



UNIVERSIDAD DE CHILE
VICERRECTORÍA DE ASUNTOS ACADÉMICOS
PROGRAMA ACADÉMICO DE BACHILLERATO

Basura Espacial: un nuevo desafío para el siglo XXI

ENSAYO MONOGRÁFICO PARA OPTAR AL GRADO DE BACHILLER
CON MENCIÓN EN CIENCIAS NATURALES

Estudiante: Matías Alonso Videla Meisenbichler

Profesor Guía: Cesar Fuentes

Fecha de entrega: 20 de diciembre de 2023

Índice

Resumen.....	3
Introducción.....	4
Los comienzos de una nueva tecnología.....	4
¿Qué significa estar en órbita?.....	5
Tipos de Órbitas.....	5
Un desafío nuevo: basura espacial.....	7
Análisis y definiciones.....	8
Física de un cohete.....	8
Etapas del lanzamiento.....	9
Mantenerse en órbita.....	10
Actualidad.....	12
¿Cómo se genera la basura espacial?.....	12
Cantidad de objetos en órbita LEO.....	14
Mega-constelaciones satelitales.....	15
Futuro.....	16
Síndrome de Kessler.....	16
Efectos en la astronomía.....	16
Tratando con basura espacial.....	18
Conclusiones.....	20
Referencias.....	22
Anexos.....	26

Resumen

La basura espacial se ha convertido en una nueva preocupación para la comunidad científica en el siglo XXI, y es a partir de lo anterior que se busca entender la situación en la que se encuentra actualmente el medio ambiente espacial, con tal de encontrar posibles vías de solución para la misma. Por lo anterior, se define un objetivo general que consiste en analizar desde una perspectiva científica, apoyada en la ingeniería y la astronomía, la relevancia de la basura espacial para el desarrollo científico y tecnológico del siglo XXI.

Con ese fin, y mediante una revisión bibliográfica, se dió paso a reunir el contexto histórico necesario, junto con comprender a profundidad las principales definiciones científicas, tipos de órbitas y principales análisis físicos como primer conjunto de conocimientos básicos. Posteriormente, se realizó una revisión de las principales ecuaciones físicas y conceptos aeroespaciales del área, además de las principales etapas del lanzamiento de un satélite. Luego, se dio una revisión de antecedentes actuales sobre la problemática y principales preocupaciones, que vino acompañada de un análisis de los potenciales riesgos a considerar en el futuro del medio ambiente espacial.

En conclusión, se da cuenta de la relevancia de la basura espacial como un nuevo desafío a considerar por las entidades y empresas usuarias de las órbitas espaciales cercanas a la Tierra, ya que los beneficios que otorgan para el desarrollo humano deben ir acompañados de medidas de sostenibilidad del medio ambiente espacial.

Introducción

Los comienzos de una nueva tecnología

Cuando hablamos de un satélite (o satélite artificial), debemos definirlo como un **objeto construido para ser lanzado al espacio** y luego puesto en órbita o dirigido en una dirección particular (en ese caso hablamos de sondas espaciales). Estos tienen fines de todo tipo, como: comunicaciones, militares, científicos, observación terrestre y espacial, entre muchos otros. Pero para entender mejor cómo se han desarrollado estas tecnologías, cotidianas actualmente pero que en algún momento fueron revolucionarias para el humano, debemos remontarnos a los inicios de la Guerra Fría.

Siendo el 4 de octubre de 1957, la Unión Soviética logra lanzar el primer satélite artificial de la historia, el **Sputnik 1**, una esfera de aluminio con 4 antenas sobresalientes, capaces de transmitir ondas de radio hacia la tierra, gracias a los instrumentos con los que contaba. Si bien la historia que continúa después de este lanzamiento ya es bien conocida como la famosa “carrera espacial” entre Estados Unidos y la Unión Soviética, hay una pregunta interesante de analizar: **¿Sputnik 1 sigue en órbita?**

La respuesta es **no**. Sputnik 1 se mantuvo en órbita 92 días en el espacio, realizando un total de 1440 órbitas, hasta su reentrada a la tierra el 4 de enero de 1958. Es decir, a pesar del tiempo en que estuvo en el espacio, **no logró mantenerse en órbita**. Por parte de Estados Unidos la situación fue similar. Lanzaron el satélite **Explorer 1**, también con fines comunicacionales, y se mantuvo en órbita **12 años**, realizando más de 58.000 órbitas alrededor del planeta. Y de la misma forma que Sputnik 1, también se desintegró en su reentrada.

Por lo tanto, a pesar del tiempo en que puede estar en órbita un satélite, sabemos que se enfrentará a una eventual reentrada a la Tierra donde se destruya por completo. Sin embargo, ¿qué condición debe cambiar para que lo anterior no suceda? Es ahí donde las definiciones de **órbitas y los vuelos orbitales** aparecen como solución.

¿Qué significa estar en órbita?

Cuando hablamos de una **órbita**, en pocas palabras, la podemos definir como una trayectoria alrededor de un centro, en este caso de la Tierra, gracias al efecto de la fuerza gravitacional. Por otro lado, al hablar de vuelos orbitales nos referimos a posicionar un satélite artificial en el espacio, donde permanezca al menos una órbita completa a la tierra.

Para esto, se requiere estar en una altitud aproximada de **100 km.** por encima de la Tierra, altura conocida como la “línea de Karman”. La importancia de este valor recae en que se plantea como un límite a partir de donde la densidad del aire es tan baja (valores menores a 1 kg/m³) que se requiere una velocidad muy alta para llegar allí, alcanzada solamente por cohetes o vehículos espaciales.

Tipos de Órbitas

Anteriormente se mencionaron algunos conceptos sobre un objeto en órbita, como la diferencia entre una órbita y un “vuelo orbital”, ya que este último se refiere estrictamente a la trayectoria que siguen los satélites artificiales lanzados desde la tierra.

