizar la planificación de redes 6G a varios niveles terrestres-HAPS-satélite.

- Telecomunicaciones. La IA apoya HAPS en el suministro de cobertura 5G de baja latencia y servicios de IoT mediante la optimización de las arquitecturas de red, la mejora de la escalabilidad y la garantía de una baja latencia en áreas remotas cerrando las brechas con la infraestructura terrestre.
- Gestión de emergencias: la IA ayuda a las HAPS en los sistemas de alerta temprana mediante el análisis de datos históricos para la previsión y respuesta a desastres naturales.
- Aviónica autónoma: la automatización de vuelos impulsada por IA mejora la navegación, la eficiencia operativa y la adaptabilidad a los cambios ambientales.
- Monitorización medioambiental: La IA admite la recopilación de datos en tiempo real para la gestión de desastres, la observación de la Tierra y otras aplicaciones críticas.

Para que la integración de la IA sea efectiva en redes con HAPS es necesario resolver algunos retos específicos:

1. Seguridad y privacidad de los datos: Garantizar el manejo seguro de los datos confidenciales y prevenir los ciberataques es fundamental, dada la dependencia del intercambio de datos en tiempo real.
2. Interoperabilidad: La integración de la IA con diversos sistemas HAPS y redes heredadas requiere soluciones de estandarización y compatibilidad.
3. Cumplimiento normativo: El cumplimiento de las normas de aviación y comunicación mientras se utiliza la IA para operaciones autónomas añade complejidad.
4. Sesgo algorítmico: La toma de decisiones de la IA corre el riesgo de sesgo, lo que podría afectar a tareas de misión crítica como la asignación de recursos o la respuesta a desastres.
5. Limitaciones de recursos: Las altas demandas computacionales y los limitados recursos a bordo en HAPS plantean desafíos para la implementación de modelos avanzados de IA.

En los próximos años el uso de la IA integrado en plataformas HAPS va a crecer de la mano del desarrollo y despliegue de 6G (Abbasi et al., 2024) en los que la gestión de recursos de comunicaciones se convierte en un problema complejo.

3.10. Gemelos digitales de sistemas espaciales

El uso de gemelos digitales basados en modelos de datos y algoritmos de simulación basados en IA están suponiendo una revolución en la denominada **“ingeniería digital”** que permite **acelerar el desarrollo de sistemas complejos** en todos los dominios. El concepto de **tecnología de gemelos digitales** fue propuesto inicialmente por la NASA en 2002 con el objetivo de mejorar la fiabilidad y la seguridad de las misiones espaciales mediante la creación de ***réplicas virtuales de sistemas complejos de naves espaciales***.

Un gemelo digital es una réplica virtual de un sistema físico que refleja su comportamiento y características en tiempo real. Combina datos de varias fuentes con información y visualizaciones sobre el comportamiento. Pueden realizarse gemelos digitales de un pequeño componente de un sistema satelital completo o del planeta Tierra como se está impulsado desde la UE.

Los **gemelos digitales de naves o estaciones espaciales** permiten simular y realizar experimentos y pruebas extensivas en tierra, lo que reduce la necesidad de pruebas en

entornos espaciales reales, prediciendo así la aparición de posibles problemas y diseñando estrategias de mitigación de riesgos con antelación, mejorando en gran medida la seguridad y las tasas de éxito de las misiones (ARTES, 2024). Más específicamente, los **gemelos digitales proporcionan un modelo dinámico y realista de las redes satelitales**, incluida toda la infraestructura de red: satélites, estaciones terrestres y enlaces de comunicación. Los ingenieros pueden diseñar y planificar la arquitectura de red virtualmente, optimizando parámetros como el número y la ubicación de satélites, estaciones terrestres y asignaciones de frecuencias (Freedman, 2024).

El uso efectivo de gemelos digitales en el sector espacial requiere el **acceso a datos detallados y confiables** y el uso de técnicas de mapeo de alta precisión y en tiempo real para crear modelos virtuales de entidades físicas, cubriendo cuatro requisitos esenciales (Kreuzer et al., 2024):

- Tecnología de modelado 3D de alta precisión: es fundamental para la construcción de modelos. Requiere una representación digital precisa de la forma geométrica, el diseño estructural y las propiedades materiales de los activos espaciales.
- Simulación de campos físicos complejos: La complejidad de los entornos espaciales exige que los modelos virtuales puedan simular interacciones entre varios campos físicos, como campos electromagnéticos, térmicos y mecánicos;
- Tecnología de modelado paramétrico: Esto permite que los modelos ajusten automáticamente su estructura y rendimiento en función de los cambios en los parámetros de entrada. Esta tecnología es particularmente importante en la optimización del diseño, el análisis de sensibilidad y la cuantificación de la incertidumbre;
- Verificación y calibración rigurosas: incluye comparaciones con datos de medición reales, análisis de incertidumbres de predicción del modelo y ajuste de los parámetros del modelo.

En la figura 59 se puede ver esquemáticamente el ciclo de trabajo de un gemelo digital (Martínez and Huss, 2022) junto a un componente físico y proporciona datos reales de sensores. Asimismo, el sistema físico recibe órdenes para sus actuadores del sistema software ejecutando el gemelo digital.

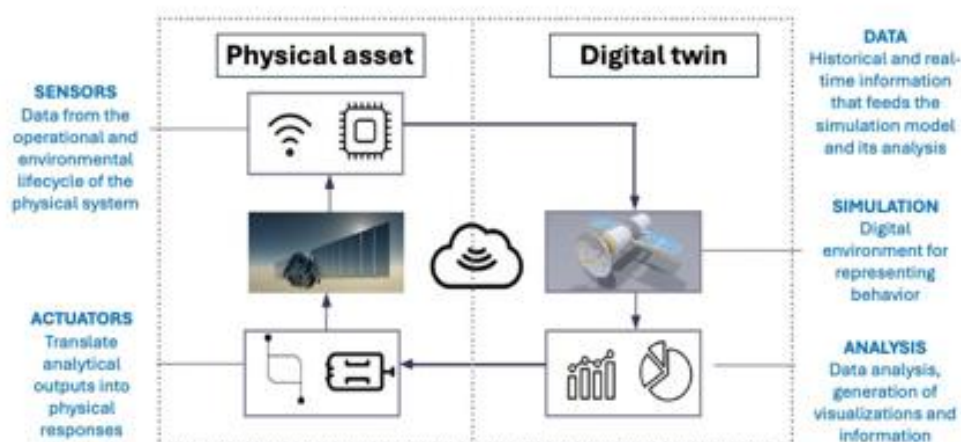


Figura 59. Esquema conceptual del uso de un gemelo digital en el sector espacial. Fuente: Adaptado de Martínez and Huss (2022)

El programa Digital EU (DIGITAL) se considera la principal fuente de financiación de la iniciativa **Destination Earth (DestinE)**. DestinE tiene como objetivo desarrollar un **gemelo digital de alta precisión de la tierra**. Este modelo digital de la tierra revolucionará la simulación y el monitoreo de fenómenos naturales, peligros y actividades humanas relacionadas. Los usuarios podrán predecir y simular oportunamente fenómenos meteorológicos extremos que provoquen desastres ambientales. Esto ayudará a salvar vidas y apoyará a Europa en su papel como líder mundial en la adaptación y mitigación del impacto del cambio climático¹²⁶. Cuando el gemelo digital interacciona con otras partes físicas en tiempo real (véase figura 60) se puede mejorar la comprensión del fenómeno y obtener datos para mejorar y aprender de ello.

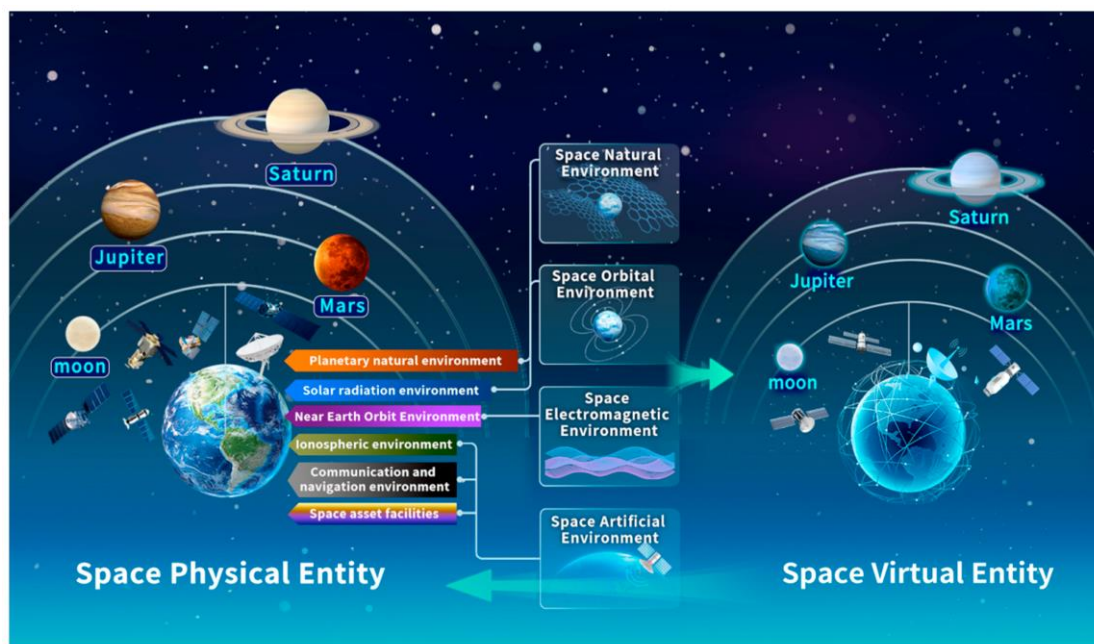


Figura 60. Relación entre entidades físicas y virtuales de un gemelo digital de espacio.

Fuente: Liu et al., 2024. <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/16/3023#:~:text=By%20establishing%20digital%20twins%20of,and%20success%20rates%20of%20missions>

Nos encontramos todavía en un momento en el que el uso de **gemelos digitales complejos ciber-físicos** (no solo modelos de datos sin conexión con entidades físicas) posee un nivel de madurez no muy elevado por lo que la experimentación y la obtención de conjuntos de datos fiables y robustos es esencial. En la figura 61 se puede ver cómo en veinte años la tecnología ha madurado para permitir su incorporación a los procesos de ingeniería

¹²⁶ La primera fase de ejecución del proyecto finalizó en junio de 2024. Esto incluyó la plataforma de servicio central como punto de entrada para los usuarios, los dos primeros gemelos digitales y el lago de datos como la fuente detrás del sistema. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/es/factpages/digital-success-stories-destine-building-digital-twin-earth>

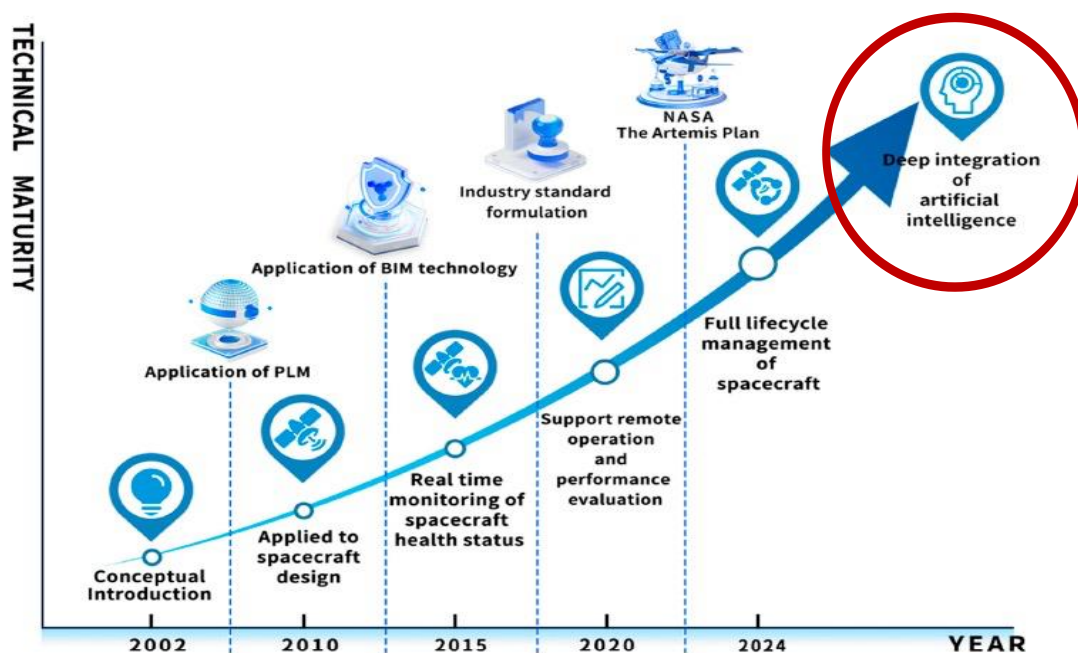


Figura 61. Evolución de la madurez de la tecnología de IA en aplicaciones espaciales. Fuente: <https://doi.org/10.3390/rs16163023>

Al establecer gemelos digitales de naves o estaciones espaciales, los científicos e ingenieros pueden **simular y analizar varios escenarios en entornos espaciales en tierra**, prediciendo así la aparición de posibles problemas e ideando estrategias de mitigación de riesgos con anticipación, mejorando en gran medida la seguridad y las tasas de éxito de las misiones.

Expresamente, el **modelado virtual se ha empleado en el diseño de sistemas de comunicación** permite comprender el rendimiento del sistema en **diversos escenarios** de dinámicas orbitales, velocidades de datos, latencias y degradaciones. Una visión más completa del uso de un gemelo digital se ve en la figura 62.

- En la parte inferior de la figura se representa esquemáticamente cómo las entidades físicas interactúan con el modelo virtual en un contexto de iteraciones para optimización y de sincronizaciones. Este proceso se basa en un conjunto de datos que evolucionan con los resultados de las ejecuciones de los modelos y con los datos en tiempo real obtenidos de los sensores.
- En la parte superior de la figura 62 se han representado diversos tipos de aplicaciones cuya ejecución interactúa con diversas funciones del sistema optimizadas con los datos generados por el gemelo digital.

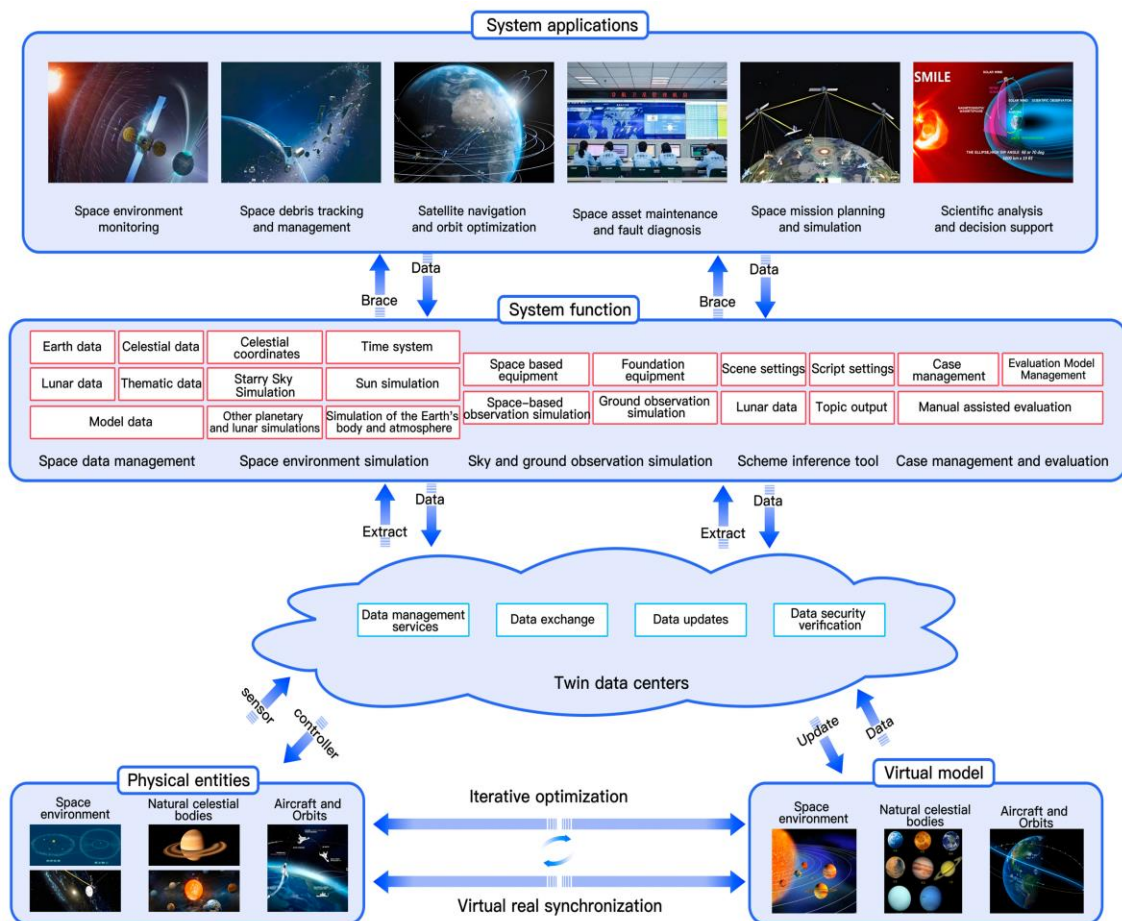


Figura 62. Modelo genérico de gemelo digital espacial. Fuente: https://www.mdpi.com/remotesensing/remotesensing-16-03023/article_deploy/html/images/remotesensing-16-03023-g008.png

Muchas agencias espaciales, y en el caso de Estados Unidos el Departamento de Defensa, han comenzado a exigir en los contratos con empresas proveedoras la **entrega de un modelo digital para facilitar su operación y mantenimiento posterior**.

Un ejemplo en este sentido es la adjudicación por parte de la **Agencia de Desarrollo Espacial (SDA)** perteneciente al Departamento de Defensa de Estados Unidos¹²⁷ a **Sedaro Corporation** un contrato SBIR para **implementar la plataforma de gemelos digitales Sedaro**. En la figura 63 puede verse la plataforma digital disponible por **Sedaro** actualmente.

Sedaro implementará instancias de su plataforma de gemelos digitales nativa de la nube, **Sedaro**, para respaldar los programas del **Sistema de Posicionamiento Global (GPS)** y la **Arquitectura Espacial de Combatientes Proliferados (PWSA)** de SDA, y realizar implementaciones específicas para cada programa. Para este proyecto, **Sedaro** se ha asociado con **Celeris Systems** y **Safran Federal Systems**.

¹²⁷ <https://www.sda.mil/>



Figura 63. Plataforma de simulación espacial Sedaro. Fuente:
<https://satellite.sedaro.com/welcome>

3.11. Robótica espacial potenciada por la IA

En las últimas dos décadas **la IA ha permitido dar un impulso a la robótica** permitiendo que **sistemas robóticos** ya sean robots antropomórficos colaborando con humanos (*cobots*), vehículos robotizados (*rovers*) o brazos robóticos en sistemas fijos como se hace en la industria sean **capaces de tomar decisiones de forma más inteligente en función de la información recibida en tiempo real del entorno**. Se combinan de esta forma en la robótica inteligente los avances tecnológicos en sensores, materiales, y la mecánica de precisión de actuadores en elementos robóticos, con el manejo de sistemas de aprendizaje automático e interfaces conversacionales aprovechando el desarrollo de técnicas de IA generativa.

El sector espacial no es ajeno a esta tendencia y el uso de la **robótica espacial inteligente** ha cobrado impulso tanto en sistemas de exploración de otros objetos espaciales (la Luna, planetas, asteroides, etc.) como para los propios satélites o naves espaciales. **La robótica espacial implica el diseño y la fabricación de robots adaptados para operar en el entorno del espacio ultraterrestre** y satisfacer diversas funciones en misiones espaciales¹²⁸. Puede tratarse de *rovers* (móviles) o *lander* (fijos) en la superficie de un planeta o sus lunas, o en naves espaciales orbitando la Tierra u otros objetos espaciales (Zhihong, et al., 2022).

A diferencia de las generaciones anteriores de robots espaciales, que requerían recibir instrucciones precisas para ejecutar cada tarea desde los operadores en Tierra o previamente con reducida flexibilidad, **los robots impulsados por IA apoyados por visión**

¹²⁸ El inventario de áreas en la que la IA está siendo utilizada por la NASA (véase el anexo 5) incluye varios ejemplos de robótica espacial.

por computadora pueden evaluar su entorno y tomar decisiones de forma autónoma. Con esa capacidad se adaptan a condiciones impredecibles o desconocidas durante las misiones, ofreciendo mayor autonomía para operar de forma independiente cuando no hay comunicación con la Tierra¹²⁹.

El **éxito de la robótica espacial impulsada por la IA** dependerá, sin embargo, del grado en el que maduren y se integren diversas tecnologías como se indica en la figura 64.



Figura 64. Áreas tecnológicas clave de la robótica espacial inteligente. Fuente: <https://redresscompliance.com/ai-in-space-robotics-revolutionizing-space-exploration/>

En la figura 64 se identifican **diversas técnicas de IA empleadas**: el aprendizaje automático, la visión por computador, el procesamiento de lenguaje natural, el aprendizaje por reforzamiento, y la fusión de datos multi-sensor.

La incorporación de sistemas de IA permite a los robots espaciales realizar tareas muy diversas como la recolección de muestras, el ensamblaje de estructuras y la navegación por terrenos complejos con una mínima intervención humana. Mediante uso de técnicas de **aprendizaje automático, los robots refinan continuamente sus movimientos para una mayor precisión**. Además, la IA avanzada permite a estos robots crear mapas en 3D, identificar obstáculos y planificar rutas eficientes, lo que los hace esenciales para la exploración planetaria.

Un ámbito específico de interés de NASA es que las actividades de construcción en la Luna y Marte pasen progresivamente del diseño teórico a la creación de infraestructuras reales. La combinación de la robótica impulsada por la IA que utiliza la impresión 3D y las operaciones autónomas de abastecimiento de materiales construirá los fundamentos básicos de la infraestructura extraterrestre. La NASA tiene como objetivo **enviar robots autónomos para construir hábitats espaciales de forma autónoma sin supervisión humana a partir de 2028**.

¹²⁹ <https://nstxl.org/ai-driven-advancements-in-space/>

Los rovers de Marte de la NASA, *Curiosity* y *Perseverance*, ejemplifican esta tecnología mediante el **uso de IA para navegar y analizar muestras de forma autónoma**, mientras que el helicóptero *Ingenuity* impulsado por IA de *Perseverance* amplía la exploración con estudios aéreos de áreas inaccesibles para los rovers. Concretamente, el *Mars Rover Perseverance* utiliza la IA para navegar de forma autónoma por la superficie marciana, identificar sitios prometedores para la exploración, analizar rocas, y evitar peligros¹³⁰.

El instrumento más avanzado con IA a bordo del *Mars Rover Perseverance* es el **Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry (PIXL)**. La IA ayuda a PIXL de dos maneras. En primer lugar, coloca el instrumento justo una vez que el instrumento está en las proximidades de un objetivo rocoso. Situado en el extremo del **brazo robótico del Perseverance**, el espectrómetro se asienta sobre seis pequeñas patas robóticas, llamadas hexápodo. La cámara de PIXL verifica repetidamente la distancia entre el instrumento y la roca objetivo para ayudar con el posicionamiento. La figura 65 permite ver el instrumento PIXL (izquierda) y el análisis generado de una roca (derecha).



Figura 65. Izquierda: Instrumento PIXL del Mars Rover Perseverance y Derecha: Imagen de una roca de Marte creada usando PIXL, que determina su composición mineral con rayos X. Fuente: <https://www.nasa.gov/missions/mars-2020-perseverance/perseverance-rover/heres-how-ai-is-changing-nasas-mars-rover-science/>

Es indudable que estas experiencias robóticas de la NASA como las indicadas están asociadas a un uso científico, civil y no militar, del espacio. Sin embargo, también se han empezado a desarrollar otros **sistemas robóticos espaciales con fines duales o militares** que cuentan con financiación de agencias de defensa.

Uno de estos desarrollos es el llevado a cabo por el **NRL (U.S. Naval Research Laboratory)** del *Naval Center for Space Technology* de Estados Unidos financiado por DARPA. En 2024 se ha completado el **desarrollo de un sistema robótico para una nave espacial calificado para dar servicio a satélites en órbita** (Pasquini, 2024) denominado “*Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites Integrated Robotic Payload*”. La figura 66 permite ver el sistema en desarrollo.

¹³⁰ El *Mars Rover Perseverance* fue lanzado en julio de 2020 y representa uno de los ejemplos más avanzados del uso de la IA en el espacio. Su misión se centra en la astrobiología, incluida la búsqueda de signos de vida microbiana antigua, la recolección de muestras de suelo y rocas marcianas y la preparación para futuras exploraciones humanas. <https://www.nasa.gov/missions/mars-2020-perseverance/perseverance-rover/heres-how-ai-is-changing-nasas-mars-rover-science/>



Figura 66. Sistema robótico de NRL. Fuente: <https://www.defense.gov/News/News-Stories/Article/Article/3966145/naval-research-lab-completes-development-of-satellite-servicing-robotics/>

El objetivo de NRL es ayudar a resolver un **problema actual de las naves espaciales debido a la imposibilidad de realizar reparaciones o actualizaciones en órbita**. Para compensar este problema, los satélites geoestacionarios muy caros se cargan con sistemas de back-up (para poder activarlos desde operadores en estaciones terrenas) y exceso de combustible, lo que aumenta la complejidad, el peso y el costo. Si el proyecto de NRL tuviera éxito, los satélites pueden recibir actualizaciones en órbita (no solo de software) para extender su vida útil.

En la UE también se están desarrollando robots espaciales inteligentes. Un caso es el desarrollado por el **Centro aeroespacial Alemán DLR** (*Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) pionero en el campo de los **cobots** (robots colaborativos que trabajan en cooperación con humanos). La figura 66 permite ver uno de estos sistemas junto con el rover “Interact” de la ESA al que se pretende controlar desde la ISS¹³¹.

La *Agencia Espacial Alemana - DLR* y la *Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA)* han anunciado en julio de 2025 un hito en el campo de la robótica llevado a cabo a bordo de la Estación Espacial Internacional (ISS), que allana el camino para una colaboración más avanzada entre humanos y robots en el espacio. Durante la misión **ICHIBAN** completada el 29 de julio, por primera vez en la historia dos robots de asistencia a astronautas desarrollados por separado denominados CIMON se comunicaron y cooperaron entre sí a través de dos redes informáticas diferentes¹³².

¹³¹ <https://www.dlr.de/en/latest/news/2025/the-art-of-compliant-robotics>

¹³² CIMON ha sido desarrollado por Airbus con el apoyo de IBM para la Agencia Espacial Alemana - DLR como robot asistente autónomo para astronautas a bordo de la ISS. Utilizando tecnología de procesamiento de lenguaje natural y reconocimiento de imágenes, CIMON puede interactuar con la tripulación mediante comandos de voz y percibir su entorno visual y sonoro. CIMON funciona con watsonx de IBM. <https://es.newsroom.ibm.com/announcements?item=122881>

La **colaboración entre los dos sistemas robóticos de vuelo libre** abre nuevas oportunidades para que las agencias espaciales aumenten y mejoren el trabajo de los astronautas con la robótica y la IA. Por ejemplo, las agencias y los sistemas ahora pueden trabajar juntos para acelerar los experimentos de la ISS, inspeccionarla para detectar defectos y mejorar la seguridad de los astronautas.

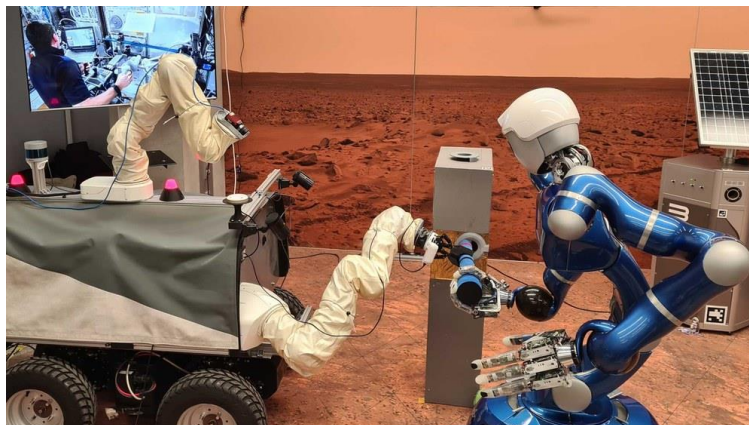


Figura 67. Robot de DLR Rollin' Justin y el ESA Interact Rover. Fuente: <https://www.dlr.de/en/latest/news/2025/the-art-of-compliant-robotics>

Se trata aún de sistemas experimentales. De igual forma que en las relaciones humanas, **los robots deben ganarse la confianza de sus compañeros de equipo y operadores a través de una fiabilidad probada**. Las barreras para establecer una autonomía de confianza incluyen aquellas normalmente asociadas con las relaciones de confianza "estándar" entre humanos: diferentes formas de pensar (digitales vs. analógicas) y expresión, baja transparencia y trazabilidad (los robots no pueden explicar sus propias decisiones), baja comprensión mutua de los objetivos. Cuanto más se impulse el nivel de autonomía de la tecnología, más habrá que responder a las siguientes preguntas: *¿Hasta qué punto se puede "confiar" en los robots para realizar sus tareas asignadas sin necesidad de supervisión humana? ¿Qué nivel de confiabilidad se puede asociar con una tarea realizada por un sistema autónomo?*¹³³

El desarrollo de sistemas robóticos espaciales se va a acelerar. NASA, junto con organizaciones espaciales privadas, ha asignado 10.000 millones de dólares de presupuesto en 2025 para impulsar el desarrollo espacial basado en IA e iniciar la **exploración espacial asistida por máquinas**¹³⁴.

¹³³ <https://eda.europa.eu/webzine/issue14/cover-story/robotics-in-defence>

¹³⁴ <https://ai-techpark.com/ai-robotics-space-exploration-2025/>

4. Situación de Europa en la IA espacial de defensa

4.1. Capacidades europeas en el sector espacial

4.1.1. Capacidades europeas en el desarrollo de componentes y sistemas espaciales y su relación la IA

La **creciente conflictividad global** ha hecho que en los últimos años la UE se haya preocupado de mejorar sus capacidades de defensa (Loizou y Ipolito, 2024) con adquisiciones de sistemas avanzados e incrementar el diseño y fabricación de sistemas propios con el fin de reducir su dependencia tecnológica.

Este cambio ha sido posible por el incremento presupuestario en los últimos años. Concretamente, los **incrementos presupuestarios** anunciados por los Estados miembros de la UE y el compromiso de superar el 5% del PIB adoptado por todos los países de la UE pertenecientes a la OTAN para 2035 anunciado en la cumbre de la OTAN de La Haya de junio de 2025 avalan este proceso. Un porcentaje de los incrementos presupuestarios se asignará al sector espacial.

