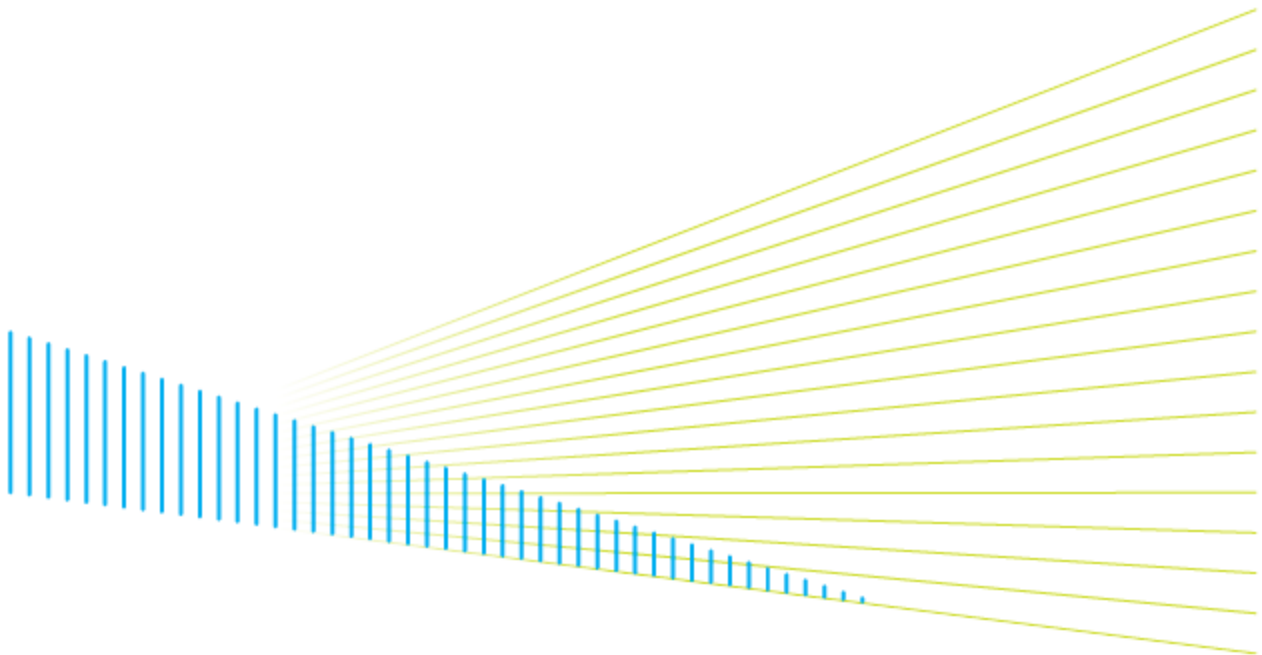


Actualizado a noviembre de 2022

Gestión de Riesgos de Megaconstelaciones en Órbita LEO



Índice

Resumen ejecutivo	1
I. Riesgo de colisión y síndrome de Kessler	5
II. Evaluación del riesgo de colisión.....	6
III. Consecuencias de la colisión	10
<i>a. La naturaleza de los residuos creados por colisiones.....</i>	10
<i>b. La persistencia y las consecuencias de los residuos creados por colisiones.....</i>	13
IV. Límites de modelado que existen con el uso de LEO.....	15
V. Las fuerzas del mercado no son adecuadas para mitigar los riesgos en LEO.....	19
VI. Debe tenerse en cuenta el riesgo agregado presentado por cada sistema LEO	20
VII. Los riesgos de colisión del sistema LEO dependen del número de satélites	22
VIII. Los sistemas de prevención de colisiones no mitigan todos los riesgos	23
IX. Otros problemas medioambientales	25
X. Conclusión	27

Resumen ejecutivo

Una concepción común es: “El espacio es grande. Realmente grande. Simplemente no creerás lo grande, enorme y sorprendente que es”.¹ Sin embargo, la parte del espacio cerca de la Tierra que se puede utilizar para actividades humanas es un recurso finito, frágil y en riesgo de sobreexplotación, al igual que los recursos de la Tierra. Esto es particularmente cierto ahora que el coste del lanzamiento ha caído precipitadamente. Las economías de escala que permiten cargas útiles pequeñas y baratas están impulsando la inversión en naves espaciales económicas, y las normas establecidas que impulsaron un vuelo seguro durante décadas están siendo destruidas.

Con el crecimiento exponencial de los residuos espaciales y el tamaño de las constelaciones de satélites en Low Earth Orbit (LEO), está cada vez más claro que los “recursos” disponibles no serán lo suficientemente grandes como para soportar el funcionamiento seguro y sostenible de un número ilimitado de satélites.

Debido a esto, astrofísicos, astrónomos, científicos, grupos de expertos, legisladores, políticos y reguladores por igual, están expresando preocupación por la creciente congestión en la órbita LEO y por un comportamiento indebidamente arriesgado:

¹ D. Adams, *La guía de los lanzadores al Galaxy* (Nueva York: Harmony Books, 1979), en 73.

“Estamos haciendo tanto desorden en el espacio que rodea a nuestro planeta como en el propio planeta”.²

“Es una carrera hasta el límite en términos de conseguir todo lo posible para reclamar recursos orbitales”.³

“El acaparamiento de todo el territorio bueno es una queja razonable”.⁴

“El surgimiento de mega-constelaciones en órbita terrestre baja plantea el riesgo de negar el acceso a la órbita LEO y al espectro radioeléctrico al imposibilitar operar allí de forma segura y sostenible. Debería preocuparnos a todos y es hora de hacer algo al respecto”.⁵

“Cuando lanzamos docenas de satélites en pocas semanas, eliminamos la capacidad del entorno de informarnos de las consecuencias no deseadas de nuestras acciones, y no podemos predecir cuál es realmente el estado de equilibrio dinámico”.⁶

“A medida que el entorno orbital de la Tierra se congestiona cada vez más, las preocupaciones sobre su sostenibilidad a largo plazo, la posible sobreexplotación y el riesgo de interferencia se están volviendo cada vez más claros y compartidos entre los legisladores, los líderes de la industria y el mundo académico”.⁷

“Ahora nos encontramos en una encrucijada: si no encontramos formas de gestionar el tráfico espacial, nuestras actividades espaciales pasadas y presentes pondrán en peligro la seguridad y sostenibilidad del espacio exterior y, como resultado, a nuestra capacidad futura de confiar en el espacio como facilitador de servicios clave en beneficio de la humanidad”.⁸

² H.E. S. Bint Yousif Al Amiri, Ministro de Estado de Tecnología Avanzada, EAU, <https://www.economist.com/the-world-ahead/2020/11/17/easier-access-to-space-imposes-new-environmental-responsibilities-on-humanity>.

³ Dr. M. K. Jah, profesor adjunto, Departamento de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Ingeniería, Universidad de Texas en Austin, https://www.wsj.com/articles/elon-musks-satellite-internet-project-is-too-risky-rivals-say-11618827368?mod=searchresults_pos1&page=1.

⁴ Dr. J. McDowell, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, <https://www.theverge.com/2021/1/27/22251127/elon-musk-bezos-amazon-billionaires-satellites-space>.

⁵ M. Alotaibi, Gobernador Adjunto de Radio Spectrum, Comisión de Comunicaciones y Tecnología de la Información de Arabia Saudí (CITC), <https://www.spaceintelreport.com/saudi-regulator-itu-must-address-leo-crowding-debris-and-sustainability-before-the-orbit-is-rendered-unusable/>.

⁶ A. Lawrence, M. L. Rawls, M. Jah, A. Boley, F. Di Vruno, S. Garrington, M. Kramer, S. Lawler, J. Lowenthal, J. McDowell y M. McCaughrean, El caso del medioambientalismo espacial, NATURE ASTRONOMY (22 de abril de 2022), <https://www.nature.com/articles/s41550-022-01655-6>.

⁷ Instituto Europeo de Política Espacial, Capacidad *del Espacio y Medio Ambiente: Perspectivas políticas, normativas y diplomáticas sobre modelos basados en umbrales para la seguridad y sostenibilidad espaciales* (11 de abril de 2022), en 39, <https://www.espi.or.at/reports/space-environment-capacity/>.

⁸ Comisión Europea, Comunicación Conjunta al Parlamento Europeo y al Consejo: Un enfoque de la UE para la gestión del tráfico espacial; una contribución de la UE para abordar un desafío global (JOIN (2022) 4 final), en 1, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022JC0004&from=EN>.

“[Se necesitan urgentemente cambios nacionales e internacionales significativos en el uso del espacio cercano para preservar el acceso y la utilidad futura de los valiosos recursos naturales del espacio y de nuestros cielos compartidos”.⁹

Estos expertos están hablando de (i) la pérdida de acceso seguro a la órbita LEO, (ii) la monopolización de recursos orbitales por parte de algunos actores, (iii) el daño al cielo nocturno, la atmósfera de la Tierra y el medio ambiente humano, y (iv) la amenaza resultante para el funcionamiento continuo, seguro y fiable, y la futura implementación innovadora de sistemas espaciales en todo el mundo. Esto incluye sistemas espaciales en los que confían por igual los consumidores, empresas comerciales, la investigación científica y la defensa, incluidos aquellos que proporcionan comunicaciones vitales, posicionamiento, navegación, sincronización (PNT) y datos y servicios de observación de la Tierra.

Las preocupaciones de estas voces líderes reflejan la realidad de que existen límites sobre los tipos y cantidad de satélites que pueden ocupar la órbita LEO de forma sostenible.

La reciente población sin precedentes de la órbita LEO está provocando congestión que aumenta significativamente el riesgo de colisiones, lo que puede tener un amplio y duradero impacto en el acceso al espacio por parte de todos, incluso en órbitas muy por encima y por debajo de los puntos de colisión. Cabe destacar que el riesgo de colisión es creado por más que tan solo los satélites que no son maniobrables. Es un riesgo agregado que se escala con el tamaño de la constelación, y está impulsado por factores como (i) la masa y el área transversal de los satélites en el sistema (considerando los efectos de los cambios en el diseño inicial y a lo largo del tiempo), y (ii) el número esperado de conjunciones (*es decir*, “llamadas cercanas”) con satélites en funcionamiento, satélites por desorbitar, y otros residuos orbitales durante la vida orbital de cada satélite del sistema, y en cada órbita que ocupan, desde el lanzamiento hasta la reentrada en la atmósfera de la Tierra.

Cabe destacar que el número de objetos de residuos espaciales rastreables y no rastreables es grande y sigue creciendo. También lo hace el número de eventos de conjunción previstos. Esto significa que incluso un evento de baja probabilidad puede ser probable que ocurra cuando se evalúa la totalidad de un sistema de órbita LEO, y el agregado de todos los objetos espaciales que encuentra durante la vida útil de ese sistema LEO.

Esta creciente congestión también afecta las órbitas LEO que pueden ser utilizadas por otras naciones para operar sus satélites y los términos bajo los cuales se pueden compartir esas órbitas.

Cuando el coste de acceder al espacio era elevado, el interés propio motivaba estándares de atención rigurosos debido al coste proporcional del fracaso. El término “calificado para el espacio” alguna vez significó los más altos estándares de calidad y confiabilidad de la industria, incluso en las duras condiciones del espacio. Esos altos costes y riesgos una vez fomentaron un ecosistema seguro, porque el número de objetos en el espacio era limitado y las herramientas para gestionarlos eran adecuadas.

⁹ J. C. Barentine, et al., Reimagining Near-Earth Space Policy in a Post-COVID World, Virginia Policy Review, Vol. XV, número 1 (primavera de 2022), en 59, https://issuu.com/virginiapolicyreview/docs/virginia_policy_review_volume_xv_issue_i.