Primero debemos entender que existen diferentes órbitas dependiendo de las funciones del satélite. La más conocida, y que presenta la mayor cantidad de objetos en órbita (satélites funcionales y basura espacial) es la órbita **LEO (low-earth-orbit)**, una órbita de baja altura como dice su nombre, que puede ser medida según **su distancia desde la Tierra** (entre 100 km y 2000 km) o su **período alrededor de la Tierra** (aprox. 128 minutos o 2 horas de traslado). Al ser una zona cercana es posible mantener mejores comunicaciones con los satélites, por lo que abundan satélites de telecomunicaciones, los cuales generalmente forman redes para lograr una mejor conexión. Sin embargo, un detalle importante es que la velocidad con la que se desplaza un satélite en LEO es muy rápida, por lo que no permite capturar información, como es el caso de los satélites meteorológicos. Como ejemplo, podemos tomar a la Estación Espacial

Internacional (ISS), ubicada a una altura de 400 km. sobre la tierra, la cual se desplaza a una velocidad de **27.500 km/h** con respecto a la superficie terrestre.

Otra órbita utilizada es conocida como **MEO (mid-earth-orbit)**, ubicada entre 2000 km y 36.000 km aproximadamente. Esta zona en particular no es tan utilizada como otras, debido a la presencia de los Cinturones de Van Allen, los cuales atrapan el viento solar y, por lo tanto, concentran una gran cantidad de energía dañina para satélites. A pesar de lo anterior, es utilizada como principal órbita para sistemas de navegación como el Global Positioning System (conocido como GPS). El sistema anterior hace uso de una órbita dentro de MEO, conocida como órbita semi síncrona, que con un periodo de 12 horas, permite a los satélites de navegación sobrepasar una misma ubicación 2 veces al día.

Existe otra órbita conocida como **GEO (geostationary-equator-orbit)**. Se encuentran a una distancia aproximada de 36.000 km. sobre la línea ecuatorial, con un periodo de 24 horas. Estos detalles permiten que el satélite se mantenga en la misma posición si lo miráramos desde la tierra, por lo que se le coloca el nombre de “estacionario”. Tal como lo mencionado, esta órbita es muy utilizada por satélites meteorológicos que requieren una posición fija, con respecto al cielo, para lograr registrar una misma imagen de la tierra. Lo anterior también se logra gracias a la velocidad orbital en esta órbita. En promedio, un satélite en GEO orbita a unos 10.800 km/h (como velocidad orbital, ya que con respecto a la superficie terrestre está inmóvil), que comparado con la velocidad de la ISS es de menos de la mitad.

A modo de complemento, la [figura n°1](#) indica, de modo ilustrativo, cómo están posicionadas algunas órbitas considerando sus distancias e inclinaciones con respecto al eje de la Tierra.

Un desafío nuevo: basura espacial

La basura espacial ha surgido como una problemática desde hace algunas décadas. Definida como *“todo objeto artificial, no funcional, incluyendo fragmentos de ellos, en órbita con la Tierra o re-entrando a la atmósfera terrestre”* (European Space Agency, 2021, traducido del inglés).

Una de las mayores preocupaciones es el rápido crecimiento en la cantidad de satélites que se envían al espacio, los cuales una vez cumplida su vida útil, influyen directamente en la cantidad de objetos calificados como basura espacial. A modo de ejemplo, en la [figura n°2](#) el astrofísico norteamericano Jonathan McDowell grafica la altura de los objetos espaciales en función de su cantidad. El color verde y rojo corresponden a satélites activos e inactivos respectivamente, mientras que el color negro corresponde a cualquier otro fragmento/objeto como basura espacial.

En este ensayo monográfico se buscará analizar desde una perspectiva científica, apoyada en la ingeniería y la astronomía, la relevancia de la basura espacial para el desarrollo científico y tecnológico del siglo XXI.

A través de diferentes capítulos que separan los puntos más importantes a revisar (análisis de principales etapas del lanzamiento de un satélite, estado actual del manejo de la basura espacial, principales causas y consecuencias a considerar para el futuro) se busca entregar los conocimientos necesarios para desarrollar un enfoque particular, que permita incluir la basura espacial dentro de la discusión por el cuidado medioambiental global.

Análisis y definiciones

Física de un cohete

Existen varios aspectos a considerar cuando queremos entender la física detrás de un satélite (o basura espacial) en órbita, ya que existen diferentes etapas importantes para su lanzamiento.

Una de ellas es el lanzamiento del cohete que llevará el satélite a órbita. Para ello, en 1897, el físico soviético Konstantin Tsiolkovski deriva la conocida **ecuación del cohete**. Se define como:

$$\Delta v = I_S g \ln (m_i/m_f)$$

o

$$\Delta v = v_E \ln (m_i/m_f)$$

donde:

Δv = incremento de la velocidad

g = aceleración de gravedad,

I_S = impulso específico del cohete

m_i = masa inicial, m_f = masa final

$v_E = I_S g$ = velocidad de escape efectiva

Algunos aspectos interesantes de analizar:

- Δv , el resultado de la ecuación, nos señala el cambio (o aumento) de la velocidad del cohete gracias a la variación de su masa inicial con respecto a su masa final (necesariamente menor).
- I_S , o impulso específico, nos señala el tiempo (seg.) en el cual un combustible puede mantener un empuje (Newtons) igual al peso del combustible ($m_c \cdot g$).
- Finalmente, v_E (m/s) indica la velocidad de escape efectiva que, bajo esta ecuación, es crucial debido a que el cohete, para lograr ascender, va perdiendo masa de combustible en forma de gas.

Comparemos dos casos que sirvan como modelo para entender mejor la ecuación:

Por un lado tenemos al famoso cohete Saturn V (responsable de las misiones a la Luna) con un empuje de **7.770.000 newtons** y un impulso específico de **304 seg**. Por el otro tenemos al moderno cohete Falcon 9 de la empresa SpaceX, con un empuje de **914.000 newtons** y un impulso específico de **311 seg**.