Esa relación entre defensa y espacio se ve claramente en la UE con la decisión de la Comisión Europea de crear en su estructura la **Dirección General de Industria de Defensa y Espacio (DEFIS)**¹³⁵ y la voluntad de dotar a ese ámbito un presupuesto de 131.000 millones de euros en su propuesta del nuevo **marco financiero plurianual** para el periodo 2028-2034 presentada en julio de 2025 lo que quintuplica el presupuesto del actual marco hasta 2027¹³⁶.

Obviamente, las **inversiones europeas en el sector espacial** tienen en cuenta su carácter dual. Están orientadas a la mejora de los sistemas preexistentes de observación, navegación, comunicaciones y comprensión del dominio espacial con el empleo de las tecnologías más avanzadas, incluida la IA, forman parte de ese objetivo.

El desarrollo por la UE durante las últimas dos décadas del sistema de navegación **Galileo** (y específicamente los servicios derivados del uso de la señal gubernamental **PRS** (*Public Regulated Service*), el sistema de uso dual de observación de la Tierra denominado **Copérnico**, los diversos satélites de comunicaciones en órbitas geoestacionarias de los países de la UE junto a las múltiples aplicaciones desarrolladas por la ESA en el programa **ARTES** (*Advanced Research in Telecommunications Systems*), se complementan con las capacidades de lanzadores de la UE con los cohetes **Ariane 6**¹³⁷. Todo ello demuestra unas capacidades muy relevantes de la Unión que se incrementarán en los próximos años con

¹³⁵ <https://op.europa.eu/es/web/who-is-who/organization/-/organization/corporate-body/DEFIS>

¹³⁶ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_25_1847

¹³⁷ El Ariane 6 estará disponible en dos versiones dependiendo del rendimiento requerido: una versión con dos propulsores, llamada Ariane 62, y Ariane 64 con cuatro propulsores. El Ariane 62 puede lanzar cargas útiles de aproximadamente 4,5 toneladas a la órbita de transferencia geoestacionaria o de 10,3 toneladas a la órbita terrestre baja. El Ariane 64 puede lanzar cargas útiles de aproximadamente 11,5 toneladas a la órbita de transferencia geoestacionaria y de 21,6 toneladas a la órbita terrestre baja.

https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Launch_vehicles/Ariane_6_overview

el desarrollo y despliegue de la constelación de satélites en órbitas combinadas LEO y MEO denominada **IRIS²** descrita brevemente con anterioridad.

El apoyo al **desarrollo y uso de tecnologías emergentes en el espacio y, especialmente, la IA en las áreas indicadas** es creciente por parte de las agencias de financiación europeas, tanto las comunitarias (como a través del programa *Horizonte Europa* o su antecesor *H2020*), de la ESA, o de los Estados miembros. Todas ellas recogen así la relevancia de la IA en el espacio como se ha presentado en secciones anteriores.

En la convocatoria de 2025 (cierre de 25 de septiembre de 2025) del programa *Horizonte Europa* (clúster 4) se han indicado las siguientes **prioridades potencialmente relacionadas con el uso de la IA en el sector espacial**:

- HORIZON-CL4-2025-02-SPACE-12: Soluciones digitales para la autonomía de los sistemas de transporte espacial, herramientas de diseño y simulación – Habilitadores digitales y bloques de construcción;
- HORIZON-CL4-2025-02-SPACE-13: Soluciones digitales para la autonomía de los sistemas de transporte espacial, herramientas de diseño y simulación – orientadas a la demostración.
- HORIZON-CL4-2025-02-SPACE-31: Habilitadores digitales y componentes clave para la observación de la Tierra y las telecomunicaciones satelitales para soluciones espaciales;
- HORIZON-CL4-2025-02-SPACE-32: Preparación de misiones de demostración para la observación colaborativa de la Tierra y telecomunicaciones por satélite para soluciones espaciales;
- HORIZON-CL4-2025-02-SPACE-41: Evolución del Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S): métodos nuevos e innovadores de procesamiento y análisis para futuros satélites *Sentinel* y otros satélites de reanálisis;
- HORIZON-CL4-2025-02-SPACE-45: Apoyo a la transición digital IA/ML de los servicios de Copernicus;

Proyectos como **DeepCube¹³⁸** (financiado en el programa europeo de investigación e innovación *H2020*) **integran aprendizaje profundo y modelado físico** para abordar desafíos como sequías, incendios forestales y migraciones inducidas por el clima, maximizando su impacto en sostenibilidad y respuesta climática. El objetivo es utilizar los datos del sistema de observación de la Tierra *Copernicus* para modelar variables geofísicas y biológicas relacionadas con el cambio climático.

En la figura 68 puede verse un esquema de la **plataforma de Deep-Cube** en la que se ve el **módulo de aprendizaje profundo distribuido** (*Distributed Deep Learning Platform*) alimentado con datos de diversas fuentes.

¹³⁸ <https://deepcube-h2020.eu/ai-for-eo-projects-ecosystem/> y <https://deepcube-h2020.eu/>

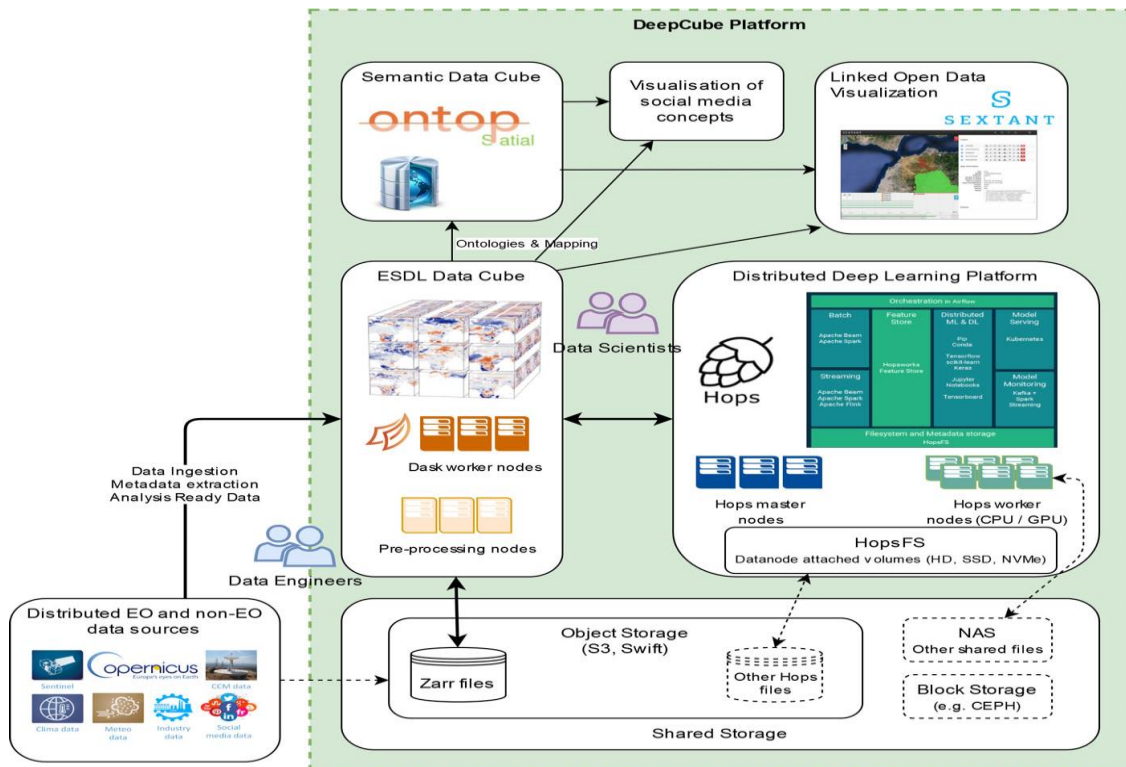


Figura 68. Plataforma Deep-Cube. Fuente: <https://deepcube-h2020.eu/technology/deepcube-platform/>

Un problema que aún sigue pendiente para extraer todas las ventajas del uso de la IA es la **estandarización de los datos y metadatos**. La **falta de formatos y protocolos unificados** dificulta el intercambio fluido de información entre sistemas, lo que limita la colaboración efectiva; problema que tienen aún más relevancia en el caso de aplicaciones de defensa y seguridad en las que participan diversos países aliados¹³⁹.

Para ello, sería necesario **actualizar formatos interoperables como RINEX (Receiver INdependent EXchange)**¹⁴⁰. Se trata de un formato ya antiguo (1989) de archivos de texto que almacena, de forma estandarizada, información del cálculo de magnitudes como la posición y las velocidades a partir de una serie de mediciones a los satélites de las diferentes constelaciones GNSS. Este formato también permite el intercambio y procesamiento de datos independientemente de la marca, modelo o característica del receptor GNSS o sistema de procesamiento¹⁴¹.

En el contexto del **diseño digital** es destacable el esfuerzo de la ESA para experimentar el uso de modelos digitales basados en IA para acelerar el desarrollo de satélites. Concretamente, el programa de **diseño disruptivo de sistemas de comunicación**

¹³⁹ <https://www.ftidefense.com/news/accelerating-data-management-decision-chain-military-space-operations>

¹⁴⁰ <https://mettatec.com/rinex-the-gnss-data-exchange-format/>

¹⁴¹ El formato se ha ido actualizando periódicamente y la última versión (4.01) es de 2021 en la que se ha incluido más metadatos de las señales GNSS para poder automatizar el análisis de la información. <https://gisresources.com/from-rinex-4-0-a-guide-to-gnss-data/>

satelital con diseño generativo (*Disruptive satcom Systems Design with Digital Generative Design*) financiado por la ESA (ARTES, 2024) pretende **experimentar el uso de las técnicas de IA generativa** dentro del dominio de las comunicaciones por satélite.

Estas tecnologías de IA, aunque prometedoras, presentan una curva de aprendizaje compleja y con incertidumbres con respecto a su aplicabilidad y efectividad en el diseño de satélites de comunicaciones para que las soluciones generadas por IA no solo sean innovadoras, sino también prácticas, fabricables y que cumplan con los estándares de la industria. Además, el éxito de la IA generativa depende en gran medida de la disponibilidad y la calidad de los datos.

Utilizando técnicas de IA de última generación, como modelos de difusión y transformadores, el objetivo es **incorporar la IA generativa en los procesos de diseño utilizando computación en la nube y GPUs para procesar y analizar grandes cantidades de datos de manera eficiente**. El proyecto financiado por la ESA¹⁴², comenzado en julio de 2024, abarca la entrega de pruebas de concepto de software de los siguientes componentes clave:

- Un modelo generativo capaz de entregar diseños en 3D para componentes de satélites de comunicaciones (SatCom).
- Grandes modelos de lenguaje (LLM) como soporte de diseño, que ofrecen una forma innovadora de interactuar con el software de diseño.
- Un generador de imágenes satelitales basado en difusión.

A la UE no le basta con mejorar la financiación para el uso y desarrollo dual de la IA en el espacio; es necesario **competir mejor en el contexto internacional** en el que nuevos países se suman al desarrollo de tecnología espacial. La siguiente sección aborda las capacidades europeas para **mantener un nivel elevado de soberanía tecnológica**.

4.1.2. Capacidades europeas en el desarrollo de aplicaciones de IA en el sector espacial de la defensa

En las secciones anteriores se han presentado diversos ejemplos del uso de la IA en el diseño y operación de sistemas espaciales en entornos disputados. En muchas de ellas participan empresas y centros de investigación europeos de la mano de programas nacionales comunitarios o de la ESA.

Sin embargo, **la valorización de estas capacidades en términos de soberanía tecnológica espacial europea se enfrenta a varios desafíos** derivados de la fragmentación del mercado espacial europeo en la que la ESA no es sinónimo de la UE ni sustituye a las agencias nacionales.

Desde un punto de vista más concreto, **las capacidades europeas en el desarrollo de aplicaciones de IA en el sector espacial de la defensa tienen luces y sombras**. Desde un punto de vista positivo, son muchos los países europeos que participan en el sector espacial (tanto de la UE como también de otros países, principalmente, el RU) y se ha

¹⁴² El proyecto se desarrolla por Applied Data Science Partners (UK), Reflex Aerospace (Germany), Anywaves (Francia) y la Universidad de Glasgow (UK). <https://connectivity.esa.int/projects/artes-future-preparation-1a127-disruptive-satcom-systems-design-digital-generative-design> (last update 30 January 2025).

incrementado el número de empresas start-ups con productos disruptivos de doble uso para el diseño de plataformas satelitales, cargas útiles y servicios ligados (p.ej. procesamiento de imágenes satelitales y computación en el borde). En todos estos casos se empieza a usar técnicas de IA, aunque sigue abierto el resto de hacerlas eficientes e incorporarlas de manera rutinaria.

Desde un punto de vista negativo, Europa no posee aún capacidades de lanzamiento recuperable que permitan reducir los costes de acceso al espacio, y depende de empresas de Estados Unidos para ello. Además, tras la ruptura de la colaboración con Rusia debido al conflicto de Ucrania tampoco se utilizan las facilidades de *Baikonur* empleadas en el pasado. Esta situación hace a la UE dependiente de las capacidades de empresas privadas de Estados Unidos como SpaceX a la que también recurre la NASA.

El informe de situación del sector espacial europeo publicado por la ESA en diciembre de 2024 (ESA, 2024) puede verse que lo **presupuestos espaciales públicos** tanto en el mercado civil como en el de defensa en el periodo 2019-2023 indican un reducido peso de Europa (véase figura 69 izquierda) con un volumen de global de 11.900 millones de euros en 2023. Más relevante como indicador de la transformación del sector en los últimos años es que **el porcentaje relativo a defensa superó por primera vez con el 50,2% al civil**.

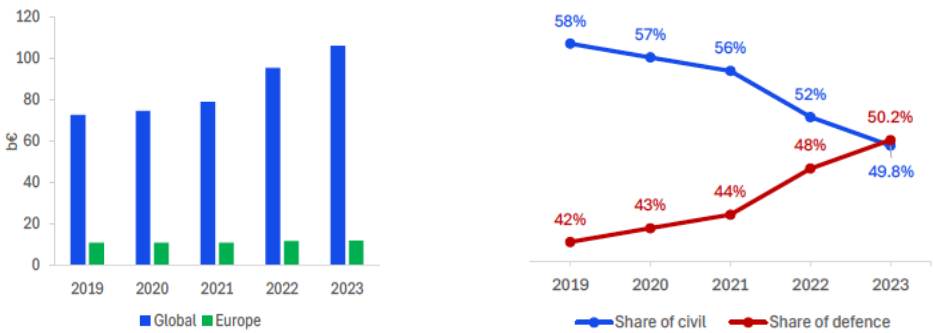


Figura 69. Presupuestos públicos de espacio y relación civil-defensa en el periodo 2019-2023. Fuente: ESA (2024).

En una comparación internacional el peso de Europa en 2023 es solo del 11% (véase figura 70 izquierda), superado no solo por Estados Unidos sino también por China con un avance desde el 2% en el año 2000 al 12% en 2023. A la derecha de la figura se puede ver la masa total lanzada (en toneladas métricas) en el periodo 2014-2023 (civil y militar).

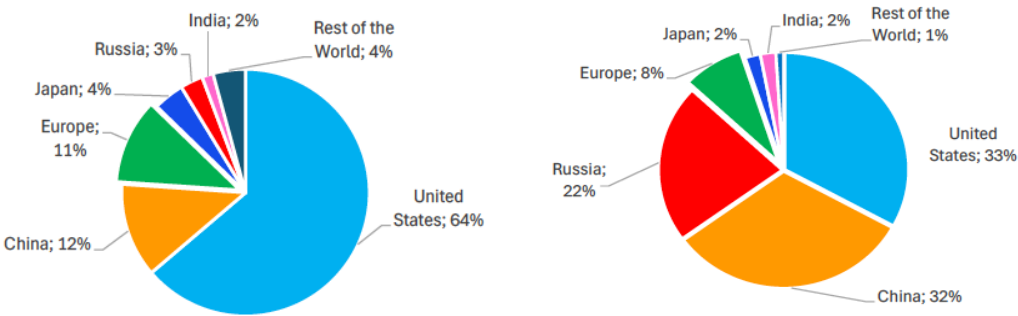


Figura 70. Izquierda: Distribución presupuestaria por países en 2023. Derecha: masa total lanzada 2014-2023 por región. Fuente: ESA (2024)

Si se analiza la situación en el sector privado, Europa sigue teniendo una buena posición, pero no de liderazgo como se indica en la figura 71. A la izquierda de la figura el peso de Europa en miles de millones de euros ha descendido de 2021 a 2023. A la derecha, supone una atracción de inversión privada del 16% en el año 2023.

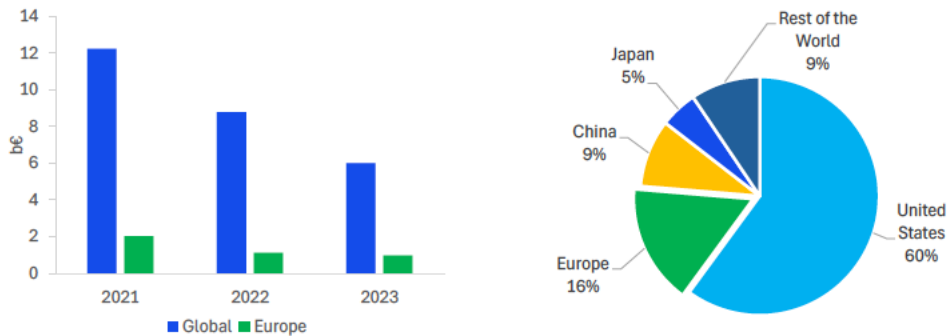


Figura 71. Comparación internacional de la inversión privada en el sector espacial 2021-2023.
Fuente: ESA (2024)

Las **tendencias estimadas por la ESA para 2024** (datos no cerrados) espera que los presupuestos institucionales de espacio alcancen los 121 mil millones de euros en 2024, lo que conduciría a un crecimiento del 7% en comparación con 2023. **Los gastos de defensa en el espacio continúan creciendo más rápido que el gasto civil, que se espera que represente el 53% en 2024.**

Se espera que el 47% de la **inversión pública** en el sector del espacio se dedique al gasto civil en 2024, una evolución del 5% respecto a 2023. Por otra parte, la **inversión privada** muestra signos de resiliencia en 2024. Se espera que el capital riesgo siga siendo una fuente principal de financiación para las empresas privadas espaciales.

Del informe de *EuroSpace* presentado en julio de 2025¹⁴³ pueden extraerse los siguientes **datos relevantes de la evolución en el periodo 2020-2022** (Tabla 1) correspondientes a entidades europeas (más allá de los miembros de Eurospace).

Key figures employment (FTE) and sales (M€)	2022	2023	2024	Var.
Direct industry employment (FTE)	57902	63402	66061	4,2%
Other personnel working on site (FTE)	2182	2192	2396	9,3%
Total space industry employment (FTE)	60084	65594	68457	4,4%
Final sales (M€ current e.c.)	8345	8570	8835	3,1%

Final sales by Customer Segment (M€)

(M€)	2022	2023	2024	Var.
Final sales (M€)	8345	8570	8835	3,1%
European public customers	5627	5968	6335	6,1%
European private customers	1073	877	893	1,8%
Other/unkown European customers	104	208	72	-65,6%
Public customers RoW	382	322	277	-14,0%
Private customers RoW	1131	1135	1197	5,5%
Other/Unknown customers RoW	28	60	62	3,7%

Final sales by Product Segment (M€)

¹⁴³ 29th Edition Facts and Figures <https://eurospace.org/publication/eurospace-facts-figures/?sfw=pass1756484196>

(M€)	2022	2023	2024	Var.
Final sales (M€)	8345	8570	8835	3,1%
Launcher systems	1224	1151	1305	13,4%
Satellite applications systems	3656	3435	3910	13,8%
Scientific systems	1401	1526	1189	-22,1%
Ground systems and services	1833	1985	2289	15,3%
Other & Unknown	232	473	142	-70,1%

Tabla 1. Datos relevantes de EuropeSpace de 2022-2024. Fuente: <https://eurospace.org/publication/eurospace-facts-figures/>

La figura 72 presenta a fecha de mayo de 2025 los 80 miembros de la asociación empresarial **EuroSpace** situados en 17 países europeos de acuerdo con la presentación de la organización¹⁴⁴. En total, agrupan el 70% del empleo del sector espacial en Europa.



Figura 72. Miembros de EuroSpace en mayo de 2025. Fuente: https://eurospace.org/wp-content/uploads/2025/05/may-2025_presentation-eurospace.pdf

En relación con el **sector espacial de defensa europeo**, Eurospace presentó en octubre de 2023 su **documento de posición** (Eurospace, 2023) con un conjunto de recomendaciones para la industria europea que considero válidas. De ellas, extraigo las siguientes **en forma resumida**:

1. *Complementar el reconocimiento de todo el sector espacial como un sector de alta criticidad (es decir, incluyendo a los operadores, pero también a los proveedores terrestres y espaciales).*
2. *Proteger los sistemas terrestres y espaciales de los ataques electrónicos y los ciberataques (es decir, la guerra ciber electrónica) generados por entidades terrestres y/o espaciales.*
3. *Incluir la ciberseguridad a bordo de todos los satélites para garantizar la detección, recuperación y respuesta adecuadas a las amenazas intencionadas (y no intencionadas) relacionadas.*
4. *Seguir estableciendo y apoyando el establecimiento de líneas programáticas financiadas para seguir desarrollando las capacidades europeas de SDA, incluida la*

¹⁴⁴ https://eurospace.org/wp-content/uploads/2025/01/january-2025_presentation-eurospace.pdf

aparición y rentabilidad de un mercado de tecnologías y servicios en combinación con activos institucionales.

5. Promover el concepto de Acceso, Movilidad y Logística al Espacio (SAML) con el fin de desarrollar un enfoque de espectro completo para la capacidad de respuesta, la versatilidad y la agilidad en el espacio, aprovechando los desarrollos tecnológicos en el campo del lanzamiento, los servicios en órbita, el reabastecimiento de combustible en órbita, la remoción activa de desechos y los vehículos de transferencia orbital aplicados a las operaciones espaciales militares;
6. Navwar estará en el centro de las preocupaciones europeas y el Servicio Público Relacionado (PRS) de Galileo evolucionará rápidamente con el fin de aumentar continuamente su solidez.

4.2. Capacidades españolas en el sector espacial

4.2.1. Sector espacial español

España se encamina hacia una economía espacial madura, generando 20.000 empleos directos, ocupando el quinto puesto en Europa en creación de empleo permanente. La industria espacial española crece un 12,6% en 2023 con respecto al año anterior alcanzando los 1.200 millones de euros (datos de TEDAE) en su mayor parte (1.100) del sector civil del espacio.

En la figura 73 se pueden ver datos relevantes del informe presentado en diciembre de 2024 por la **asociación empresarial Tedae**. Los datos corresponden al año 2022 en el que se produjeron unas ventas de 1.065 millones de euros (incremento del 7,1%) y dio empleo a 5.533 personas (incremento del 11,5%).

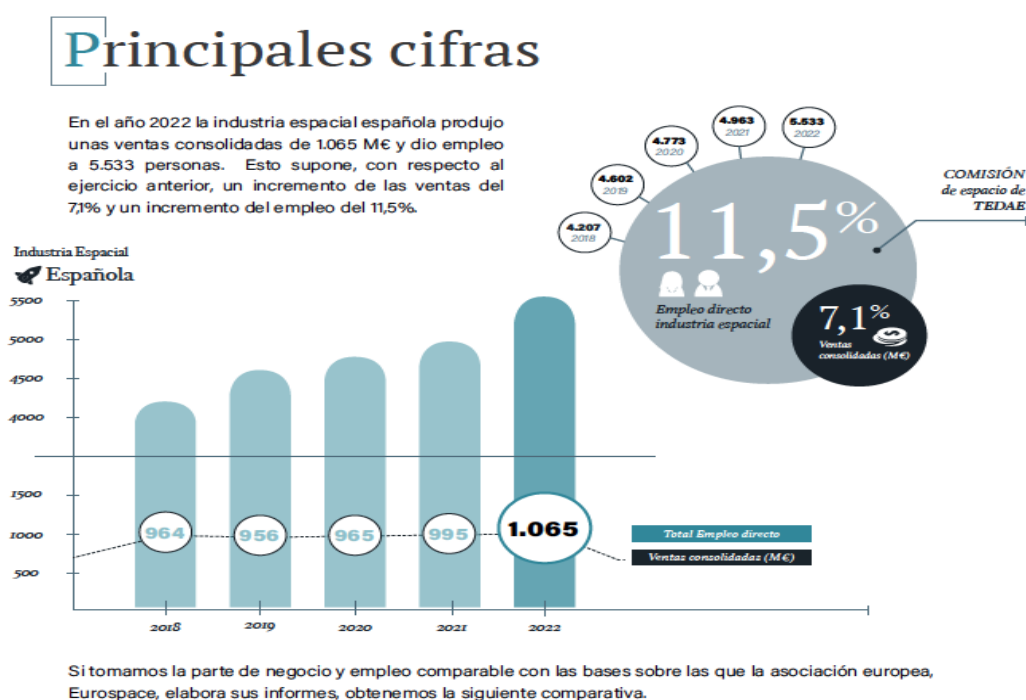


Figura 73. Industria espacial española Tedae. Cifras y datos de 2022. Fuente:

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://tedae.org/wp-content/uploads/2024/12/cifras-tendencias-2023.pdf&ved=2ahUKEwiGr9WniIWLAXX_SKQEHaQlluYQFnoECBgQAQ&usg=AOvVaw3ohJANXNFzBMBupBEH-XKV

Esta evolución positiva se ve en la figura 74 obtenida del mismo informe de Tedaee mencionado previamente que indica un **crecimiento relevante del empleo** en los últimos años.

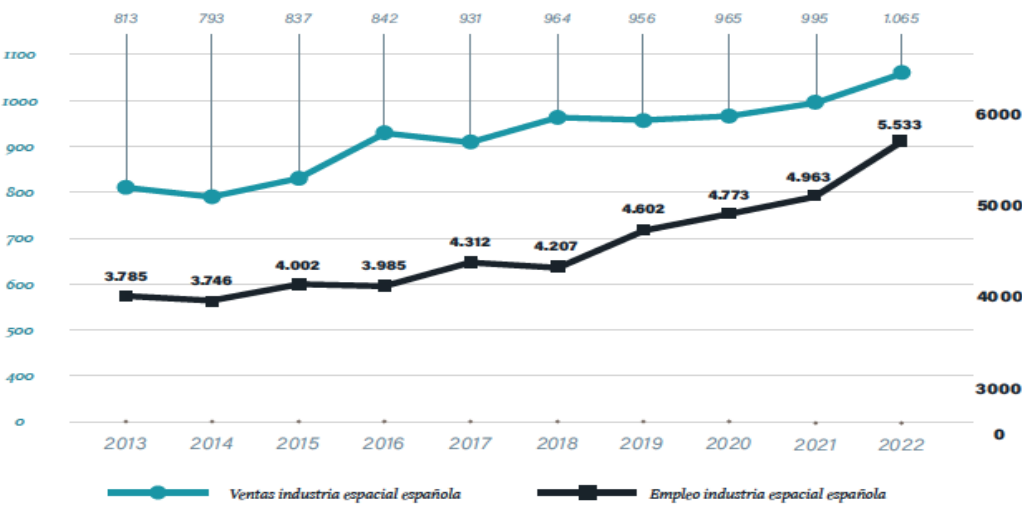


Figura 74. Ventas y empleos. Tedaee. Cifras y datos de 2022 (diciembre de 2024). Fuente: Tedaee

Finalmente, la figura 75 permite ver **la evolución desde 2018 a 2022 de los segmentos básicos del mercado español del espacio**: lanzadores, satélites de observación, comunicaciones y navegación, satélites científicos, y el segmento terreno y de servicios.

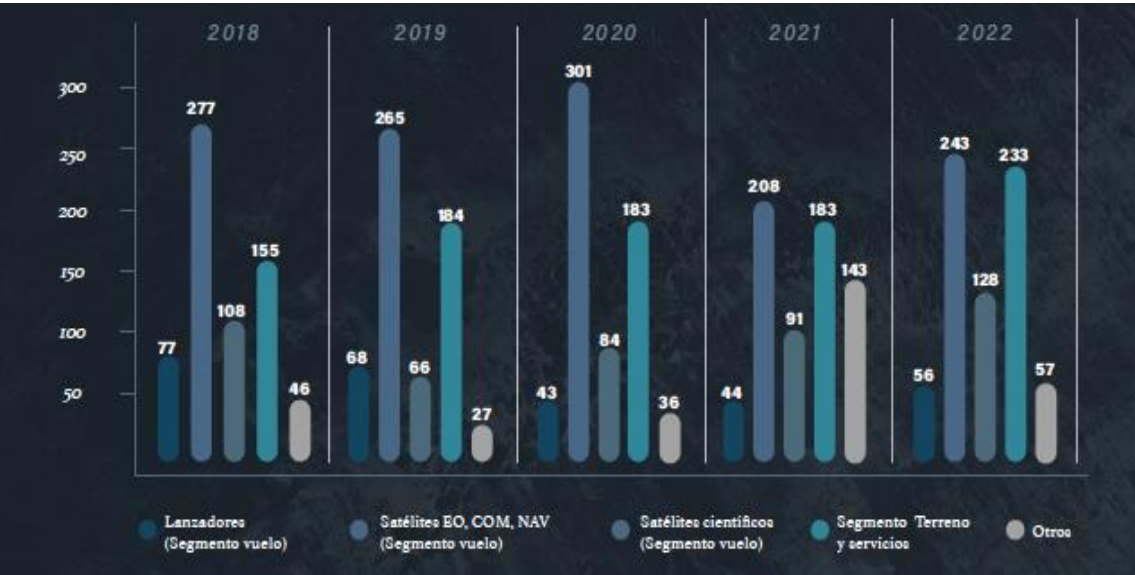


Figura 75. Segmentos del mercado espacial español (2018-2022). Fuente: Tedaee

Es interesante en este contexto indicar la **emergencia de nuevas empresas en sector espacial que, en pocos años, han logrado hacerse un hueco en áreas en las que no estábamos presentes con el uso de soluciones innovadoras**. El Anexo 4 presenta algunos ejemplos significativos de proyectos que muestran las capacidades de la industria espacial española.