Con barreras económicas superadas, el interés propio y el bien público están divergiendo rápidamente. Como ha reconocido la Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos (FCC), el nuevo enfoque adoptado por algunos operadores tiene el potencial de crear externalidades negativas significativas, porque los costos de las operaciones insostenibles e inseguras de un operador no son asumidos en su totalidad, ni si quiera en su mayor parte, por ese operador.¹⁰ En su lugar, esos costes son asumidos por todos los que utilizan o se benefician del uso del espacio. En consecuencia, se incentiva a ciertos operadores individuales a priorizar sus propios intereses a corto plazo por encima de los intereses a largo plazo en el uso del espacio por parte de todos¹¹: una verdadera tragedia de los bienes Comunes.

Dados los potentes incentivos económicos, simplemente no podemos confiar en las “mejores prácticas” o directrices (ya sean creadas a nivel nacional o internacional) para producir los resultados correctos, es decir, sostenibles, seguros y responsables.

Como enfatizan algunos líderes expertos y una institución legal prominente, (i) necesitamos tomar medidas preventivas ahora a nivel nacional porque simplemente no *alcanzaremos el consenso internacional a corto plazo*,¹² y (ii) es fundamental abordar los posibles daños nacionales en la etapa de licenciamiento o acceso al mercado, porque son “una de las decisiones muy particulares, si no la única, adoptadas por [una nación] que condiciona la prestación de servicios [satélites]” en su territorio.¹³

A menos que los reguladores hagan responsables a los operadores de operar de manera segura y sostenible, corremos un grave riesgo de llegar pronto a un punto de inflexión que deje a la órbita LEO inutilizable durante décadas, o incluso siglos. Las organizaciones internacionales están empezando a tomar nota, pero se está haciendo muy poco. Mientras

¹⁰ Véase, por ejemplo, *Mitigación de residuos orbitales en la nueva era espacial*, Notificación de reglamentación propuesta y Orden de reconsideración, 33 FCC Rcd 11352 (2018), en ¶ 89, <https://www.fcc.gov/document/fcc-launches-review-rules-mitigate-orbital-space-debris-0> (“La generación de residuos por actividades en órbita es una externalidad negativa, y es una que podría conducir a la degradación de los comunes del entorno orbital de la Tierra”).

¹¹ *Id.* (“Aunque el problema de los residuos es una consideración significativa para el uso a largo plazo de los recursos orbitales, dichas consideraciones pueden no desempeñar un papel significativo en la toma de decisiones económicas a corto plazo. Los operadores satelitales individuales pueden tener interés en preservar el entorno orbital terrestre para sus operaciones continuas, pero el deseo de evitar los costos a corto plazo asociados con la desorbitación de satélites para mitigar el riesgo de residuos podría anular esos intereses a largo plazo. Dados estos incentivos, a largo plazo, es probable que la población de residuos continúe creciendo y podría dar lugar a un aumento exponencial de la población de residuos de modo que el uso de ciertas configuraciones orbitales valiosas ya no sea económicamente viable”).

¹² R. Buchs, *Opciones de política para abordar el riesgo de colisión por residuos espaciales*, Lausana: El Centro Internacional de Gobernanza de Riesgos de EPFL (2021), en ii, <https://infoscience.epfl.ch/record/290171?ln=en> (“Dado que la perspectiva de alcanzar un consenso a corto plazo es muy baja, se aconseja a los gobiernos que tomen medidas unilaterales pero coordinadas mejorando sus normativas nacionales”).

¹³ Le Conseil d’État invalidación del acceso al mercado de Starlink, conclusiones del ponente, Caso n.o 455321, 5 de abril de 2022 (Francia).

tanto, un pequeño número de actores compiten para llenar el cielo y monopolizar órbitas valiosas.

La clave para evitar catástrofes es reducir el riesgo de colisión desde el principio, requiriendo que los sistemas de órbita LEO operen dentro de perfiles de riesgo razonables. Cada nación que autoriza sistemas ya sea para ocupar la órbita LEO o para tener acceso a sus dominios nacionales en, o por encima de la Tierra, puede definir y aplicar políticas para garantizar que esos sistemas sean seguros. Una mejor conciencia situacional del espacio y la gestión del tráfico espacial son útiles, pero al igual que la aviación en la Tierra, existen límites en la densidad del tráfico espacial que se puede gestionar de forma segura. El problema principal es aglomerar demasiados objetos en regiones espaciales valiosas por tan solo una o dos naciones individuales o actores comerciales.

No es necesario aceptar estos riesgos o consecuencias. Los sistemas innovadores pueden ofrecer un mejor servicio, garantizar la sostenibilidad del espacio y permitir que todas las naciones compitan y ganen su lugar de forma justa en la economía del Nuevo Espacio. Se han desarrollado herramientas analíticas que nos permiten comprender las consecuencias de implementar ciertas constelaciones LEO antes de colocarlas en órbita. Los reguladores nacionales tienen el poder de garantizar que los sistemas que autorizan o permiten servir en sus países no supongan una amenaza para sus propios intereses nacionales, o para la seguridad espacial, y que múltiples actores puedan compartir los recursos orbitales limitados de la órbita LEO de forma equitativa.

I. Riesgo de colisión y síndrome de Kessler

El rápido ritmo de lanzamientos de satélites destinados a ocupar grandes porciones de órbitas LEO está creando conciencia sobre el síndrome de Kessler. El síndrome de Kessler, presentado por primera vez por Donald J. Kessler de la NASA en 1978, se produce cuando la reacción positiva (*es decir, colisiones en cascada*) conduce a un crecimiento exponencial en la densidad de residuos espaciales. La densidad de residuos aumenta después de cada colisión, lo que aumenta la tasa de colisiones futuras y aumenta aún más la densidad de residuos hasta que la tasa de colisión se vuelve tan alta que impacta a todos los satélites. Como se analiza a continuación, estudios recientes muestran que esto es una amenaza real debido al diseño de ciertas mega-constelaciones de órbita LEO.

La naturaleza insidiosa de la reacción positiva es que podemos llegar a un punto de inflexión donde el síndrome de Kessler se vuelve inevitable sin siquiera darnos cuenta. Si se alcanza un punto de inflexión, toda la humanidad observaría de forma impotente como la basura espacial se multiplica incontrolablemente. Sin una intervención oportuna, nos arriesgamos a poner fin a la era espacial y a atrapar a la humanidad en la Tierra bajo una capa de su propia basura por siglos, o incluso milenios. No solo un fin abrupto de la exploración espacial, sino también la pérdida de todos los beneficios de la tecnología espacial, incluida la navegación, la previsión meteorológica, las mediciones del clima e incluso la banda ancha satelital (el propósito previsto de las mega-constelaciones que se están implementando). Lejos de hacer de la humanidad una especie multiplanetaria, el síndrome de Kessler pondría fin a esa visión.

Por supuesto, aumentar la conciencia sobre estos riesgos es diferente de aumentar el entendimiento que permite una intervención oportuna y adecuada. La combinación de las consecuencias irreversibles del síndrome de Kessler y el ritmo acelerado de lanzamientos de satélites de mega-constelación en la órbita LEO, hace que sea imperativo (como se analiza más adelante), que empleemos un modelo utilizando métricas cuantitativas que nos ayuden a comprender tanto lo cerca (o distante) que estamos de un punto de inflexión, así como lo rápido que nos estamos acercando a él. Esas mismas métricas también pueden ayudarnos a entender cómo mitigar la situación, por ejemplo, aplicando requisitos adecuados de seguridad y sostenibilidad del espacio a una constelación de órbita LEO antes de que se autorice el prestar servicios sobre un territorio.

Se puede modelar el síndrome de Kessler para que se produzca cuando el número de objetos en el espacio crezca sin límites, o equivalentemente, cuando la tasa de colisión se vuelve infinita (Figura 1). Al observar la tasa de colisión, y sus derivados con respecto a los factores contribuyentes, nos indica qué factores debemos ajustar para evitar catástrofes, o al menos retrasarlas (al cambiar la curva sustancialmente a la derecha).

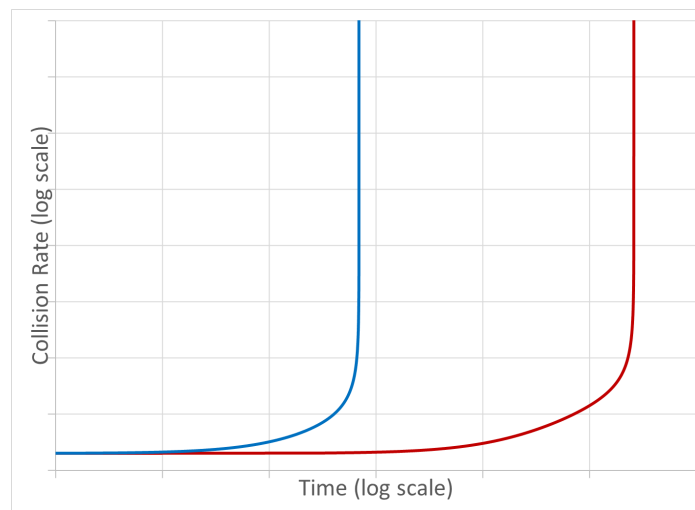


Figura 1. Gráfico Log-Log de la tasa de colisión frente al tiempo (dos curvas con diferentes puntos de inclinación)

De hecho, solo a través de las mediciones cuantitativas habilitadas por este modelo predictivo podemos esperar comprender qué pasos son necesarios para garantizar que podamos maximizar el uso de recursos orbitales limitados y compartidos, al tiempo que creamos un entorno operativo seguro y sostenible del que las generaciones futuras puedan beneficiarse.

Hasta que sepamos dónde nos encontramos, nos arriesgamos a tratar los síntomas del problema y a no abordar la causa raíz, especialmente si nos centramos en asuntos como la gestión del tráfico espacial (STM), la conciencia situacional espacial (SSA) y la eliminación de grandes residuos (como cuerpos de cohetes) fuera del contexto de un modelo predictivo útil.

II. Evaluación del riesgo de colisión

Los riesgos de colisión en la órbita LEO se analizan adecuadamente a lo largo de ciclos orbitales de vida. Los sistemas grandes se implementan gradualmente y los satélites se reponen a medida que fallan, alcanzan el final de su vida útil y se reemplazan por modelos más capaces. Se puede suponer razonablemente que esta reposición continuará hasta que el sistema ya no sea económicamente viable. El resultado es un proceso continuo de elevación y puesta en fase de la órbita, y una combinación de desorbitación activa y pasiva. Además, se pueden esperar cambios en el entorno operativo a lo largo de la vida útil de un sistema que aumenten el riesgo de colisión, a medida que se lanzan más satélites en la órbita LEO, que se propagan los residuos existentes y que los satélites fallan o explotan.

Como muestran los datos resaltados en la Tabla 1, los operadores de seis grandes constelaciones de órbita LEO recibirán individualmente casi de 1 millón a más de 10 millones de advertencias de conjunción espacial (encuentros) al año, lo que requiere de casi 100 000 a más de 1,2 millones de maniobras al año para intentar evitar un total de 695 colisiones durante 15 años, que de otro modo se esperarían que ocurrieran.¹⁴ A medida que mejore el rendimiento de los sistemas de vigilancia espacial, el número de objetos rastreados aumentará drásticamente hasta alrededor de los 200 000 (desde los 24 243 actuales) conforme el tamaño rastreable disminuya de 10 cm a 2 cm, aumentando el promedio de encuentros en la Tabla 1 en un factor de 8 a 12.¹⁵ A pesar de permitir que se esquiven más objetos, este desarrollo aumentaría la carga sobre los sistemas de STM en un orden de gran magnitud, aumentando las probabilidades de que un error humano, de software o de máquina tenga consecuencias catastróficas.

¹⁴ SpaceX, como operador de sus constelaciones Gen1 y Gen2 Starlink, recibiría casi 11 millones de advertencias al año (o un promedio de una cada 3 segundos), lo que requeriría más de 1,2 millones de maniobras al año (o un promedio de una cada 26 segundos) para evitar un promedio de 30 colisiones al año.