¿Cómo se entiende esa diferencia de empuje, mientras que sus impulsos específicos son similares? La respuesta recae en las características de cada cohete.

El Saturn V estaba diseñado para superar toda órbita terrestre (que significa una gran masa de combustible), por medio de distintas fases (ver [figura n°3](#)). Con eso, su empuje lograría ser el necesario para lograr la trayectoria correcta hacia la Luna. Por otro lado, El Falcon 9 ha sido diseñado como un cohete que principalmente trabaja en órbitas terrestres (LEO, MEO, GEO), por lo que no tiene que considerar una gran masa de combustible para su uso, lo que le permite priorizar, por ejemplo, lanzamientos de satélites y/o sondas.

Etapas del lanzamiento

Para cada satélite, al momento de su puesta en órbita, existió una planificación y logística detrás, la cual mediante diferentes etapas, va posicionando y preparando al satélite para su correcto funcionamiento. Para describir el proceso, se pueden separar algunas etapas:

- A. Una vez ensamblado y anclado el satélite al respectivo cohete que lo elevará, se realizan los chequeos correspondientes previos al lanzamiento. Es aquí donde, generalmente, las primeras fases de los cohetes son las responsables de alcanzar la velocidad necesaria para superar a la atmósfera.
- B. Ya en altura la primera fase del cohete es desechada, y luego, dependiendo de la órbita deseada, el cohete puede contar con más fases disponibles (con el fin de alcanzar mayor altura).

- C. Para colocarse correctamente en la órbita deseada (ej. LEO, MEO, GEO), se busca utilizar una trayectoria conocida como “órbita de transferencia” la cual, si bien no es una órbita definida para el satélite, le permite tomar la trayectoria de la órbita que se desea. A modo de ejemplo, la [figura n°4](#) señala una órbita de transferencia para alcanzar una órbita de tipo GEO (geostationary-equator-orbit).
- D. Con el satélite orbitando correctamente, se suelen realizar los primeros procedimientos para encender los circuitos de este (en el caso de no haber sido activados antes), con lo cual se puede confirmar que ya se encuentra en funcionamiento.
- E. Finalmente, y solamente si se cuenta con ellos, los motores del satélite pueden ser encendidos para corregir su órbita o inclinación, como también para posicionarlo en una “órbita cementerio” al término de su vida útil, lo que permite liberar el espacio utilizado en la órbita correspondiente.

Mantenerse en órbita

Una vez que un satélite ya se encuentra en órbita alrededor de la Tierra, podemos analizar su movimiento en relación a esta. ¿A qué velocidad se traslada?, ¿cuánta energía cinética posee?, son algunas de las preguntas que se pueden realizar.

Para este análisis, primero se debe definir la Ley de la Gravitación Universal de Newton:

$$F_g = G (m_1 m_2 / r^2)$$

donde:

m_1, m_2 = masa 1 y masa 2

r = distancia entre los centros de masas de m_1 y m_2

G = cte. de gravitación universal = $6,67 \times 10^{-11}$ (N m² / kg²)

Aplicado al caso de un satélite, la ecuación se puede volver a reescribir de una de las formas más conocidas:

$$F_g = G M_{Tierra} m_{satélite} / (R + h_{satélite})^2$$

con

$$M_{\text{Tierra}} = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg y } R = 6,38 \times 10^6 \text{ m}$$

Luego, podemos obtener la ecuación de velocidad orbital, para lo que se debe realizar la siguiente igualdad:

$$F_g = F_{\text{centrípeta}}$$
$$G M_{\text{Tierra}} m_{\text{satélite}} / (R + h_{\text{satélite}})^2 = m_{\text{satélite}} v^2 / (R + h_{\text{satélite}})$$

Dado lo anterior, se debe despejar v:

$$v_{\text{orbital}} = [G M_{\text{Tierra}} / (R + h_{\text{satélite}})]^{0.5}$$

A modo de ejemplo, podemos calcular entonces la velocidad orbital y la energía cinética, por ejemplo, de la Estación Espacial Internacional (ISS), la cual está ubicada a 400 km sobre la superficie terrestre:

$$v_{\text{orbital}} = [6,67 \times 10^{-11} \text{ (Nm}^2\text{/kg}^2) \cdot 5,98 \times 10^{24} \text{ kg} / (6,38 \times 10^6 \text{ m} + 4 \times 10^5 \text{ m})]^{0.5}$$

$$v_{\text{orbital}} = 7670 \text{ m/s} = 7,67 \text{ km/s} = 27612 \text{ km/h}$$

Luego, podemos obtener una estimación de la energía cinética con la que se desplaza, considerando que su masa es de 419 725 kg, tal que

$$K_{\text{EEI}} = 0,5 m v^2$$

$$K_{\text{EEI}} = 0,5 \cdot 419\,725 \text{ kg} \cdot (7670 \text{ m/s})^2$$

$$K_{\text{EEI}} = 1,23 \times 10^{13} \text{ J}$$

Actualidad

Al momento de lanzar un satélite, una nueva preocupación que surge es la **cantidad de objetos que orbitan la Tierra**. Para entender la acumulada población de objetos que existe, la ESA (agencia espacial europea) junto a la NASA (agencia espacial estadounidense) mantienen vigilancia y conteo sobre cuántos objetos orbitan la Tierra.

Al 12 de septiembre de 2023, ESA mantiene contabilizados a **8.900** satélites operativos. Por otro lado, hasta el día 4 de septiembre de 2023, el U.S Space Surveillance Network (SSN) tiene catalogados/identificados a **27.355** objetos, entre los que se consideran a satélites activos o no, cuerpos de cohete, estanques de combustible, entre otros. Ambos números corresponden a objetos que pueden ser visualizados desde la Tierra, sin embargo, al momento de considerar fragmentos de menor tamaño (menores a 10 cm), la tecnología actual no es capaz de rastrear objetos tan pequeños a velocidades tan altas, por lo que se debe recurrir a cálculos estadísticos para estimar la cantidad de material artificial orbitando el planeta.