También es relevante el **uso progresivo de la IA en grandes empresas con participación española**. Un ejemplo destacado del uso de la IA en el sector espacial es el uso del aprendizaje por refuerzo (*reinforcement learning, RL*) considerado por la empresa **Airbus** como la de mayor potencial, pues permite:

- Mejor escalabilidad y generalización que los enfoques más clásicos.
- Toma de decisiones en tiempo real con comportamiento adaptativo
- Posibilidad de hibridar RL con otros métodos (por ejemplo, como heurística para la planificación)
- Capacidad para afrontar la incertidumbre incluso en problemas complejo

A pesar de ello, se detectan los siguientes desafíos en la implementación y uso de las soluciones basadas en RL:

- Necesidad de una infraestructura de formación y computación
- Identificación de los mejores algoritmos RL adaptados al espacio (p.ej. robustos al ruido ambiental...)
- Limitaciones de los sistemas de Información de los desarrolladores y de los usuarios, localmente o en la nube (por ejemplo, problemas de proxy, seguridad)
- Verificación y validación de RL (pruebas, robustez, explicabilidad...).
- Además, la certificación será un desafío

Nueve de las entidades de EuroSpace están situadas en España lo que indica un **papel protagonista español en el sector espacial europeo**. Los nueve **miembros españoles de Eurospace** en mayo de 2025 son los siguientes (algunos de ellos pertenecientes a grupos internacionales):

- Airbus Defence and Space
- Alter Technology TUV Nord
- Indra Sistemas
- Indra/Deimos
- GMV Global Solutions Internet
- GTD Sistemas de Información
- Pangea Aerospace
- SENER Aerospace and Defence
- Thales Alenia Space

El sector empresarial español del espacio cuenta con un número mayor de empresas de las presentes en *Eurospace* indicadas anteriormente. Se destacan las siguientes con relevante actividad internacional en proyectos financiados por la ESA o las AAPP (se indican las áreas de actividad más relevantes de cada una de ellas):

- **Integrasy** (gemelos digitales, sistemas automáticos de evitación de interferencias).
- **Aicox Soluciones** (redes satelitales (Estaciones terrenas, redes VSAT ...) el suministro de terminales para diferentes plataformas (terrestre, vehicular, naval, ferroviario).
- **Tecnobit-OESIA** (electrónica de antenas activas satelitales).
- **PLD Space** (lanzadores y cápsulas de pequeños satélites).
- **Fossa Systems** (desarrollo de nanosatélites y de soluciones de conectividad para dispositivos IoT).
- **ETBIDA** (satélites para redes privadas IoT).

- **EMAXYS** (plataforma completa de nanosatélites de alto rendimiento con comunicaciones ópticas).
- **Sateliot** (constelaciones de satélites 5G para IoT).
- **Aistech** (imágenes térmicas de la Tierra con una tecnología geoespacial propia (hardware y software)).
- **Hydra Space systems** (desarrollo de nanosatélites).
- **Frenetic** (componentes magnéticos usando modelos inteligentes e IA).

Debe indicarse también la existencia de dos **operadores satelitales** españoles con participación pública:

- **Hispasat**. Es el principal puente de comunicaciones entre Europa y América como proveedor de servicios de banda ancha y de conectividad a través de sus empresas en España y Latinoamérica. Además, lidera la difusión y distribución de contenidos audiovisuales en español y portugués, incluida la transmisión de plataformas digitales de Televisión Directa al Hogar (DTH) y Televisión de Alta Definición (TVAD). El satélite Amazonas Nexus lanzado en 2024 es el mayor satélite de la actual flota de Hispasat. Además, tiene en operación: Hispasat 30W-5, Hispasat 30W-6, Hispasat 36W-1.
- **Hisdesat**. *Hisdesat Servicios Estratégicos S.A.* nació en 2001 como operador de servicios gubernamentales por satélite para actuar fundamentalmente en las áreas de defensa, seguridad, inteligencia y asuntos exteriores. *Hisdesat* se constituye como proveedor internacional de servicios de comunicaciones por satélite en Banda X y Banda Ka para aplicaciones tanto militares como gubernamentales. Hisdesat gestiona dos satélites geoestacionarios (SpainSat y Xtar-Eur). También operará los satélites SPAINSAT NG y PAZ 2.

4.2.2. Política de defensa espacial española

El sector espacial español, a pesar de su relativo tamaño, sí ha tenido una relevancia destacable en el contexto internacional. Algunos hechos relevantes en los últimos años:

- Puesta en marcha de la **Agencia Espacial Española (AEE)** radicada en Sevilla con el objetivo de *“unificar todas las políticas espaciales de nuestro país y coordinar de manera efectiva todos los servicios y actividades en el sector para garantizar la acción estratégica del Gobierno de España en el ámbito del espacio”*¹⁴⁵.

Entre sus actividades se encuentra en el marco europeo la coordinación la **Agencia de la Unión Europea para el Programa Espacial (EUSPA)**¹⁴⁶. Esta Agencia proporciona servicios europeos de navegación por satélite seguros y protegidos, avanza en la comercialización de datos y servicios de Galileo, EGNOS y Copernicus, participa en comunicaciones satelitales seguras (GOVSATCOM e IRIS2), y opera la recepción de EUSST. La EUSPA también es responsable de acreditar la seguridad de todos los componentes del Programa Espacial de la UE. Su último informe técnico de 2025 (EUSP, 2025) proporciona una panorámica de la situación y perspectivas.

- Incremento de la participación española en la **Agencia Europea del Espacio (ESA)**

¹⁴⁵ <https://www.aee.gob.es/>

¹⁴⁶ <https://www.euspa.europa.eu/>

España es uno de los signatarios iniciales del Convenio fundacional de la ESA y su participación como estado miembro implica una contribución anual en base a programas obligatorios y programas opcionales.

España desde 2018 ha aumentado en un 50 % su contribución anual a la ESA, que ha pasado de 200 millones a los actuales 300 millones. La aportación española a la ESA de 2025 es de 297,4 millones de euros lo que supone el 5,9% de las naciones contribuyentes. En <https://www.aee.gob.es/Actividades/ESA.html> pueden verse algunas de las contribuciones relevantes de España en la ESA durante los últimos años¹⁴⁷.

- **Desarrollo de un PERTE Aeroespacial**

El PERTE Aeroespacial se financia con fondos europeos del *Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia*, junto a otros instrumentos como la compra pública precomercial del CDTI. El PERTE Aeroespacial prevé movilizar cerca de 4.533 millones de euros entre 2021 y 2025, con una contribución del sector público de alrededor de 2.193 millones de euros y una inversión privada de cerca de 2.340 millones.

Lanzadores de pequeños satélites. El objetivo es poner en órbita cargas útiles con una masa primaria (satélites) de más de 300 kg de carga útil primaria en una órbita de referencia tipo helio síncrona (SSO) de alrededor de 500 km de altura. El prototipo de lanzador de pequeños satélites deberá también tener la capacidad de poner en órbita cargas útiles con una masa primaria (satélites) en el rango de 300 kg a 800 kg en toda la variedad (con distintos parámetros) de órbitas bajas (LEO) de interés para aplicaciones espaciales, en un rango de 300 km a 1.000 km de altura¹⁴⁸.

Convocatoria del Programa Tecnológico Espacial: actuación en el ámbito del *PERTE Aeroespacial* enfocada en impulsar la competitividad de la industria aeroespacial española como actor clave para los próximos retos y oportunidades del sector mediante el desarrollo de capacidades tecnológicas basado en I+D. En concreto, en la convocatoria de 2024 se financiarán proyectos de los siguientes ámbitos¹⁴⁹:

- **New Space - constelaciones satelitales:** proyectos de I+D para desarrollar nuevos productos, procesos o servicios o que permitan mejorar considerablemente la capacidad de producción en serie de sistemas espaciales, a nivel de subsistemas y cargas útiles, con potencial demanda en futuras constelaciones de satélites, especialmente aquellas de carácter estratégico para el posicionamiento y liderazgo español en la operación global de futuros servicios satelitales.
- **Maduración de tecnología espacial bottom-up:** proyectos que impulsen el avance en el nivel de madurez de tecnologías espaciales, especialmente aquellos con un

¹⁴⁷ <https://www.infoespacial.com/texto-diario/mostrar/5131842/esa-reduce-24-presupuesto-anual-2025-respecto-ano-pasado>

¹⁴⁸ <https://www.cdti.es/noticias/el-cdti-innovacion-resuelve-la-ultima-fase-competitiva-para-el-desarrollo-del-primer>

¹⁴⁹ <https://www.cdti.es/noticias/el-cdti-innovacion-lanza-convocatoria-2024-del-programa-tecnologico-espacial-pte-con-70> La resolución provisional de noviembre de 2024 con algunas propuestas relacionadas con IA puede encontrarse en https://www.cdti.es/sites/default/files/2024-11/propuesta_resolucion_provisional_pte_2024_firmado.pdf

alto potencial disruptivo, que generen una gran recurrencia de uso y/o comercial o habiliten el desarrollo de instrumentación científica de vanguardia para futuras misiones científicas espaciales.

- **Participación española en los programas europeos**

Programa **Galileo** de navegación satelital.

Mantenimiento y evolución del Segmento de Control en Tierra de Galileo (Galileo Ground Control Segment, GCS), un contrato de contratista principal en el entorno de la UE. Asimismo, es destacable la participación en el programa de Evolución del GNSS Europeo (EGEP), cuyo objetivo es realizar actividades de investigación, desarrollo y verificación de tecnologías relacionadas con los sistemas regionales de aumento basados en el espacio (SBAS) y los sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS).

Programa **Copérnico** de observación de la Tierra.

España ha participado en diversos proyectos de desarrollo del sistema Copérnico. Puede destacarse el liderazgo del sistema de comunicaciones TAS-E, del instrumento MWR del satélite Sentinel-3 (ADS España), del centro de procesamiento de datos del satélite Sentinel-3 (INDRA), del centro de control preciso de órbita (GMV) y de la estación de descarga (INTA) todo del programa liderado por la UE Copernicus. Asimismo, el liderazgo por primera vez de una misión UE del programa Copernicus LSTM (*Land Surface Temperature Monitoring*) por parte de ADS España.

Es destacable, en el contexto del PERTE Aeroespacial el futuro desarrollo de la denominada **Constelación Atlántica**¹⁵⁰, que constará de un total de 16 satélites y que lanzarán España y Portugal, con el objetivo de disponer de datos para prevenir inundaciones, incendios forestales, sequías y olas de calor y mejorar la capacidad de reacción ante estas emergencias. Los satélites de la Constelación Atlántica, que trabajarán junto a los satélites europeos *Sentinel* del programa **Copérnico**, también aportarán información clave para la gestión del territorio y de los recursos naturales; contribuirán a la producción sostenible de alimentos; y ayudarán a garantizar la seguridad, a través de la vigilancia marítima y de fronteras. La Constelación Atlántica proporcionará imágenes del territorio español cada 2 o 3 horas, una frecuencia muy superior a la de *Copérnico*, que actualmente ofrece una frecuencia de revisita de la Península Ibérica de 2 a 3 días.

Participación en la **prioridad de espacio en el programa Horizonte Europa**.

La participación española en HE es muy destacable. Como se indica en la figura 76 que indica los retornos obtenidos en los tres primeros años del programa en el que ha ocupado la tercera posición detrás de Alemania y Francia. En ese periodo las entidades españolas han conseguido 3.416,9 millones de euros en las convocatorias adjudicadas (CDTI, 2024).

¹⁵⁰ <https://www.ciencia.gob.es/Noticias/2025/enero/constelacion-atlantica-satelites.html>

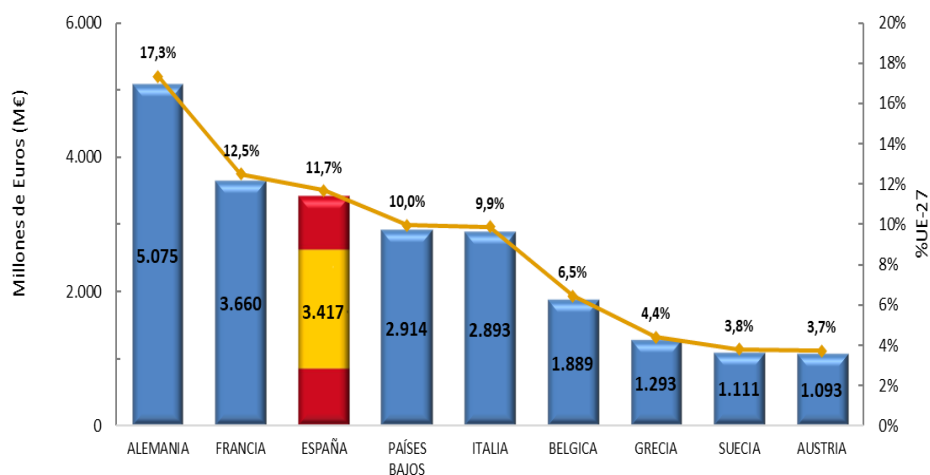


Figura 76. Retornos españoles en HE. Fuente: CDTI. Noviembre 2024.
<https://www.horizonteeuropa.es/file-download/download/public/7113>

Los resultados por áreas temáticas son los que se indican en la figura 77. La gráfica en rojo indica el resultado en términos del porcentaje de retorno en relación con el conjunto de los países de la UE. Como referencia la contribución española ha sido de media del 10% por lo que hay áreas temáticas en las que el retorno obtenido ha sido superior y en otras inferior. El retorno porcentual en el área de espacio ha sido del 11,9%, superior a la contribución.

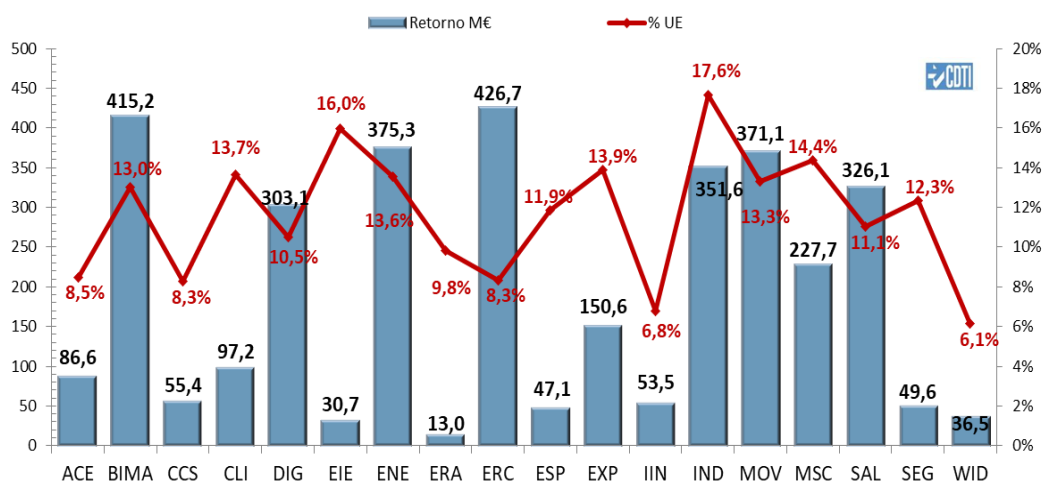


Figura 77. Resultados españoles por áreas temáticas de HE (2021-2023), Fuente: CDTI. Noviembre 2024. <https://www.horizonteeuropa.es/file-download/download/public/7113>

El programa de trabajo de HE para 2023-2024 incluía una prioridad específica para Espacio: Destination 5: Open Strategic Autonomy in Developing, Deploying and Using Global Space-Based Infrastructures, Services, Applications and Data. La prioridad estaba, sobre todo, ligada al desarrollo de aplicaciones basadas en la explotación de datos de Copérnico y de Galileo (incluyendo la señal gubernamental)¹⁵¹.

¹⁵¹ https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe/horizon-europe-work-programmes_en

- **Potenciación de la participación española en IRIS²**

Hispasat forma parte del consorcio *SpaceRISE* que ha sido el adjudicatario para el desarrollo y operación de la constelación durante doce años como ya se ha indicado previamente. Su desarrollo dará pie a la participación de otras muchas empresas españolas (en febrero de 2025 se celebró un evento para la participación de la industria en IRIS²).

- **Desarrollo de satélites militares**

España dispone y dispondrá en 2025 de satélites específicos para las Fuerzas Armadas que serán detallados en una sección posterior del presente documento. Ello implica disponer de unas capacidades tecnológicas destacables puesto que un porcentaje de alrededor del 40% puede considerarse como tecnología nacional. Estos satélites son: para misiones de observación: Satélite Paz y para comunicaciones seguras los dos satélites Spainsat NG 1 y 2.

Estas capacidades espaciales en el sector de la defensa se complementan con el uso de otros satélites europeos de comunicaciones y de observación de carácter dual en el marco de acuerdos bilaterales y multilaterales.

Seguidamente, las siguientes secciones desarrollan con un poco más de detalle algunos proyectos emblemáticos en el sector de la defensa que ponen de manifiesto las **capacidades tecnológicas españolas en el espacio relacionados con la IA: Satélite Paz y satélites SpainSat NG**.

En el Anexo 4 se han incluido breves referencias a otros proyectos tecnológicos avanzados con participación española que implican el uso de la IA en el sector espacial. No se trata de un listado exhaustivo sino unos cuantos ejemplos de participación y capacidades españolas: 1) proyecto BREGO, 2) MARVISION, 3) CISERES, 4) ODALISS, 5) FarADAI, 6) proyectos de Airbus.

4.2.3. Satélite Paz

El satélite **PAZ**, operado por *Hisdesat*, es el primer satélite radar español en observación de la Tierra, incluido en el **Programa Nacional de Observación de la Tierra por Satélite (PNOTS)**. Se lanzó el 22 de febrero de 2018 a bordo de un cohete Falcon 9, desde la Base Aérea de Vandenberg (California)¹⁵².

PAZ (véase en la figura 78 una imagen del satélite) **cubre las necesidades de observación en seguridad y defensa y otras de carácter civil**, pudiendo tomar más de 100 imágenes diarias de hasta 25 cm de resolución, tanto diurnas como nocturnas, y con independencia de las condiciones meteorológicas¹⁵³.

¹⁵² <https://www.aee.gob.es/Actividades/Nacionales/PAZ.html>

¹⁵³ Se ubica en la misma órbita que los satélites TerraSAR-X y TanDEM-X de Airbus D&S y opera con ellos en constelación, reduciendo significativamente el tiempo de revisita e incrementando la capacidad diaria de cobertura sobre zonas de interés. Su peso total estimado es de 1400 kg, mide 5 m de altura y tiene 2,4 m de diámetro.



Figura 78. Satélite PAZ de observación de la Tierra. Fuente: <https://www.infoespacial.com/texto-diario/mostrar/5074574/industria-espacial-espanola-crece-126-2023-respecto-ano-anterior>

Paz cubre un área de más de 300 000 kilómetros cuadrados al día y está preparado para dar quince vueltas diarias a la Tierra, a una altura de 514 kilómetros y con una velocidad de siete kilómetros por segundo. Dada su órbita cuasi-polar ligeramente inclinada, PAZ cubre todo el globo con un tiempo medio de revisita de 24 horas

Permite la **observación del territorio para múltiples aplicaciones de carácter dual:** control fronterizo, inteligencia, control medioambiental, protección de los recursos naturales, operaciones militares, verificación de tratados internacionales, vigilancia de la superficie terrestre, urbanismo, planificación de infraestructuras, evaluación de catástrofes naturales y cartografía de alta resolución, entre otras.

El radar se ha desarrollado de manera muy flexible, con capacidad para operar en gran número de configuraciones que permitirán escoger las prestaciones de la imagen. Dispone de una memoria para imágenes de 256 GB y una capacidad de transmisión de éstas a tierra de 300 Mbits/s en banda X.

4.2.4. Desarrollo de nuevos satélites militares

Actualmente, las Fuerzas Armadas cuentan con dos satélites militares lanzados a principios del siglo actual: **Spainsat** y **XTAR-EUR**. El primero (en órbita desde 2006) ofrece cobertura desde Estados Unidos y Sudamérica hasta Oriente Medio, pasando por Europa y África. Mientras que el segundo (en órbita desde 2005) se centra en el océano Índico. En ambos casos, se encuentran **al final de su vida útil con tecnología obsoleta** por lo que era necesario sustituirlos con satélites más potentes y de nueva generación para continuar proporcionando cobertura a las unidades militares desplegadas en zonas de operaciones fuera del territorio nacional.

El **diseño de un nuevo sistema de satélites militares de nueva generación** denominado **Spainsat NG¹⁵⁴** arrancó en 2019 con un coste estimado total que se acercará a los 2.000

¹⁵⁴ <https://www.hisdesat.es/c-seguras/programa-spainsat-ng/>

millones de euros con un metaobjetivo de **incrementar la soberanía tecnológica española en defensa**¹⁵⁵ y con los siguientes objetivos:

- Asegurar el **mando y control** efectivos en operaciones de las Fuerzas Armadas más allá de la línea de visualización en 2/3 de la Tierra.
- Garantizar la capacidad de **comunicación en teatros de operaciones carentes de infraestructura** en los que España tiene o podrá tener tropas desplegadas.
- Desarrollar más **comunicaciones satelitales en movimiento**, con mayor capacidad y seguridad.
- Liberar el potencial de la **red central de combate** (*battlespace-netcentric warfare and operations*).

El sistema completo de **Spainsat NG** propiedad de Hisdesat, operador gubernamental español de satélites, está compuesto por una pareja de satélites junto a su componente de control y seguimiento en tierra. El objetivo es emplear la tecnología más avanzada posible para asegurar una vida útil de 15 años. En la figura 79 puede verse un esquema de las características más relevantes.

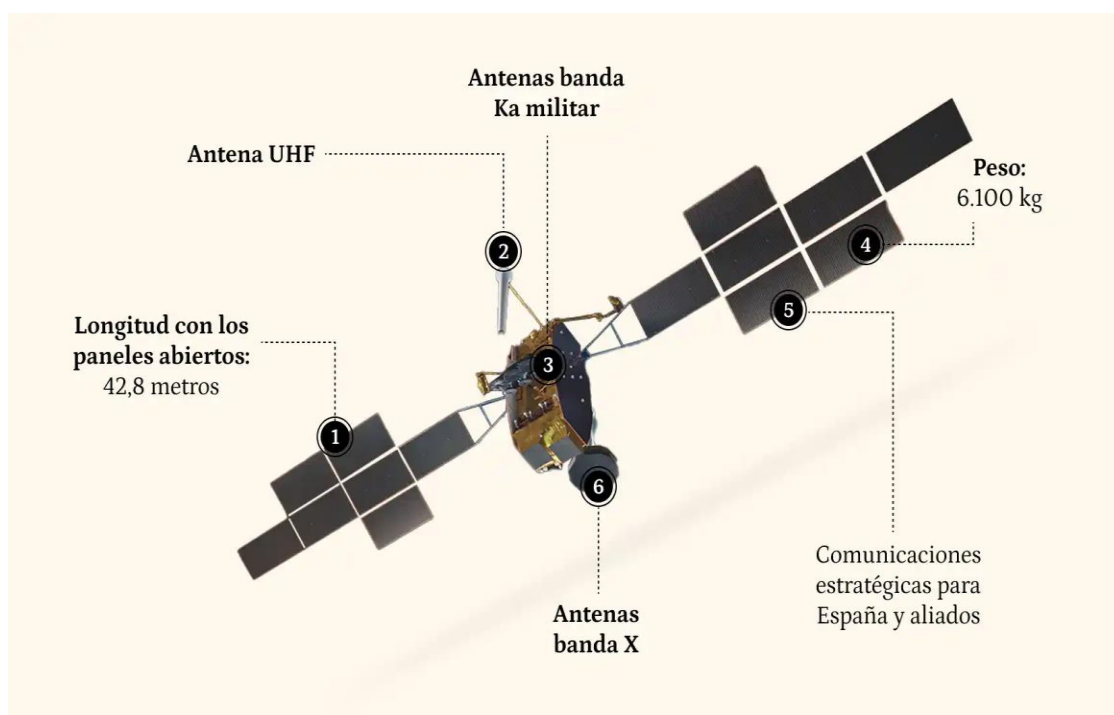


Figura 79. SpainSatNG. Fuente: HISDESAT

¹⁵⁵ Más del 40% de los satélites será desarrollado por la industria nacional, liderada por un consorcio de cuatro co-contratistas (las filiales francesa y española de las empresas europeas Airbus D&S y Thales Alenia Space), siendo Airbus DS España la contratista principal e integradora de la carga útil de banda X y TAS España la contratista principal e integradora de las cargas útiles de bandas Ka militar y UHF, actuando Airbus DS Toulouse como el líder del consorcio.

Se trata de **satélites geoestacionarios** que utilizan como base la plataforma *Eurostar Neo* de Airbus.¹⁵⁶ El lanzamiento del primero de los satélites, el **Spainsat NG 1**, se ha realizado con éxito el 30 de enero de 2025 desde Cabo Cañaveral en Florida utilizando un Falcon-9 de Space X¹⁵⁷. El lanzamiento del segundo satélite **Spainsat NG 2** está previsto para septiembre u octubre de 2025.

Desde el punto de vista tecnológico cuentan con propulsión iónica, chips diseñados específicamente, y un sistema de antenas muy avanzados de banda X con 16 haces independientes que se pueden orientar electrónicamente controladas por software (también tiene antenas en las bandas UHF y Ka). Eso permite modificar su tamaño y su forma para apuntar dónde sea necesario y reducir interferencias (*anti-jamming*) y de suplantación (*spoofing*) de acuerdo con los estándares de la OTAN a la que también dará servicio. Asimismo, cuenta con protección ante radiación nuclear.

La figura 80 permite ver el satélite en la sala blanca de Airbus en Toulouse antes de embarcar para Estados Unidos y en la figura 81 una imagen del momento del lanzamiento.



Figura 80. Spainsat NG 1 en la sala blanca en la factoría de Airbus en Toulouse. Fuente: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/La_ESA_e_Hisdesat_lanzan_un_satelite_de_comunicaciones_seguras_de_ultima_generacion

¹⁵⁶ Se trata de satélites grandes, con 6,7 metros de altura, 2,7 metros de ancho, 3,4 metros de lateral y 6.100 kilogramos de masa. Una vez con todos los sistemas desplegados, la envergadura asciende a 42,84 metros. Cuenta con protección frente a amenaza nuclear.

¹⁵⁷ Se ha integrado en un cohete Falcon 9 de Space X lanzado desde Cabo Cañaveral en Florida.



Figura 81. Imagen del momento del lanzamiento del Spainsat NG I el 30 de enero de 2025.
<https://www.space.com/space-exploration/spacex-rocket-next-gen-spainsat-ng-1-satellite-launch>

El **desarrollo de aplicaciones y servicios** de uso militar sobre estos nuevos satélites incorpora tecnologías de vanguardia, integrando la IA con tecnologías de big data y de internet de las cosas, con el fin de garantizar prestaciones adaptadas a las necesidades militares actuales.

4.2.5. Apoyo a nuevas empresas de base tecnológica en el sector espacial

En muchos casos la innovación en el espacio se basa en sistemas con tecnologías desarrolladas por empresas consolidadas. Sin embargo, ha crecido el **interés en nuevas empresas de base tecnológica europeas con productos disruptivos** basados en tecnologías emergentes, algunos de ellos adaptados de mercados no espaciales y viceversa, que es necesario apoyar para consolidar el sector e incrementar el ritmo de innovación tecnológica.

Sin embargo, estas startups suelen enfrentarse a **barreras de entrada elevadas** con reticencias de los fondos de inversión convencionales para asumir riesgos elevados. En consecuencia, requieren apoyo público especializado para poder consolidar su oferta y escalar; al menos, en las primeras fases desde su creación.

Con este motivo, la Comisión Europea puso en marcha en 2022 un conjunto de iniciativas destinadas a **mejorar las condiciones financieras para las empresas start-ups europeas del sector espacial** consciente de que era necesario ampliar el panorama del ecosistema europeo con empresas con productos y servicios disruptivos.

La *Iniciativa de Emprendimiento Espacial CASSINI*¹⁵⁸, apoyada por el *Fondo Europeo de Inversiones* (FEI), es una de estas iniciativas que se suma al apoyo financiero a las empresas del denominado “Nuevo Espacio” (*New Space*) que ofrece el *Consejo Europeo de Innovación* (EIC). Para ello cuenta con el programa de aceleración denominado “*CASSINI Business Accelerator*”¹⁵⁹. La iniciativa CASSINI está abierta a todos los ámbitos del Programa Espacial de la UE y abarca tanto las fases iniciales (es decir, nanosatélites, lanzadores, etc.) como las fases posteriores (es decir, productos/servicios habilitados por datos espaciales, etc.).

Concretamente, el *Emerging Technologies Challenge* premia empresas con soluciones disruptivas que combinen los datos espaciales de la UE con tecnologías profundas como la Inteligencia Artificial (IA), las tecnologías cuánticas, la cadena de bloques, la realidad extendida o el metaverso¹⁶⁰.

También la ESA ha realizado desde hace años un esfuerzo en apoyar nuevas empresas. La *Oficina del Programa de Transferencia de Tecnología* (TTPO) de la ESA¹⁶¹ apoya a emprendedores con ideas innovadoras que empleen tecnología espacial o desarrollen aplicaciones para crear nuevos productos y servicios en entornos no espaciales a través de los *Business Incubation Centres* (BIC).

Los BIC puestos en marcha por la TTPO tienen como objetivo ayudar a los emprendedores a convertir sus ideas de negocio relacionadas con el espacio en empresas comerciales, así como ofrecer conocimientos técnicos expertos y apoyo para su desarrollo empresarial durante un máximo de dos años¹⁶². Aunque todas las áreas relacionadas con el espacio son bienvenidas, se ha prestado atención a empresas con productos disruptivos empleando tecnologías emergentes como la IA o las tecnologías cuánticas.

¹⁵⁸ El Mecanismo de Inversión Cassini apoya con 1.000 millones de euros en inversiones para fondos de capital riesgo interesados en invertir en empresas del sector espacial con sede en la UE. <https://www.cassini.eu/cassini-initiative>

¹⁵⁹ Es un programa de aceleración de seis meses que proporciona a las empresas emergentes y en expansión asesoramiento empresarial y de inversión, formación, eventos y financiación inicial. La iniciativa se dirige específicamente a empresas espaciales con tracción comercial probada dispuestas a aumentar sus ventas y expandirse a nuevos mercados. Abarca todos los componentes del Programa Espacial de la UE, proporcionando un enfoque holístico del emprendimiento.

¹⁶⁰ https://defence-industry-space.ec.europa.eu/european-commission-and-euspa-announce-cassini-challenges-winners-2024-06-03_en

¹⁶¹ Technology Transfer Programme Office (ESA) https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Technology_Business_Opportunities/Technology_Transfer_Programme

¹⁶² <https://commercialisation.esa.int/esa-business-incubation-centres/>

En el caso español es significativa la presencia de varias incubadoras BIC de la ESA en Madrid¹⁶³, Sevilla¹⁶⁴, Valencia¹⁶⁵ y Barcelona¹⁶⁶ con apoyo en las primeras fases de inversión.

La Comisión también está reforzando su papel como “*cliente ancla*”, facilitando el acceso de las empresas del Nuevo Espacio a contratos públicos (por ejemplo, con la adjudicación de contratos para actuar como proveedores de datos para las misiones de Copernicus a las que contribuyen los países).