¹⁵ D. L. Oltrogge, Keeping Space Sustainable for Current and Future Generations, Space Generation Advisory Council (SGAC) Conference, París, Francia (15 de septiembre de 2022), en 31, <https://comspoc.com/Resources/Content/>.

Constelación	Altitud (km)	Inc. (°)	#Satellites	Encuentros promedio a lo largo de 15 años		
				Advertencias	Maniobras	Colisiones
Amazon Kuiper	590 - 630	33 - 51.9	3,236	8,500,000	945,000	24
Ciencia AST	700	98	243	1,460,000	163,000	4
Astra	380 - 700	0 - 98	13,620	24,154,000	2,685,900	67
Espacio Galaxy	500	63.5	1,000	4,430,000	493,000	12
Guangwang	508 - 1145	30 - 85	12,992	31,915,000	3,546,000	89
Hughes HVNET	1150	55	1,440	986,000	110,000	3
Iridium	778	86.4	75	725,000	80,400	2
Lynk	500	97.5	2,000	15,500,000	1,730,000	43
OneWeb	1200	55 - 87.9	716	2,168,000	241,100	6
OneWeb Gen2	1200	40 - 87.9	6,372	14,270,000	1,576,000	39
Sfera	870	98	640	4,860,000	540,000	14
SpaceX Gen1	540 - 570	53 - 97.6	4,408	75,420,000	8,366,000	209
SpaceX Gen2	340 - 614	33 - 148	29,988	86,314,000	9,914,600	248
SpaceX VLEO	335 - 346	42 - 53	7,518	7,760,000	861,000	22
GIRAR	830	55	1,190	7,090,000	788,000	20
Telesat Gen2	1015 - 1329	50 - 99	1,671	1,380,000	153,800	4
Telesat Gen1	1015 - 1329	50 - 99	298	288,500	32,070	1

Tabla 1. Número medio de encuentros a lo largo de 15 años (Catálogo actual de 24.243 objetos)¹⁶

Cada vez que un operador no maniobra un satélite en respuesta a una advertencia de conjunción de baja probabilidad, existe un riesgo de colisión distinto de cero. Además, cada vez que un operador realiza una maniobra, existe otra probabilidad distinta de cero de que la maniobra provoque una colisión. En ambos casos, con millones de advertencias conjuntas cada año, incluso los eventos extremadamente raros (“six sigma”) pueden llegar a ser probables.

Los satélites que no pueden maniobrar no pueden evitar colisiones. Esto, independientemente de si la colisión es con otros satélites no maniobrables del mismo sistema LEO, con satélites inactivos de un tercero, o con residuos orbitales de cualquier forma o tamaño.

La pérdida de maniobrabilidad puede deberse a fallos de subsistemas del satélite en la cadena de maniobra (*p. ej.*, propulsión, comando) o a colisiones que deshabilitan estos subsistemas. Los riesgos de fallo pueden mitigarse con redundancia de subsistemas, componentes calificados para el espacio y pruebas previas al lanzamiento. Pero no todos estos riesgos pueden mitigarse. Por lo general, se reconoce que el blindaje no es un medio viable de proteger los satélites comerciales contra las consecuencias de las colisiones con el 1 000 000 (y contando) de residuos estimados de entre 1 cm y 10 cm que es poco probable

¹⁶ Generado con la herramienta de evaluación del número de encuentros (NEAT) de COMSPOC, <https://comspoc.com/neat/>, el 15 de octubre de 2022 con parámetros de constelación del Dr. Jonathan McDowell's Space Pages, <https://planet4589.org/space/stats/conlist.html>, consultado el 15 de octubre de 2022. El análisis de la NEAT es conservador, ya que evalúa solo los encuentros con objetos espaciales rastreables existentes; no tiene en cuenta (i) los encuentros con residuos letales no rastreables (*es decir*, menores de 10 cm, como se describe a continuación), (ii) las consecuencias de las colisiones, incluido el aumento y la propagación de nuevos fragmentos de residuos causados por colisiones, o (iii) la introducción de constelaciones satélite adicionales.

que se rastreen,¹⁷ por lo que no se pueden evitar, y que pueden hacer que los satélites no sean maniobrables o incluso destruirlos, fragmentándolos en miles de piezas. Los riesgos de colisión con objetos más pequeños (<1 cm) se pueden mitigar con un diseño adecuado que incorpora redundancia y blindaje de subsistemas.

Los 19 400 objetos de residuos que las redes¹⁸ de vigilancia espacial rastrean regularmente representan solo un *pequeño* porcentaje de todos los objetos de residuos. El número total de objetos residuales estimados por modelos estadísticos y su efecto potencial en los satélites con los que colisionan se muestra en la Tabla 2.¹⁹

Tamaño del objeto de residuos	Número en órbita	Efecto de la colisión en el satélite activo
>10 cm	36,500	Catastrófico
De 1 cm a 10 cm	1,000,000	Puede ser catastrófico o hacer que no sea maniobrable
De 1 mm a 1 cm	130 millones	Puede hacer que no sea manejable

Tabla 2. Efectos de colisiones satélite con residuos

El entorno de residuos evoluciona naturalmente con el tiempo a medida que los objetos se deterioran, los satélites activos se vuelven no maniobrables (pasivos) y los nuevos objetos se crean mediante colisiones entre objetos de residuos. Las colisiones de satélites con objetos grandes suelen ser catastróficas, fragmentando los objetos y provocando un aumento gradual de la población de residuos; consulte la Figura 2. Además, las etapas superiores y los proveedores asociados con los lanzamientos iniciales y de reposición se suman a la población de residuos.

¹⁷ Agencia Espacial Europea, “Estadísticas del entorno espacial: Space Debris by the Numbers”, última actualización: 11 de agosto de 2022), <https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics/>.

¹⁸ Visite [Space-Track.Org](https://space-track.org).

¹⁹ *Id.*

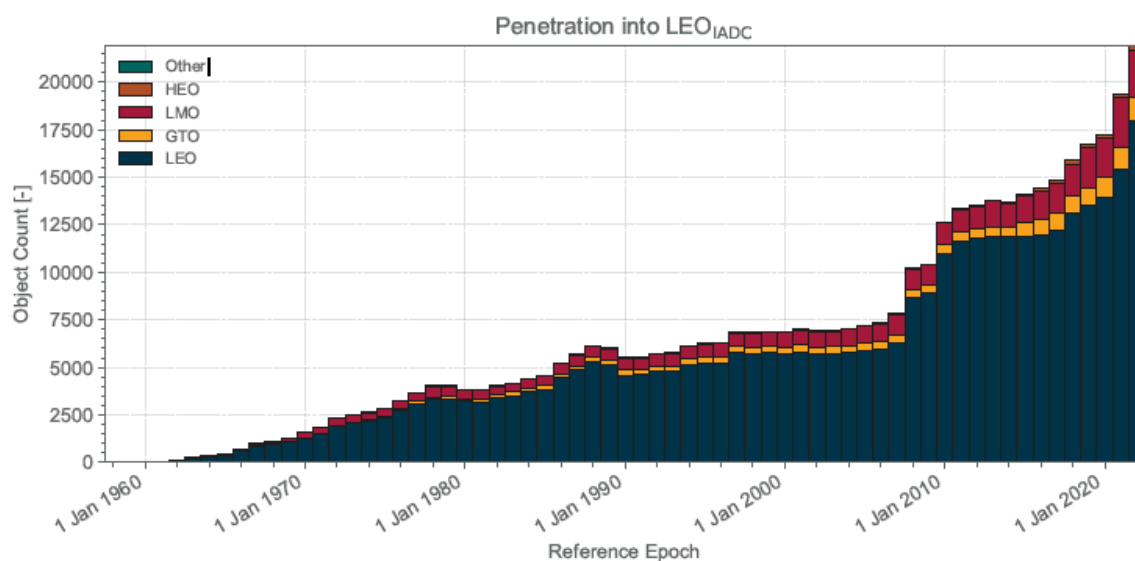


Figura 2. Crecimiento continuo del entorno de residuos²⁰

La mitigación de los riesgos de fallos con redundancia de subsistemas y la protección para mitigar los daños por colisiones con objetos pequeños son importantes, pero quizás más impactante es la mitigación operativa: Por ejemplo, desorbitar satélites cuando los modelos de fiabilidad no pueden predecir con precisión cuándo puede fallar la cadena de maniobra e iniciar la desorbitación inmediatamente después del fallo (N – 1)^{ésimo} con redundancia N^{ésima}.

III. Consecuencias de la colisión

Incluso con toda la mitigación razonable, la realidad de las mega-constelaciones LEO es que la probabilidad de que ocurran colisiones catastróficas aumentará. Una pregunta importante de parteaguas se convierte entonces en: ¿Cuáles son las consecuencias esperadas de estas colisiones?

a. La naturaleza de los residuos creados por colisiones

Como demostró una colisión en la órbita LEO hace más de 13 años, solo dos satélites que colisionan pueden crear nubes de residuos que consisten en muchos miles de fragmentos que se propagan en órbitas por encima y por debajo del punto de impacto, y que persisten durante décadas. Más específicamente, el 10 de febrero de 2009, se produjo la primera colisión que involucraba a dos satélites en órbita. El satélite activo Iridium 33 de 689 kg chocó con el satélite pasivo COSMOS 2251 de 900 kg aproximadamente a 800 km por encima de Siberia y produjo aproximadamente 2000 piezas de residuos letales rastreables (>10 cm)²¹, y muchas veces ese número de piezas de objetos de residuos letales no

²⁰ Informe anual del entorno espacial de la ESA (2022), en 21, https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf.

²¹ Los fragmentos de más de 10 cm suelen ser observables por radares y telescopios terrestres, por lo que se pueden rastrear. También son lo suficientemente grandes como para fragmentar cualquier satélite con el que colisionen. Estos son los fragmentos letales rastreables.

rastreables (LNT) más pequeños,²² tienen suficiente masa (dada la velocidad de impacto de las colisiones de la órbita LEO) para fragmentar cualquier satélite con el que colisionen. Trece años más tarde, la consecuencia restante de esa colisión es 1342 objetos de residuos rastreables con apogeos de hasta 1650 km, distribuidos por la órbita LEO, como se muestra en la Figura 3, más un número mucho mayor de objetos de residuos LNT.

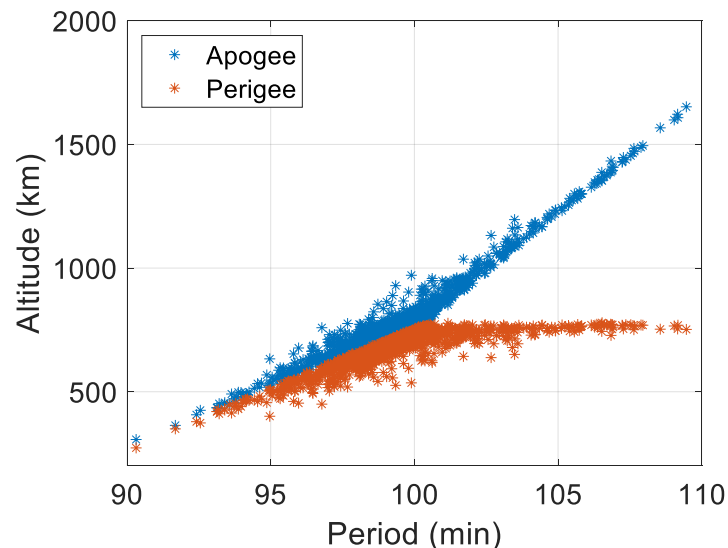


Figura 3. Distribución de residuos letales del espacio rastreable desde la colisión Iridium-33/Cosmos-2251

Se ha prestado atención a las consecuencias a corto y largo plazo de una prueba anti-satélites (ASAT) exitosa que tuvo lugar en noviembre de 2021 con el satélite COSMOS 1408. Como se muestra en las Figuras 4 y 5, se puede esperar un resultado similar cuando dos satélites LEO colisionan catastróficamente.²³ Ambos tipos de acontecimientos generan un gran número de residuos letales *rastreables* (Figura 4) e incluso un mayor número de residuos de LNT (Figura 5).