Según la oficina de Basura Espacial (Space Debris Office) de la ESA, la cantidad de objetos según tamaño es:

36.500 objetos mayores a 10 cm
1.000.000 de objetos entre 1 cm y 10 cm
130 millones de objetos entre 1 mm y 1 cm

¿Cómo se genera la basura espacial?

Primero debe ser señalado que si bien se pueden detectar varias causas por las que existe basura espacial en órbita, muchos de los fragmentos (sobre todo de tamaños pequeños) no tienen un origen señalado. Algunas de las causas que sí se pueden analizar son:

- **Accidentales** (en su mayoría, sistemas fallidos que se destruyen)
- **Colisiones**

- **Intencionales** (por ejemplo, sistemas anti-satelitales)
- **Propulsión** (cuerpos de cohetes que quedan en órbita)

En la [figura n°5](#) se encuentra una gráfica, proporcionada por el reporte ambiental de la basura espacial de la ESA (ESA Space Debris Environment Report), en la que se puede observar como la propulsión es una de las mayores causas dentro de los objetos identificados. Lo anterior se debe principalmente al alto costo de reutilizar estanques de combustible o etapas de cohetes, ya que para lograr usarlos de nuevo deben ser capaces de resistir la reentrada atmosférica, además de estar en condiciones de soportar un nuevo despegue.

Otra causa interesante de analizar son las colisiones en órbita. Representan un riesgo muy preocupante para satélites en funcionamiento, ya que pueden encontrarse con fragmentos de la colisión a velocidades muy altas. A modo de ejemplo, han existido 2 eventos de colisión entre satélites notorios para la historia espacial:

1. Colisión Iridium 33-Kosmos 2251:

Ocurrió el 10 de febrero de 2009 entre 2 satélites, uno de telecomunicaciones norteamericano (Iridium 33) y otro, inoperativo, con fines militares rusos (Kosmos 2251). Una de las principales causas de este evento fue que el segundo satélite, inactivo desde hace años, no contaba con medidas de re-entrada a la atmósfera ni control desde tierra, por lo que se mantuvo en órbita.

Esas son muy importantes actualmente ya que se busca establecer, dentro de la vida útil del satélite, maniobras como cambios de dirección y quema de combustible, lo que permite generar una re-entrada exitosa a la atmósfera, en la que los satélites se queman y desintegran sin peligro.

2. Destrucción Fengyun-1C:

El año 2007, el satélite climático chino Fengyun-1C fue destruido por un sistema anti-satelital como parte de una prueba militar. Se posicionó el sistema a 8 km/s y en dirección contraria a la órbita del satélite. Este evento es reconocido como uno de los pocos intentos exitosos de interceptación de satélites, donde si bien no corresponde a una colisión causada por basura espacial, sus fragmentos se mantienen como uno de los grupos más grandes de basura espacial en órbita.

Ambos eventos son considerados como los mayores causantes de basura espacial en órbita, sumando alrededor de 4298 fragmentos identificados al 2017.

Cantidad de objetos en órbita LEO

Lo anterior permite generar una reflexión acerca del estado actual de la órbita LEO (low-earth-orbit), es decir, la más cercana a la Tierra. Para eso, el astrónomo del Centro de Astronomía Harvard-Smithsonian (CfA) Jonathan McDowell se ha dedicado por años a llevar registro de la población y posición de objetos en esta órbita.

En McDowell, J (2020), se retrata el estado actual de la órbita: en la [figura n°6](#) está graficada la cantidad de objetos en la órbita LEO superior (arriba de 600 km), donde se logra observar que la cantidad de satélites activos (color rojo) es considerablemente menor al resto de objetos en órbita. También se puede señalar su crecimiento constante, aumentando en 500 satélites aprox. los últimos 20 años.

Dentro del resto de objetos en órbita se señalan etapas de cohetes, satélites inactivos, fragmentos (incluyendo las dos colisiones señaladas anteriormente), que alcanzan a sumar 13.500 objetos aproximadamente. Esa cantidad corresponde a basura espacial que, principalmente, no cuenta con la capacidad de reingresar a la atmósfera para desintegrarse, por lo que su tiempo de órbita restante es indefinido. Este último detalle puede ser observado con facilidad en la figura ya que, si se toma la referencia de tiempo ubicada en el eje inferior, la cantidad de objetos no ha cambiado considerablemente en las últimas dos décadas.

En el mismo documento, en específico la [figura n°7](#), McDowell grafica de la misma forma la cantidad de objetos en la órbita LEO inferior (debajo de 600 km). Acá se logra observar la tendencia de colocar satélites activos en esta zona, en especial en la última década de actividad. Según el astrofísico, una de las razones del rápido crecimiento en esta zona corresponde al lanzamiento de cubesats (nanosatélites) que, a diferencia de los satélites tradicionales, cuentan con un formato pequeño (10x10x10 cm. A modo de ejemplo, véase [figura n°8](#)) que permite disminuir el costo y tiempo de fabricación, facilitando entonces la producción y lanzamiento masivo de estos satélites.

Junto a lo anterior, también se logra observar un rápido crecimiento debido al programa espacial de telecomunicaciones “Starlink” de la empresa estadounidense SpaceX, que incluso llega a sobrepasar la cantidad de objetos que anteriormente se encontraban en órbita.