4.2.6. DAFO de situación de España para el uso de la IA en el sector espacial de la defensa¹⁶⁷

En esta sección se pretende identificar un conjunto reducido de **Debilidades**, **Amenazas**, **Fortalezas** y **Oportunidades** de España del sistemas español relacionados con la IA en el sector espacial de la defensa que puedan servir de base para la **elaboración de una hoja de ruta específica de actuaciones** por parte de las AAPP españolas en el sector espacial de la defensa a llevar a cabo en los próximos años. Deliberadamente, se ha pretendido identificar únicamente un conjunto de elementos de relativa generalidad

Debilidades

- **D1.** Presupuestos reducidos de I+D de defensa dedicados al espacio que permita explorar el uso de tecnologías disruptivas en niveles de baja madurez tecnológica y poder acelerar el proceso de innovación.
 - Los recursos relevantes se han concentrado en el desarrollo de los satélites militares de Spainsat NG con el empleo de tecnologías bastante maduras condicionados por los servicios necesarios que deben ofrecer en los que el uso de al IA no es una prioridad.
- **D2.** Colaboración reducida entre las empresas de sector espacial y la academia en proyectos de IA de interés para la defensa en el espacio combinado con el uso de tecnologías disruptivas como robótica inteligente, computación neuromórfica o tecnologías cuánticas.
 - Existen pocos proyectos de experimentación de la IA espacial financiados con recursos nacionales (p.ej. con computación en el borde).
- **D3.** Escasos recursos humanos, fragmentados y con alta rotación que impiden disponer de grupos de investigación estables y bien formados centrados en el uso de la IA para el espacio.

¹⁶³ ESA BIC Comunidad de Madrid está cofinanciado al 50% por la ESA y al 50% por la Comunidad de Madrid, a través de la Consejería de Educación, Ciencia y Universidades.
<https://www.madrimasd.org/emprendedores/esa-bic-comunidad-madrid>

¹⁶⁴ <https://esabic-andalusia.com/>

¹⁶⁵ <https://esabic.aeroportcastello.com/>

¹⁶⁶ <https://esabicbarcelona.pmt.es/about-us/>

¹⁶⁷ Este tipo de ejercicio debe realizarse en el contexto del Grupo de Trabajo FEI-Amper para permitir modular la relevancia de los elementos indicados en el DAFO. La información que se presenta en esta versión borrador procede únicamente del coordinador en su papel de redactor del presente documento, pero deberá discutirse de forma conjunta en una fase posterior. También será posible realizar en una versión posterior del presente informe una valoración de la relevancia de cada uno de estos elementos.

- Falta desarrollar una visión de ecosistema nacional integrado en el sector espacial con objetivos a medio y largo plazo.
- La existencia de RRHH suficiente para la IA en el espacio debe integrarse con los objetivos de la Estrategia de Tecnología de Defensa.
- **D4.** Programas de IA de uso dual fragmentados en múltiples convocatorias de diversos departamentos ministeriales difíciles de coordinar.
 - Como ejemplo, los temas de IA en defensa no aparecen en el PERTE Aeroespacial y el programa COINCIDENTE del Ministerio de Defensa no posee los recursos necesarios como para tener un impacto significativo.
- **D5.** Falta de experiencia en el uso de la IA generativa en el sector espacial de la defensa.
 - Es un problema compartido por muchos países y no solo en España. El problema es que la cooperación con empresas de IA en este ámbito no es muy elevada.
- **D6.** Falta de capacidades españolas de fabricación de dispositivos semiconductores de interés militar, y especialmente de chips de IA.
 - Esta debilidad reduce el desarrollo soberano de sistemas microelectrónicos inteligentes en el espacio.
- **D7.** Reducida participación de los fondos de inversión de capital riesgo en proyectos del sector espacial de la defensa.
 - Menos aún que impliquen el uso de la IA.
 - Por ahora, tampoco está aprovechando España el programa DIANA.

Amenazas

- **A1.** Aceleración del uso de la IA en defensa en el sector espacial que obligue a España a adquirir sistemas avanzados de IA para la defensa llave en mano con la que el nivel de soberanía tecnológica española decrecerá.
 - El desarrollo de sistemas como LLM especializados puede requerir recursos de entrenamiento y datos válidos para defensa cuya obtención no es sencilla.
- **A2.** Necesidad de disponer de sistemas de mando y control multidominio interoperables incluyendo el espacio o para el desarrollo de plataformas procedentes de proveedores externos manteniendo la dependencia externa a lo largo del ciclo de vida.
 - La necesidad de disponer lo antes posible de un sistema de mando y control que integre el dominio espacial hace que no sea posible desarrollarlo con el nivel de soberanía tecnológica nacional deseado.
- **A3.** Incremento de los ataques de interferencias y suplantación de señal en navegación satelital (NAVWAR) sin herramientas propias para asegurar la navegación.
 - La evolución de estas herramientas es muy rápida y se requieren capacidades de adaptación y sustitución flexibles y rápidos.
- **A4.** Retrasos en la puesta en marcha de las aplicaciones nacionales ligadas a los satélites españoles *Spainsat NG* y la constelación *IRIS²* de la UE.
 - España debe intentar aprovechar estos programas para el desarrollo de aplicaciones disruptivas con el uso de la IA para tener un peso relativo relevante en las que se utilicen.
- **A5.** Necesidad de adquirir sistemas de procesamiento de imágenes satelitales de alta resolución procedentes de proveedores no nacionales que cumplan los requisitos operativos de las FAS.

- La experiencia de desarrolladoras nacionales está enfocado al mercado civil y no al militar.
- **A6.** Falta de interoperabilidad futura de los sistemas españoles con los de otras FAS que empleen comunicaciones cuánticas espaciales en el contexto de la OTAN.
 - Será necesario experimentar el uso de las tecnologías cuánticas en el sector espacial con interacción con sistemas de aprendizaje automático.

Fortalezas

- **F1.** España dispone en el contexto europeo de una sólida base industrial con participaciones asentadas en programas de la ESA, del EDF y de HE desde hace años en los que ha demostrado capacidad de liderazgo.
 - Los resultados obtenidos en porcentaje de retornos son buenos y esta colaboración se extiende a otras empresas en el contexto europeo.
- **F2.** Incremento paulatino del sector industrial con tecnologías duales en defensa y en el espacio en base a start-ups que puede extender la base industrial actual.
 - Emergencia de empresas con tecnología de IA interesadas en abrir sus mercados al desarrollo de productos duales.
- **F3.** Relación estable, aunque limitada, entre el sector industrial espacial de defensa y centros públicos de investigación y universidades con experiencia en la participación conjunta en programas internacionales de I+D en defensa.
 - Existencia de cátedras universidad-empresa, programas de formación especializados y uso conjunto de instalaciones e infraestructuras.
- **F4.** Compromisos internacionales de las FAS españolas en el marco de la OTAN que ha permitido disponer de experiencia en el uso de aplicaciones avanzadas en el terreno.
 - Conocimiento claro y preciso por parte de las FAS de los requisitos deseables y de la hoja de ruta en los próximos años para que sean efectos

Oportunidades

- **O1.** Aprovechar los previsibles incrementos de los recursos presupuestarios a los que el gobierno español se ha comprometido para asegurar un gasto del 2% del PIB al final de la presente década.
 - Probablemente, este porcentaje debería crecer dada la situación mundial, y España deberá hacer valer su buena posición relativa en el sector espacial con el lanzamiento de programas/proyectos ambiciosos que impliquen un uso de la IA en la obtención y procesamiento de datos espaciales.
- **O2.** Aprovechamiento de la participación en DIANA y en las diversas sedes del programa BIC de la ESA en España para reforzar el escalado de empresas de base tecnológica de sector espacial de la defensa.
 - Requiere compromisos de inversión por parte de fondos de capital riesgo privado que cuenten con apalancamiento público.
- **O3.** Creación de un programa específico español de mando y control multidominio, basado en el uso de IA en el espacio con el objetivo de disponer de un nivel elevado de tecnología propia en 2030.
 - Puede requerir el desarrollo de gemelos digitales de mando y control ciberfísicos alimentados por algoritmos de ML.
- **O4.** Incrementar el esfuerzo en el procesamiento de imágenes satelitales para vigilancia de interés dual.
 - Generación de alertas tempranas para movimientos de tropas o eventos climáticos extremos, o detección de cambios en infraestructuras críticas a partir de imágenes satelitales,

- **O5.** Disponibilidad de infraestructuras públicas de sistemas de prueba de soluciones en el sector espacial de la defensa basadas en IA como extensión a las infraestructuras que tendrá el CEDETEX (INTA)¹⁶⁸ y algunas universidades poseen.
 - Creación de capacidades en red abiertas al uso de PYMEs y startups con condiciones reguladas.
- **O6.** Aprovechar el PERTE Chip y programas sucesivos para desarrollar la infraestructura industrial necesaria para fabricar componentes COTS y microelectrónica habilitada para el espacio.
 - Análisis detallado de las necesidades para el desarrollo de una planta piloto para defensa basada en FPGA y VLSI con materiales semiconductores como el nitruro de galio para ejecución de algoritmos de aprendizaje automático.
- **O7.** Desarrollo nacional de sensores avanzados y cámaras de infrarrojo de alta resolución, junto con radares de apertura sintética, para mejorar las capacidades de observación en el ámbito espacial y terrestre.
 - La integración de inteligencia artificial embebida optimiza el procesamiento de datos en tiempo real, permitiendo respuestas rápidas y eficaces en misiones críticas.
 - Integración de diferentes tipos de sensores complementarios en constelaciones de inteligencia distribuida.
- **O8.** Crear un espacio de datos espaciales para defensa que permita capturar, curar y acceder a información que alimente el desarrollo de aplicaciones y sistemas avanzados de análisis de datos.
 - Este espacio de datos debe residir en centros de datos seguros controlados por organismos públicos.

4.3. Impacto del informe Draghi sobre la competitividad europea en el contexto del sector espacial

El convencimiento de que la Unión Europea (UE) se encuentra en un punto muy relevante de su historia en el que es necesario actuar para mantener su impulso y relevancia a nivel mundial había crecido entre expertos, académicos, industriales y responsables políticos europeos desde hace años. La preocupación sobre su pérdida de competitividad frente a otras potencias competidoras era manifiesta y obligaba a reaccionar.

En el año 2024 se sucedieron diversos informes que alentaron un profundo debate sobre el futuro de la competitividad europea desde diversos ángulos. Me refiero expresamente a tres de ellos: el elaborado por Enrico Letta ("*Mucho más que un mercado*"¹⁶⁹) presentado en mayo de 2024, el de Mario Draghi ("*El futuro de la competitividad europea*"¹⁷⁰) publicado en septiembre de 2024, y el de Sauli Niinistö, antiguo presidente de Finlandia presentado el 30 de octubre de 2024 ("*Juntos estamos más seguros: Reforzar la preparación y la*

¹⁶⁸

<https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/defensa/paginas/2024/050724-centro-tecnologico-defensa-jaen.aspx>

¹⁶⁹ <https://www.consilium.europa.eu/media/ny3j24sm/much-more-than-a-market-report-by-enrico-letta.pdf>

¹⁷⁰ https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en?prefLang=es&etrans=es#paragraph_47059

preparación civil y militar de Europa”); este último más relacionado con la seguridad desde la perspectiva de un conflicto militar de alta intensidad en las fronteras de la Unión.

Los tres informes mencionados son complementarios, con énfasis diferentes, pero todos ellos reflejan una preocupación común: la UE debe girar el rumbo si desea ser relevante globalmente, más segura y competitiva. Su publicación ha generado, asimismo, multitud de análisis desde entidades públicas y privadas, y también de las instituciones comunitarias. Me focalizaré únicamente en el informe elaborado por Mario Draghi a petición de la presidenta de la Comisión Europea dado que aborda expresamente el sector espacial como factor de competitividad de la UE (León, 2025).

Referente a la reacción suscitada por el informe Draghi en el ámbito de la defensa y la seguridad puede indicarse la posición adoptada por la industria europea, la ASD (*The Aerospace, Security, and Defence Industries Association of Europe*)¹⁷¹ y, en España, el análisis presentado por TEDAE (*Asociación Española de Empresas Tecnológicas de Defensa, Seguridad, Aeronáutica y Espacio*)¹⁷². En ambos casos, se refleja una perspectiva positiva por la oportunidad que representa el informe Draghi para enmarcar y acelerar el debate, conocedora del papel que juega y jugará la industria (de defensa) en el futuro.

Aunque el título del Informe Draghi se refiera a la “*competitividad europea*” y a la necesidad de responder al reto de otras potencias como Estados Unidos y China con las que estamos perdiendo distancia, su alcance es mayor. El propio *Draghi* en la presentación de su informe ante el Parlamento Europeo celebrado el 17 de septiembre de 2024 decía: “*La Unión Europea existe para garantizar que siempre se respeten los valores fundamentales de Europa: democracia, libertad, paz, equidad y prosperidad en un entorno sostenible. Si Europa ya no puede ofrecer estos valores a sus ciudadanos, habrá perdido su razón de ser*”.¹⁷³

Se trata, como el informe indica varias veces, de una cuestión “existencial”. La urgencia de un cambio cuya necesidad estaba anunciada desde hace años, debía constituirse en un eje clave de actuación para la nueva Comisión Europea que iniciaba su andadura, pero también para el resto de las instituciones comunitarias.

El informe se concentraba en tres ejes: 1) *necesidad de acelerar la innovación y encontrar nuevos motores del crecimiento*, 2) *reducir los altos precios de la energía, y continuar el proceso de descarbonización en un contexto de economía circular* y 3) *reaccionar ante un mundo menos estable geopolíticamente, donde las dependencias se están convirtiendo en vulnerabilidades y en la que Europa no puede depender de otros para su seguridad*.

En el informe de Draghi (Parte B, capítulo 7 sobre Defensa) se reconoce que el sector de la defensa es un motor clave de innovación para toda la economía. “*Históricamente, el sector de la defensa ha sido el origen de diversas innovaciones que ahora se han generalizado en*

¹⁷¹ <https://defence-industry.eu/europes-defence-and-aviation-industries-welcome-supportive-eu-draghi-report/>

¹⁷² <https://tedae.org/defensa/el-sector-de-la-consultoria-urge-a-reactivar-europa-con-la-aplicacion-inmediata-de-los-informes-draghi-y-letta/>

¹⁷³ https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en#:~:text=Preview-,Download,-Related%20links

el mundo civil. Más recientemente, la innovación y los avances tecnológicos en los sectores civiles se aplican cada vez más en el ámbito de la defensa, especialmente a medida que las soluciones de defensa dependen en mayor medida de herramientas digitales”. Además, para Draghi los programas de doble uso no están suficientemente desarrollados en la UE. Estos programas aportan varios beneficios, como “la mejora de la colaboración entre los sectores civil y de defensa, el impulso de una profunda innovación técnica que también aborda las necesidades militares, la mitigación de riesgos mediante el aprovechamiento de tecnologías comunes en diferentes usos finales y la ampliación del uso del capital privado para el desarrollo de tecnologías emergentes”.

En relación con el sector del “espacio” Draghi asume que *“la UE ha desarrollado un sector espacial de clase mundial, a pesar de niveles mucho más bajos de financiación, pero ahora está comenzando a perder terreno.”* Es importante recordar que el sector espacial es un sector dual, en el que la tecnología espacial, y la del segmento terreno de operación de plataformas y explotación de datos espaciales, sirve, en gran medida, a los mercados civiles y militares en áreas como la observación, la navegación y las comunicaciones como bien conocen las empresas del sector aeroespacial.

Entre las muchas propuestas incluidas en el informe de Draghi destaco tres que me parecen especialmente oportunas en el contexto del presente documento:

- *Reforzar la investigación de doble uso y la innovación en materia de defensa en el marco de la UE para evitar que Europa se quede aún más rezagada con respecto a las principales potencias en detrimento de su posición estratégica a largo plazo.*
- *Integrar las consideraciones relacionadas con la defensa y el doble uso en el trabajo de la UE sobre tecnologías críticas (fundamentales), como la IA y la cuántica.*
- *Reforzar los vínculos entre la industria de defensa y otros sectores industriales estratégicos que forman parte de un mismo ecosistema, como el naval, el espacial, el aeroespacial, etc.*

Para Draghi los activos espaciales son clave para las operaciones militares (incluidas las de vigilancia e inteligencia) por lo que es necesario incrementar la coordinación y las sinergias entre las actividades espaciales y militares que, desde su punto de vista, no se aprovechan plenamente en la UE.

Para la Comisión Europa (JOIN, 2023) la UE es una potencia espacial mundial que posee y explota activos espaciales de posicionamiento, navegación y temporización (PNT, Galileo) y de observación de la Tierra (OT, Copernicus), y pondrá en marcha una tercera constelación, el Programa de Conectividad Segura de la Unión (IRIS²), para las comunicaciones. El *Centro de Satélites de la Unión Europea* (Satcen) proporciona una capacidad única de análisis de inteligencia geoespacial que sirve de apoyo a la toma de decisiones y las actuaciones de la UE y sus Estados miembros.

Desde el punto de vista del esfuerzo necesario, el informe reconoce que, si bien todos los Estados miembros de la UE asumen el espacio como un ámbito estratégico, su nivel de urgencia para financiar actuaciones, y sus estrategias para proteger los activos espaciales son muy variadas. Solo recientemente, con la adopción de la *Estrategia Espacial de la UE para la Seguridad y la Defensa* de marzo de 2023 (JOIN, 2023), la UE ha comenzado a **desarrollar sinergias entre el espacio y la defensa** para: i) aprovechar el uso del espacio en apoyo de las operaciones de seguridad y defensa (también en el ámbito de la vigilancia);

y ii) aumentar el nivel de protección de los bienes espaciales. Concretamente, La Estrategia propuso diversas actuaciones:

- *Poner en marcha dos proyectos piloto, uno para probar la prestación de servicios iniciales de sensibilización en el ámbito espacial basados en las capacidades de los Estados miembros, y otro para probar un nuevo servicio gubernamental de observación de la Tierra como parte de la evolución de Copernicus.*
- *Mejorar la conexión del espacio, la defensa y la seguridad a escala de la UE y garantizar las sinergias y el enriquecimiento mutuo, en particular en términos de investigación y desarrollo.*
- *Proponer medidas concretas para fomentar el trabajo colaborativo entre las empresas emergentes espaciales y de defensa.*
- *Mejorar las competencias relacionadas con el desarrollo de servicios espaciales para la seguridad y la defensa.*

Volviendo al informe Draghi, se propone un cambio sustancial en la gobernanza de la Agencia Espacial Europea (ESA) para **eliminar el principio de retorno geográfico**¹⁷⁴ con el fin de reducir la fragmentación de la base industrial de la UE y modernizar las normas de contratación pública de la UE. En particular:

- *Reformar gradualmente las normas de contratación de la ESA y el diseño de los programas espaciales para reflejar el resultado de la competencia industrial, la elección de los mejores proveedores, apartándose de las limitaciones impuestas por la contribución financiera relativa de cada país miembro.*
- *Concentrar los recursos nacionales y de la ESA en proyectos que demuestren el potencial de un avance científico o tecnológico significativo, independientemente de la ubicación geográfica de las entidades participantes.*
- *Modernizar las normas pertinentes de contratación pública de la UE para adaptarlas a las características del mercado espacial actual, permitiendo procedimientos más flexibles y sustancialmente más rápidos.*
- *Diseñar las convocatorias de contratación (a todos los niveles) de manera que permitan la apertura de las cadenas de suministro y la participación de las pymes y los agentes emergentes*

Es destacable la propuesta de Draghi de **explotar mejor las sinergias entre las políticas industriales de espacio y defensa** que, como se ha presentado en el presente documento, tienen muchos puntos en común. Específicamente, dice que “*los activos espaciales deben ser reconocidos como infraestructuras críticas de seguridad y se les debe conceder el nivel de protección pertinente*”.

Finalmente, la relación de la defensa y el espacio con la IA se aborda de manera indirecta. Draghi propone lanzar un **Plan de prioridades de EU en verticales de IA (EU Vertical AI Priorities Plan)** que permita financiar modelos de IA en diferentes sectores industriales sobre la base de la compartición de datos y medidas de fortalecimiento de la aplicación de la ley antimonopolio.

¹⁷⁴ Se refiere al mecanismo de “justo retorno” por el que las contribuciones de los países miembros de la ESA deben igualarse con los contratos industriales recibidos por el país, si se dispone de capacidades tecnológicas para ello.

Esto animaría a las empresas de la UE a participar y acelerar los desarrollos europeos de la IA en diez industrias estratégicas en las que deben salvaguardarse los conocimientos técnicos europeos y la captura de valor. Entre ellas, en relación con el espacio y la defensa, el uso de los datos de observación de la Tierra generados desde el espacio para la agricultura.

Un problema destacado en el sector espacial europeo es la **dependencia estratégica de proveedores fuera de la UE** lo que afecta a la seguridad económica y la soberanía de la UE, además de comprometer la competitividad de la industria de fabricación espacial europea al debilitar la resiliencia de las cadenas de suministro espacial.

En el informe se lee: *“Esta situación se ve agravada por la imposición de estrictas regulaciones de exportación de los Estados Unidos, como el Reglamento sobre el Tráfico Internacional de Armas (ITAR), el Reglamento de Administración de Exportaciones (EAR) y la reciente Norma de Productos Extranjeros Directos. Estos marcos regulatorios, diseñados para salvaguardar los intereses de Estados Unidos, limitan inadvertidamente el acceso de la UE a la tecnología... También existen barreras similares para las exportaciones de la UE. El principal mercado para la industria espacial, los Estados Unidos, impone una serie de medidas de control de las importaciones y restricciones de acceso al mercado que protegen a las empresas estadounidenses”*.

Las medidas anunciadas en febrero de 2025 por la Administración Trump en establecer aranceles adicionales (del 25%) a los productos procedentes de la UE van a agravar aún más, si se producen, la situación descrita en el informe.

5. Evolución previsible de la IA espacial en defensa hasta 2030

5.1. Eventos disruptivos

Aunque se trate de un **periodo temporal muy corto** de solo seis años, es posible identificar algunos **eventos de relevancia de carácter disruptivo** relacionados con el uso de la IA en el sector espacial de la defensa desde 2025 hasta 2030 que podrían producirse en ese periodo. La figura 82 identifica desde una perspectiva personal estos eventos y los sitúa en el tiempo hasta 2030.

En la **parte superior** de la figura 82 se han situado los eventos disruptivos en el mercado relacionados con el sector espacial de la defensa. Se han posicionado en el **año en el que se espera que estén comercializados** (es decir, hayan alcanzado un nivel TRL 7 o superior) y no cuando la tecnología se haya generado en un centro de investigación con menores niveles de madurez. En la **parte inferior** de la figura se han posicionado en el tiempo los eventos disruptivos en el mercado relacionados con el uso de la inteligencia artificial en la defensa.

En todos los casos, se ha indicado, *grosso modo*, la **probabilidad de ocurrencia** de los eventos identificados desde una perspectiva personal¹⁷⁵.

¹⁷⁵ Valoración personal del coordinador del grupo de trabajo no discutido ni refrendado por los miembros del GT.

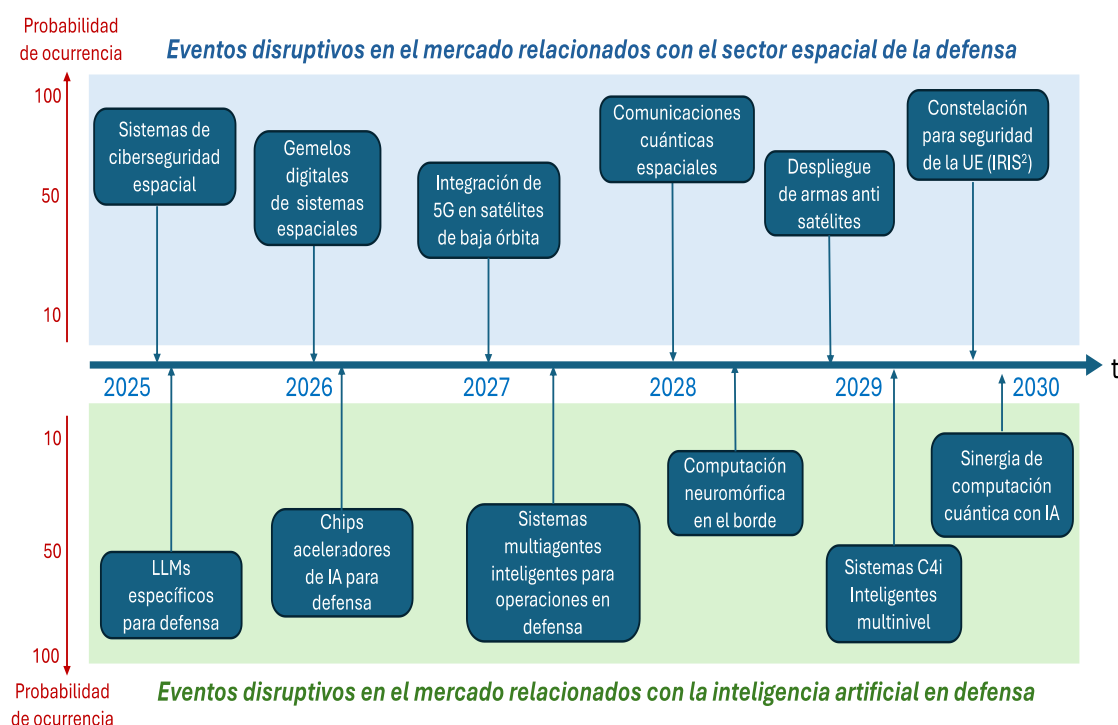


Figura 82. Eventos disruptivos relacionados con el uso de la IA en el sector espacial de la defensa desde 2025 hasta 2030. Fuente: elaboración propia.

Los eventos disruptivos en el mercado relacionados con el sector espacial de la defensa y su año de aparición más probable identificados son los siguientes:

- 2025. Sistemas de ciberseguridad espacial para navegación y comunicaciones robustas ante interferencias y suplantación de señal.
- 2025-2026. Plataformas basadas en gemelos digitales de sistemas espaciales con el suficiente nivel de detalle como para insertarlos de forma rutinaria en la ingeniería digital de sistemas.
- 2026-2027. Integración de 5G en satélites de baja órbita. Probablemente, también en plataformas de alta altitud.
- 2028-2029. Comunicaciones cuánticas espaciales con protocolos postcuánticos satélite-satélite.
- 2028-2029. Despliegue de armas anti-satélites no cinéticas de bajo coste.
- 2029-2030. Despliegue completo de la constelación para seguridad IRIS²

Los eventos disruptivos en el mercado relacionados con el uso de la inteligencia artificial en la defensa y su año de aparición más probable identificados son los siguientes:

- 2025. Desarrollo de modelos de lenguaje específicos basados en LLM abiertos para aplicaciones de defensa entrenados con conjuntos de datos reales y sintéticos.
- 2026-2027. Disponibilidad de chips aceleradores específicos para aplicaciones de defensa de bajo consumo con materiales de banda amplia.
- 2027-2028. Sistemas multiagentes inteligentes para la automatización de las operaciones de defensa en múltiples escenarios.
- 2028-2029. Extensión de la computación neuromórfica en el borde integrada en dispositivos de usuario y sensores.

- 2028-2029. Sistemas C4i inteligentes multinivel con integración del segmento espacial.
- 2029-2030. Primeras experiencias de sinergia de la computación cuántica con la IA en el ámbito de la defensa.

Una valoración global de la figura 82 indica, si los eventos identificados se producen en el periodo indicado, **nos encontraremos al final de la década en una situación mucho más madura de la actual en el uso de la IA para el sector espacial de la defensa que se habrá convertido en una tecnología habilitadora en este dominio.** Eso supone un reto para los actores del ecosistemas de defensa español para adoptar correctamente las tecnologías habilitadoras implicadas.

5.2. Imbricación de la IA con las tecnologías cuánticas en el espacio

Como siempre ocurre en el ámbito de la defensa, **la existencia de conflictos militares de alta intensidad acelera el desarrollo de tecnologías que puedan suponer una ventaja en el campo de batalla.**

El uso de las tecnologías cuánticas no va a ser diferente. Aun así, algunos de estos usos estarán disponibles antes que otros (p.ej. los derivados de las comunicaciones cuánticas o de los sensores cuánticos), mientras que otros (p.ej. los derivados de computación cuántica) aparecerán en el mercado en fechas posteriores cuando se disponga de sistemas de computación cuántica libres de errores que demuestren la supremacía ante enfoques de computación convencionales en problemas de relevancia.

Aunque nos parece que la siguiente revolución tecnológica basada en la física cuántica en el ámbito militar puede parecer que está aún muy lejos, ya se empieza a considerar la forma en la que la denominada **guerra cuántica** tomará forma en la década de los años 2030. La figura 83 nos ofrece una visión, aún muy lejos de la realidad en la que **el dominio cuántico espacial se integra con el resto de los dominios.**

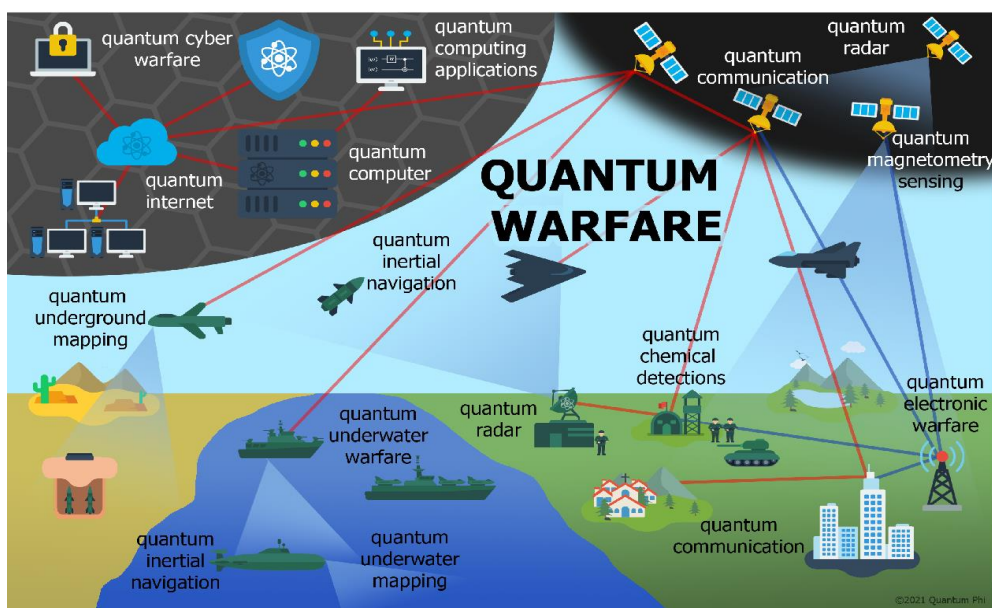


Figura 83. Idea conceptual de la guerra cuántica. Fuente: Krelina 2021.

https://www.researchgate.net/figure/Sketch-of-quantum-warfare-utilizing-various-quantum-technology-systems_fig1_350341569

Es evidente, no obstante, que la persistencia de conflictos militares abiertos entre naciones con capacidades en tecnología cuántica avanzada **acelerará su desarrollo si la supuesta ventaja militar tiene posibilidades de concretarse en el campo de batalla a medio plazo**. Y las grandes potencias están avanzando hacia ese objetivo.

En 2024, Estados Unidos estableció una iniciativa multilateral denominada **Grupo de Desarrollo Cuántico** (*Quantum Development Group*) para coordinar estrategias para el avance y la gestión de la nueva tecnología. Los Estados Unidos también ha discutido las consecuencias de esa tecnología en el ámbito militar dentro de varios foros de seguridad, incluido AUKUS, el pacto trilateral de defensa entre Australia, el Reino Unido y los Estados Unidos; el Diálogo de Seguridad Cuadrilateral, entre Australia, India, Japón y Estados Unidos; y el Consejo de Comercio y Tecnología entre Estados Unidos y la UE (Chou et al., 2025).