²² B. Weeden, “Hoja informativa sobre colisión entre el Iridium y el Cosmos 2009”, Secure World Foundation, actualizada el 10 de noviembre de 2010, https://swfound.org/media/6575/swf_iridium_cosmos_collision_fact_sheet_updated_2012.pdf.

²³ Consulte las colisiones por satélite que tienen las mismas consecuencias que las pruebas ASAT (noviembre de 2021), <https://www.viasat.com/space-innovation/space-policy/space-debris/>.

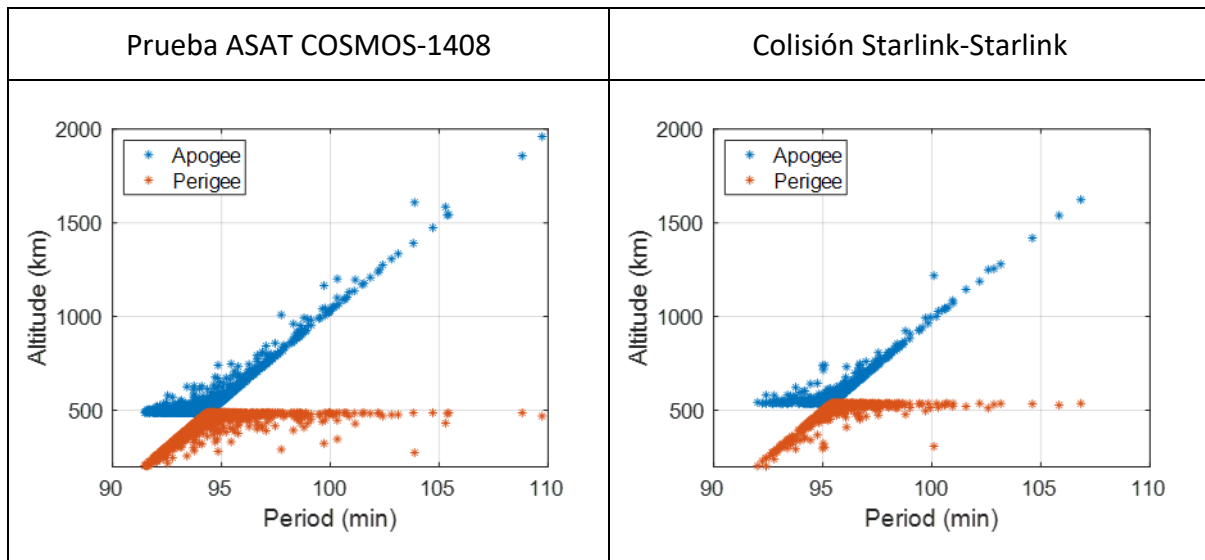


Figura 4. Fragmentos letales rastreables modelados de la prueba ASAT COSMOS-1408 (1514 fragmentos LT) y Starlink-Starlink Collision (531 fragmentos LT)

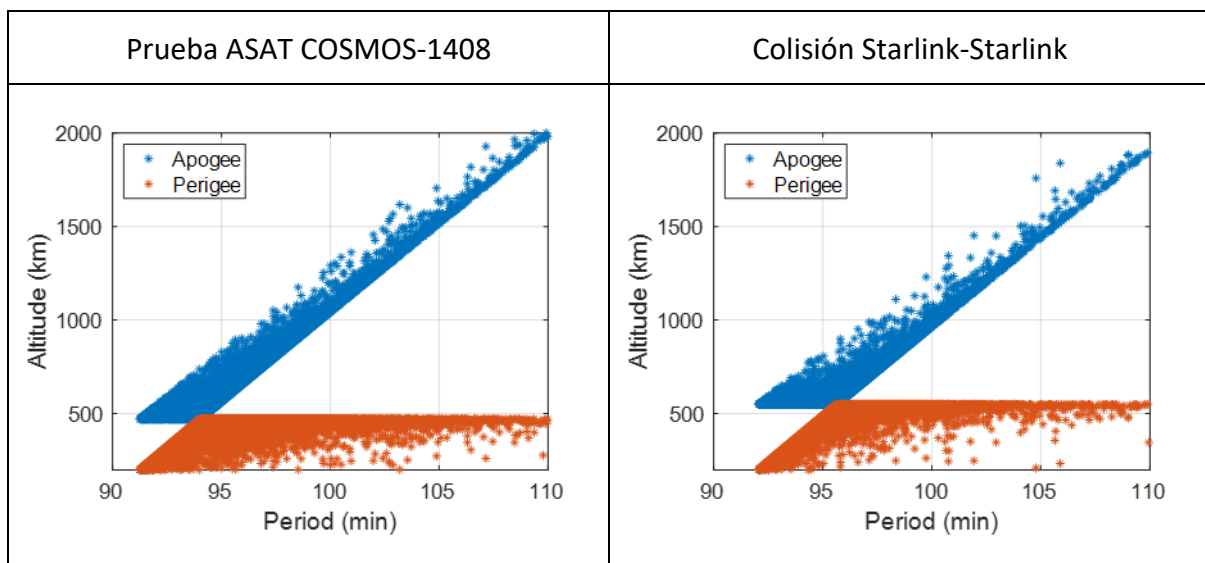


Figura 5. Fragmentos LNT modelados de la prueba ASAT COSMOS-1408 (77.706 fragmentos LNT) y Starlink-Starlink Collision (26.968 fragmentos LNT)²⁴

Los campos de residuos de gran cantidad de fragmentos letales rastreables y un número aún mayor de fragmentos LNT son características tanto de colisiones satelitales accidentales como de pruebas ASAT exitosas. El número exacto de fragmentos varía con varios factores,

²⁴ Los Starlinks se utilizan con fines ilustrativos, ya que son los satélites de constelación LEO más numerosos con alrededor de 3300 en órbita, y una licencia de 15 años de la FCC para mantener 4408 satélites operativos más un número adicional ilimitado que podría estar siendo sometido a elevación o desorbitación en un momento dado. Muy simple, dados los números, si un satélite colisionara con un objeto de escombros letales, sería más probable que no sea un Starlink. La versión de 260 kg del diseño Starlink se utiliza en esta ilustración. El número previsto de fragmentos sería cinco veces mayor con la propuesta de la versión de 2000 kg.

incluidas las masas de objetos. Con todos los factores idénticos, las consecuencias de las colisiones satelitales y las pruebas ASAT exitosas son indistinguibles, lo que supone una amenaza para los satélites LEO, la Estación Espacial Internacional (ISS) y otros sistemas espaciales durante décadas, o incluso siglos.

Estas observaciones son especialmente notables porque (i) los LNT aumentan el riesgo de colisiones de naves espaciales (y de accidentes humanos en el espacio), (ii) no se pueden ver los LNT y, por lo tanto, no se pueden evitar, (iii) los riesgos que los LNT crean no pueden mitigarse hoy, (iv) la cantidad de LNT ya eclipsa todas las demás formas de residuos, (v) los LNT probablemente sean la categoría de residuos de más rápido crecimiento, (vi) los LNT tienen una amplia gama de impactos en satélites activos, y (vii) los LNT son los más peligrosos en la categoría de más rápido crecimiento de pequeños satélites LEO. De hecho, los expertos explican que los LNT “dominan el perfil de riesgo de una nave espacial operativa”.²⁵

b. La persistencia y las consecuencias de los residuos creados por colisiones

Un estudio titulado “Consecuencias de las colisiones de satélites LEO: los fragmentos”²⁶ analiza las siguientes preguntas en el contexto de las mega-constelaciones LEO que se proponen e implementan:

- ¿Cuáles son las distribuciones y vidas útiles de las nubes de fragmentos cuando dos grandes satélites de sistemas LEO colisionan catastróficamente?
- ¿Cómo cambian estas distribuciones en función de la masa de los satélites que colisionan?
- ¿Cómo afectarán estas nubes de residuos a la sostenibilidad de la órbita LEO?

Este estudio muestra que incluso las colisiones que se producen por debajo de los 600 km pueden tener consecuencias por décadas en una gran franja de la órbita LEO.²⁷ Además,

²⁵ Véase generalmente R. Buchs, *Riesgo de colisión por residuos espaciales: Estado actual, desafíos y estrategias de respuesta* (Lausana: EPFL International Risk Governance Center, 2021), en 13, https://go.epfl.ch/irqc_space_debris_report (“Los objetos LNT dominan el perfil de riesgo de las naves espaciales operativas. Dado que son mucho más numerosos que los objetos rastreables y no se pueden evitar, los objetos LNT constituyen más del 95 % de la misión que termina con el riesgo de colisión para un satélite LEO típico[.]”).

²⁶ M. A. Sturza y G. Saura Carretero, *Consecuencias de las colisiones satelitales LEO – Los fragmentos* (2021), 11.a Conferencia IAASS – Gestión del riesgo en el espacio, <https://www.viasat.com/space-innovation/space-policy/space-debris/>. Este estudio utiliza el modelo de descomposición de la NASA y el modelo de descomposición de Blitzer. Para caracterizar las nubes de fragmentos iniciales se utilizan distribuciones de parámetros orbitales y de relación área-masa. Esas distribuciones se propagan con el tiempo utilizando modelos de arrastre para determinar trayectorias y vidas orbitales.

²⁷ Los tiempos de descomposición pasiva son más largos para los fragmentos que los de los satélites originales debido a las órbitas de los fragmentos y las relaciones área-masa.

este estudio, junto con otros análisis,²⁸ dejan al descubierto las tergiversaciones recurrentes de que la parte de estas órbitas, entre 500 km y 600 km de altitud, es intrínsecamente de “autolimpieza” y que las colisiones entre satélites maniobrables o no maniobrables (reliquias) en dichas órbitas son, por lo tanto, inconsecuentes. En realidad, las colisiones por satélite LEO a estas altitudes tienen consecuencias que persisten durante décadas debido al tiempo que tardan los fragmentos de esas colisiones en descomponerse, como se muestra en la Figura 6.

La Figura 6 muestra los tiempos de desintegración para varias fracciones de los fragmentos letales rastreables y los LNT de una colisión catastrófica para cada una de las órbitas actuales de Starlink.²⁹ Las curvas muestran el tiempo necesario para que el 90 %, 99 % y 99,9 % de los fragmentos se “limpien”. Las colisiones en estas órbitas tienen consecuencias durante décadas.