Mega-constelaciones satelitales

Es en esa misma línea que, a raíz de los constantes lanzamientos de SpaceX, se discute acerca de las nuevas “mega-constelaciones”. Una de ellas, la que se está construyendo en el programa “Starlink”, consiste en grupos de satélites de telecomunicaciones con el objetivo de ofrecer internet satelital de alta velocidad. Sin embargo, el programa ya tiene confirmado el lanzamiento de 12.000 satélites, y podría confirmar el lanzamiento de 30.000 más.

¿Qué podría significar, para los futuros lanzamientos espaciales, la aparición de miles de satélites en órbita? Es claro que acorta la posibilidad de acceder a un espacio seguro para nuevas misiones espaciales en órbitas terrestres bajas, como también para las que actualmente se encuentran en funcionamiento. Una consecuencia de aquello ha sido el desarrollo de maniobras de evasión cuando existe riesgo de colisión con otro objeto de tamaño considerable. A modo de ejemplo, la estación espacial internacional (ISS) está en constante alerta de basura espacial que pueda impactarla, y desde su puesta en órbita en 1999, ha debido modificar su posición 32 veces. Si se considera la aparición de mega-constelaciones como la de SpaceX, Amazon, además de otras compañías, Jonathan McDowell compara la órbita con una “*carretera interestatal, en hora punta con una tormenta de nieve y todos manejando muy rápido*” (McDowell, citado en Space, 2023).

Futuro

Síndrome de Kessler

Si actualmente la órbita LEO, por ejemplo, ya se considera sobrepoblada, ¿qué podemos esperar en 10, 30, 50 años más? Donald J. Kessler es un astrofísico norteamericano reconocido internacionalmente por plantear esa pregunta desde hace décadas atrás. Desde 1978, Kessler plantea la posibilidad de que el aumento de población satelital provocaría, a futuro, un aumento de colisiones entre objetos ya identificados. Lo anterior daría paso a que cada colisión generara nuevos fragmentos, que resultarían en un aumento exponencial en la tasa de colisiones y en la cantidad de nuevos fragmentos en órbita. Esto se definiría como una cascada colisional (collisional cascading) de la población satelital, tomando el nombre de “Síndrome de Kessler”.

En otras palabras, Kessler lo definiría como

un fenómeno en el que colisiones aleatorias, entre objetos lo suficientemente grandes para catalogarse, podrían generar un riesgo para los satélites más grande que el riesgo que ya genera el ambiente natural de meteoroides (Kessler, D.J. 2009).

Según la comunidad científica, la aparición de mega-constelaciones satelitales podría significar una alteración al medio ambiente espacial. Con las tecnologías actuales, se considera la posibilidad de que el lanzamiento de diversas constelaciones genere más de 67.000 alertas de colisión al año (Peterson, G. citado en MIT Technology Review, 2019).

Efectos en la astronomía

Dentro de los peligros que se evalúan para futuros lanzamientos de satélites también ha surgido la preocupación científica por la observación astronómica, y como el constante aumento de satélites en órbitas bajas podría significar a futuro. A modo de ejemplo, en la [figura n°9](#) se puede observar una imagen captada en 2019, en el observatorio Victor Blanco de Cerro Tololo (CTIO) ubicado en la región de Coquimbo. En ella se distinguen

líneas blancas que “manchan” la exposición del espacio, que estarían causadas por el paso de uno de los lotes de satélites Starlink.

Para entender lo anterior, se debe considerar un elemento importante: al momento en que los satélites (o basura espacial) realizan su órbita, son capaces de reflejar la luz del Sol hacia la Tierra. Lo anterior, al momento de realizar observaciones astronómicas, se observa como rastros de luz en las imágenes, como se señaló anteriormente. A su vez, con el aumento de satélites en la órbita LEO, también se ha detectado un aumento en el brillo del cielo nocturno (night-sky-brightness o NSB en inglés). Para la investigación astronómica, lo anterior trae consecuencias que significan cambios relevantes en la forma en la que se realiza astronomía. En Barentine, Venkatesan, Heim, et al. (2023) se señalan algunas:

- **Pérdida de datos para la astronomía profesional**

Un aumento significativo en el NSB repercute en el tiempo de exposición necesario para obtener imágenes, como también podría disminuir la distancia máxima de observación desde la Tierra.

- **Accesibilidad en la astronomía**

En la astronomía profesional, los tiempos de observación en telescopios terrestres son acotados y muy competitivos, y de manera similar ocurre para los modernos telescopios espaciales. Al disminuir los tiempos de observación, se deben realizar más filtros para decidir qué investigación obtendrá acceso a ellos, por lo que daría paso a una reducción, en general, de los proyectos que requieran usar algún telescopio para su investigación.

De la misma forma en que se han identificado algunas consecuencias, también se han propuesto soluciones que permitan asegurar un desarrollo científico para los años siguientes, como por ejemplo, definir regulaciones para el diseño de futuros satélites que cuenten con la tecnología necesaria para no reflejar la luz solar, o modificar su órbita con tal de no sobrepasar algún telescopio terrestre o espacial.

Tratando con basura espacial

Las consecuencias de la basura espacial han sido reflexionadas y analizadas con especial detalle en el último tiempo, y junto a eso, también han surgido propuestas para disminuir sus efectos negativos, tanto en la actualidad como a futuro.

Algunas de las soluciones planteadas dentro de la comunidad científica se relacionan con establecer regulaciones que deban cumplir futuros satélites, como por ejemplo:

- **Tiempo de vida delimitado**

La Agencia Espacial Europea (ESA) ha recomendado que, tanto satélites como otro tipo de cuerpos grandes, sean programados para reingresar a la atmósfera y desintegrarse luego de cumplir 25 años sin actividad. Lo anterior con especial énfasis en la órbita LEO, bajo los 2000 km de altura, donde se concentra la mayor cantidad de satélites inactivos.

- **Órbita “cementerio”**

Los satélites ubicados en órbitas lejanas como GEO o MEO, luego de cumplir su vida útil, pueden ser reubicados en órbitas más lejanas (300 km por encima). De esta forma, liberan el espacio que futuras misiones podrían utilizar en este tipo de órbitas muy útiles actualmente.