Asimismo, el programa de DARPA denominado **QBI** (*Quantum Benchmarking Initiative*)¹⁷⁶ pretende fomentar la competencia para generar nuevos algoritmos de computación cuántica para abordar retos del mundo real hacia posibles áreas de aplicación lo que aún no es el caso. No obstante, como se indica en la figura 84, la tecnología actual de comunicaciones cuánticas en el espacio está limitada hoy en altitud ($1 \times 10^6 \text{ m}$) y a largo plazo ($3,8 \times 10^8 \text{ m}$) empleando tecnología cuántica óptica.

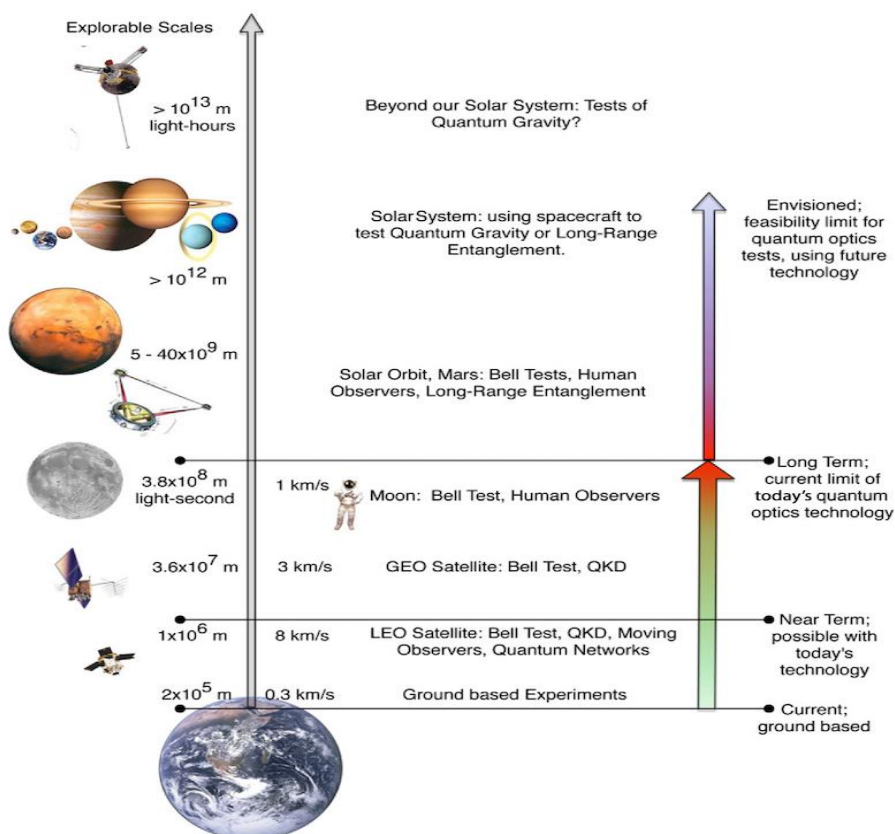


Figura 84. Rango posible de comunicaciones cuánticas espaciales. Fuente: Chapman and Peters, 2022. <https://physics.aps.org/articles/v15/172>

¹⁷⁶ <https://www.darpa.mil/research/programs/quantum-benchmarking-initiative>

El área de **comunicaciones cuánticas** es la más desarrollada. *Thales Alenia Space*, (entre Thales (67%) y Leonardo (33%)), e *Hispasat*, el operador de servicios satelitales de Redeia, han anunciado en enero de 2025 el **inicio de la fase de desarrollo, fabricación, verificación y validación del prototipo QKD-GEO, el sistema español de distribución de claves cuánticas desde órbita geoestacionaria**¹⁷⁷.

En relación con el ámbito de la sensórica cuántica en defensa también se producen avances. El reciente anuncio del Gobierno del Reino Unido sobre el **desarrollo de un reloj cuántico con fines defensivos** diseñado por el *Defence Science and Technology Laboratory (DSTL)* junto con empresas como Infleqtion, Aquark Technologies, HCD Research y el Imperial College London, promete **mejorar la precisión en inteligencia y vigilancia al reducir la dependencia del sistema GPS**, vulnerable a bloqueos enemigos¹⁷⁸.

La **carga útil geoestacionaria** constará de un **telescopio de alta precisión** con su mecanismo de apuntamiento y electrónica integrada, un **generador de números aleatorios cuánticos**, una **fuentes de señal de fotones polarizados**, una **baliza láser** y un **procesador para generar las claves** e implementar el protocolo de comunicaciones. El segmento terreno consta de estaciones ópticas equipadas con telescopios para recibir los fotones transmitidos desde el espacio y recuperar las claves, así como un centro de operaciones que organiza y controla todas las actividades del sistema, asegurando el buen funcionamiento tanto del segmento espacial como de las interacciones con el usuario.

Desde el punto de vista español, y encuadrado en el *PERTE Aeroespacial* es destacable la primera **misión geoestacionaria española de distribución de claves cuánticas** (QKD, *quantum key distribution*) para avanzar en la seguridad de las comunicaciones dotada con un presupuesto de 125 millones de euros¹⁷⁹. El proyecto requerirá tanto el desarrollo de nuevos elementos tecnológicos como la adaptación al entorno espacial de tecnologías como fuentes de fotones, generadores cuánticos de números aleatorios, telescopios para comunicaciones ópticas compatibles con la transmisión de estados cuánticos y procesadores para el destilados de claves recibidas por el canal cuántico, entre otras, así como el desarrollo de un nuevo segmento terreno o centro de gestión y procesado con el potencial de integrarse en la futura red europea **Euro-QCI** (*European Quantum Communications Infrastructure*).

Consta de dos partes diferenciadas:

¹⁷⁷ Con un presupuesto de 103,5 millones de euros, la misión QKD-GEO es un proyecto iniciado por la Secretaría de Estado de Telecomunicaciones e Infraestructuras Digitales y financiado con fondos europeos PERTE Aeroespacial, gestionado por CDTI <https://advanced-television.com/2025/01/22/thales-hispasat-start-quantum-key-geo-system/>

¹⁷⁸ Los relojes cuánticos, basados en la manipulación de átomos mediante radiación electromagnética, ofrecen una precisión sin precedentes, capaz de perder menos de un segundo en miles de millones de años. Se espera que en cinco años puedan utilizarse en operaciones militares, mejorando sistemas de navegación, redes de comunicación encriptadas y estrategias de ciberdefensa. https://www.barcelonadot.com/la-supremacia-cuantica-oculta-tras-la-ia/?t&utm_source=perplexity

¹⁷⁹ <https://planderecuperacion.gob.es/noticias/Conoce-primer-proyecto-espanol-mision-geoestacionaria-distribucion-cuantica-claves-perte-aeroespacial-prtr>

- **QKD GEO**, con una dotación de hasta 105 millones de euros, para el desarrollo de una carga útil destinada a ser embarcada en un satélite geoestacionario a 35.786 kilómetros sobre el nivel del mar y su segmento terreno asociado a desarrollar por Thales Alenia Space España S.A.
- **QKD LEO**, con una dotación de hasta 20 millones de euros, para el desarrollo de una carga útil destinada a ser embarcada en un satélite de órbita terrestre baja y su segmento terreno asociado que correrá a cargo de Sener Aeroespacial S.A. y Telespazio ibérica S.L.U.

China se adelantó en el uso de la tecnología cuántica militar en 2016 con el lanzamiento del satélite “*Micius*” diseñado específicamente para experimentos de **comunicación cuántica** (Chao-Yang et al., 2022). Este satélite ha demostrado con éxito la distribución de claves cuánticas (QKD) a larga distancia, estableciendo enlaces seguros entre estaciones terrestres separadas por miles de kilómetros. En 2017, científicos chinos utilizaron *Micius* para realizar una videollamada entre Viena y Beijing, encriptada mediante QKD, marcando la primera demostración intercontinental del modelo distancia de más de 7.400 Km (véase figura 85).



Figura 85. Comunicación cuántica a gran distancia. Fuente: CGTN (Grupo de Medios de Comunicación de China)

https://static.wixstatic.com/media/faeb1f_f3fca06248324e67bc5c56e60ad741c7~mv2.jpg/v1/fill/w_1480,h_1040,al_c,q_85,usm_0.66_1.00_0.01,enc_auto/faeb1f_f3fca06248324e67bc5c56e60ad741c7~mv2.jpg

Seguramente, serán las áreas de **sensores cuánticos** y la de **comunicaciones cuánticas** las primeras que interaccionarán en aplicaciones espaciales de defensa con la IA. Concretamente, la combinación de inteligencia artificial (IA) y comunicaciones cuánticas promete aplicaciones revolucionarias en el futuro como las siguientes en las que ya se está trabajando:

- **Ciberseguridad avanzada:** Redes cuánticas protegidas contra ciberataques mediante criptografía cuántica, optimizadas por IA para detectar y mitigar amenazas en tiempo real.
- **Exploración espacial:** Comunicaciones ultraseguras entre satélites y estaciones terrestres, facilitando la transmisión de datos científicos críticos.

- **Optimización de redes globales:** IA aplicada a redes cuánticas para mejorar la eficiencia en telecomunicaciones, transporte y ciudades inteligentes

En el ámbito de la **interacción de la IA con los sensores cuánticos** el objetivo es combinar la sensibilidad extrema de los sensores con la capacidad de análisis de grandes volúmenes de datos que proporciona la IA¹⁸⁰.

DARPA en su programa **Quantum-Assisted Sensing and Readout (QuASAR)**¹⁸¹ ha logrado avances significativos en **magnetometría cuántica** al poder detectar señales muy débiles. Los magnetómetros desarrollados bajo este programa mejoran la capacidad de detectar campos magnéticos de un perfil que antes pasaba desapercibido en los sistemas clásicos debido a la falta de precisión y rango. Estos sensores demuestran la **capacidad de interceptar señales de radio de muy bajo espectro de frecuencia**, lo que podría revolucionar la detección de submarinos y la comunicación subterránea, incluso a distancias que podrían marcar un punto de inflexión en la estrategia operativa de las grandes potencias (López-García, 2024).

Por otro lado, la **computación cuántica** puede mejorar potencialmente en la próxima década las capacidades de la IA al eliminar las limitaciones del tamaño de los datos, la complejidad y la velocidad de resolución de problemas. Por ejemplo, se piensa posible desarrollar redes neuronales cuánticas que enseñen a una computadora cuántica a detectar anomalías, hacer reconocimiento de imágenes y otras tareas. También es posible mejorar los métodos tradicionales de IA mediante el uso de enfoques inspirados en la cuántica para reducir drásticamente los costes de desarrollo y entrenamiento de grandes modelos de lenguaje (LLM)¹⁸². Por ahora, se está explorando la computación cuántica en ámbitos de investigación civil como en la **biología** con resultados esperanzadores¹⁸³. Muy lejos aún de su integración en aplicaciones reales en el espacio y la defensa.

Desde mi punto de vista, **las tecnologías cuánticas se integrarán progresivamente con la IA** (se ha empezado a denominar como “IA cuántica”) en el dominio espacial tal y como se indica esquemáticamente en la figura 86 como base de la futura implementación de la denominada “**guerra cuántica inteligente integrada en el espacio**”.

¹⁸⁰ Este mismo principio es el que se utiliza en medicina para sistemas de magnetoencefalografía (MEG) avanzados que permiten detectar la actividad cerebral producida al activarse las neuronas.

¹⁸¹ <https://www.darpa.mil/research/programs/quantum-assisted-sensing-and-readout>

¹⁸² <https://www.informationweek.com/machine-learning-ai/quantum-computing-and-ai-a-perfect-match->

¹⁸³ Como ejemplo, en julio de 2024 se han publicado los resultados de experimentar el uso de aprendizaje automático combinado con la computación cuántica para predecir la estructura de proteínas pequeñas, pero que no pueden manejar las cantidades masivas de datos y el tiempo necesarios para las proteínas más grandes. Como resultado, se ha podido predecir el plegamiento de un pequeño fragmento de proteína del virus del Zika de forma más rápida y precisa que los métodos informáticos clásicos.

<https://www.lerner.ccf.org/news/article/?title=+How+quantum+computing+will+affect+artificial+intelligence+applications+in+healthcare+&id=79c89a1fcb93c39e8321c3313ded4b84005e9d44#:~:text=Quantum%20computing%20can%20potentially%20enhance,methods%20to%20protein%20structure%20prediction.>

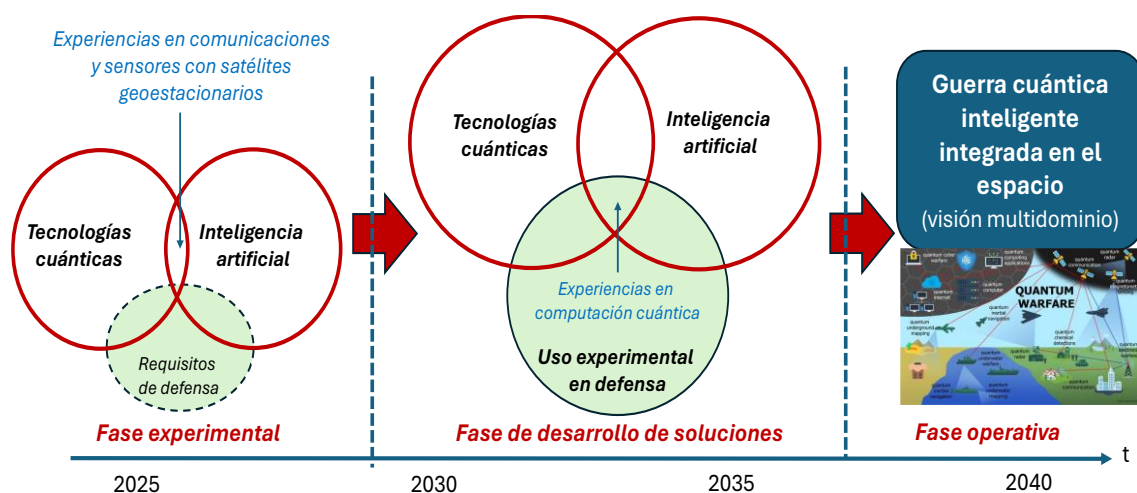


Figura 86. Interacción entre tecnologías cuánticas e IA en el sector espacial para posibilitar la guerra cuántica inteligente. Fuente: elaboración propia

Se ha planteado esta evolución en un periodo temporal dilatado desde 2025 a 2040 y en **tres fases diferenciadas**.

- En la fase **experimental** (2025-2030) se está empezando a analizar como la IA (sobre todo, ML) puede complementar a la tecnología cuántica o aprovecharse de ella. Eso ocurre, sobre todo, en los ámbitos de comunicaciones y sensores cuánticos en el espacio. Es una fase en la que los centros de investigación, start-ups, y las agencias públicas de I+D toman el protagonismo. El rol de las FAS se puede limitar a experimentar con algunas soluciones y a definir cuáles serían los requisitos necesarios para su uso en el futuro.
- En la fase de **desarrollo de soluciones** (2030-2035) supongo que la computación cuántica haya madurado lo suficiente como para complementar las comunicaciones y la sensórica cuánticas y proporcionar la base para un desarrollo tecnológico real, en gran medida, de carácter dual. Probablemente, será el turno del sector industrial de defensa para desarrollar sistemas reales que puedan ser experimentados por las FAS en escenarios reales.
- En la fase **operativa** (2035-2040) se supone que, paulatinamente, esta convergencia desembocará en su uso en operaciones militares reales, fundamentalmente por parte de las grandes potencias que serán celosas en compartir la información.

Los periodos temporales indicados como referencia pueden modificarse debido a **escenarios futuros** en los que los conflictos militares de alta intensidad **crezcan** (acelerando el desarrollo) o **disminuyan** (ralentizando el desarrollo) por lo que supone en el volumen y priorización de las inversiones.

En todo caso, la experiencia con el proceso de digitalización del campo de batalla y la transición hacia un campo de batalla inteligente, procesos que demuestran las dificultades existentes, y las **necesidades de cambios profundos de doctrina militar implicados**, debemos ser cautelosos.

6. Conclusiones y recomendaciones de actuación

6.1. Conclusiones

El documento elaborado ha pretendido cubrir un amplio conjunto de temas en las que se describe y justifica cómo **la IA se ha convertido en un elemento clave para dotar de mayor inteligencia a las aplicaciones del sector de la defensa en el espacio.**

Como resumen, del presente documento pueden extraerse las siguiente **conclusiones generales no referidas expresamente a la UE:**

1. El dominio espacial está **incrementando de manera muy rápida su relevancia para la defensa** en estrecha interacción e integración con otros dominios militares (tierra, mar, aire, ciber) como parte de la confrontación geopolítica entre grandes potencias.
2. Se ha producido un fuerte **crecimiento del gasto total gubernamental para defensa y seguridad espacial** (en 2023 fue de 58.400 M\$ totales de los que 40.200 M\$ son ingresos de la industria) y las previsiones apuntan a que **ese crecimiento se mantendrá durante la presente década** al incrementarse las estrategias y tácticas militares que se apoyan en el sector espacial para su implementación.
3. Se ha producido una **mayor diversidad geográfica de actores del sector espacial** con la incorporación de nuevos países que han desarrollado capacidades espaciales en algunos eslabones de la cadena de valor, y son capaces de desarrollar, poner en órbita y operar sistemas satelitales.
4. El desarrollo de **tecnologías duales** ha impulsado un **proceso acelerado de innovación** con el empleo de tecnologías digitales concretado en el desarrollo de componentes, satélites y constelaciones satelitales de uso civil y militar con mayor capacidad de computación a bordo, ejecución de algoritmos de IA, lanzamientos múltiples a bajo coste, que implican **menores tiempos y costes de desarrollo.**
5. El desarrollo de nuevas aplicaciones del sector espacial potenciadas por la IA y la miniaturización de las plataformas ha provocado **profundos cambios en la estructura del sector espacial** con la entrada de nuevos actores: startups con productos y servicios espaciales disruptivos, empresas usuarias de datos espaciales en múltiples sectores.
6. Se observa una creciente dependencia de las agencias espaciales nacionales que sustituyen actividades internas por **servicios proporcionados por el sector privado** (servicios de desarrollo, de acceso al espacio, de operación, etc.) en búsqueda de mayor agilidad y eficiencia en el uso de recursos.
7. El brutal incremento del número de objetos espaciales orbitando el planeta Tierra, incluyendo desechos espaciales, ha forzado a la necesidad de disponer de **sistemas inteligentes de comprensión de la situación de múltiples objetos en el espacio** (tanto naturales como artificiales) que permita tomar decisiones para reducir los riesgos de operación.
8. El crecimiento de los **ciberataques a la comunicación y señales de posicionamiento y navegación de los satélites** con perturbaciones o

suplantaciones provocadas ha convertido la ciberseguridad en una tecnología transversal para proteger los datos y telemetría satelitales como parte intrínseca de la guerra electrónica satelital.

9. Se ha producido un incremento del **interés en la aplicación de la IA para abordar el análisis a bordo de datos espaciales** (p.ej. imágenes tomadas desde diversas cargas útiles en el satélite) y reducir el flujo de información hacia estaciones terrenas mediante el incremento de la capacidad de procesamiento a bordo.
10. El rápido despliegue de **constelaciones de satélites de órbita baja** de miles de satélites para aplicaciones duales como el acceso a internet, observación e inteligencia o navegación, ha obligado a múltiples países a reconsiderar la dependencia frente a operadores privados.
11. La previsible **convergencia de la IA con las tecnologías cuánticas** está incrementando el interés de su aplicación en el sector espacial y supondrá un cambio disruptivo en la próxima década.

Sin pretender ser exhaustivo, el informe ha cubierto algunos **ejemplos recientes del uso avanzado de la IA en el dominio espacial de la defensa**. Entre ellos, se destacan:

- ✓ Mejora de la **comprensión del dominio espacial** en un contexto congestionado de miles de objetos de todo tipo, misión y tamaño.
- ✓ Reducción de los peligros de **colisión** con restos de objetos espaciales, problema creciente cuyas técnicas y procedimientos es necesario automatizar.
- ✓ Detección y eliminación de **objetos con comportamientos anómalos** en constelaciones de miles de satélites en un contexto de militarización del espacio.
- ✓ Uso de IA generativa para facilitar la **planificación de operaciones** espaciales con interacción multimodal del sistema con operadores humanos.
- ✓ Uso de aprendizaje automático para la **toma de decisión** a nivel táctico y estratégico en el sector espacial de la defensa.
- ✓ Mejora de la defensa contra **ciberataques** (interferencias y suplantación) en los sistemas de navegación satelital.
- ✓ Desarrollo de **gemelos digitales espaciales** para acelerar el diseño y las labores de mantenimiento preventivo y aumentativo de los activos espaciales alimentados por grandes conjuntos de datos y técnicas de simulación potenciadas por la IA.

Es obvio que el **uso de la IA en áreas sensibles** como son las de defensa y seguridad con posible impacto en vidas humanas requiere que el concepto de **“explicabilidad”** de las decisiones tomadas por un sistema automático se convierta en un elemento esencial en la toma de decisiones. En la medida en que las tecnologías de IA progresen en ese ámbito su uso será mejor aceptado para la defensa.

Otro condicionante básico para su adopción es el de la **calidad de los datos disponibles**. Si el uso masivo de conjuntos de datos en tiempo real es esencial en todos los sectores para entrenar algoritmos que permitan detectar patrones, predecir amenazas, apoyar la toma de decisiones o alimentar análisis predictivos, **en el ámbito de la defensa y seguridad tienen una relevancia aún mayor**.

En el uso real, la capacidad de **anticipar comportamientos y situaciones que se puedan dar en el campo de batalla** requiere procesar grandes volúmenes de datos históricos, lo

que, a su vez, obliga a disponer de modelos de lenguaje específicos entrenados para sistemas de defensa (generalmente, sobre la base de LLM genéricos confiables como ya se ha expuesto en secciones precedentes).

Sin embargo, **la obtención de datos etiquetados y relevantes** que permitan entrenar a los algoritmos desarrollados en el ámbito de la defensa requiere obtenerlos de operaciones reales en el campo de batalla; **el uso de datos sintéticos no es suficiente**. Debe tenerse en cuenta que de un correcto entrenamiento combinados con la captura de datos en tiempo real depende la calidad de las de inferencias.

En el ámbito del uso de la IA en la defensa en el sector espacial, el **procesamiento automatizado de datos geoespaciales es un factor crítico**. El objetivo es que el software geoespacial pueda procesar grandes cantidades de datos en tiempo real, detectando cambios en el terreno o movimientos del enemigo o generando alertas cuando ocurren eventos en ubicaciones específicas mediante un análisis inteligente de imágenes espaciales, ayudando a la toma de decisiones inmediata como se ha indicado en secciones anteriores.

Finalmente, la **interoperabilidad entre los sistemas militares de mando y control, nube de combate o simulación** empleados por distintas fuerzas armadas, así como con plataformas aliadas o de coalición en un **contexto de operación multidominio que incluye obligatoriamente el sector espacial** es una tendencia que supone un reto para los sistemas automatizados de toma de decisiones basado en IA. Reto que, sin embargo, ha adquirido una relevancia muy elevada y en el que los esfuerzos actuales en IA se concretarán en **sistemas interoperables muy potentes al final de la presente década**.

Para terminar, puede decirse que **la carrera espacial está siendo dominada en la presente década por la inteligencia artificial**. Las entidades del sector espacial públicas y privadas que no dominen la IA no podrán competir con éxito en el sector espacial.

En el contexto indicado, las siguientes **conclusiones** se focalizan en la **situación actual de la UE en el sector espacial de la defensa**.

1. **La UE es una potencia espacial** reconocida en el contexto mundial con una estrategia pública definida a nivel comunitario y por muchos de los Estados miembros, y apoyada por un sector industrial potente y diversificado, y la existencia de diversos centros públicos de investigación.
2. Los programas comunitarios espaciales de **navegación** (Galileo), **observación** (Copérnico) o la constelación **IRIS²** en desarrollo para dotar a la UE de servicios de comunicación gubernamentales son exponentes del interés político existente.
3. La existencia de la **Agencia Europea del Espacio** desde hace décadas, aunque formalmente diferenciada de la UE, se ha constituido en un elemento esencial para el desarrollo, lanzamiento y operación de múltiples plataformas satelitales de alta tecnología para la UE. Sin embargo, su funcionamiento en base a retornos industriales garantizados para sus miembros dificulta conseguir una mayor eficiencia y plazos de actuación reducidos.
4. Persiste una **debilidad europea en el acceso al espacio** que, basado en Ariane 6 y Vega C, es comparativamente caro (sin cohetes reutilizables) y dependiente de

otras potencias, sobre todo de Estados Unidos y, en especial de los cohetes lanzadores de *SpaceX* (actualmente de *Falcon 9* y en el futuro de *Starship*).

5. **El sector europeo espacial de la defensa está fragmentado** con múltiples países promoviendo programas basados en su industria nacional y con competencias limitadas por parte de la Comisión Europea. Como ha demostrado la guerra de Ucrania no se dispone de un sistema propio paneuropeo para aplicaciones de seguridad y defensa que alimente la inteligencia militar común (IRIS² no estará disponible hasta 2030).
6. El **uso de la IA** en el desarrollo de plataformas y cargas útiles (p.ej. mediante gemelos digitales) y en el desarrollo de aplicaciones espaciales (p.ej. de procesamiento de datos como imágenes) **depende de tecnologías no europeas** en el desarrollo de procesadores a bordo y de herramientas software.
7. La creciente relación del espacio con las **tecnologías de comunicaciones cuánticas** y su integración con la IA s va a acelerar y múltiples empresas europeas han comenzado a participar en desarrollos experimentales con objeto de disponer de sistemas operativos de comunicaciones cuánticas satelitales seguras al final de la presente década.

6.2. Recomendaciones

En función de las conclusiones presentadas, y con el objetivo general de **reforzar la posición española en el uso de la IA en el sector espacial de la defensa**, se proponen las siguientes **recomendaciones de actuación** para las **administraciones públicas (AAPP)**, en especial, para las **Fuerzas Armadas (FAS)**, y para la **industria**. El esfuerzo necesario para la priorización, diseño y puesta en marcha de las recomendaciones indicadas anteriormente implica disponer de **recursos abundantes y una voluntad política que debería tener continuidad a largo plazo**.

- **R1.** *Elaborar un mapa actualizado de requisitos y necesidades de las Fuerzas Armadas españolas sobre el uso de la IA en el espacio, por lo menos hasta 2035.*
 - Se trata de disponer de información actualizada y revisable periódicamente de las necesidades integradas de las FAS en una hoja de ruta ambiciosa y realista, alineada con la OTAN y la UE para los próximos diez años, indicando su urgencia y caracterizando los condicionantes para su desarrollo.
 - Esta acción puede insertarse como parte del proceso de actualización de la *Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa* (ETID 2020) del Ministerio de Defensa español que se desarrollará en 2025-2026.
- **R2.** *Elaborar un mapa actualizado de capacidades duales de la industria y del sector público de investigación de IA en el dominio espacial en el horizonte temporal de 2035.*
 - Este mapa no debería circunscribirse a las empresas que actualmente disponen de contratos con el Ministerio de Defensa o participan en programas internacionales del sector espacial, sino que debe extenderse a otras empresas, incluidas start-ups, con tecnologías, productos y servicios

duales que pueden en el futuro formar parte del ecosistema industrial del sector espacial de la defensa

- Se pretende conocer con ello las debilidades, fortalezas, amenazas y oportunidades a las que se enfrenta España hasta 2035 actualizando periódicamente los datos.
- Esta acción puede insertarse como parte del desarrollo de la Estrategia de Tecnología de Defensa del Ministerio de Defensa español que se aprobará en 2025.

- **R3.** *Poner en marcha un programa de tecnología e innovación específico para incrementar el uso de la IA en el sector espacial en el contexto de la implementación de la Estrategia Tecnológica de la Defensa y del Plan Nacional de la Agencia Española de Espacio para los próximos años.*

- Priorizar áreas específicas del sector espacial como la mejora de la conciencia situacional y vigilancia espacial, la gestión autónoma de satélites y constelaciones, y la detección de amenazas mediante IA.
- Integración de sistemas de procesamiento a bordo en satélites para la ejecución de algoritmos de IA en las prioridades tecnológicas de sistemas de mando y control multidominio, de nube de combate, de guerra electrónica o de comunicaciones satelitales.

- **R4.** *Acelerar el desarrollo de plataformas de diseño apoyadas por la IA para soportar el ciclo de vida digital integrado de sistemas y plataformas espaciales reduciendo los plazos de desarrollo y facilitando el mantenimiento posterior.*

- Con esta recomendación se pretende incrementar la soberanía tecnológica nacional en el desarrollo de herramientas software y hardware necesarias para acelerar el proceso de diseño y fabricación de activos espaciales reduciendo la dependencia de proveedores no europeos.
- Desarrollar un conjunto de gemelos digitales de activos espaciales basados en IA para simular escenarios de conflicto y facilitar la toma de decisiones.
- Desarrollar gemelos digitales ciberfísicos de satélites y cargas de pago para facilitar la toma de decisión en operación y mantenimiento predictivo.

- **R5.** *Financiar el lanzamiento de proyectos espaciales de carácter experimental en el uso de la IA en el espacio de alto riesgo tecnológico con implicación de las FAS que permita construir las capacidades que España requiere para la siguiente década en base a pequeños satélites de validación tecnológica.*

- Desplegar herramientas de IA para monitorización de la basura espacial, del uso de criptografía cuántica satelital, y para la toma de decisiones autónomas en misiones.
- Desarrollar satélites miniaturizados con procesamiento de IA embarcado para misiones de reconocimiento y comunicaciones seguras. (p.ej. proyecto piloto de enjambres de nanosatélites con IA para vigilancia marítima del Estrecho de Gibraltar).

- **R6.** *Incrementar la participación española en programas voluntarios de exploración de tecnologías duales en el espacio implicando el uso de la IA en la Agencia Europea del Espacio (ESA), en el Horizonte Europa (HE), en el Fondo Europeo de la Defensa (EDF) y*

en la Agencia Europea de la Defensa (EDA) en colaboración con otros socios internacionales europeos.