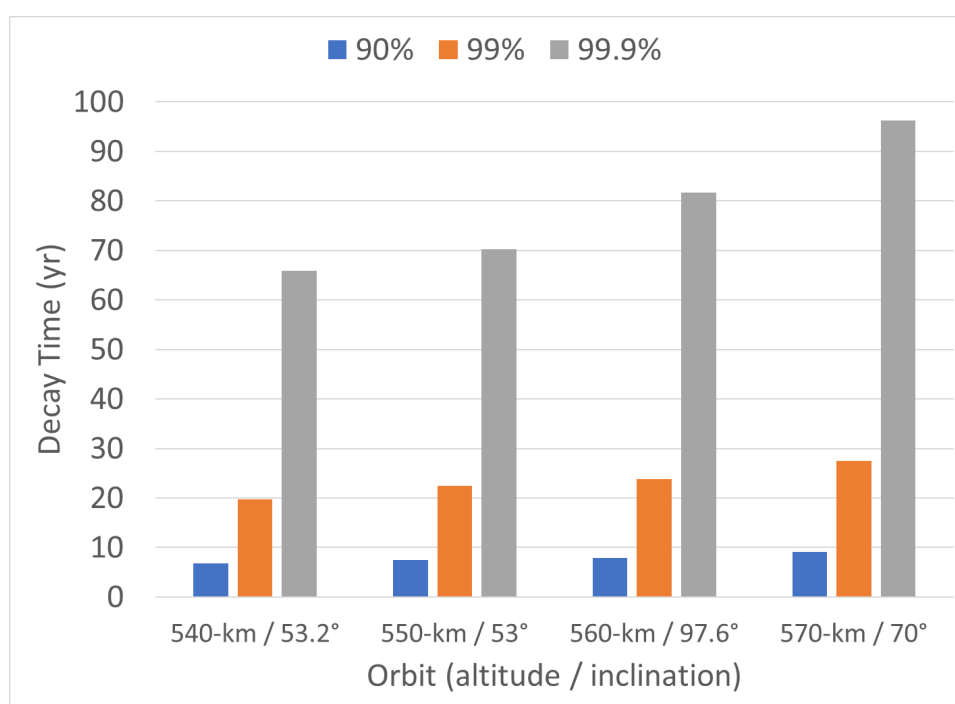


Figura 6. Tiempo de descomposición para varias fracciones de residuos frente a órbita

El estudio “Consecuencias de las colisiones satelitales LEO” también muestra que las consecuencias de las colisiones disminuyen drásticamente con la masa de los satélites involucrados. Es decir, las colisiones entre satélites más pequeños, como CubeSats de 25 kg, tienen una consecuencia significativamente menor que las colisiones entre dos satélites más grandes (p.ej., 250 kg), hay menos fragmentos letales. Las colisiones en órbitas inferiores también tienen menos consecuencias: los fragmentos se descomponen antes. Ambos factores pueden contribuir a una sostenibilidad de la órbita LEO más sólida. Por lo tanto, las

²⁸ Consulte Mito de la órbita autolimpiante, <https://www.viasat.com/space-innovation/space-policy/space-debris/>.

²⁹ Actualmente, SpaceX cuenta con la licencia de la FCC de EE. UU. para operar con altitudes nominales de 540, 550, 560 y 570 km, y tolerancias que permiten que las órbitas varíen hasta +/- 30 km de altitud.

colisiones entre dos CubeSats de 25 kg son mucho menos preocupantes que las que se producen entre dos satélites de 250 kg.

Desafortunadamente, las naves espaciales LEO son cada vez más grandes y más masivas, con implicaciones significativas para los riesgos de seguridad y sostenibilidad del espacio que plantean los satélites individuales, incluso cuando se ven de forma aislada (*p. ej., riesgos de colisión por satélite*), debido al mayor riesgo de colisión asociado con una mayor área transversal, y los campos de residuos resultantes más grandes cuando estos satélites colisionan con otros objetos espaciales.

El drástico aumento de la masa del satélite y el área transversal en los diseños de satélites LEO se ilustra en la Figura 7. Como se analiza a continuación, esta tendencia tiene graves repercusiones para otras personas que buscan acceder y utilizar el espacio.

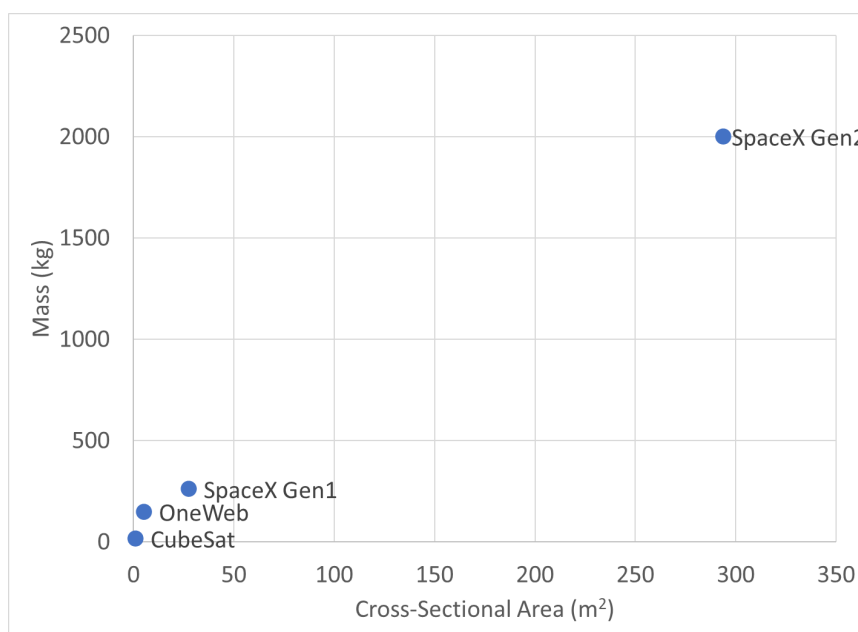


Figura 7. Tendencias en la masa estimada de la nave espacial LEO y área transversal

IV. Límites de modelado que existen con el uso de la órbita LEO

Otros estudios recientes indican que existen límites sobre lo que puede ocupar la órbita LEO de forma sostenible, y que esos límites dependen de las características específicas de cada sistema LEO y del impacto de un entorno de residuos espaciales que empeora constantemente, incluido el impacto de la gran y creciente cantidad de residuos espaciales. En particular, las características de los satélites LEO (incluida la masa y el área transversal) son un factor significativo en la evaluación: (i) el riesgo de colisión, (ii) cuántos residuos adicionales pueden crear colisiones, incluida la letalidad y dispersión de esos residuos, y (iii) las condiciones y desencadenantes que conducen a un síndrome de Kessler.

Un estudio inicial encargado por la Fundación Nacional de Ciencias de los EE. UU. (NSF) indica que puede que no sea factible mantener incluso uno de los sistemas LEO ya propuestos y que actualmente se está lanzando, y que las mega-constelaciones individuales pueden consumir la totalidad o la mayoría de los “recursos” orbitales LEO limitados que deben compartirse en todas las naciones a nivel mundial. Ese estudio predice las

consecuencias de implementar completamente un sistema LEO individual que ha comenzado la implementación y que, en última instancia, busca consistir en más de 40 000 satélites a altitudes en el vecindario de 600 kilómetros. El estudio prevé un aumento drástico tanto en las colisiones espaciales como en los nuevos escombros, empezando en solo unos años. A largo plazo, el estudio NSF predice que “los satélites se destruyen [por colisiones con residuos] más rápido de lo que se lanzan”.³⁰

Otro estudio concluyó que “se espera que el síndrome de Kessler se produzca en la órbita baja alrededor de 2048 según las recientes tendencias históricas de crecimiento sectorial, y puede ocurrir ya en 2035 si la economía espacial crece de forma coherente con las proyecciones de los principales bancos de inversión”.³¹

Los conceptos analíticos empleados en el estudio de la FSN se han mejorado en otro estudio utilizando modelos y simulaciones aún más detallados para explorar más a fondo las secuencias de eventos que conducen a un síndrome de Kessler en función de los parámetros clave de las grandes constelaciones LEO (el número de satélites, el área y la masa de la sección transversal del satélite y la densidad de esos objetos en órbitas específicas).³²

Ese estudio, titulado “Design Trades for Environmentally Broadband LEO Satellite Systems”, demuestra las restricciones reales que existen en el uso de la órbita LEO. En concreto, la órbita LEO tiene una capacidad orbital limitada (número y tipo de satélites que se pueden implementar de forma sostenible), y existe un punto de inflexión en el que ya no sería posible evitar un síndrome de Kessler al dejar de lanzarse.

Ese estudio comercial de diseño también muestra que las grandes constelaciones LEO de satélites pequeños (<25 kg) son significativamente más seguras de implementar que las constelaciones de satélites más grandes. *Esta observación sobre el impacto del tamaño del satélite en la seguridad general es extremadamente importante para permitir que la capacidad orbital limitada de la órbita LEO sea compartida de manera sostenible por todas las naciones, a nivel mundial.*

Es crucial destacar que ese estudio ilustra que es probable que se alcance un punto de inflexión antes de que las herramientas de medición y observaciones existentes puedan detectar que una catástrofe es inminente.

Se han desarrollado modelos adicionales, utilizando herramientas de medición empíricas y análisis cuantitativos, para ayudarnos a comprender los límites de la explotación espacial de órbita LEO y cómo podemos operar mejor dentro de esos límites.

³⁰ G. Long, The Impacts of Large Constellations of Satellites, JASON – The MITRE Corporation, JSR-20-2H , noviembre de 2020, (Actualizado: 21 de enero de 2021), en 97, https://www.nsf.gov/news/special_reports/jasonreportconstellations/JSR-20-2H_The_Impacts_of_Large_Constellations_of_Satellites_508.pdf.

³¹ A. Rao y G. Rondina, Acceso abierto a crecimiento de residuos espaciales en órbita y embalamiento, arXiv:2202.07442 [econ.GN] (16 de febrero de 2022), en 1, <https://arxiv.org/pdf/2202.07442.pdf>.

³² M. A. Sturza y G. Saura Carretero, Design Trades for Environmentally Broadband LEO Satellite Systems (2021), Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS) 2021, <https://amostech.com/TechnicalPapers/2021/Poster/Sturza.pdf>.

Un estudio de investigación titulado “Modelado de capacidad LEO para diseño sostenible”³³ estima la “capacidad de transporte” de la órbita LEO, es decir, la distribución sostenible de la población de satélites en la órbita LEO. Estima la propagación futura de residuos, teniendo en cuenta tanto los residuos existentes como la probabilidad de que los objetos que no son residuos se conviertan en residuos dentro de un horizonte temporal determinado. También tiene en cuenta el rendimiento de varias posibles mitigaciones.³⁴ Esta metodología permite comparar holísticamente las contribuciones a la propagación de residuos en función de características específicas del sistema y deducir el impacto incremental de los sistemas y características individuales en la capacidad de transporte de la órbita LEO.

Este estudio de investigación arroja una serie de resultados significativos: (i) las configuraciones de segunda generación propuestas de dos mega-constelaciones particulares consumirían toda, o casi toda, la capacidad de transporte en órbitas vecinas a las ocupadas por esas constelaciones, (ii) satélites menos masivos y un área transversal más pequeña facilitan una mayor capacidad de transporte, y (iii) la eliminación de la población existente de cuerpos de cohetes en desuso no da lugar a un aumento sustancial de la capacidad de transporte de la órbita LEO.

Estos resultados destacan la necesidad de facilitar el uso sostenible de la órbita LEO mediante: (i) la aplicación del control de admisión orbital y los requisitos mínimos de fiabilidad satelital a través de las condiciones de licencia y acceso al mercado que limitan el número de satélites, masas y áreas transversales de órbita LEO lanzados en varias órbitas, y garantizan una cierta y probable eliminación posterior a la misión; y (ii) el desarrollo de regímenes orbitales adecuados para admitir diferentes tipos de sistemas LEO. Por ejemplo, (a) las altitudes inferiores a 400 km pueden ser adecuadas para satélites no propulsivos; (b) las altitudes en el rango de 400 km a 600 km pueden ser adecuadas para mega-constelaciones (siempre que se gestione el número de satélites, masa y área de sección transversal lanzada); y (c) las constelaciones más pequeñas superiores a 600 km probablemente sean sostenibles en dependencia de la masa y el área de sección transversal.

Significativamente, el modelo subyacente a este estudio de investigación es útil para: (i) ayudar en el diseño de sistemas LEO de banda ancha sostenibles, (ii) evaluar el impacto de los sistemas LEO existentes y planificados, y (iii) comprender las implicaciones de múltiples constelaciones LEO grandes que ocupan órbitas vecinas, entrelazadas o superpuestas.

³³ M. Sturza, M. Dankberg, W. Blount, LEO Capacity Modeling for Sustainable Design, Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 27-30 de septiembre de 2022, <https://amostech.com/TechnicalPapers/2022/Space-Debris/Sturza.pdf>.