- **Pasivación de sistemas**

Según la ESA, una forma de evitar la explosión accidental de un satélite en órbita es vaciando toda fuente de energía restante del sistema, ya sea mediante la quema controlada de combustible, descarga de baterías, descarga de tanques presurizados, entre otras.

Por otro lado, también se consideran proyectos que buscan remover la basura espacial mediante dispositivos enviados al espacio con ese fin en específico. Por medio de un “rendezvous” (encuentro) espacial, compañías como Astroscale (Japón) buscan hacer uso de sistemas magnéticos para reingresar basura espacial a la atmósfera. Sin

embargo, debido a todo el proceso de enviar al espacio un nuevo satélite, este método es uno de los más caros dentro del mercado (Federation of American Scientists, 2023).

Otros métodos que se han propuesto han sido el uso de láseres orbitales que, por medio de pulsos, desintegran una pequeña parte del objeto, frenándolo y cambiando su órbita con tal de que reingrese a la atmósfera. Estos pueden ser posicionados en la superficie terrestre o en satélites en órbita y, de cualquiera de las dos formas, podrían reducir significativamente la cantidad de basura espacial en órbita, como se puede observar en la [figura n°10](#), las líneas ubicadas en la zona inferior del gráfico (de colores rojo, amarillo y verde) corresponden a métodos de eliminación de basura espacial mediante láseres.

Conclusiones

El objetivo general de este ensayo monográfico es analizar desde una perspectiva científica, apoyada en la ingeniería y la astronomía, la relevancia de la basura espacial para el desarrollo científico y tecnológico del siglo XXI.

A partir de ella, se realizó una revisión a las principales definiciones científicas de qué es la basura espacial, que son necesarias para entender el área científica en la que se ubica esta problemática. Junto a eso, se detallaron las principales órbitas utilizadas por la industria espacial y la comunidad científica, las que permiten comprender las principales zonas críticas por el aumento de la basura espacial.

Posteriormente, se desarrollaron ecuaciones físicas y conceptos aeroespaciales que entregan una visión integral de cómo es que se logra llevar un satélite a una órbita espacial. Junto con eso, también se detallaron las principales etapas que ocurren cuando se realiza el lanzamiento de un satélite por medio de un cohete, lo que resume de forma objetiva todo el proceso detrás de la puesta en órbita y funcionamiento de un satélite.

Junto a lo anterior, se realizó una recopilación y análisis de las principales fuentes de datos sobre basura espacial, en los que remarca, por ejemplo, la cantidad aproximada de fragmentos actualmente en órbita, junto con las principales causas y mayores eventos responsables del aumento de basura espacial, ya sean satélites inactivos como pequeños fragmentos de ellos. Además, se incluyó dentro del análisis a las mega-constelaciones de satélites, como funcionan y porque representan un gran daño a las órbitas más cercanas a la Tierra.

Finalmente, utilizando de base los antecedentes anteriores, se generó una revisión de los potenciales riesgos a los que se enfrentan futuras misiones espaciales, uno de ellos conocido como el “Síndrome de Kessler”. De la misma forma, también se revisaron las principales preocupaciones desde la astronomía con respecto a lo que la basura espacial ha generado, junto con plantear lo que podría generar en la práctica de la observación para el futuro del campo científico.

Considerando lo anterior, efectivamente la basura espacial puede ser considerada de vital importancia para el desarrollo de la ciencia y la ingeniería, no solo por los que actualmente ha causado, sino también por la forma en que, como problemática, puede seguir desarrollándose y creciendo, lo que refuerza la posición de plantear a la basura espacial como una grave consecuencia del constante desarrollo, en materia espacial, que no considera sostenibilidad dentro su desarrollo y organización.

Es por eso que, a partir de los antecedentes recolectados y los análisis realizados en este ensayo monográfico, surge importante que entidades/empresas aeroespaciales, tanto privadas como estatales, comiencen a considerar dentro de su propio crecimiento las medidas de sostenibilidad que les permitan seguir utilizando los extensos beneficios del medio ambiente espacial, tal como han sido utilizados durante más de un siglo de investigaciones e importantes logros para la humanidad.

Referencias

Union of Concerned Scientists. (enero 2023). *UCS Satellite database*.
<https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database>

Zak, A. (octubre 2021). *First artificial satellite orbits the Earth*.
https://www.russianspaceweb.com/sputnik_mission.html

Loff, S. (marzo 2015). *Explorer 1 Overview*. NASA.
https://www.nasa.gov/mission_pages/explorer/explorer-overview.html

NASA Orbital Debris Program Office. (junio 2023). *Orbital Debris Quarterly News*.
NASA. orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv27i2.pdf

McDowell, J. (2018). *Where Space Begins: Revisiting the Karman Line*. [Disertación, CfA]. <https://planet4589.org/talks/space/2018/dc.pdf>

Riebeek, H. (2009). *Catalog of Earth Satellite Orbits*. Earth Observatory NASA.
<https://earthobservatory.nasa.gov/features/OrbitsCatalog/page1.php>

European Space Agency. (s.f). *About Space Debris*.
https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/About_space_debris

Aguilar, L. (febrero 2007). *Dinámica de Cohetes*. [Archivo PDF].
http://www.astrosen.unam.mx/~aguilar/MySite/Teaching_files/cohetes_SinSols.pdf

Singh, R. (mayo 2020). *Explained: SpaceX and the Rocket Equation (for beginners)*.
Medium. <https://medium.com/swlh/explained-spacex-and-the-rocket-equation-for-beginners-aa427c091f97>

Khan Academy. (s.f). *¿Qué son el momento y el impulso?*

<https://es.khanacademy.org/science/physics/linear-momentum/momentum-tutorial/a/what-are-momentum-and-impulse>

FISICALAB. (s.f). *Energía mecánica satélite en órbita y trabajo de escape.*

<https://www.fiscalab.com/ejercicio/1599>

FISICALAB. (s.f). *Estabilidad dinámica de un satélite en órbita.*

<https://www.fiscalab.com/ejercicio/1598>

Ganado, C. (septiembre 2014). *Lanzamiento de satélites y operaciones en la órbita.*

Noticias de la Ciencia y la Tecnología.