- Adoptar una posición proactiva en la propuesta de nuevas prioridades espaciales de interés español en los programas tecnológicos de las entidades indicadas que requieran el uso de la IA.
- Con ello, se pretende valorizar el uso de tecnologías duales participando en programas emblemáticos europeos como es el caso de los sistemas Galileo, Copérnico o IRIS² relacionados con la UE o en programas de cooperación internacional con otras agencias como la NASA en la exploración del sistema solar.
 - Ejemplo: colaboración con la ESA en misiones de eliminación de basura espacial mediante robots autónomos guiados por IA.
 - Fomentar alianzas bilaterales (p.ej.: España-EE.UU. en proyectos de satélites autónomos) y en el marco de la Agencia Espacial Española (AEE).
- **R7. Fortalecer el ecosistema de innovación espacial de la defensa apoyado en el uso dual de la IA con la participación de empresas digitales, startups y centros de investigación alejados hasta ahora del sector espacial**
 - Apoyar la creación y escalado de start-ups con tecnología espacial disruptiva.
 - En combinación con actuaciones del programa BIC de la ESA y con el EIC (*European Innovation Council*) de la UE.
 - Cooperación con fondos de capital riesgo focalizados en el sector de la defensa y la seguridad.
 - Coinversión de recursos públicos en fondos de capital riesgo relacionados con el espacio.
 - Ofrecer incentivos fiscales a startups, midcaps y pymes que desarrollen IA dual (civil-militar) para aplicaciones espaciales que requieran el uso de tecnologías emergentes.
 - Apoyar el fortalecimiento del ecosistema de innovación espacial mediante actuaciones como:
 - Fomentar la creación de clústeres tecnológicos (p.ej.: Cataluña, Andalucía, Madrid, País Vasco o Galicia) especializados en IA y espacio desde una perspectiva dual.
 - Facilitar el acceso de pymes y start-ups a laboratorios de pruebas existentes en el sistema público con el fin de acelerar el desarrollo de productos y servicios innovadores para el uso de la IA en el sector espacial de la defensa.
 - Crear programas de financiación específicos para proyectos de IA aplicada al espacio y defensa (p.ej., con fondos del CDTI o Ministerio de Defensa).
 - Establecer consorcios público-privados entre empresas, universidades y centros de investigación (INTA, ISDEFE, CSIC) en el marco de los programas estatales de la Agencia Española del Espacio.
 - Priorizar la compra pública de soluciones locales del uso de aplicaciones espaciales innovadoras.
- **R8. Incrementar la participación española en actividades de tecnologías duales disruptivas basadas en el uso de la IA en el marco de la OTAN con impacto en el sector espacial**

- Promover la participación en el programa DIANA apoyando empresas start-ups españolas y en el Fondo de Innovación de la OTAN buscando la máxima sinergia con los programas de aceleración de la ESA.
 - Incrementar la participación española en los grupos de trabajo de STO relacionados con el uso de la IA en espacio.
 - Participar en misiones OTAN de vigilancia espacial, aportando tecnologías de procesamiento de datos con IA.
- **R9.** *Explorar la interacción entre la IA y las tecnologías cuánticas en el contexto del despliegue de la red de comunicaciones cuánticas nacional y europea con la máxima participación de la academia, la industria y las FAS.*
 - Desarrollar experiencias de comunicaciones cuánticas que puedan integrarse en redes que empleen los satélites *SpainSAT NG* (1 y 2) a partir de 2026 gestionadas con sistemas de IA y en el futuro programa PAZ 2.
 - Desarrollo de experiencias de sensórica cuántica en el desarrollo de cargas de pago espaciales inteligentes.
- **R10.** *Mejorar la ciberseguridad y resiliencia de los sistemas satelitales desde perspectivas complementarias aprovechando la capacidad de procesamiento a bordo para ejecutar algoritmos de IA*
 - Implementar protocolos de ciberseguridad robustos, incluyendo IA para detectar amenazas cibernéticas en tiempo real.
 - Invertir en IA defensiva para proteger infraestructura espacial (p.ej. en la detección de interferencias en satélites).
 - Realizar simulacros conjuntos con aliados para responder a ciberataques en sistemas espaciales.
- **R11.** *Elaborar directrices éticas para el uso de la IA en defensa espacial, alineadas con la Brújula Estratégica de la UE, con las regulaciones de la OTAN, y con las directrices que emanen del uso responsable de la IA militar (REAIM).*
 - Prestar atención al establecimiento de criterios y directrices nacionales e internacionales para el mantenimiento del humano en el bucle en los procesos de automatización en la toma de decisión.
 - Estos aspectos pueden tratarse en la Cumbre REAIM a celebrar en España en febrero de 2026.
- **R12.** *Desarrollar la infraestructura tecnológica necesaria para soportar el desarrollo automatizado basado en IA de sistemas espaciales de la defensa*
 - Incrementar el uso de centros de supercomputación dedicados a simulaciones espaciales y entrenamiento de modelos de IA.
 - Utilización de la red europea de supercomputación y, específicamente, del nodo español del BSC para simulación de sistemas espaciales.
 - Desarrollar un repositorio nacional de datos espaciales (imágenes satelitales, telemetría) accesible para proyectos estratégicos.
 - Establecer los criterios y responsabilidades para el filtrado, almacenamiento, mantenimiento y compartición de los datos.

- Facilitar el acceso de startups del sector espacial a la infraestructura tecnológica disponible en el sistema público nacional.
- **R13.** *Promover la captura, desarrollo y retención de talento especializado para asegurar que España posea los recursos humanos necesarios y formados para atender las futuras necesidades de desarrollos de IA para el sector espacial de la defensa.*
 - Capacitar al personal militar en el uso de la IA en operaciones de sistemas espaciales mediante simuladores y cursos específicos.
 - Apoyar la creación de másteres y doctorados interdisciplinares en IA, defensa y tecnología espacial en colaboración con la IA.
 - Ofrecer becas internacionales en este ámbito para atraer expertos.
 - Promover intercambios de expertos con países líderes (EE.UU., Francia, Alemania) en programas como Horizonte Europa y la ESA.

No todas las recomendaciones descritas tienen la misma urgencia, ni requieren el mismo nivel de recursos, ni tienen la misma complejidad para su implementación, ni pueden abordarse sin cooperación internacional. La siguiente tabla 3 resume esta situación atendiendo a una valoración subjetiva del autor como Alta (A), Media (M) y Baja (B).

Recomendación	Urgencia	Nivel de recursos	Complejidad	Cooperación internacional
R1. Mapa de requisitos y necesidades de las FAS españolas sobre el uso de la IA en el espacio.	A	B	M	B
R2. Mapa de capacidades duales de la industria y sector público de investigación en el dominio espacial.	A	B	A	B
R3. Programa específico de I+DT para incrementar el uso de la IA en el sector espacial.	A	M	M	M
R4. Plataformas de diseño apoyadas por la IA para soportar el ciclo de vida digital integrado.	M	M	M	B
R5. Lanzamiento de proyectos espaciales de carácter experimental.	M	M	M	A
R6. Incrementar la participación española en programas internacionales de espacio.	A	A	M	A
R7. Fortalecer el ecosistema espacial de innovación dual.	A	M	M	B
R8. Incrementar la participación en actividades de la OTAN relacionadas.	M	B	M	A
R9. Explorar la interacción entre la IA y las tecnologías cuánticas.	B	M	M	M
R10. Mejorar la ciberseguridad y resiliencia.	A	M	A	M
R11. Elaborar directrices éticas para el uso de la IA en el espacio.	M	B	M	B
R12. Desarrollar infraestructura tecnológica.	M	A	A	M
R13. Desarrollo y retención de talento especializado.	M	B	M	B

7. Referencias

1. Abbasi, A. Yadav, H. Yanikomeroglu, N. -D. Đào, G. Senarath and P. Zhu, "HAPS for 6G Networks: Potential Use Cases, Open Challenges, and Possible Solutions," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 31, no. 3, pp. 324-331, June 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/MWC.012.2200365>
2. Aftatah y Zebbata (2024). Comprehensive Survey on Secure Navigation for Intelligent Systems: Artificial Intelligence Approaches to GPS Jamming and Spoofing Detection. COCIA 2024, LNNS 1123, pp. 1–6, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70411-6_17
3. Anicho, O., Charlesworth, P., Baicher, G., Nagar, A., and Buckley, N. (2024). Comparative Study for Coordinating Multiple Unmanned HAPS for Communications Area Coverage.
4. ARTES (2024). ARTES Future Preparation 1A.127 Disruptive satcom Systems Design with Digital Generative Design. CSC (Connectivity and Secure Communications). ESA. 24th July, 2024. <https://connectivity.esa.int/projects/artes-future-preparation-1a127-disruptive-satcom-systems-design-digital-generative-design>
5. Bahamonde, J. (2025). La NASA prueba satélites con inteligencia artificial que deciden sus propias observaciones. INFOBAE. Julio 2025. <https://www.infobae.com/america/ciencia-america/2025/07/30/la-nasa-prueba-satelites-con-inteligencia-artificial-que-deciden-sus-propias-observaciones/>
6. Bataille, M. (2024). Integrating Commercial Space for Military Applications in Europe: A Challenge and Opportunity. European Space Policy Institute. 5 September 2024. <https://www.espi.or.at/briefs/integrating-commercial-space-for-military-applications-in-europe-a-challenge-and-opportunity/>
7. Berkowitz, M.J. (2024). America's Asymmetric Vulnerability to Navigation Warfare: Leadership and Strategic Direction Needed to Mitigate Significant Threats. National Security Space Association (NSSA). July 18, 2024. <https://nssaspace.org/wp-content/uploads/2024/07/NAVWAR-FINAL.pdf>
8. Bojor. L., Petrache.T., y Critescu, C. (2024). Emerging Technologies in Conflict: The Impact of Starlink in The Russia – Ukraine War. Land Forces Academy Review. Vol. XXIX, No. 2(114), 2024. June 2024. DOI: <https://doi.org/10.2478/raft-2024-0020>
9. Bollfrass, A.K., Sabatino, E. Wiley, C. (2025). Space Capabilities to Support Military Operations in the European Theatre. IISS Research Papers. The International Institute for Strategic Studies. 30th January 2025. <https://www.iiss.org/research-paper/2025/space-capabilities-to-support-military-operations-in-the-european-theatre/>
10. Boozallen (2025). Artificial Intelligence for Space Missions. <https://www.boozallen.com/markets/space/artificial-intelligence-for-space-missions.html> (accedido el 4 de enero de 2025)
11. Bourriez, N., Loizeau, A., Abidin, A. (2023). Spacecraft Autonomous Decision-Planning for Collision Avoidance : a Reinforcement Learning Approach. 74th International Astronautical Congress (IAC), International Astronautical Federation (IAF), Oct 2023, Baku, Azerbaijan. hal-04334473.
12. Caso, S. (2024): Emerging technologies in military space operations: current applications and future research for educational and training purposes, International Journal of Training Research, 25 Nov 2024. DOI:

- 10.1080/14480220.2024.2431482
<https://doi.org/10.1080/14480220.2024.2431482>
13. Chang, E. (2024). The Role of AI in Managing Low Orbit Satellites. *TelecomWorld101*. December 24, 2024. <https://telecomworld101.com/the-role-of-ai-in-managing-low-orbit-satellites/>
 14. Chapman, J.C. and Peters, N.A. (2022). Paving the Way for Satellite Quantum Communications November 9, 2022. *Physics* 15, 172. <https://physics.aps.org/articles/v15/172>
 15. Chintalapati, B., Precht, A. Hanra, S., Laufer, R., Liwicki, M., Eickhoff, J. (2024). Opportunities and challenges of on-board AI-based image recognition for small satellite Earth observation missions. *Advances in Space Research*. Available online 26 March 2024. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.03.053>
 16. Chochtoulas, A. (2024). How Large Language Models are Transforming Modern Warfare. Is ChatGPT Applicable in the Military Domain? Joint Air Power Competence Centre. *Journal Edition* 37. May 2024
 17. Chao-Yang Lu, Yuan Cao, Cheng-Zhi Peng, and Jian-Wei Pan (2022). Micius quantum experiments in space *Rev. Mod. Phys.* 94, 035001 (2022). July 6, 2022
 18. Chou, C., Manyika, J., y Neven, H. (2025). The Race to Lead the Quantum Future. How the Next Computing Revolution Will Transform the Global Economy and Upend National Security. *Foreign Affairs*. January/February 2025 (pp 154-167).
 19. Comisión Europea (2025). Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the safety, resilience and sustainability of space activities in the Union. Brussels, 25.6.2025 COM(2025) 335 final 2025/0335 (COD) https://defence-industry-space.ec.europa.eu/document/download/0adeee10-af7a-4ac1-aa47-6a5e90cbe288_en?filename=Proposal-for-a-Regulation.pdf
 20. DARPA (2024). Catalyzing an Integrated Lunar Economy: Initial Results of the LunA-10 Capability Study. May 2024. <https://www.darpa.mil/news/2024/luna-10-economy-study>
 21. De Reus, N. M., Kerbusch, P., Schadd, M. and de Vos, A. (2021). Geospatial analysis for Machine Learning in Tactical Decision Support. STO-MP-MSG-184. NATO. <http://www.schadd.com/Papers/2021GeospatialanalysisforMachineLearninginTacticalDecisionSupport.pdf>
 22. Di Mare, A. (2021). The Role of Space Domain Awareness Space Asset Resilience thru Protection. Joint Air & Space Power Conference 2021. May 2021 <https://www.japcc.org/essays/the-role-of-space-domain-awareness/>
 23. Draghi, M. (2024). The future of European competitiveness Part B | In-depth analysis and recommendations. September 2024. https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en#paragraph_47059
 24. ESA (2022). Smarter satellites: ESA Discovery accelerates AI in space. 12/05/2022. https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/Smarter_satellites_ESA_Discovery_accelerates_AI_in_space (accedido el 4 de enero de 2025).
 25. ESA (2024). Artificial intelligence in space. https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/Artificial_intelligence_in_space (accedido el 4 de enero de 2025).
 26. EU (2023). Joint Communication to The European Parliament and The Council. European Union Space Strategy for Security and Defence. JOIN(2023) 9 final.

- Brussels, 10.3.2023. [https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail?ref=JOIN\(2023\)9&lang=en](https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail?ref=JOIN(2023)9&lang=en)
27. Eurospace (2023). Eurospace Position Paper: Recommendations for implementation of the EU Space Strategy for Security & Defence – October 2023. <https://eurospace.org/download/5540/?tmstv=1698328271>
 28. EUSPA (2025). GNSS and Secure Satcom. User Technology Report. 28 January 2025. <https://www.euspa.europa.eu/tech-report>
 29. Frąckiewicz, M. (2025a). Global Navigation Showdown: How GPS III, Galileo, BeiDou & GLONASS Upgrades Will Change How You Navigate. TS2. 6 June 2025. <https://ts2.tech/en/global-navigation-showdown-how-gps-iii-galileo-beidou-glonass-upgrades-will-change-how-you-navigate/>
 30. Frąckiewicz, M. (2025b). Satellite Imagery: Principles, Applications, and Future Trends. TS2. 7 June 2025. <https://ts2.tech/en/satellite-imagery-principles-applications-and-future-trends/>
 31. FRONTEX (2023). High Altitude Pseudo Satellites: HAPS Final Report. FRONTEX: European Border and Coast Guard Agency. 2023. <https://www.fronTEX.europa.eu/innovation/eu-research/news-and-events/research-study-on-high-altitude-pseudo-satellites-project-closure-dMPhtc>
 32. Ghanbarzade, A. y Soleimani, H. (2025). GNSS/GPS Spoofing and Jamming Identification Using Machine Learning and Deep Learning. ArXiv:2501.02352. January 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.02352>
 33. Glen, A (2025). GPS Outage – A Navigator’s Nightmare. North Standard. 19 June 2025. <https://north-standard.com/insights-and-resources/resources/articles/gps-jamming-spoofing-and-hacking>
 34. Grest, H. (2022). High-Altitude Platform Systems: Alternative, Supplement, or Competition to Satellites? JAPCC. Journal Edition 34. July 2022. https://www.japcc.org/wp-content/uploads/JAPCC_J34_Art-03_screen.pdf
 35. Gutierrez, P. (2024). GMV-led Project Develops AI-based Jamming and Spoofing Mitigation. December 26, 2024. <https://insidegnss.com/gmv-led-project-develops-ai-based-jamming-and-spoofing-mitigation/>
 36. Hadley, G. (2024). Space Force Is Testing AI to Automate Ops—and Eyeing More. Air&Space Forces Magazine. Dec. 12, 2024 <https://www.airandspaceforces.com/space-force-testing-ai-automate-ops/>
 37. Hao, S., Han, W., Yiang, T., Li, Y. Wu, H., Zhong, C., Zhouy, Z., (2024). Synthetic Data in AI: Challenges, Applications, and Ethical Implications. arXiv.org. 03 Jan 2024. <https://arxiv.org/html/2401.01629v1>
 38. Husain, A. (2024). The Military Applications of Artificial Intelligence in Space. Forbes. Aug 19, 2024. <https://www.forbes.com/sites/amirhusain/2024/08/19/the-military-applications-of-artificial-intelligence-in-space/> (accedido el 4 de enero de 2025)
 39. Huynh, C. (2025). AI on the edge of space. Securing space superiority and avoiding surprise in orbit. CSET (Center for Security and Emerging Technology). June 2025. <https://cset.georgetown.edu/wp-content/uploads/CSET-AI-on-the-Edge-of-Space.pdf>
 40. JOIN (2023). Estrategia Espacial de la Unión Europea para la Seguridad y la Defensa. Comunicación Conjunta al Parlamento Europeo y al Consejo. JOIN (2023) 9. Dirección General de Industria de Defensa y Espacio. 10 marzo 2023. [https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail?ref=JOIN\(2023\)9&lang=es](https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail?ref=JOIN(2023)9&lang=es)

41. Jospin, L. V., Laga, H., Boussaid, F., Buntine, W. y Bennamoun, M. (2022). "Hands-On Bayesian Neural Networks—A Tutorial for Deep Learning Users," in IEEE Computational Intelligence Magazine, vol. 17, no. 2, pp. 29-48, May 2022, doi: 10.1109/MCI.2022.3155327. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9756596>
42. Kirkland, P., Clemente, C., Macdonald, M., Caterina, G., Meoni, G. (2023). Neuromorphic sensing and processing for space domain awareness. Proceedings of the 2023 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2023), 16-21 July 2023, Pasadena, California, USA. <https://researchers.westernsydney.edu.au/en/publications/neuromorphic-sensing-and-processing-for-space-domain-awareness>
43. Kratos (2024). Towards Complete Space Domain Awareness. How RF Data Fills the Gaps in Orbital, Link and Terrestrial SDA. <https://www.kratosdefense.com/download/rf-space-situational-awareness-whitepaper>
44. Kreuzer, T., Papapetrou, P. & Zdravkovic, J. (2024). Artificial intelligence in digital twins—A systematic literature review. Data & Knowledge Engineering, 151, 102304, ISSN 0169-023X, <https://doi.org/10.1016/j.datak.2024.102304>
45. Kurt, G.A., Khoshkholgh, M., Alfattani, S., Ibrahim, A., Darwish, T., Alam, S., Yanikomeroğlu, H., Yongacoglu, A. (2021). A Vision and Framework for the High-Altitude Platform Station (HAPS) Networks of the Future. arXiv:2007.15088v4 [cs.IT] 18 Mar 2021.
46. León, G. (2025). Contexto y repercusión del «Informe Draghi» desde la perspectiva europea de la Defensa y la Seguridad. Serie de monografías y ensayos. Número 13. Academia de las Ciencias y las Artes Militares. Marzo de 2025.
47. Liu, W., Wu, M., Wan, G. y Xu, M. (2024). Digital Twin of Space Environment: Development, Challenges, Applications, and Future Outlook. Remote Sens. 2024, 16(16), 3023; 18 August 2024. <https://doi.org/10.3390/rs16163023>
48. Loizou, C. and Ippolito, V. (2024). Europe's future capabilities in space and in the higher atmosphere. Defence Industry Europe. January 29, 2024. <https://defence-industry.eu/europes-future-capabilities-in-space-and-in-the-higher-atmosphere/>
49. López-García, A. (2024). El efecto de las tecnologías cuánticas en la estrategia de seguridad militar. LISA News. 9 de octubre de 2024. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.lisanews.org/seguridad/el-efecto-de-las-tecnologias-cuanticas-en-la-estrategia-de-seguridad-militar/&ved=2ahUKEwjypbSLnpiLAXVwdqQEHcp6AYcQFnoECBQQAQ&usg=AOvVaw09WO2VXwTPIxnku2_QwyVW
50. Marin, D. (2024). Luna-10, la iniciativa de DARPA para sostener una base lunar. 31 mayo, 2024. <https://danielmarin.naukas.com/2024/05/31/luna-10-la-iniciativa-de-darpa-para-sostener-una-base-lunar/>
51. Martínez, V. & Huss, N. (2022). Digital twins: thought leadership in the satellite industry. University of Cambridge. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.ifm.eng.cam.ac.uk/uploads/Research/2022-03-03-SatDigTwins.pdf&ved=2ahUKEwiluKj0y6eMAXU8Q_EDHdm9N944FBAWegQILxAB&usg=AOvVaw04tBUYNKfQC1cDRiKXlnDr
52. Nakajima, M. (2024). "Parallel neuromorphic computing on space and wavelength division multiplexed photonic processor", Proc. SPIE 12903, AI and Optical Data Sciences V, 129030I. 13 March 2024; <https://doi.org/10.1117/12.2692003>

53. NATO (2024). NATO's Overarching Space Policy, 30 May 2024. https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_190862.htm
54. Neuberger, A. (2025). Spy vs. AI. How Artificial Intelligence Will Remake Espionage. Foreign Affairs. January 15, 2025. <https://www.foreignaffairs.com/united-states/spy-vs-ai>
55. OECD (2023), The Space Economy in Figures: Responding to Global Challenges, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/fa5494aa-en>
56. O'Connor, M. y Curlee, K. (2025). Advanced Space Technologies. Challenges and Opportunities for US National Security. Issue Brief. CSET (Center for Security and Emerging Technology). June 2025. <https://cset.georgetown.edu/publication/advanced-space-technologies/>
57. Panella, C. The US Air Force is teaching AI to navigate aircraft in case GPS gets taken out in a future fight. Business Insider. May 13, 2024. <https://www.businessinsider.com/air-force-teaching-ai-to-navigate-aircraft-gps-is-gone-2024-5>
58. Pasquini, N. (2024). Naval Research Lab Completes Development of Satellite-Servicing Robotics. US Department of Defense. Nov. 15, 2024. <https://www.defense.gov/News/News-Stories/Article/Article/3966145/naval-research-lab-completes-development-of-satellite-servicing-robotics/>
59. Precedence Research (2025). AI in Aerospace and Defense Market Size, Report by 2034. <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.precedenceresearch.com/industry/aerospace-and-defence&ved=2ahUKEwiL4aS14tyKAxU6zwlHHb1xA7UQFnoECBEQAw&usg=AOvVaw2vABIA9xqd-9VvxCuljlpS> (accedido el 3 de enero de 2025)
60. Pultarova, T., (2025). Starlink satellites: Facts, tracking and impact on astronomy. SPACE. January 9, 2025. <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html>
61. Rashed, M. y Bang, H. (2024). Role of AI in nano-satellite constellations for autonomy. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://nanosat11th.itu.edu.tr/assets/papers/ROLE.pdf&ved=2ahUKEwi52OKLw_eKAxVkevEDHe6ol0M4ChAWegQIEBAB&usg=AOvVaw2GdA3UqfULHMk-s4rGYkcd
62. Rijlaarsdam, D. Hendrix, T., Toledano, P., Velasco-Mata, A., Buckley, L., Puig, J., Aragon, O., Dunne, A. (2025). The Next Era for Earth Observation Spacecraft: An Overview of CogniSAT-6. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations And Remote Sensing, VOL. 18, 2025. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=10772069>
63. Rodriguez-Fernandez, V., Carrasco, A. Cheng, J., Scharf, E., Siew, P.M., Linares R. (2024). Language Models are Spacecraft Operators. <https://arxiv.org/pdf/2404.00413v1>
64. Siew, P. and Linares, R. (2022). "Optimal Tasking of Ground-Based Sensors for Space Situational Awareness Using Deep Reinforcement Learning," Sensors 22, no. 20 (October 16, 2022): 7847, <https://doi.org/10.3390/s22207847>
65. Shah, D. (2024). Artificial Intelligence in Addressing Space Pollution. Journals Journal of Research in Mechanical Engineering Volume 10 ~ Issue 2 (2024) pp: 09-13 ISSN(Online):2321-8185 www.questjournals.org
66. Shaw, J. and Kirkpatrick, S. (2024). Future Space Domain Awareness Needs for National Security Space. Center for Strategic and International Studies (CSIS). October 31, 2024 <https://www.csis.org/analysis/future-space-domain-awareness-needs-national-security-space>

67. Slingshot (2024a). Slingshot Aerospace and DARPA Develop New AI System Capable of Detecting Anomalous Satellites. June 5, 2024
<https://www.slingshot.space/news/slingshot-darpa-agatha-ai>
68. Slingshot (2024b). Slingshot's Agatha AI Identifies Outlier Satellite in Group of Chinese Reconnaissance Satellites. September 26, 2024.
<https://www.slingshot.space/news/slingshots-agatha-ai-identifies-outlier-satellite-in-group-of-chinese-reconnaissance-satellites>
69. Space Systems Command (2025). Space Domain Awareness and Combat Power. United States Space Force. <https://www.ssc.spaceforce.mil/Program-Offices/Space-Domain-Awareness-Combat-Power> (accedido el 3 de enero de 2025)
70. Thangavel, K., Sabatini, R., Gardi, A., Ranasinghe, K., Hilton, S., Servidia, P., Spiller, D. (2024). Artificial Intelligence for Trusted Autonomous Satellite Operations. Progress in Aerospace Sciences. Volume 144, 1 January 2024, 100960. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042123000763>
71. Thomson, M. (2025). Satellite Collisions Could Be Prevented With a New AI System. The ESA is combatting space junk with artificial intelligence. IEEE Spectrum. 17 Aug 2025. <https://spectrum.ieee.org/kessler-syndrome-esa-cream-ai>
72. Tingley, B. (2022). "A Chinese Satellite Just Grappled Another and Pulled It out of Orbit," The War Zone. January 27, 2022, <https://www.twz.com/44054/a-chinese-satellite-just-grappled-another-and-pulled-it-out-of-orbit>
73. Tran, J., Puri, P., Logue, J., Jacques, A., Zhang, L., Langeland, K., Nacouzi, G., Briggs, G.J. Artificial Intelligence and Machine Learning for Space Domain Awareness. The Development of Two Artificial Intelligence Case Studies. RAND Corporation. Sep 30, 2024.
https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA2318-2.html
74. Udrea, B. and Campbell, R. (2025). "Neuromorphic Computing and its Application to Space Vehicle Rendezvous and Docking," 2025 Pan Pacific Strategic Electronics Symposium (Pan Pacific), Maui, HI, USA, 2025, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.23919/PanPacific65826.2025.10908950>
75. UE (2023). EU Space Strategy for Security and Defence for a stronger and more resilient European Union. https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-strategy-security-and-defence-stronger-and-more-resilient-eu-2023-03-10_en
76. ViDAR (2025). Passive Wide Area Search For Any Mission. AI Sensors. Visual detection and Ranging (ViDAR). <https://shield.ai/vidar/> (accedido el 4 de enero de 2025)
77. Wainscott-Sargent, A. (2024). Leveraging AI in Space: Experts Assess the Impact on the Defense and Space Domain. Via Satellite. August 2024.
<https://interactive.satellitetoday.com/via/september-2024/leveraging-ai-in-space-experts-assess-the-impact-on-the-defense-and-space-domain>
78. Wald, D. y Fields, K. (2024). Generative AI is Now in Space. Here's Why That's a Big Deal. Air&Space Forces Magazine. Sept. 4, 2024.
<https://www.airandspaceforces.com/generative-ai-space-big-deal/>
79. Waterman, S. (2024). As Space Gets More Crowded, Space Force Needs New AI Tools to Keep Up: Experts. Air&Space Forces Magazine. Dec. 6, 2024.
<https://www.airandspaceforces.com/experts-space-domain-awareness-ussf-ai-tools/>
80. Weeden, B. (2025). U.S. policy decisions that shaped civil and commercial use of GPS. Center for Space Policy and Strategy. The Aerospace Corporation. May 2025.

- <https://csps.aerospace.org/papers/us-policy-decisions-shaped-civil-and-commercial-use-gps>
81. Yu, A., Woo, S., Ahn, H. (2025). Toward transforming space exploration with artificial intelligence neuromorphic computing. Engineering applications of artificial intelligence. Volume 154, Issue C. 12 June 2025
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.111055>
 82. Zhang, L., Langeland, K., Tran, J., Logue, J., Puri, P., Nacouzi, G., Jacques, A., and Briggs, G.J. (2024). Artificial Intelligence and Machine Learning for Space Domain Awareness. Characterizing the Impact on Mission Effectiveness. RAND Corporation. Nov 21, 2024. ISBN: 978-1-9774-1447-2
https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA2318-1.html
 83. Zhihong, J., Xiaolei, C., Xiao, H., Hui, L. Ceccarelli, M. (2022). Progress and Development Trend of Space Intelligent Robot Technology. *SPACE: SCIENCE & TECHNOLOGY*. 25 Jan 2022 Vol 2022. Article ID: 9832053 DOI:
<https://doi.org/10.34133/2022/9832053>

ANEXO 1. Listado de acrónimos

No se incluyen acrónimos relativos a nombres de empresas o universidades, pero sí de organizaciones, programas o proyectos que han sido mencionados en el texto.