³⁴ Más concretamente, este modelo incluye una cuantificación de: (i) razonable, estimaciones de intentos de mitigación infructuosos entre objetos espaciales maniobrables, (ii) colisiones con residuos rastreables y no rastreables y los efectos de esas colisiones, (iii) dispersión de residuos de colisiones y los efectos de esa densidad de flujo de residuos en constante evolución, (iv) incertidumbre en la medición (conciencia situacional del espacio), incluidos los objetos y residuos que de otro modo se considerarían “seguibles”, y (v) crecimiento de residuos y densidad de flujo de residuos en regiones orbitales críticas, como, por ejemplo, entre otros, colisiones entre objetos incontrolables/no maniobrables, incluidos residuos sobre residuos (seguibles o no), residuos en objetos espaciales no maniobrables, y objetos espaciales no maniobrables que interactúan entre sí.

Además, el uso de dicho modelo puede facilitar el:

- Medir cuantitativamente la eficacia absoluta y relativa de las normativas y políticas propuestas que rigen el acceso y las operaciones espaciales;
- Determinar la eficacia de las correcciones y mitigaciones, como formas específicas de estrategias de eliminación de residuos, nuevos requisitos de eliminación después de la misión y mejoras previstas en la vigilancia y seguimiento espaciales (SST), la conciencia situacional espacial (SSA) y la gestión del tráfico espacial (STM);
- Considerar las interacciones entre todas las misiones y constelaciones, en lugar de simplemente abordar cada una individualmente y en ausencia de todas las demás y basándose en modelos de flujo de residuos pasados o actuales, y considerar el flujo de residuos que existirá durante la vida útil de todas esas constelaciones;
- Determinar la sensibilidad del entorno espacial LEO a eventos imprevistos que de otro modo podrían precipitar colisiones en cascada, como los efectos de las sobretensiones en las emisiones solares que llegan a la tierra, la fragmentación imprevista de satélites en órbitas congestionadas o incluso ataques cinéticos deliberados; y
- Fomentar la identificación de las características de diseño cuantitativo del sistema que ralentizan, detienen o invierten la aceleración hacia un punto en el tiempo cuando el acceso al espacio se ve afectado o incluso perdido de forma intolerable.

Por lo tanto, dicho modelo proporciona una alternativa cuantitativa a la heurística intuitiva y a las mitigaciones que se contemplan actualmente. Debe (i) proporcionar decisiones más informadas de políticas y licenciamiento, (ii) permitir que diferentes investigadores y administraciones comprendan, estudien y reproduzcan los resultados de las reglas propuestas, y (iii) permitir la adopción y el perfeccionamiento impulsado por datos de reglas que tienen una mayor probabilidad de éxito y que pueden ajustarse en función de las mejoras en las tecnologías de seguridad espacial.

Cabe destacar que, sin emplear un buen modelo predictivo, ni siquiera es posible reconocer cuándo un síndrome de Kessler es inminente o inevitable. El uso de un modelo nos permite “rebobinar” una posible secuencia de eventos que conducen a un síndrome de Kessler, es decir, mirar hacia atrás desde su ocurrencia para comprender cuándo se habría alcanzado un punto de inflexión y luego examinar cuidadosamente el estado del espacio LEO en ese momento.

Cabe destacar que ningún modelo predictivo debe basarse en la simplificación de suposiciones como la existencia de supuestas “órbitas de autolimpieza”,³⁵ una creencia ciega en la eficacia de los controles “autónomos” para evitar colisiones,³⁶ o la falacia de que

³⁵ Consulte *Mitos de órbita autolimpiantes*, <https://www.viasat.com/space-innovation/space-policy/space-debris>.

³⁶ Véanse los comentarios de la NASA, n.o de archivo de IBFS de la FCC de EE. UU. SAT-AMD-20210818-00105 (presentado el 8 de febrero de 2022), en 2 (“[T]a preocupación sigue siendo que otros proveedores

los satélites maniobrables tienen “cero riesgo” de colisión.³⁷ Si bien muchos de los efectos individuales que deben cuantificarse pueden considerarse de baja probabilidad con respecto a objetos individuales, el gran número de objetos residuales rastreables y no rastreables, así como los eventos de conjunción previstos, significa que los eventos que tienen baja probabilidad con respecto a un solo objeto son muy probables que ocurran dentro del conjunto de todos los objetos.

V. Las fuerzas del mercado no son adecuadas para mitigar los riesgos en la órbita LEO

Actualmente, los costes y riesgos creados por ciertos sistemas LEO se están transmitiendo a otros, incluidos otros operadores de banda ancha satelital, y la ciencia, defensa, navegación, astronomía y otros sectores cuyas operaciones en, o a través de, la órbita LEO son críticas para muchas naciones. El mayor riesgo de colisión que presentan ciertos diseños LEO aumenta el coste del acceso al espacio para todos, ya sea en áreas desatendidas o para el propio gobierno (en el caso del uso del espacio en la defensa nacional). De hecho, hoy en día se están realizando compensaciones de coste/seguridad en ciertos diseños de constelación LEO, lo que conduce a la implementación de satélites económicamente rentables que aumentan indebidamente los riesgos para todos. Entre otras cosas, esas decisiones comerciales de interés propio afectan a otros usos del espacio al reducir la probabilidad de maniobrar con éxito para evitar colisiones; o al obligar a los nuevos participantes a utilizar órbitas que sean menos eficientes, más costosas de alcanzar o mantener; o al obligar cargas de diseño de naves espaciales mucho más altas que las utilizadas por los participantes anteriores que pretendían impedir la competencia ocupando más recursos orbitales de lo que se justificaba.

Como reconoció hace tres años la Comisión Federal de Comunicaciones de EE. UU.,³⁸ los incentivos económicos para algunos actores industriales individuales no son adecuados para obligarlos a adoptar prácticas responsables diseñadas para garantizar que el entorno orbital compartido permanezca disponible para que todos lo utilicen de forma segura. En su lugar, estos actores están motivados para adoptar prácticas que obliguen a otros usuarios espaciales a soportar externalidades negativas significativas, aumentando sus costes económicos y, en última instancia, poniendo en peligro la viabilidad continua de las operaciones satelitales, ya sea que los otros operen dentro de la órbita LEO, o pasen a través de ésta misma en el camino hacia o desde otras órbitas. Además, el riesgo de fallo

que propongan grandes constelaciones también utilicen la capacidad de maniobra automática dentro de los rangos de altitud ocupados por Starlink, lo que requiere que múltiples constelaciones autónomas se desvíen del camino de los demás sin reglas claramente definidas de la carretera para dichas interacciones”). (“Carta de la NASA”).

³⁷ Véase *id.* en 3 (“[C]teniendo en cuenta múltiples constelaciones independientes de decenas de miles de naves espaciales y el aumento esperado en el número de encuentros cercanos con el tiempo, *la asunción de riesgo cero desde el punto de vista del sistema carece de justificación estadística.*”) (énfasis añadido).

³⁸ Véase Comisión Federal de Comunicaciones de EE. UU., *Mitigación de residuos orbitales en la nueva era espacial*, Aviso de formulación de reglas propuesta, 18-159 (ref. 19 de noviembre de 2018), ¶¶ 88-89; Notificación adicional de formulación de reglas propuesta, 20-54 (referencia 24 de abril de 2020), ¶ 25.

empresarial en este nuevo entorno es alto, y los fallos empresariales pueden dejar a un operador sin la capacidad ni el incentivo de desorbitar rápidamente satélites fallidos.

Una consecuencia inmediata del desarrollo de la congestión en la órbita LEO es hacer aún más escaso el número de ventanas de lanzamiento viables que ya están inherentemente limitadas³⁹, y/o aumentar los riesgos de colisión para las ventanas que permanecen. Y los residuos creados por una colisión que involucra satélites LEO, o incluso, tan solo la presencia en órbita de satélites LEO fallidos que ya no son maniobrables, impedirán aún más la capacidad de otros operadores de lanzar sus propios satélites en órbita. Como mínimo, estos factores aumentarán los costes, riesgos y retrasos asociados con el lanzamiento de todos los satélites en el espacio, según lo observado por el director ejecutivo del proveedor de lanzamiento de satélites RocketLab.⁴⁰

Es por eso que los reguladores nacionales deben adoptar reglas exigibles que restrinjan a los operadores de enfatizar los desechos y reemplazos (redundancia en un gran número de satélites), en lugar de la fiabilidad y la seguridad (implementación de menos satélites que sean más eficientes, y que sean capaces de evitar colisiones durante los muchos años que permanecen en órbita). En ausencia de dichas normas, los operadores: (i) seguirán realizando operaciones económicas de interés propio que pongan en peligro el uso sostenible y seguro del espacio; (ii) no reconocerán las externalidades negativas creadas por sus operaciones; y (iii) no mitigarán las cargas y los impactos adversos que de otro modo se impondrían a otros operadores y al público en general.

VI. Debe tenerse en cuenta el riesgo agregado presentado por cada sistema LEO

Es esencial evaluar el riesgo de colisión *agregado* presentado por *todos los* sistemas LEO que buscan servir o utilizar estaciones terrestres ubicadas en un territorio. Como se refleja en los estudios mencionados anteriormente, el riesgo de colisión en la órbita LEO se escala con factores como el área transversal de los satélites, la masa satelital, los números y las órbitas de los satélites, y las tasas de fallo satelital en relación con la maniobrabilidad (*es decir*, la capacidad de evitar colisiones). Existe un riesgo adicional por cada satélite en un sistema LEO determinado y cada reemplazo que podría lanzarse durante todo el periodo de licencia.

También hace hincapié en que, dado que estos parámetros son los determinantes de la seguridad y sostenibilidad espaciales, cualquier esfuerzo por parte de operadores autorizados para cambiar sustancialmente esos parámetros para los diseños de satélite debe requerir una *reevaluación* del impacto en el riesgo de colisión agregado basado en una

³⁹ Carta de la NASA en 4 (“La NASA también se preocupa por una creciente falta de disponibilidad de ventanas de lanzamiento seguras, especialmente para misiones que requieren ventanas de lanzamiento instantáneas o cortas, como misiones planetarias como Europa Clipper, que se verían significativamente afectadas debido a una oportunidad de lanzamiento perdida”).

⁴⁰ J. Wattles, *Space se está volviendo demasiado abarrotado, el director ejecutivo de Rocket Lab advierte*, CNN (8 de octubre de 2020), <https://www.cnn.com/2020/10/07/business/rocket-lab-debris-launch-traffic-scn/index.html> (“Las constelaciones satélite pueden ser particularmente problemáticas, dijo, porque los satélites pueden volar bastante cerca juntos, formando un tipo de bloqueo que puede evitar que los cohetes se estrujen”).

demostración adecuada por parte del operador *antes* de que se le permita utilizar dicho diseño modificado.

Una evaluación agregada del riesgo de colisión debe tener en cuenta los riesgos asociados con los satélites derivados que fallan y ya no pueden maniobrar, así como los riesgos residuales asociados con el gran número de satélites maniobrables debido a conjunciones (*es decir, llamadas cercanas*) con residuos espaciales rastreables y no rastreables y otros satélites activos que se pueden esperar durante un plazo de licencia. Esto es cierto porque un gran número de eventos de probabilidad incluso muy baja (advertencias conjuntas con baja probabilidad sobre las que no se actúa) resulta en múltiples colisiones que se esperan de forma realista durante ese periodo.

Cabe destacar que el enorme aumento de los tamaños de constelación LEO está impulsando un aumento exponencial en el número de conjunciones que se puede esperar que experimente una constelación determinada con el tiempo, lo que aumenta drásticamente la probabilidad de una colisión dentro de la órbita que tendría impactos devastadores en la sostenibilidad y la seguridad espacial.⁴¹ Como explica un experto líder: “La ley de números muy grandes le dirá que pueden ocurrir eventos de muy baja probabilidad si se le dan suficientes oportunidades”.⁴² Sin embargo, ninguna norma o directriz actual refleja la magnitud de estos peligros.