<https://noticiadelaciencia.com/archive/11405/lanzamiento-de-satelites-y-operaciones-en-la-orbita>

Nave, C. (2017). *Órbita Circular.* HyperPhysics, Georgia State University.

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/orbv.html>

NASA. (s.f). *International Space Station. Facts and figures.*

<https://www.nasa.gov/international-space-station/space-station-facts-and-figures/>

European Space Agency. (julio 2019). *Fragmentation event database statistics.*

<https://fragmentation.esoc.esa.int/home/statistics>

European Space Agency. (s.f). *Space debris by the numbers.*

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

NASA Orbital Debris Program Office. (octubre 2023). *Orbital Debris Quarterly News.*

NASA. <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/ODQNv27i4.pdf>

McDowell, J. (julio 2021). *Space Debris*. [Disertación, Harvard].
<https://planet4589.org/talks/space/2021/spol.pdf>

McDowell, J. (2020). The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX Starlink constellation. *The Astrophysical Journal Letters*, 892(2), L36.
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab8016>

Caleb, H. (octubre 2019). *SpaceX submits paperwork for 30,000 more Starlink satellites*. Space News. <https://spacenews.com/spacex-submits-paperwork-for-30000-more-starlink-satellites/>

Howell, E. (marzo 2023). *How often does the International Space Station have to dodge space debris?*. SPACE. <https://www.space.com/international-space-station-space-dodge-debris-how-often>

Pultarova, T. (febrero 2023). *How many satellites can we safely fit in Earth orbit?*. SPACE. <https://www.space.com/how-many-satellites-fit-safely-earth-orbit>

O'Callaghan, J. (mayo 2019). *SpaceX's Starlink Could Cause Cascades of Space Junk*. Scientific American.
<https://www.scientificamerican.com/article/spacexs-starlink-could-cause-cascades-of-space-junk/>

Kessler, D. J. (marzo 2009). *The Kessler Syndrome. As Discussed by Donald J. Kessler*. University of Western Ontario.
<https://aquarid.physics.uwo.ca/kessler/KesSym.html>

Harris, M. (marzo 2019). *Why satellite mega-constellations are a threat to the future of space.* MIT Technology Review.

<https://www.technologyreview.com/2019/03/29/136268/why-satellite-mega-constellations-are-a-massive-threat-to-safety-in-space/>

Barentine, J.C., Venkatesan, A., Heim, J. et al. Aggregate effects of proliferating low-Earth-orbit objects and implications for astronomical data lost in the noise.

Nature Astronomy 7, 252–258 (2023).

<https://doi.org/10.1038/s41550-023-01904-2>

European Space Agency. (s.f). *Mitigating space debris generation.*

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

European Space Agency. (s.f). *Active debris removal.*

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

Pultarova, T. (agosto 2023). *Astroscale aims to capture old space junk with robotic arm*

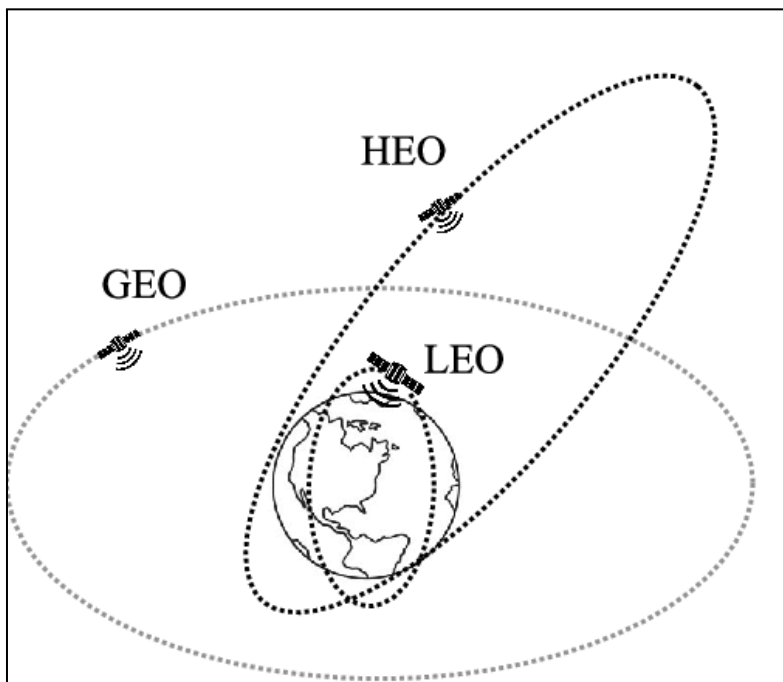
in 2026. SPACE. [https://www.space.com/astroscale-space-junk-removal-2026-](https://www.space.com/astroscale-space-junk-removal-2026-plan-exclusive-video)

[plan-exclusive-video](https://www.space.com/astroscale-space-junk-removal-2026-plan-exclusive-video)

Anexos

Figura 1

Ilustración de satélites ubicados en diferentes órbitas espaciales (LEO, HEO/MEO, GEO)