1. AAPP: Administraciones Públicas
2. ACAP: Adaptive Compute Acceleration Platform
3. AEE: Agencia Espacial Española
4. AEGIS: Autonomous Exploration for Gathering Increased Science
5. AICA: Autonomous Intelligent Cyberdefence Agent (NATO)
6. AIRIS: Artificial Intelligence Retraining In Space
7. AIS: Automatic Identification System
8. API: Application Interface
9. ARTES: Advanced Research in Telecommunications Systems
10. ASAT: Antisatellite (... weapon)
11. BIC: Business Incubator Centre
12. BNN: Bayesian Neural Network
13. BOC: Binary Offset Carrier
14. BREGO: Block-box for an optimized GNSS spectrum monitoring network using AI
15. B2B: Business to Business
16. B2C: Business to Customer
17. CAGR: Compound Annual Growth Rate
18. CDTI: Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación
19. CSS: Civil Security Space (ESA)
20. DARPA: Defence Advanced Research Programs Agency
21. DEEP: Data Exploitation and Enhanced Processing
22. DEFIS: Dirección General de Industria de Defensa y Espacio (Comisión Europea)
23. DGAM: Dirección General de Armamento y Material
24. DIU: Defence Innovation Unit
25. DL: Deep learning
26. EGNOS: European Geostationary Navigation Overlay Service
27. EIC: European Innovation Council
28. ESA: European Space Agency
29. EuroQCI: European Quantum Communication Infrastructure
30. EUSPA: EU Agency for the Space Programme
31. EW: Electronic Warfare
32. Euro-QCI: European Quantum Communications Infrastructure
33. FAS: Fuerzas Armadas
34. FCAS: Future Combat Air System
35. FRONTEX: European Border and Coast Guard Agency
36. GCS: Galileo Ground Control Segment
37. GEO: Geostationary Earth Orbit
38. GEODSS: Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance
39. GLONASS: Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
40. GNC: Guidance, Navigation and Control
41. GNSS: Global Navigation Satellite Systems
42. GPS: Global Positioning System
43. GSIP: Global Space Innovation Project
44. GT: Grupo de Trabajo

45. HAPS: High Altitude Platform Systems
46. HOPAS: Hybrid Online Policy Adaptation Strategy
47. IA: Inteligencia Artificial
48. IAC: International Astronautical Congress
49. IAF: International Astronautical Federation
50. IMU: Inertial Measurement Unit
51. INS: Inertial Navigation System
52. ILRS: International Lunar Research Station (China)
53. INTA: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
54. IoT: Internet de las cosas
55. IPB: Intelligence Preparation of the Battlefield
56. IRIS²: Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite
57. IRP: Carga Robótica Integrada
58. ISR: Intelligence, Surveillance, Recognition
59. ISS: International Space Station
60. JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency
61. KSP: Kerbal Space Program
62. KSPDG: Kerbal Space Program Differential Games suite
63. LEO: Low Earth Orbit
64. LIDAR: Laser Imaging Detection and Ranging
65. LIME: Local Interpretable Model-Agnostic Explanations
66. LLM: Large Language Model
67. LSTM: Land Surface Temperature Monitoring
68. MDMP: Military Decision-Making Process
69. MEO: Medium Earth Orbit
70. ML: Machine learning
71. MRV: Mission Robotic Vehicle
72. M&S: Modelado y Simulación
73. NASA: National Aeronautics and Space Agency
74. NATO: North Atlantic Treaty Organization
75. NAVWAR: Navigation War.
76. NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration
77. NRO: National Recognition Office (US)
78. NSSA: National Security Space Association
79. OBC: On-board Computer
80. OST: Outer Space Treaty
81. PERTE: Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica
82. PIB: Producto Interior Bruto.
83. PNT: Positioning, Navigation and Timing
84. PNOTS: Programa Nacional de Observación de la Tierra por Satélite
85. QBI: Quantum Benchmarking Initiative
86. QKD: Quantum Key Distribution
87. QuASAR: Quantum-Assisted Sensing and Readout (DARPA)
88. RF: Radio Frequency
89. RINEX: Receiver INdependent Exchange
90. RL: Reinforcement Learning
91. RSGS: Robótica para el Mantenimiento de Satélites Geoestacionarios
92. R2C2: Rapid and Resilient Command and Control
93. SatCen: European Union Satellites Centre
94. SCORE: Signal Corps Orbiting Relay Experiment
95. SDA: Space Domain Awareness

- 96. SDA: Space Development Agency
- 97. SNN: Spike Neural Networks
- 98. SSA: Space Situational Awareness
- 99. STM: Space Traffic Management
- 100. TDOA: mediciones de diferencia de tiempo de llegada
- 101. TEDAE: Asociación española de empresas tecnológicas de defensa, seguridad, aeronáutica y espacio
- 102. TEXBAT: Texas Spoofing Test Battery
- 103. TRL: Technology Readiness Level
- 104. TTPO: Technology Transfer Programme Office (ESA)
- 105. UE: Unión Europea
- 106. URSS: Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas
- 107. US: United States
- 108. USSF: US Space Force

ANEXO 2. Programas nacionales de espacio

Los programas nacionales relacionados con el espacio son¹⁸⁴:

Programa Nacional de Vigilancia y Seguimiento Espacial (S3T).

Tiene como objeto de dar respuesta a la necesidad europea *Space Situational Awareness* de proveer servicios de evitación de colisiones, previsión de reentradas y análisis de fragmentaciones. El programa está gestionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI) para la componente civil y por el Ministerio de Defensa para la componente militar. Además, la Agencia Espacial Europea (ESA) realiza la gestión técnica y de licitaciones asociadas al programa.

Programa Nacional de Observación de la Tierra por Satélite

El Programa Nacional de Observación de la Tierra por Satélite (PNOTS) nace con el objetivo de crear un sistema español de observación de la Tierra para la obtención de imágenes ópticas multiespectrales de alta resolución e imágenes radáricas tomadas bajo condiciones de absoluta oscuridad o climatológicas adversas. El programa está financiado por el Gobierno de España y gestionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, y por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y la Dirección General de Armamento y Material (DGAM) del Ministerio de Defensa.

Las actuaciones específicas para el sector espacial del **PERTE Aeroespacial**¹⁸⁵ son:

- **ACT6. Lanzadores de pequeños satélites.** Adquisición y prueba de un prototipo de lanzador para pequeños satélites que suponga una oportunidad de vuelo para satélites españoles experimentales.
- **ACT7. Constelación Atlántica de observación de la Tierra.** Se enmarca en la cooperación transfronteriza con Portugal. Tiene como objetivo proveer datos de observación de la Tierra sobre el territorio de ambos países a través de una constelación de pequeños satélites que permitirán monitorizar fenómenos como el cambio climático o el ecosistema marino y costero, entre otros.
- **ACT8. Sistemas de satélite y terrestres para comunicaciones cuánticas.** Desarrollo de un sistema de distribución de clave cuántica para operar desde un satélite geoestacionario con comunicaciones institucionales seguras a nivel nacional y europeo.
- **ACT9. Sistema español de Observación de la Tierra para Seguridad y Defensa.** Fortalecimiento de las capacidades nacionales en el ámbito de observación de la Tierra a través del desarrollo de tecnología de uso dual.
- **ACT10. Agencia Espacial Española.** Dirigida a garantizar el desarrollo y ejecución de una política espacial nacional, así como optimizar la gestión de recursos económicos dedicados por España a actividades espaciales.
- **ACT11. Cuota española en la Agencia Espacial Europea.** Proyectos de desarrollo tecnológico en torno a las prioridades de la ESA y de la industria española, con cargo a fondos de la ESA y los retornos en territorio nacional asociados a esta contribución efectuada por España.

¹⁸⁴ <https://www.aee.gob.es/Actividades/Nacionales.html>

¹⁸⁵ <https://www.aee.gob.es/Actividades/PERTEAeroespacial.html>

ANEXO 3. Satélites militares de Francia, Alemania, Italia y Suecia

Fuente: Tabla extraída de Bollfrass, A.K., Sabatino, E. Wiley, C. (2025). Space Capabilities to Support Military Operations in the European Theatre.

Table 1: Selected military satellite systems and ground segments		
Country	Selected military space satellites (national and partnerships)	SIGINT and SSA ground capabilities (radar and laser capabilities)
 France	SIGINT: <i>CERES</i> 1, 2 and 3	GRAVES – Large Array for Space Survey; SSA by 2027
	ISR: CSO-1 and -2; CSO-3 from February 2025; <i>Helios</i> 2A and 2B; <i>Pleiades</i> 1A and 1B (dual role)	SATAM – Dual-role radar sensors and data processing that can be adapted for SSA
	ISR/SSA: YODA – proximity operations demonstrator; launch of two satellites in 2025	French Transportable Laser Ranging Station (FTLRS)
	COMMS: <i>Athena-Fidus</i> ; <i>Sicral</i> 2; <i>Syracuse</i> 3A, 3B, 4A, 5B; <i>Syracuse</i> 4C by 2030	MeO Laser Ranging Station
		CNES Optical Ground Station Demonstrator (FrOGS)
 Germany	ISR: SARah 1, 2 and 3; SAR-Lupe 1, 2, 3, 4 and 5	OGS Technologies optical ground stations
	COMMS: COMSATBw 1 and 2, COMSATBw 3 from 2028–29	Safran Data Systems optical ground stations
		GESTRA – German Experimental Space Surveillance and Tracking Radar
		miniSLR laser ranging station
		Satellite Laser Ranging Station Potsdam
 Italy	ISR: <i>Cosmo (SkyMed)</i> – 3 operational first generation and two second generation; <i>Cosmo</i> SG 3 and 4 starting 2025; launch of IRIDE constellation by 2025–26; OPTSAT-3000	DLR Optical Ground Station in Oberpfaffenhofen
	COMMS: <i>Athena-Fidus</i> ; <i>Sicral</i> 2; <i>Sicral</i> 3A and 3B by 2026–27; <i>Sicral</i> R1, estimated in 2025	Laser-Bodenstation optical ground station in Trauen
		University of the Bundeswehr Munich optical ground station
		BIRALES – Bistatic Radar for LEO Survey
		Matera Laser Ranging Observatory (MLRO)
 Sweden	ISR: Heimdall 0-C by 2027–28	GeoDAF (Geodetic Data Archiving Facility) laser ranging station
	COMMS: Osvon 3	Officina Stellare Optical Ground Stations (OGS)
		Thales SMART-L Multi Mission (MM/F) radar
		Espace Space Center laser ranging station
		NODES – Network of Optical Stations for Data Transfer to Earth from Space optical ground network in development

Source: IISS analysis

ANEXO 4. Ejemplos de proyectos de I+D españoles de uso de IA en el sector espacial

Se han incluido en el presente Anexo 4 **algunos proyectos en ejecución liderados o con participación de empresas españolas que implican el uso de técnicas de IA en el sector espacial**. No se ha pretendido cubrir todos los proyectos existentes, sino dar una muestra de los ejecutados por diversas entidades españolas para mostrar las capacidades tecnológicas alcanzadas. Todos ellos pueden considerarse de uso dual.

Proyecto Miura 5

Otro ejemplo de capacidades españolas es el **Miura** desarrollado por la empresa **PLD Space**¹⁸⁶ pionera y referente en Europa en el desarrollo de cohetes reutilizables, con el desarrollo de la familia de vehículos de lanzamiento **Miura** y la cápsula tripulada **LINCE**. Su colaboración con *Deimos Space* para el desarrollo del sistema de Guiado, Navegación y Control del nuevo cohete **Miura 5**, supone disponer de una tecnología española que permitirá proporcionar misiones dedicadas y opciones de vuelo compartido para pequeños satélites, combinando fiabilidad con una menor complejidad operativa.

Miura 5 es un **lanzador orbital de dos etapas** de la familia **MIURA** diseñado, construido y operado por *PLD Space*. Se prevé culminar la fabricación del cohete Miura 5 a lo largo de 2025 con vistas a poder lanzarlo al espacio durante el primer trimestre de 2026. Dedicado a pequeños satélites puede proporcionar misiones dedicadas y opciones de vuelo compartido, minimizando además las complejidades y los riesgos que suelen surgir cuando se utilizan vehículos de lanzamiento de carga media o pesada. En la figura 73 puede verse una imagen de lanzador y sus posibles configuraciones de carga.



Figura A4.1. Imagen del lanzador MIURA 5 de dos etapas y configuraciones de carga útil. Fuente: <https://www.pldspace.com/es/miura-5>

¹⁸⁶ La empresa fue fundada en 2011 por dos emprendedores, en Elche (Alicante), y en febrero de 2025 ya cuenta con más de 300 empleados. <https://www.pldspace.com/es/nosotros>

Proyecto *BREGO* (Block-box for an optimized GNSS spectrum monitoring network using AI)¹⁸⁷.

Se trata de un proyecto financiado por la ESA y coordinado por la empresa tecnológica española **GMV**.

Su objetivo es el desarrollo de un nuevo **sistema para la detección, clasificación y mitigación de interferencias y suplantación de identidad en tiempo real**. El sistema emplea técnicas optimizadas de procesamiento de señales impulsadas por algoritmos de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (ML). El sistema se ha probado en el laboratorio de GMV en el RU contra conjuntos de datos simulados y TEXBAT (*Texas Spoofing Test Battery*).

En la figura A4.2 pueden verse los resultados obtenidos por el proyecto **BREGO** en los que a la derecha se ve una trayectoria de un objeto sin mitigación de las perturbaciones de navegación y a la izquierda con las interferencias mitigadas.



Figura A4.2. Resultados obtenidos del proyecto BREGO de la ESA. Fuente:

<https://insidegnss.com/gmv-led-project-develops-ai-based-jamming-and-spoofing-mitigation/>

Proyecto MARVISION

Proyecto desarrollado por **Deimos Space**¹⁸⁸.

Este proyecto es uno de los dos únicos seleccionados en el marco de la contratación precomercial de España de servicios de investigación y desarrollo para aplicaciones de rescate marítimo, como parte del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia

¹⁸⁷ <https://insidegnss.com/gmv-led-project-develops-ai-based-jamming-and-spoofing-mitigation/>

¹⁸⁸ <https://deimos-space.com/marvision/#:~:text=Deimos'%20innovative%20approach%20leverages%20the,technological%20innovation%20in%20maritime%20security.>

(PRTR) financiado con fondos europeos. MARVISION también está alineado con la iniciativa PERTE Aeroespacial Española, concretamente en el marco de la Acción ACT9 – Sistema Español de Observación de la Tierra para la Seguridad y la Defensa, abordando el Reto Tecnológico N° 1.

MARVISION entregará un sistema operativo integrado, validado en un entorno preoperacional dentro de un centro de operaciones de la administración pública. Desempeñará un papel fundamental en la toma de decisiones y la evaluación de riesgos de varios organismos gubernamentales, que abarcan áreas como la seguridad nacional, la política exterior, la protección de fronteras, la gestión de crisis, la prevención de desastres y la cooperación internacional con las naciones aliadas.

El enfoque innovador de Deimos aprovecha los últimos avances en inteligencia artificial, particularmente en el procesamiento de datos AIS y satelitales para aplicaciones marítimas. El uso de modelos fundacionales garantiza que MARVISION se mantenga a la vanguardia de la innovación tecnológica en seguridad marítima.

Proyecto CISERES

Liderado por *Indra/Deimos* (parte del grupo INDRA) ¹⁸⁹ con la ESA (firmado en octubre de 2024) como parte del programa de Seguridad Civil desde el Espacio (CSS) de la ESA ¹⁹⁰.

CISERES es una pequeña misión satelital liderada y cofinanciada por Deimos diseñada para mejorar significativamente los tiempos de respuesta a las crisis utilizando IA. La ESA tiene como objetivo en CSS emplear las capacidades de la IA para mejorar la capacidad de Europa para responder de manera más eficaz y rápida a situaciones de seguridad civil y catástrofes. En el proyecto de la ESA tras el acuerdo firmado en octubre de 2024; se trata de una pequeña misión satelital liderada y cofinanciada por Deimos, diseñada para mejorar significativamente los tiempos de respuesta a las crisis utilizando procesamiento de imágenes satelitales a bordo e IA predictiva.

El software de monitorización continua a bordo, mejorado por tecnologías de IA, permitirá el procesamiento de grandes cantidades de datos, reduciendo megabytes de datos a unos pocos kilobytes, proporcionando a los responsables de la toma de decisiones la información más importante y crítica, reduciendo el tiempo necesario para compartir y transmitir los datos. Al aprovechar la IA, el tiempo necesario para compartir dichos datos podría reducirse a menos de un minuto ¹⁹¹.

Ciseres tiene como objetivo mejorar las capacidades de los satélites, permitiendo a los equipos de primera respuesta y a los funcionarios gubernamentales recibir alertas críticas a los pocos minutos de desastres como inundaciones, incendios y deslizamientos de tierra. El software de monitorización continua a bordo, mejorado por tecnologías de IA, permitirá el procesamiento de grandes cantidades de datos, reduciendo megabytes de datos a unos pocos kilobytes, proporcionando a los responsables de la toma de decisiones la información más importante y crítica, reduciendo el tiempo necesario para compartir y

¹⁸⁹ Deimos fue fundada en 2001 con sede en España y subsidiarias en Portugal, Italia, Rumanía y Reino Unido. Desde el 1 de noviembre de 2024, Deimos fue adquirida por Indra y se fusionó con Indra Espacio. <https://deimos-space.com/>

¹⁹⁰ <https://deimos-space.com/ciseres/>

¹⁹¹ <https://deimos-space.com/ciseres/>

transmitir los datos. Al aprovechar la IA, el tiempo necesario para compartir dichos datos podría reducirse a menos de un minuto, lo que podría salvar innumerables vidas.

Plataforma ODALISS

La empresa española denominada **EMAXYS**¹⁹² radicada en Alicante ha desarrollado una plataforma completa de nanosatélites de alto rendimiento con comunicaciones ópticas denominada **ODALISS**.

El objetivo principal es el desarrollo de una plataforma de Minisatélite (Smallsat) y la implementación de un demostrador, en el rango de los 50kg-75kg de peso, orientado a la implementación de aplicaciones de inteligencia artificial en el borde (Edge AI) enfocada al tratamiento de imágenes de la superficie terrestre desde órbita baja (de 400 km a 1.000 km de altura). Se espera lanzarlo en 2025.¹⁹³

La plataforma de nanosatélites ODALISS se basa en un bus de alto rendimiento que permite conectar cargas útiles intensivas en datos en una arquitectura escalable. El bus interno de ODALISS incluye un amplio conjunto de interfaces lógicas y líneas eléctricas (reguladas y no reguladas) para cumplir con las aplicaciones más exigentes. El objetivo es que la Plataforma dotada de altas prestaciones computacionales permita ejecutar aplicaciones de IA en el borde (*edge ai*) desde el espacio. Concretamente, el proyecto **EdgeAISat**¹⁹⁴ implica un salto en el rendimiento computacional de los satélites pequeños. En el marco de este proyecto, EMXYS está desarrollando una arquitectura satelital disruptiva dirigida a aplicaciones de alto rendimiento computacional como la IA y el procesamiento de datos de sensores a bordo combinada con comunicaciones ópticas.

Proyecto INDISPENSATBLE (TSI-064200-2023-0013)

Proyecto desarrollado por la empresa española **Integrasys** en el contexto del programa español “Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia” y el “Mecanismo de Recuperación y Resiliencia”.

INDISPENSATBLE¹⁹⁵ tiene como objetivo desarrollar un **gemelo digital multipropósito** para optimizar y gestionar la integración de **redes NTN en 5G** avanzado a través de enlaces híbridos que combinan radiofrecuencia (RF) e interfaces ópticas. Este gemelo digital permitirá una simulación y caracterización precisas de los enlaces entre estaciones terrestres y satélites en varias órbitas, optimizando la conectividad, la asignación de recursos y la eficiencia de la comunicación, en línea con los estándares avanzados 5G y 6G.

El gemelo digital permite la **monitorización en tiempo real de la constelación de satélites**, optimizando la calidad del servicio a través de la gestión avanzada de enlaces

¹⁹² <https://www.emxys.com/>

¹⁹³ <https://gam.webs.upv.es/index.php/proyectos/proyectos-vigentes/mini-plataforma-de-satelite-de-altas-prestaciones-computacionales-para-aplicaciones-de-inteligencia-artificial-en-el-borde-edge-ai-desde-el-espacio/?lang=es>

¹⁹⁴ El proyecto ha sido cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) dentro del programa operativo FEDER de la Comunitat Valenciana 2021 – 2027

¹⁹⁵ <https://www.integrasys-space.com/projects/indispensatble>

híbridos. INDISPENSATBLE permite el diseño y simulación de sistemas que integran redes satelitales y terrestres, creando una cobertura global para los usuarios en tierra, mar y aire. La implementación de **IA en el gemelo digital** facilita la toma de decisiones en tiempo real sobre las estrategias de transmisión. La IA selecciona las rutas y configuraciones óptimas para maximizar la capacidad de transmisión. Entre las principales contribuciones de la IA se encuentran la **mejora del rendimiento de la simulación a través de algoritmos avanzados de aprendizaje automático**, la anticipación del comportamiento futuro del sistema a través de predicciones basadas en datos y la automatización de la toma de decisiones para seleccionar configuraciones óptimas. Además, la IA facilita el análisis eficiente de los datos obtenidos durante las simulaciones y permite la generación de datos sintéticos realistas, útiles para las pruebas y la validación del sistema.

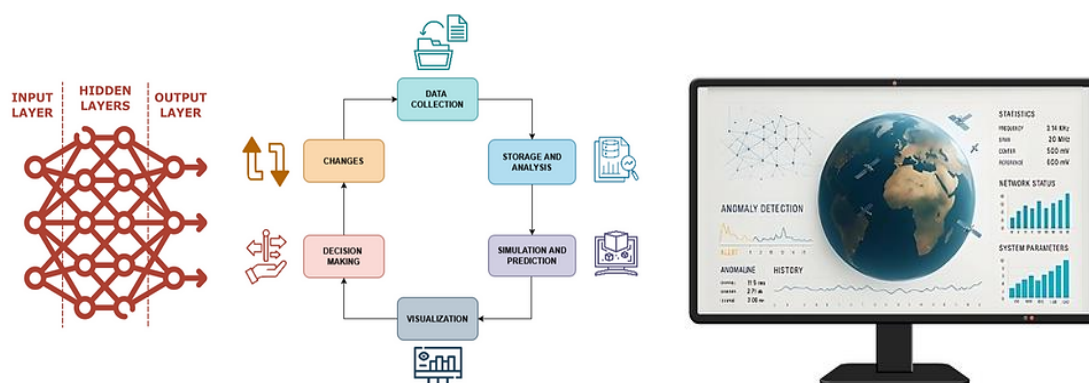


Figura A4.3. Uso del gemelo digital desarrollado en el proyecto INDISPENSATBLE. Fuente: <https://www.integrasys-space.com/projects/indispensable>

Gracias al gemelo digital y al uso de aprendizaje automático, el sistema permite una **monitorización continua y detallada del estado de la red satelital**, detectando anomalías en tiempo real y anticipándose a posibles fallos a través de algoritmos de mantenimiento predictivo. La IA analiza dinámicamente las condiciones operativas, ajustando automáticamente los parámetros del sistema para garantizar una comunicación óptima y estable.

Proyecto FaRADAI: Inteligencia Artificial Frugal y Robusta para Inteligencia Avanzada de Defensa

FaRADAI¹⁹⁶ tiene como objetivo avanzar en las técnicas de IA aumentando su rendimiento general para abordar los desafíos críticos de las operaciones militares. Aunque el proyecto no está directamente ligado al sector del espacio, sus resultados pueden aplicarse a él. Entre los socios participan las siguientes entidades españolas: Indra, Grupo Amper, Tecnalia, UPM.

Para paliar la grave falta de conjuntos de datos en operaciones militares se aprovechará toda la investigación realizada en todos los niveles, desde expandir los conjuntos de datos existentes hasta extraer los resultados requeridos con menos datos y reutilizar el conocimiento que se puede obtener. Siempre que tales operaciones muestren diversidades significativas, se desarrollarán numerosos modelos con los mismos objetivos.

¹⁹⁶ <https://www.indracompany.com/es/indra/faradai-inteligencia-artificial-frugal-robusta-inteligencia-avanzada-defensa>

FaRADAI proporcionará la base de investigación requerida a la industria de defensa y la comunidad de investigación correspondiente para que las tecnologías relevantes puedan adoptarse en futuros sistemas reales. Dichos modelos se centrarán en la detección y el reconocimiento de objetos/objetivos, seguimiento de objetos/objetivos, detección de anomalías, adaptaciones de sensores, segmentación automática y conocimiento inteligente de la situación para cubrir una amplia variedad de objetivos operativos.

Proyecto Aida (Artificial Intelligence Deployable Agent)

El proyecto Aida¹⁹⁷ está financiado por el *Fondo Europeo de Defensa (EDF)* y liderado por **Thales**. Entre sus socios participa Indra Sistemas.

El objetivo de este proyecto europeo, de tres años y medio de duración, es diseñar una IA con capacidad de respuesta autónoma o semiautónoma para proporcionar protección de ciberseguridad a los sistemas de las aeronaves, como los ordenadores de a bordo y los sistemas de guerra electrónica de los aviones de combate, que son vulnerables a ciberataques cada vez más sofisticados en los conflictos de alta intensidad actuales.

AIDA es el primer proyecto marco estructural europeo en apoyo del concepto de la OTAN de *Agente Autónomo de Ciberdefensa Inteligente (AICA)*. Este proyecto de EDF es una respuesta a tres grandes retos a los que se enfrentan las fuerzas armadas en la actualidad: las superficies de ataque están creciendo debido a la digitalización del espacio de batalla; La cadena de detección-respuesta a los ciberataques debe automatizarse debido al uso cada vez mayor de sistemas autónomos como drones y robots; y la IA se está utilizando cada vez más para lanzar y responder a los ciberataques.

Reconocimiento automático de objetivos en imágenes de satélite TerraSAR-X, TanDEM-X y Paz Radar.

Ha sido desarrollado por **AIRBUS**. En tiempos pasados contamos con plataformas más modernas Eurofighter, MRTT, C295, Eurodrone con modernos sensores SAR, pero explorar todos los datos de los sensores requiere un sistema automatizado, por lo que Airbus ha creado una caja de herramientas Airbus ATR para generar clasificadores que faciliten la identificación de objetivos.

Actualmente, este sistema se utiliza en Alemania para el reconocimiento automático de clases de aeronaves y barcos combinando datos de fuentes ópticas y de radar.

Detección de peligros basada en IA para aterrizaje de asteroides

Caso de uso que utiliza IA para la defensa planetaria, con un demostrador que utilizará una selección autónoma de un sitio de aterrizaje seguro para identificar una ubicación segura para un aterrizaje seguro en un asteroide.

A continuación, se enumeran algunos ejemplos concretos de aplicaciones internas de **Airbus** del uso de la IA y la RL en el ámbito del Espacio.

1. Aprendizaje de refuerzo para la planificación de misiones de satélites de observación de la Tierra.

¹⁹⁷ https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/defence-and-security/press_release/protecting-aircraft-artificial-intelligence-thales-and

La planificación de misiones de satélites de observación de la Tierra es un gran problema combinatorio que tiene como objetivo programar un número máximo de imágenes de la Tierra que se tomarán durante la próxima órbita de un satélite.

El plan de la misión debe satisfacer varias restricciones, como el tiempo de maniobra del satélite para pasar de una toma a otra, y también debe tener en cuenta las previsiones meteorológicas, ya que las imágenes nubladas no tienen interés. Además, debe calcularse en un período de tiempo muy corto para que se consideren las solicitudes de imágenes de último momento junto con el último pronóstico de cobertura de nubes disponible. Los solucionadores óptimos no pueden cumplir con esta restricción operativa y es por eso que la planificación de misiones actualmente se realiza utilizando heurísticas artesanales simples pero subóptimas.

Al permitir que un algoritmo de aprendizaje de refuerzo interactúe con un simulador interno, puede aprender a dominar el juego de planificación de misiones de observación de la Tierra y producir planes de misión eficientes.

Los resultados obtenidos en un caso de prueba simple de interés son prometedores y muestran que el algoritmo de aprendizaje de refuerzo es capaz de encontrar mejores soluciones de planificación que el enfoque operativo actual: mejora el número promedio de imágenes planificadas en un pequeño porcentaje, lo que puede generar ganancias significativas. Se esperan avances adicionales para ampliar este enfoque y generar planes de misión para toda una órbita satelital, con el objetivo de construir un demostrador operativo innovador.

2. Control de actitud de una nave espacial con aprendizaje por refuerzo.

En los últimos años, los equipos de **GNC** (Guía, Navegación y Control) de Airbus han estado explorando casos de uso de aprendizaje automático, por ejemplo, modelos sustitutos, detección, aislamiento y recuperación de fallas, navegación basada en visión, pero también aprendizaje de refuerzo para el circuito de control de actitud de una nave espacial.

El trabajo sobre este tema comenzó en 2019 con el **proyecto GNC-v.AI**¹⁹⁸. Un objetivo clave fue asegurarse de que el controlador entrenado fuera robusto, es decir, que pudiera permanecer estable y cumplir con sus requisitos de rendimiento en todas las posibles configuraciones dinámicas del problema (se utilizó la aleatorización de dominio para abordar este problema). El resultado de este primer proyecto aún requirió trabajo manual en tierra en caso de cambios imprevistos, ya que el controlador fue entrenado fuera de línea para cumplir con los requisitos de rendimiento (en los escenarios y configuraciones ambientales previstos).

Estos trabajos condujeron a la creación del algoritmo **HOPAS** (Estrategia híbrida de adaptación de políticas en línea)¹⁹⁹, actualmente en proceso de patente. El objetivo fue entrenar un controlador en línea en la plataforma real, para sus condiciones ambientales

¹⁹⁸ <https://indico.esa.int/event/338/contributions/5724/attachments/4013/5918/1530%20-%20AI4GNC%20ADS%20perspective.pdf>

¹⁹⁹ <https://nebula.esa.int/content/hopas-hybrid-online-policy-adaptations-strategy-ops-sat>

y operaciones específicas, con el objetivo de maximizar el rendimiento. Cuando se probaron en simulaciones de alta fidelidad en el caso de uso de *Solar Orbiter*, se obtuvieron resultados muy prometedores, alcanzando una precisión de apuntamiento mayor que el controlador anterior.

Proyecto Integrasys EO MASTER (EARTH OBSERVATION & OBJECT CHARACTERIZATION TOOL)²⁰⁰

EO Master, introducido en el mercado en mayo de 2024, permite caracterizar objetos en tiempo real para reducir el tiempo y la toma de decisiones en aplicaciones GEOINT mediante la comparación de imágenes con modelos 3D, incluidas, entre otras, las últimas plataformas militares orientales. Actualmente, la observación de la Tierra sobre SAR y óptica se ha vuelto esencial en cualquier guerra de poder a poder, sin embargo, las herramientas son propiedad de cada proveedor o tecnología EO que bloquea a los proveedores y obliga a los usuarios a utilizar múltiples plataformas.

EO Master es el primero en cubrir el procesamiento de imágenes ópticas y SAR y la caracterización de objetivos utilizados por usuarios gubernamentales sin conocimientos profundos de análisis para determinar y comparar patrones reales versus falsos, así como patrones de tráfico y población.

Sus características principales son:

- Inteligencia artificial y aprendizaje automático
- Procesamiento de imágenes para inteligencia geoespacial (GEOINT)
- Conciencia situacional en milisegundos desde la descarga de la imagen hasta la caracterización del objeto

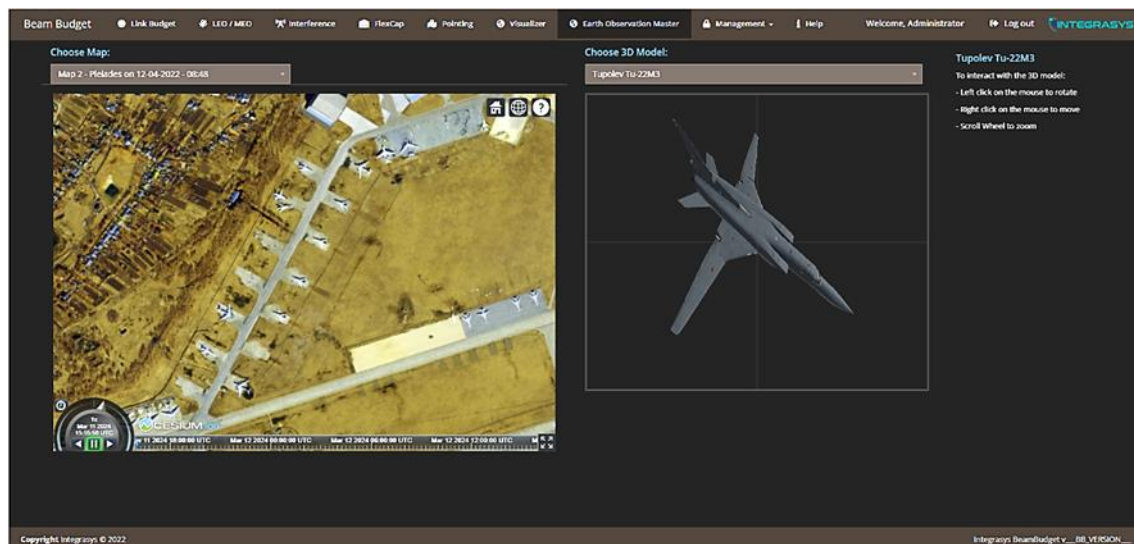


Figura A4.4. Interfaz de usuario. <https://www.integrasys-space.com/post/integrasys-introduces-eo-master-the-ai-ml-object-characterizer>

²⁰⁰ <https://www.integrasys-space.com/post/integrasys-introduces-eo-master-the-ai-ml-object-characterizer>

Proyecto OESIA OPTIMAS²⁰¹

El proyecto europeo, con la colaboración de Tecnobit-Grupo Oesía y liderado por Navantia tiene el objetivo de desarrollar un **sistema avanzado de comunicación óptica en espacio libre para aplicaciones de defensa multidominio**. El proyecto se desarrolla en el marco del programa de trabajo 2023 del *Fondo Europeo de Defensa (EDF – European Defence Fund)*, consolidando la cooperación internacional en innovación tecnológica para la defensa.