Eso significa que estos factores de riesgo agregados deben medirse, evaluarse, modelarse y rastrearse, y las operaciones deben ajustarse durante la vida útil de cada misión, no solo en la etapa de autorización inicial (incluidas las misiones de comunicaciones y observación de la Tierra).

Una evaluación adecuada de la totalidad del riesgo de colisión para un sistema LEO en su conjunto debería tener en cuenta:

- Riesgos asociados con satélites que fallan y ya no pueden maniobrar (y, por lo tanto, crean riesgos significativos mientras permanecen en órbita).
- Los riesgos durante todo el periodo en que cada satélite de una mega-constelación permanece en órbita y en todas las órbitas que puede ubicarse (inyección, funcionamiento y eliminación posterior a la misión).
- El aumento del riesgo de colisiones debido a cambios en el entorno orbital (como la falla o explosión de satélites, la colisión de residuos con otros residuos y demás fallas, y la implementación de sistemas LEO adicionales, no solo el entorno como existía en el pasado).

⁴¹ Carta de la NASA al 1 (con el aumento de las propuestas de gran constelación a la FCC, la NASA está preocupada por el potencial de un aumento significativo en la frecuencia de eventos conjuntos y los posibles impactos en las misiones científicas y de vuelo espacial humano de la NASA”.); (“Un aumento de esta magnitud en estas bandas de altitud confinadas inherentemente conlleva un riesgo adicional de eventos de colisión generadores de residuos en función del número de objetos solamente). (énfasis añadido).

⁴² Consulte <https://twitter.com/ProfHughLewis/status/1509903335251456045> (1 de abril de 2022).

- Características del sistema: área transversal, masa, fiabilidad del subsistema, redundancia, blindaje y técnicas operativas para reducir el riesgo de fallos del sistema, y cualquier cambio propuesto posterior en esos parámetros.
- El riesgo de colisiones con objetos espaciales de todos los tamaños, ya sean rastreables o no, incluidos objetos letales no rastreables (LNT).
- La fiabilidad continua de las capacidades de comando y propulsión críticas para intentar maniobrar para evitar colisiones, y la probabilidad de que esos sistemas críticos puedan dañarse por residuos poco rastreables que son demasiado pequeños para fragmentar el satélite.
- El riesgo de colisiones intrasistema dentro de cualquiera de estas mega-constelaciones LEO (debido a todas las causas, incluidos satélites fallidos).
- Riesgos conocidos con un gran número (posiblemente millones al año) de conjunciones esperadas entre un sistema LEO grande y otros objetos espaciales (*p. ej.*, un gran número de maniobras para evitar algunas colisiones crean otros riesgos de colisión; las conjunciones de baja probabilidad que no dan lugar a maniobras de evasión se suman a riesgos de colisión mucho mayores con un gran número de conjunciones).
- Interacciones de todos los satélites en un sistema con todos los demás objetos en su entorno (incluidas las órbitas solapadas y de intersección) durante las maniobras de elevación de órbita para satélites en ascenso, teniendo en cuenta las trayectorias de decaimiento activas y pasivas para satélites en la fase de eliminación orbital, así como teniendo en cuenta aquellos satélites en servicio activo.
- La precisión y tolerancia de todas las trayectorias orbitales para evaluar y modelar con precisión las probabilidades de conjunción.

Es fundamental desarrollar un modelo para evaluar la situación actual en la órbita LEO y la evolución esperada de ese entorno. Las observaciones y mediciones de hoy no proporcionarán una advertencia suficiente de los usos de la órbita LEO que podrían conducir a reacciones en cadena autosostenibles de colisiones que pueden destruir satélites y perjudicar el acceso al espacio para todos por generaciones (síndrome de Kessler). *En pocas palabras: No podemos saber dónde estamos con respecto a la sobreexplotación de la órbita LEO sin un buen modelo que pueda predecir de forma fiable la evolución de los residuos en el espacio.*

VII. Los riesgos de colisión de un sistema LEO dependen del número de satélites

Algunos operadores de sistemas LEO intentan minimizar el riesgo significativo de colisión con sus sistemas centrándose en el riesgo de un solo satélite e ignorando lo que puede suceder durante todo el plazo de la licencia cuando cientos, miles o decenas de miles de satélites se operan en altitudes vecinas, superpuestas o de intersección. Ese enfoque ignora el simple hecho de que el riesgo de colisión escala con el tamaño de la constelación. En otras palabras, existe un riesgo adicional por cada satélite en un sistema LEO y el número ilimitado de sustituciones que podrían lanzarse durante el periodo de licencia. Centrarse en

el riesgo de satélites individuales en una constelación sancionaría eficazmente las colisiones catastróficas que se producen con mucha frecuencia, como se muestra en la Tabla 3.

N.o de satélites en órbita	Tiempo medio permitido entre colisiones en años (días)
1,000	5
5,000	1
10,000	0,5 (180 días)
50,000	0,1 (36 días)
100,000	0,05 (18 días)

Tabla 3. Riesgo agregado que aplica una única norma de riesgo satélite⁴³

VIII. Los sistemas de prevención de colisiones no mitigan todos los riesgos

Algunos intentan minimizar los riesgos agregados de grandes constelaciones LEO al afirmar que su sistema LEO empleará mecanismos “autónomos” de prevención de colisiones. Pero la eficacia de esas capacidades depende totalmente de que cada uno de sus satélites pueda maniobrar de manera fiable y eficaz durante el tiempo que el satélite permanezca en órbita, después de la inyección, mientras esté en órbita operativa y durante toda la eliminación posterior a la misión. Los satélites que fallan o se degradan de manera que ya no puedan maniobrarse de manera confiable no pueden evitar colisiones, entre sí, con satélites en otros sistemas o con la gran cantidad creciente de residuos espaciales rastreables. Por este motivo, la implementación de satélites LEO poco fiables presenta riesgos indebidos para todos los que buscan utilizar el espacio.

Si un operador lanza decenas de miles de satélites con incluso una probabilidad de fallo del 1 % por satélite (por ejemplo), puede esperar tener *cientos* de satélites no maniobrables fallidos, lo que hace que su sistema de prevención autónomo sea ineficaz en cuanto a esos satélites. No hay diferencia desde la perspectiva del riesgo de colisión entre esos cientos de satélites fallidos y no maniobrables y un operador diferente que lanza un número similar de satélites que no son propulsivos y/o no maniobrables por diseño. Ambos tienen exactamente el mismo resultado en espacio y producen la misma probabilidad de riesgo de colisión. Además, las conclusiones sobre la fiabilidad no pueden extraerse simplemente de la “probabilidad de fallo” al principio de la vida útil del diseño, porque también hay un modo de fallo de “desgaste” que se produce cerca del final de la vida útil del diseño. La evaluación de la eficacia de un sistema de prevención de colisiones requiere datos de análisis de fiabilidad en los satélites que demuestren un nivel de rendimiento de fiabilidad adecuado.

Además, la simple existencia de sistemas de prevención de colisiones (“autónomos” o de otro tipo) *no* significa que exista una probabilidad de colisión cero. Modelos de Analytical Graphics, Inc. (un proveedor líder de herramientas de análisis de colisiones y amenazas) y otros⁴⁴, muestran que el aglomeramiento incluso de decenas de miles de satélites nuevos

⁴³ Los cálculos se basan en la vida útil del diseño satélite de 5 años y la aplicación de la norma de riesgo de colisión uno de cada 1000 (0,001) que se utiliza habitualmente para escenarios de riesgo de un solo satélite.

⁴⁴ S. Alfano, D. Oltrogge, R. Shepperd, Leo Constellation Encounter y estimación de la tasa de colisión: Una

en la órbita LEO puede generar cientos de millones de eventos de conjunción totales sobre los términos de licencia de las mega-constelaciones LEO. La probabilidad de colisión residual restante distinta de cero, incluso después de intentar una maniobra, puede contribuir significativamente al riesgo de síndrome de Kessler en conjunto, dado un número suficientemente alto de oportunidades de conjunción. Además, se espera que la implementación de un solo tercio de una *sola* mega-constelación represente el 90 % de todos los enfoques cercanos entre dos satélites,⁴⁵ y con el nivel de actividad significativamente creciente en la órbita LEO, los expertos advierten que “deberán hacerse cambios para hacer que el espacio sea más sostenible”.⁴⁶ Como se ha comentado anteriormente, la ley de números muy grandes refuerza la necesidad de utilizar modelos realistas que nos ayuden a predecir las circunstancias que conducen a posibles catástrofes.

Además, y como ha reconocido la NASA, cualquier sistema automatizado de prevención de colisiones debe estar acoplado con la capacidad de coordinarse eficazmente con otros operadores casi en tiempo real para “garantizar que las maniobras previstas por uno o ambos operadores, si se ejecutan, y no coloquen ambos satélites en un curso de colisión”.⁴⁷ Sin embargo, como han señalado terceros, algunos procesos de prevención de colisiones de sistemas LEO no incorporan esta capacidad; más bien, incorporan características que probablemente frustrarán la coordinación entre operadores y *exacerbarán los riesgos de colisión*.⁴⁸ De hecho, un operador de sistema LEO ha revelado que su proceso de evasión de colisiones existente: (i) no incorpora ninguna comprobación para garantizar que una maniobra planificada para evitar una posible colisión no crea un riesgo inaceptable de colisión con otros objetos espaciales (*por ejemplo*, otro satélite maniobrable u residuos orbitales); y (ii) no requiere interacción entre operadores antes de la acción “autónoma” por uno o más de sus satélites LEO.⁴⁹

actualización, 2.a Conferencia de la IAA sobre Conciencia Espacial y Situacional (ICSSA), Washington, D.C., 14-16 de enero de 2020, <https://www.documentcloud.org/documents/6747529-LEO-CONSTELLATION-ENCOUNTER-and-COLLISION-RATE.html>.

⁴⁵ T. Pultarova, satélites *SpaceX Starlink responsables de más de la mitad de los encuentros cercanos en órbita, según el científico*, los satélites *Starlink pronto podrían estar involucrados en el 90 % de los encuentros cercanos entre dos naves espaciales en órbita terrestre baja*, Space.com (18 de agosto de 2021), <https://www.space.com/spacex-starlink-satellite-collision-alerts-on-the-rise>.

⁴⁶ D. Swinhoe, *Starlink de SpaceX, representa “la mitad de todos los cuasi accidentes de satélites”; los satélites de Elon Musk que llegan a menos de 1 km de las máquinas de otras empresas unas 500 veces por semana*, Data Center Dynamics (23 de agosto de 2021), <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/spacexs-starlink-accounts-for-half-of-all-satellite-near-misses/>.

⁴⁷ Consulte el *Manual de prácticas recomendadas para la evaluación del conjunto de naves espaciales y la prevención de colisiones de la NASA*, NASA/SP-20205011318 (2020), en 29, https://nodis3.gsfc.nasa.gov/OCE_docs/OCE_50.pdf.

⁴⁸ Véase generalmente <https://twitter.com/planet4589/status/1429525312577183746> (proporcionar varias críticas sobre los sistemas autónomos de colisión, *por ejemplo*, “Entonces, la pieza que parece faltar, al menos en esta representación, es el aspecto crítico del cribado de maniobras. Puede planificar una maniobra para mitigar una conjunción, solo para crear una situación peor. El plan de quemado debe revisarse con respecto al catálogo antes de la ejecución”).

⁴⁹ Véase la carta de SpaceX a la Comisión Federal de Comunicaciones de los EE. UU., IB Docket No. 18-313, Att. B (10 de agosto de 2021).

Otro aspecto crítico de la prevención de colisiones autónomas es si otros operadores de satélites se sienten cómodos aceptando al operador “autónomo” como agente de maniobra cuando ese operador ha diseñado su sistema para emplear satélites económicamente desechables de manera que no esté tan motivado para evitar colisiones.