Se trata de un proyecto ambicioso que busca dotar a las comunicaciones de alta velocidad de transferencia de datos con un nivel de seguridad excepcional, integrando tecnologías de encriptación de última generación, como la distribución de claves cuánticas (QKD). OPTIMAS **desarrollará sistemas de comunicación láser aerotransportados**, diseñados para operar en constelaciones de satélites y ser aplicables a unidades espaciales, aéreas (drones), navales y terrestres, proporcionando comunicaciones seguras y de alta velocidad.

El demostrador final del proyecto se centrará en lograr comunicaciones ópticas bidireccionales, seguras y de alta velocidad con capacidades avanzadas de apuntamiento, adquisición y seguimiento de satélites en órbitas terrestres bajas (LEO). Asimismo, se explorará su aplicabilidad en órbitas medias (MEO) y geoestacionarias (GEO), ampliando el alcance y las posibilidades del sistema.

OPTIMAS busca establecer un nuevo estándar en la transmisión de datos mediante el uso de tecnología láser aerotransportada. Esta permitirá operar en constelaciones de satélites y otras unidades espaciales, aéreas, navales y terrestres, garantizando comunicaciones de alta velocidad y con un nivel de seguridad sin precedentes.

²⁰¹ <https://grupooesia.com/noticias/arranca-optimas-proyecto-europeo-para-comunicaciones-ciberseguras-en-el-espacio-libre-con-la-colaboracion-de-tecnobit-grupo-oesia/>

ANEXO 5. Actividades de la NASA en Inteligencia Artificial

La información se ha obtenido de la actualización de 7 de enero de 2025 del Inventario de casos de la NASA²⁰²

NASA's use of AI is diverse and spans several key areas of its missions²⁰³:

Autonomous Exploration and Navigation

- AEGIS (Autonomous Exploration for Gathering Increased Science): AI-powered system designed to autonomously collect scientific data during planetary exploration.
- Enhanced AutoNav for Perseverance Rover: Utilizes advanced autonomous navigation for Mars exploration, enabling real-time decision-making.
- MLNav (Machine Learning Navigation): AI-driven navigation tools to enhance movement across challenging terrains.
- Perseverance Rover on Mars – Terrain Relative Navigation: AI technology supporting the rover's navigation across Mars, improving accuracy in unfamiliar terrain.

Mission Planning and Management

- ASPEN Mission Planner: AI-assisted tool that helps streamline space mission planning and scheduling, optimizing mission efficiency.
- AWARE (Autonomous Waiting Room Evaluation): AI system that manages operational delays, improving mission scheduling and resource allocation.
- CLASP (Coverage Planning & Scheduling): AI tools for resource allocation and scheduling, ensuring mission activities are executed seamlessly.
- Onboard Planner for Mars2020 Rover: AI system that helps the Perseverance Rover autonomously plan and schedule its tasks during its mission.

Environmental Monitoring and Analysis

- SensorWeb for Environmental Monitoring: AI-powered system used to monitor environmental factors such as volcanoes, floods, and wildfires on Earth and beyond.
- Volcano SensorWeb: Similar to SensorWeb, but specifically focused on volcanic activity, leveraging AI to enhance monitoring efforts.
- Global, Seasonal Mars Frost Maps: AI-generated maps to study seasonal variations in Mars' atmosphere and surface conditions.

Data Management and Automation

- NASA OCIO STI Concept Tagging Service: AI tools that organize and tag NASA's scientific data, making it easier to access and analyze.
- Purchase Card Management System (PCMS): AI-assisted system for streamlining NASA's procurement processes and improving financial operations.

²⁰² <https://www.nasa.gov/ai-inventory/>

²⁰³ <https://www.nasa.gov/organizations/ocio/dt/ai/2024-ai-use-cases/>

Aerospace and Air Traffic Control

- NextGen Methods for Air Traffic Control: AI tools to optimize air traffic control systems, enhancing efficiency and reducing operational costs.
- NextGen Data Analytics: Letters of Agreement: AI-driven analysis of agreements within air traffic control systems, improving management and operational decision-making.

Space Exploration

- Mars2020 Rover (Perseverance): AI systems embedded within the Perseverance Rover to support its mission to explore Mars.
- SPOC (Soil Property and Object Classification): AI-based classification system used to analyze soil and environmental features, particularly for Mars exploration.

Ethical AI: NASA's Responsible Approach

NASA ensures that all AI applications adhere to Responsible AI (RAI) principles outlined by the White House in its Executive Order 13960. This includes ensuring AI systems are transparent, accountable, and ethical. The agency integrates these principles into every phase of development and deployment, ensuring AI technologies used in space exploration are both safe and effective.

Looking Forward: AI's Expanding Role

As AI technologies evolve, NASA's portfolio of AI use cases will continue to grow. With cutting-edge tools currently in development, the agency is poised to further integrate AI into more aspects of space exploration, from deep space missions to sustainable solutions for planetary exploration.

By maintaining a strong commitment to both technological innovation and ethical responsibility, NASA is not only advancing space exploration but also setting an industry standard for the responsible use of artificial intelligence in scientific and space-related endeavors.

ANEXO 6. Evolución de las capacidades de procesamiento a bordo en satélites utilizando IA

1. Introducción

La **capacidad computacional** se refiere a la capacidad de un sistema informático para realizar cálculos y procesar datos. En cualquier satélite el cálculo principal se realiza en un procesador que tiene restricciones relacionadas con su capacidad para realizar cálculos. Estas restricciones son relevantes porque ya que estos procesadores se eligen teniendo en cuenta su masa, volumen, capacidad para resistir la radiación, patrimonio, seguridad y otros que, a menudo, están relacionados con los requisitos generales de la función del satélite.

Debido a esto el **subsistema de procesamiento a bordo** (*On-board Computer, OBC*) se ha constituido en un elemento clave como se ve en la figura A6.1.

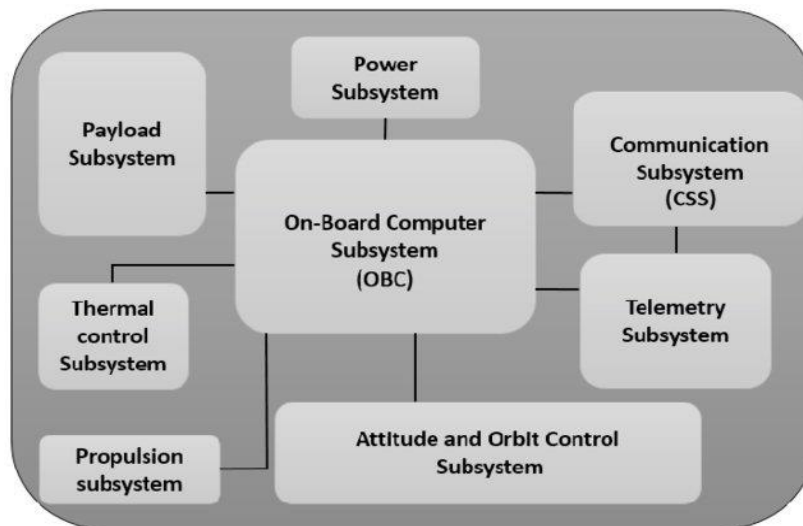


Figura A6.1. Fuente: <https://arxiv.org/html/2501.12030v1>

En todos los ordenadores de a bordo (OBC) tradicionales, la tecnología está retrasado entre 10 y 15 años en comparación con sus homólogos terrestres. Esto hace que incluso el algoritmo de IA más simple funcione demasiado lento y, en algunos casos, ni siquiera sea posible (Evans, 2016). Este problema es crucial en aplicaciones de procesamiento de imágenes satelitales porque es necesario almacenar mucha información y descargarla en un corto espacio de tiempo cuando la estación terrena es accesible desde el satélite.

En la figura A6.2 puede verse un esquema comparativo entre no usar procesamiento a bordo en el que se necesitan varias horas para procesar la información, o con procesamiento a bordo, cerca del tiempo real.

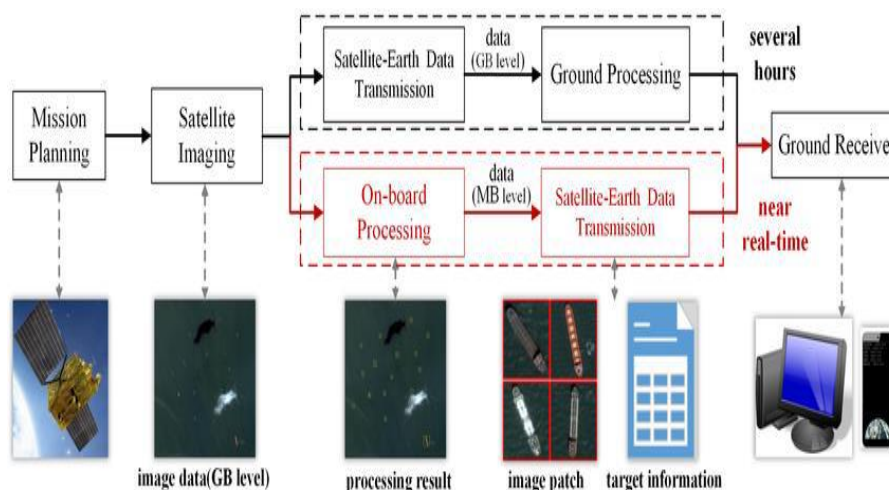


Figura A6.2. Ventajas del uso de procesamiento a bordo de las imágenes satelitales. Fuente: https://assets.science.nasa.gov/content/dam/science/cds/science-enabling-technology/events/2025/accelerating-informatics/PM_6_Ahmad.pdf

El uso del procesamiento a bordo es ahora más relevante. Algunos ejemplos de procesamiento a bordo son:

- la computación de borde en el satélite en el que se calcula directamente algún procesamiento para dispositivos IoT o activos móviles directamente en el satélite en lugar de en una carga, lo que reducirá la latencia y aumentará la seguridad de los datos.
- Otro ejemplo es el análisis de fallos, por lo que sí podemos detectar de forma autónoma los fallos y reducir los modos seguros del satélite, aumentamos la vida del satélite y mejoramos la disponibilidad, lo cual es clave en las constelaciones.
- Otro punto es la “orquestración de la red” (gestión integrada), por lo que en los futuros satélites 6G la red será más compleja, los satélites no serán solo un relevo, sino que muchas operaciones se harán a nivel de satélite, clasificando a los usuarios, optimizando la red.

Uno de los desafíos clave en los sistemas espaciales es que el número de satélites ha aumentado y las operaciones terrestres son más complejas y el número de operaciones está aumentando. Además, se están desbloqueando nuevos modelos de negocio, con más integración vertical que nunca. Por otro lado, el valor de los datos adquiridos con los satélites está estrictamente relacionado con el tiempo que lleva adquirirlos y enviarlos al cliente, por lo que el valor está vinculado al tiempo de la información.

El área de **mejora de la capacidad del procesamiento de datos en órbita** ha ido ganando popularidad, ya que ofrece no solo una reducción de hasta 100 veces en el tamaño de los datos sin pérdida de información relevante, sino también la posibilidad de aplicación en tiempo real, que es clave en la gestión de crisis.

Sin embargo, para ser utilizados de manera eficiente, en primer lugar, los *datos hiper espectrales* entregados requieren un procesamiento rápido para permitir su análisis lo más cerca posible del tiempo real. En segundo lugar, requieren compresión, ya que su tamaño supera significativamente las capacidades del enlace descendente. Teniendo todo esto en cuenta, el mayor reto actual del procesamiento de datos en el espacio es **desarrollar la tecnología que permita su procesamiento y compresión eficientes ya a bordo del satélite.**

2. Procesadores específicos para el espacio

Las computadoras de a bordo son el cerebro de las naves espaciales. Muchas empresas han desarrollado ordenadores de a bordo y unidades de gestión de naves espaciales para numerosos programas de exploración espacial, así como ordenadores de a bordo adaptados a los satélites de observación de la Tierra,

Como ejemplo de **procesadores específicos para el espacio** se puede mencionar el chip **RAD 5545** de **BAE Systems** cuenta con más del doble de velocidad de reloj, ocho veces la memoria y 1.000 veces el rendimiento de punto flotante de su predecesor, el utilizado en el *Mars Curiosity Rover*. Estas mejoras son fundamentales para apoyar la ejecución de algoritmos de IA a bordo. Sobre el chip se han diseñado ordenadores en una única placa como el SpaceXPX²⁰⁴. Véase la figura A6.3 en la que se ve el sistema físico (izquierda) y el diagrama de bloques (derecha).

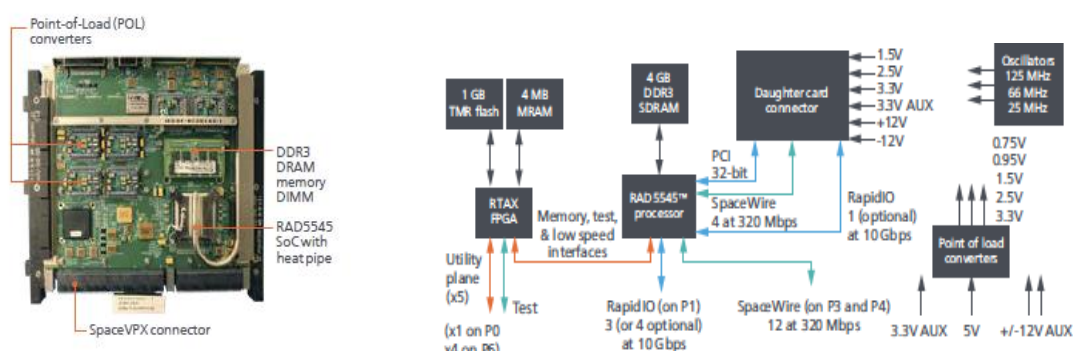


Figura A6.3. RAD5545™ SpaceVPX singleboard computer (SBC). Fuente:

<https://www.baesystems.com/en-us/dam/jcr:cd804739-19fa-43f6-b47a-c58eb18e3bba/17-c09-RAD5545-SpaceVPX-SBC-v1-2-Flight-ds-2025-web.pdf>

Con la expansión de los satélites pequeños (tipo *CubeSat*) y la necesidad de dotarlos de mayor inteligencia, ha sido necesario disponer de procesadores pequeños de bajo consumo. La NASA desarrolló la familia de **FPGA** denominada **Space Cube**. Se trata de una **familia de sistemas de procesamiento a bordo reconfigurables** que mejoran la capacidad, la autonomía y la ejecución de aplicaciones de inteligencia artificial / aprendizaje automático (AI / ML) en el espacio²⁰⁵.

El **procesamiento de datos de la carga útil a bordo mediante inteligencia artificial** permite la selección automática de la información recopilada y, en consecuencia, el enlace descendente de los datos con una importancia clave para el usuario en primer lugar. El volumen de los datos transmitidos a la estación terrena se reducirá significativamente, y los algoritmos utilizados facilitarán la captura de cambios relevantes en las áreas observadas gracias a la capacidad de análisis en tiempo real de diferentes

²⁰⁴ El RAD5545™ ordenador de placa única (SBC) SpaceVPX integra la versión 1.2 RAD5545 procesador de sistema en chip (SoC) con memoria volátil y no volátil en un módulo de formato 6U-220 compatible con el estándar ANSI/VITA 78.00 SpaceVPX. <https://www.baesystems.com/en-us/dam/jcr:cd804739-19fa-43f6-b47a-c58eb18e3bba/17-c09-RAD5545-SpaceVPX-SBC-v1-2-Flight-ds-2025-web.pdf>

²⁰⁵ <https://technology.nasa.gov/patent/GSC-TOPS-241>

tipos de información²⁰⁶. La información enviada de esta manera no solo acortará el tiempo de reacción a los fenómenos observados, sino que también permitirá al usuario final adquirir datos procesados listos para su posterior análisis.

La cantidad de energía generada por un satélite de órbita terrestre baja (LEO) está influenciada por varios factores (por ejemplo, el tamaño del panel solar, la eficiencia y la órbita de los satélites), todos los cuales se tienen en cuenta durante la fase de diseño²⁰⁷. **La ejecución de un modelo de ML a bordo aumentará la demanda de consumo de energía** en un entorno en el que la energía ya está muy limitada y estrictamente gestionada, por lo que esto tendrá que entenderse completamente para garantizar que la generación de energía pueda satisfacer el aumento de la demanda.

Los modelos de ML suelen implicar un gran número (millones) de cálculos, realizados por un **procesador que debe tener suficiente capacidad informática para soportar estos cálculos**. Se trata de un gran paso adelante con respecto a tareas básicas como el control de altitud o el cifrado de datos, y representa un gran obstáculo que hay que superar para apoyar el despliegue en un satélite. Los procesadores que pueden satisfacer esta demanda de cómputo suelen ser una GPU grande, una CPU de varios núcleos o una combinación de las 2 que ocupan un espacio significativo.

Se han realizado muchas investigaciones sobre **estrategias para mitigar estas limitaciones**, incluida la selección de componentes energéticamente eficientes y modelos de aprendizaje automático, junto con la creación y el equilibrio de un presupuesto de energía preciso para todos los consumidores de energía dentro del satélite. Se han creado chips de procesador de baja potencia con excelentes capacidades de cómputo y se han integrado en sistemas lo suficientemente pequeños como para caber en CubeSats integrados.

Se han utilizado varios de ellos a bordo de pequeños satélites para validar su buen funcionamiento. La memoria limitada a bordo se puede mitigar eligiendo un modelo como **SqueezeNet**, que requiere menos de 5 MB²⁰⁸. Además, la aplicación de una serie de técnicas de optimización bien probadas puede reducir drásticamente la huella de combustible sin afectar significativamente el rendimiento. El preprocesamiento de las imágenes integradas también puede reducir la cantidad de memoria asignada para el almacenamiento de imágenes.

²⁰⁶ Se necesitan aproximadamente 7 GB para registrar los resultados de la obtención de imágenes en un área de 40 km x 40 km con una resolución espacial de 25 m/píxel para mediciones espectrales utilizando 150 bandas/canales de longitud de onda. Sin embargo, a través del procesamiento, es posible lograr una reducción de al menos 100 veces la cantidad de datos, por ejemplo, mediante el uso de algoritmos de segmentación de imágenes, que nos permiten generar un mapa que muestra la posición de objetos específicos en la escena. <https://www.kplabs.space/news/what-is-on-board-data-processing> ¶

²⁰⁷ Algunos ejemplos de satélites actualmente en órbita son el Landsat 8, lanzado en 2013, que genera 4,3 KW, o el EMISat, lanzado en 2022, que genera solo 0,8 W. <https://arxiv.org/html/2501.12030v1>

²⁰⁸ SqueezeNet es una red neuronal profunda para clasificación de imágenes lanzada en 2016. SqueezeNet fue desarrollada por investigadores de DeepScale, la Universidad de California, Berkeley y la Universidad de Stanford. <https://medium.com/@avidrishik/squeezenets-architecture-compressed-neural-network-7741d24ca56f>

LEON3 y LEON4 son los nuevos procesadores resistentes a la radiación que se utilizan actualmente en satélites pequeños donde se necesita una mayor fiabilidad (Eickhoff, et al., 2018). Se trata de procesadores multinúcleo, que son mucho mejores en términos de potencia computacional que los procesadores tradicionales. LEON3 se basa en el núcleo SPARC V8 tradicional con procesamiento en tiempo real y puede alcanzar un rendimiento de 2 MFLOPS/1MHz (Frontgrade Gaisler, 2018).²⁰⁹

Como ejemplo, **Airbus Crisa** se ha basado en procesadores LEON3. Junto con estos ordenadores de a bordo **Airbus Crisa** proporciona software de arranque y dependiente del hardware para facilitar el desarrollo de software de aplicación de misión.

Además, parece haber una tendencia al uso de microprocesadores ARM que podrían ser reemplazados por el RISC-V de código abierto, debido a su facilidad de acceso. Muchos de los nuevos Cube-sat utilizan procesadores COTS que proporcionan un rendimiento computacional mucho mayor. LS1046A es un procesador COTS de NXP que se basa en el núcleo Cortex-A72, capaz de alcanzar un rendimiento computacional de 64 MFLOPS/1MHz (Nxp Semiconductors, 2020). En los últimos años, diferentes fabricantes han desarrollado aceleradores que incluyen GPU, FPGA, MPSoC y *Adaptive Compute Acceleration Platform* (ACAP).

Mientras tanto, alternativas comerciales disponibles como *Versal XQR* de AMD y *Jetson Orin NX* y *AGX Orin* de NVIDIA **ofrecen capacidades de IA comparables a una fracción del coste del RAD 5545**. A medida que los chips endurecidos por radiación estén más accesibles, las barreras para implementar sistemas autónomos en el espacio impulsados por IA serán mucho menores. Algunos de los principales aceleradores se enumeran en la tabla A6.1 (Chintalapati et al., 2024).

Acelerador/Plataforma	Fabricante	Tecnología	TOPS	Potencia
Movidius™ Myriad™ 2 (Murphy, et al., 2021)	Intel®	VPU	2	2 W
Movidius™ Myriad™ X (Murphy, et al., 2021)	Intel®	VPU	4	2 W
Google Coral (Murphy, et al., 2021)	Google	TPU	4	2 W
NVIDIA Jetson Xavier NX (Murphy, et al., 2021)	NVIDIA	GPU	21	10 W
Kintex KU060 (Xilinx, 2023)	AMD	FPGA	1.1	~15 W
Versal™ AI Edge (Xilinx, 2023)	AMD	ACAP	23	6–75 W

Tabla A6.1. Selección de aceleradores basados en COTS; con las cifras de Tera Operaciones por Segundo (TOPS) y Consumo de energía.

Dado que la mayoría de los algoritmos de reconocimiento de imágenes utilizan redes neuronales convolucionales (CNN), el 90 % de los cálculos se realizan en las capas de convolución (Furano et al., 2020a, Furano et al., 2020b). Por lo tanto, las CNN son muy intensivas en computación y requieren grandes recursos de memoria y energía.

El reto de seleccionar el acelerador o la plataforma correctos se encuentra en un extremo para respaldar la alta necesidad de computación, la compatibilidad con el

²⁰⁹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117724002886>

marco/herramientas de IA, la compatibilidad con la administración de memoria y otras necesidades de diseño conjunto de hardware / software.

Por otro lado, el nodo acelerador/de cálculo debe ser adecuado para su integración en el satélite que tiene limitaciones ambientales, restricciones térmicas, restricciones relacionadas con la radiación y restricciones relacionadas con la compatibilidad.

En los satélites de Observación de la Tierra, se aplica lo mismo que lo anterior, pero la aplicación de la IA se centra actualmente en los datos de enlace descendente y la reducción de latencia y la detección de nubes. Los casos de uso más complejos son la detección de eventos en tiempo real (detección de inundaciones o incendios en tiempo real, acelerando la información a la estación terrestre en lugar de recibir solo imágenes). Otro caso de uso es el seguimiento autónomo de objetos en tiempo real.

Uso de procesadores neuromórficos

Pensando en el futuro, se ha empezado a probar el uso de **procesadores neuromórficos** para aplicaciones espaciales. Desde un punto de vista teórico este enfoque basado en procesadores para **redes neuronales de impulsos** (*spike neural networks*, SSN) ofrece algunas ventajas en el sector espacial:

- Consumos muy bajo (~100 mW) podrían permitir operaciones 24/7 para satélites pequeños y rovers limitados
- La arquitectura inherentemente paralela admite redundancia y medios teóricos de la información para detectar y enmascarar o corregir errores
- Chips como Loihi (INTEL) incorporan módulos de memoria de corrección de errores que reducen los bitflips incorregibles
- La base probabilística de las redes neuronales es más resistente a fallos que el procesamiento determinista y se puede mejorar aún más con entrenamiento y aprendizaje en chip

En los dos últimos años se ha empezado a explorar el uso de procesamiento neuromórfico en el espacio para aplicaciones en las que esas ventajas son esenciales (Nakajima, 2024), (Udrea y Campbell, 2025), (Yu et al., 2025). Entre ellas, el desarrollo de **cámaras de eventos** que reduzcan la captura de imágenes, u operaciones espaciales dedicadas como es el **acoplamiento visual de naves con imágenes** o mejora de **SDA**.

El proyecto **NEU4SST** (Kirkland et al., 2023), tenía como objetivo explorar la ingeniería neuromórfica, específicamente la **detección visual basada en eventos** con el empleo de redes neuronales de impulsos (SNN), como una solución para mejorar la conciencia del dominio espacial (SDA). Dado que los desechos espaciales plantean riesgos sustanciales para los bienes espaciales, la necesidad de métodos eficientes de vigilancia y predicción de alta resolución es apremiante.

En Alemania el **ARFL** junto con **INTEL** desarrollan el programa de desarrollo y demostración **NICS+6.2**, enfatizando la **integración de tecnologías neuromórficas avanzadas en experimentos espaciales y aéreos para el aprendizaje en el sistema**. El objetivo es evaluar arquitecturas avanzadas con nuevas capacidades para inteligencia artificial, aprendizaje automático y soluciones autónomas para computación en el borde.²¹⁰

²¹⁰ <https://afresearchlab.com/technology/nics>

Concretamente, se ha explorado el uso del chip **Lohi 2** y el software de código abierto **Lava** para desarrollar aplicaciones “neuro inspiradas”.

También se han llevado a cabo experimentos para probar otro procesador neuromórfico, **Akida**²¹¹, en el espacio²¹². Las redes neuronales convolucionales (CNN) tradicionales activan cada capa neuronal en cada paso de tiempo y pueden consumir vatios de energía para procesar flujos de datos completos, incluso cuando nada cambia. Akida adopta un enfoque diferente, procesando solo información significativa. Esto permite la transmisión de IA en tiempo real que funciona continuamente con milivatios de potencia, lo que permite implementar inteligencia siempre activa en dispositivos portátiles, sensores y otros dispositivos alimentados por baterías.

- Datos dispersos: las CNN tradicionales procesan todos los puntos de datos entrantes, independientemente del cambio. Akida filtra la entrada a nivel de hardware y reacciona solo a información nueva o relevante.
- Pesos escasos: los modelos convencionales llevan millones de pesos, incluidos muchos con poco impacto. Akida los poda durante el entrenamiento, lo que reduce los requisitos de memoria y computación.
- Activaciones dispersas: la mayoría de las CNN pasan todas las activaciones hacia adelante. Akida se activa solo cuando la salida cruza un umbral, evitando cálculos innecesarios.

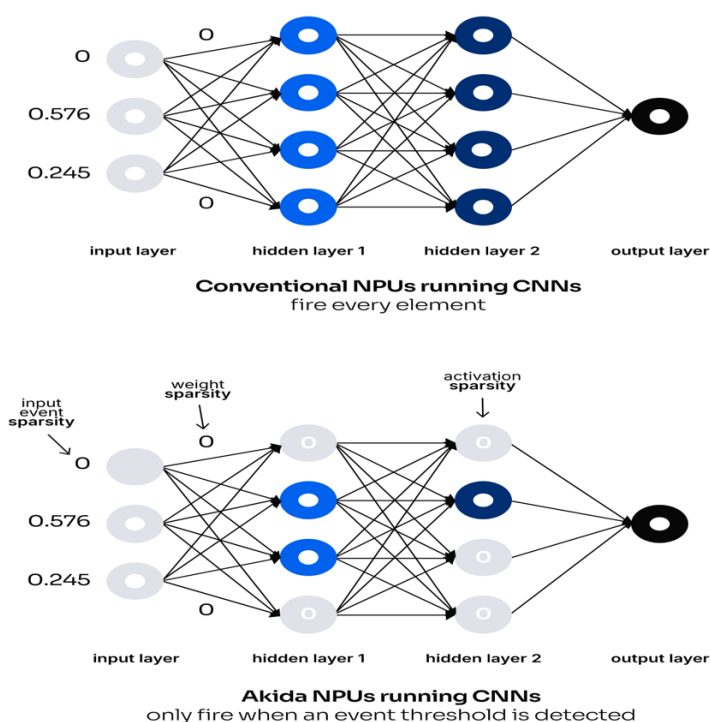


Figura A6.4. Comparación entre CCNs convencionales y con Akida. Fuente: <https://brainchip.com/technology/>

²¹¹ <https://brainchip.com/technology/>

²¹² <https://brainchip.com/akida-in-space/>

El estudio consistió en probar *Akida* en un flujo de trabajo típico de **satélites de observación de la Tierra**, para mostrar el rendimiento y los requisitos de energía que podrían esperarse para la detección basada en el espacio para evitar la transmisión de todas las imágenes al suelo para su posterior procesamiento.

En la misma línea de experimentación, la ESA ha puesto en marcha el proyecto ***Neuromorphic AI Onboard***²¹³. La actividad propuesta implica la definición (fase de definición) de una **unidad de procesamiento de datos de IA neuromórfica a bordo** diseñada para constelaciones de órbita terrestre baja (LEO) de comunicación por satélite (satcom), dirigida a satélites pequeños. La actividad contiene tres capítulos principales de alto nivel:

- Identificación de posibles aplicaciones y escenarios neuromórficos de comunicación satelital.
- Evaluación comparativa preliminar de algoritmos neuromórficos.
- Definir la arquitectura del producto, los requisitos del usuario y las especificaciones técnicas.

El producto en desarrollo incluye un **sistema de procesamiento de alto rendimiento** que combina elementos informáticos tradicionales y neuromórficos para garantizar un procesamiento de datos eficiente y en tiempo real. El diseño modular permite una integración flexible y escalable en varias arquitecturas satelitales. Sus principales características son:

- La **arquitectura del sistema** a desarrollar consiste en un **diseño modular con dos placas** principales interconectadas: la **placa central** y la **placa neuronal**. La placa central es responsable de manejar tareas informáticas de alto rendimiento, mientras que la placa neuronal se enfoca en el procesamiento de IA eficiente y de bajo consumo.
- La arquitectura integra **múltiples unidades de procesamiento**, incluidas CPU, GPU, aceleradores de IA y NPU, para admitir requisitos computacionales diversos e intensivos. Incluye varias interfaces de alta y baja velocidad para una conectividad flexible y soluciones de almacenamiento sólidas para administrar grandes volúmenes de datos.
- Diseñado para **soportar entornos espaciales hostiles**, el sistema incorpora características de seguridad y confiabilidad. El software facilita la implementación y las actualizaciones, lo que garantiza que el sistema pueda adaptarse a las necesidades cambiantes de la misión y los avances tecnológicos.

²¹³ <https://connectivity.esa.int/projects/neuromorphic-ai-onboard>