Los expertos de la industria señalan que el “derecho de paso” a los carriles, u opciones de maniobra, en el espacio puede otorgarse de manera más apropiada a los satélites que son más irremplazables (económicamente o de otro modo), o al menos estar sujetos a condiciones que preservan los derechos de objetos espaciales valiosos y difíciles de reemplazar. A este respecto, enfatizamos que, sin ninguna norma o restricción sobre el consumo de recursos orbitales físicos, los operadores están motivados para mantener satélites de bajo rendimiento, o incluso fallidos, en órbita con el fin de impedir (o incluso precluir) el acceso a esas órbitas por parte de otros operadores. Por el contrario, con las restricciones adecuadas en el uso de recursos orbitales, los operadores estarían motivados a mantener en órbita solo aquellos satélites que aporten valor real en relación con el espacio que ocupan.

Al final, es casi imposible atribuir cualquier valor a un mecanismo autónomo de prevención de colisiones sin tener una comprensión completa de su rendimiento previsto y real, medido empíricamente. Al igual que los sofisticados modelos de riesgo mencionados anteriormente, evaluar el rendimiento real de la prevención de colisiones requiere análisis, simulación y una evaluación exhaustiva de todas las maniobras en vivo en el espacio realizadas hasta la fecha y el contexto en el que se realizaron.

IX. Otros problemas medioambientales

También existen preocupaciones crecientes sobre otras consideraciones medioambientales al evaluar la naturaleza finita del recurso LEO compartido, su naturaleza frágil y el riesgo de sobreexplotación.⁵⁰ Estos incluyen: (i) la posibilidad de que grandes cantidades de satélites vuelvan a entrar en la atmósfera para dañar la atmósfera de la Tierra y afectar al cambio climático a través de, entre otras cosas, forzamiento radiativo o forzamiento climático,⁵¹ y

⁵⁰ Véase Carta del Consejo de Defensa de Recursos Naturales y la Asociación Internacional del Cielo Oscuro a la Comisión Federal de Comunicaciones de los EE. UU., Archivo IBFS No. SAT-LOA-20200526-00055 y SAT-AMD-20210818-00105 (7 de septiembre de 2022) (“Carta NRDC y IDA”).

⁵¹ L. Organski, *et al.*, *Impactos medioambientales de los satélites desde el lanzamiento hasta la desorbitación y el nuevo acuerdo ecológico para Space Enterprise*, Aerospace Corporation (diciembre de 2020);

D. Werner, *Aerospace Corp. Plantea preguntas sobre contaminantes producidos durante la reentrada de satélites y cohetes*, SpaceNews (15 de diciembre de 2020), <https://spacenews.com/aerospace-agu-reentry-pollution/>;

M. N. Ross y L. David, *un peligro subestimado de la nueva era espacial: Contaminación aérea global*, *Scientific American* (febrero de 2021), <https://www.scientificamerican.com/article/an-underappreciated-danger-of-the-new-space-age-global-air-pollution/>;

M. N. Ross y K. L. Jones, *Implicaciones de una industria de vuelos espaciales en crecimiento: Cambio climático*, PERIÓDICO DE INGENIERÍA DE SEGURIDAD ESPACIAL (6 de junio de 2022), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468896722000386>;

Oficina de Responsabilidad del Gobierno de EE. UU., *Grandes constelaciones de satélites: Mitigación de los*

agotamiento de la capa de ozono, aumentar el riesgo de cáncer y otros efectos negativos para la salud,⁵² (ii) perjudicar la investigación óptica y radioastronómica crítica al alterar el cielo nocturno visible,⁵³ (iii) crear contaminación lumínica, con los impactos negativos resultantes en la salud y la calidad de vida de los seres humanos y en plantas y animales,⁵⁴ y (iv) perjudicar el funcionamiento de las capacidades críticas de detección y defensa de asteroides.⁵⁵ De hecho, ciertas elecciones realizadas en el diseño de sistemas LEO son los factores dominantes que inciden en estos impactos adicionales, como el área transversal del satélite, la masa, la órbita y el número de satélites, junto con el albedo (o reflectividad) y la composición del material.

Tendencias incorrectas en cada uno de estos aspectos. La Figura 8 muestra: (i) el número total de satélites en la órbita LEO al 1 de enero de 2022⁵⁶, así como el área de masa y sección transversal asociada de esos satélites (en verde) y (ii) los aumentos exponenciales en estos valores que ocurrirían si simplemente se permitiera implementar el sistema Starlink Gen2 (en rojo).⁵⁷

efectos medioambientales y de otro tipo, GAO-22-105166 (29 de septiembre de 2022) (“Primer informe de la GAO de EE. UU.”), <https://www.gao.gov/products/gao-22-105166>.

⁵² Carta NRDC y IDA en 3.

⁵³ R. Boyle, las constelaciones *satélite son una amenaza existente para la astronomía*, Scientific American (7 de noviembre de 2022), <https://www.scientificamerican.com/article/satellite-constellations-are-an-existential-threat-for-astronomy/>;

A. Lawrence, M. L. Rawls, M. Jah, A. Boley, F. Di Vruno, S. Garrington, M. Kramer, S. Lawler, J. Lowenthal, J. McDowell y M. McCaughrean, El caso del medioambientalismo espacial, NATURE ASTRONOMY (22 de abril de 2022), <https://www.nature.com/articles/s41550-022-01655-6>;

C. Young, ¿el peor caso de Starlink? Podríamos estar al borde del síndrome de Kessler, INTERESANTES INGENIERÍA (11 de agosto de 2022), <https://interestingengineering.com/innovation/worst-case-starlink-scenario-kessler-syndrome>;

Primer informe GAO de EE. UU. en 1;

Oficina de las Naciones Unidas para Asuntos Espaciales Exteriores, Unión Astronómica Internacional, IAC, Laboratorio NOIR, Cielos Oscuros y Tranquilos para la Ciencia y la Sociedad: Informe y recomendaciones, (29 de diciembre de 2020), <https://www.iau.org/static/publications/dqskies-book-29-12-20.pdf>.

⁵⁴ Carta NRDC y IDA en 3.

⁵⁵ Carta de la NASA en 3 (“[T]aquí estaría un Starlink en cada imagen de estudio de asteroides tomada para la defensa planetaria contra impactos peligrosos de asteroides, lo que disminuiría la efectividad del estudio de asteroides al dejar inutilizables partes de las imágenes. Esto podría... tener un efecto perjudicial en la capacidad *de nuestro planeta para detectar y posiblemente redirigir un impacto potencialmente catastrófico.*”) (énfasis añadido).

⁵⁶ Consulte el Informe anual del entorno espacial de la ESA, en 52-54 (22 de abril de 2022), https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf (que proporciona los datos utilizados para el “inicio” del 1 de enero de 2022).

⁵⁷ Basado en los datos que SpaceX proporcionó a la FCC en su modificación pendiente para expandir su sistema.

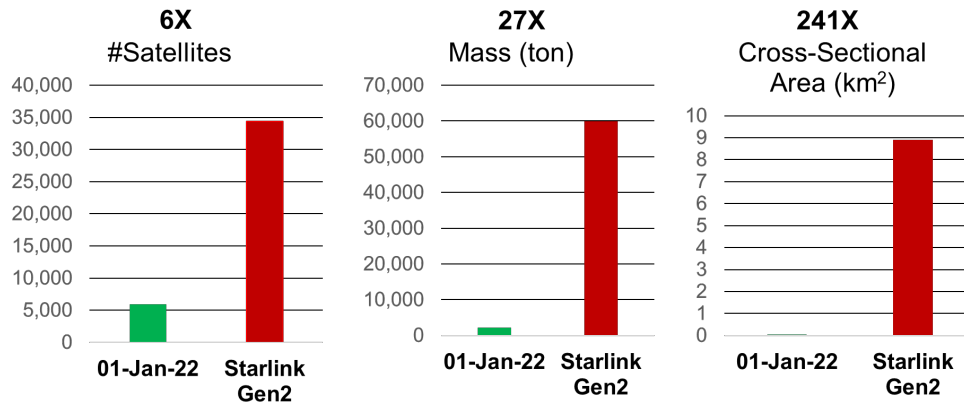


Figura 8. Tendencias en el tamaño, la masa y el área transversal de la constelación LEO

La revisión de expertos confirma que el enfoque de décadas de antigüedad aplicado por algunos a los efectos medioambientales de las mega-constelaciones actuales debe revisarse para tener en cuenta la nueva información disponible sobre esos efectos nunca antes planteados.⁵⁸ Es esencial tener en cuenta estos efectos, así como los factores exacerbantes mencionados anteriormente, al evaluar los límites sobre lo que puede ocupar de forma sostenible el espacio en la órbita LEO desde una perspectiva medioambiental.

X. Conclusión

Es fundamental desarrollar y adoptar un marco legal y normativo sólido que ayude a garantizar un uso seguro y sostenible del espacio; la constelación responsable y el diseño de la nave espacial deben ser un enfoque crítico de ese esfuerzo. De hecho, a menos que los legisladores nacionales hagan responsables a los operadores del espacio seguro, corremos un grave riesgo de llegar pronto a un punto de inflexión que podría dejar a la órbita LEO inutilizable durante décadas, o incluso siglos.

Cabe destacar que los innovadores diseños de sistemas LEO pueden minimizar estos riesgos, a la vez que ofrecen un mejor servicio, garantizan la sostenibilidad del espacio y permiten a todas las naciones competir y ganarse su lugar de forma justa en la economía del Nuevo Espacio. La capacidad existe para garantizar que los sistemas LEO que prestan servicio en un territorio determinado no sean una amenaza para sus intereses nacionales, o para la seguridad espacial y el medio ambiente en general.

Debemos actuar ahora, posiblemente incluso limitando la escala de las mega-constelaciones individuales, hasta que comprendamos las consecuencias. A continuación, podemos tomar medidas para garantizar que un punto de inflexión del síndrome de Kessler permanezca lo suficientemente lejos en el futuro:

⁵⁸ La Oficina de Responsabilidad del Gobierno de los EE. UU., FCC, *debe volver a examinar su proceso de revisión medioambiental para grandes constelaciones de satélites*, GAO-23-105005 (nov. 2022), en 28, <https://www.gao.gov/products/gao-23-105005>.

- Aplicar en las etapas de licenciamiento y acceso al mercado un modelo que evalúe la situación actual en la órbita LEO, la evolución esperada de ese entorno y las consecuencias de lanzar satélites LEO adicionales.
- Evitar simplificar suposiciones como la existencia de supuestas “órbitas de autolimpieza”, una creencia ciega en la eficacia de los controles “autónomos” para evitar colisiones, y evitar confiar en la falacia de que los satélites maniobrables tienen “cero riesgo” de colisión.
- Reducir el área transversal de los satélites LEO para disminuir la probabilidad de colisiones incluso con residuos letales no rastreables que no se pueden evitar.
- Reducir la masa del satélite LEO para minimizar las consecuencias de las colisiones.
- Minimizar el número de satélites no maniobrables (satelitales pasivos) en órbita que, por definición, no pueden evitar colisiones, incluido el establecimiento de métodos y procesos para desorbitar activamente los satélites antes de que puedan ser no maniobrables.
- Mejorar la precisión de la conciencia situacional del espacio (SSA) para reducir el riesgo de conjunciones que no dan lugar a maniobras de evasión y también de maniobras para evitar conjunciones.
- Que cada país que autorice un sistema LEO determine el impacto potencial del sistema en el medio ambiente, tanto en el espacio como en la Tierra, y si puede compartir recursos orbitales limitados de forma equitativa.
- En última instancia, establecer directrices y prácticas vinculantes y eficaces entre todos los países que trabajan en el espacio para garantizar un uso compartido y seguro del espacio limitado de la órbita LEO.