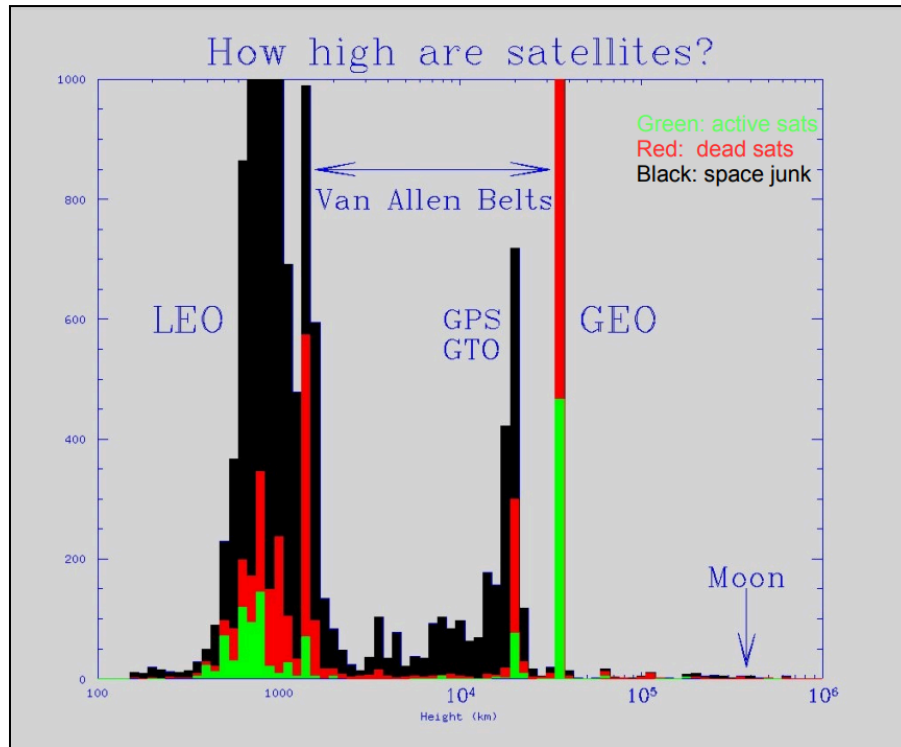


Nota. Recuperado de *Satélites de comunicações em diferentes órbitas (GEO, LEO, HEO)* por W. Melo, et. al, 2017.

(www.researchgate.net/figure/Satelites-de-comunicacoes-em-diferentes-orbitas-GEO-LEO-HEO_fig1_336000857)

Figura 2

Gráfico de comparación entre cantidad de satélites y altura desde la tierra a la que están ubicados.



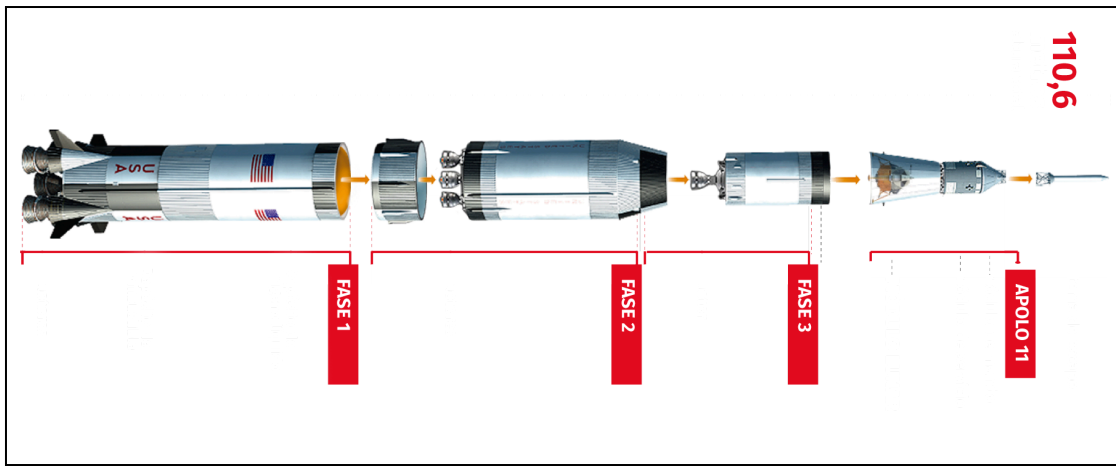
Nota. El color verde representa a satélites activos; el color rojo a satélites inactivos; el negro a basura espacial (fragmentos, etc.).

Recuperado de *Space Junk* (p.38), por J. McDowell, 2019.

(<https://planet4589.org/talks/space/global/junk19b.pdf>)

Figura 3

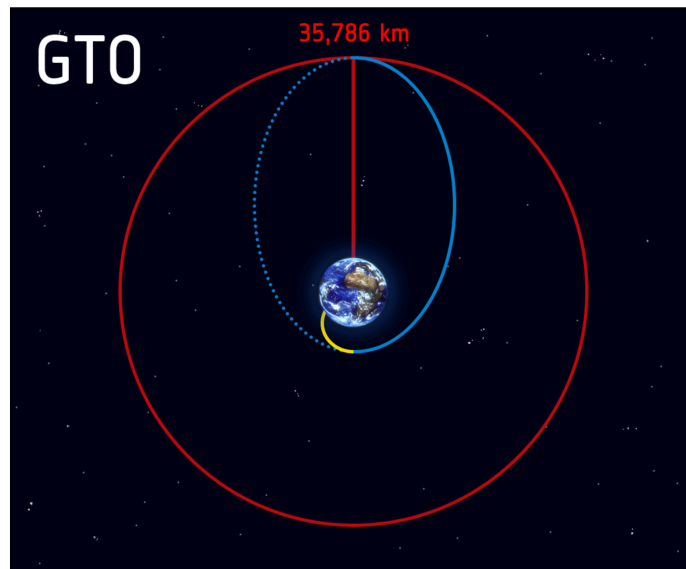
Separación de fases de un cohete Saturn V.



Nota. Tomado de *A 50 años de la llegada del hombre a la Luna*, por Rio Negro, 2019. (<https://www.rionegro.com.ar/a-50-anos-de-la-llegada-del-hombre-a-la-luna-1038394/>)

Figura 4

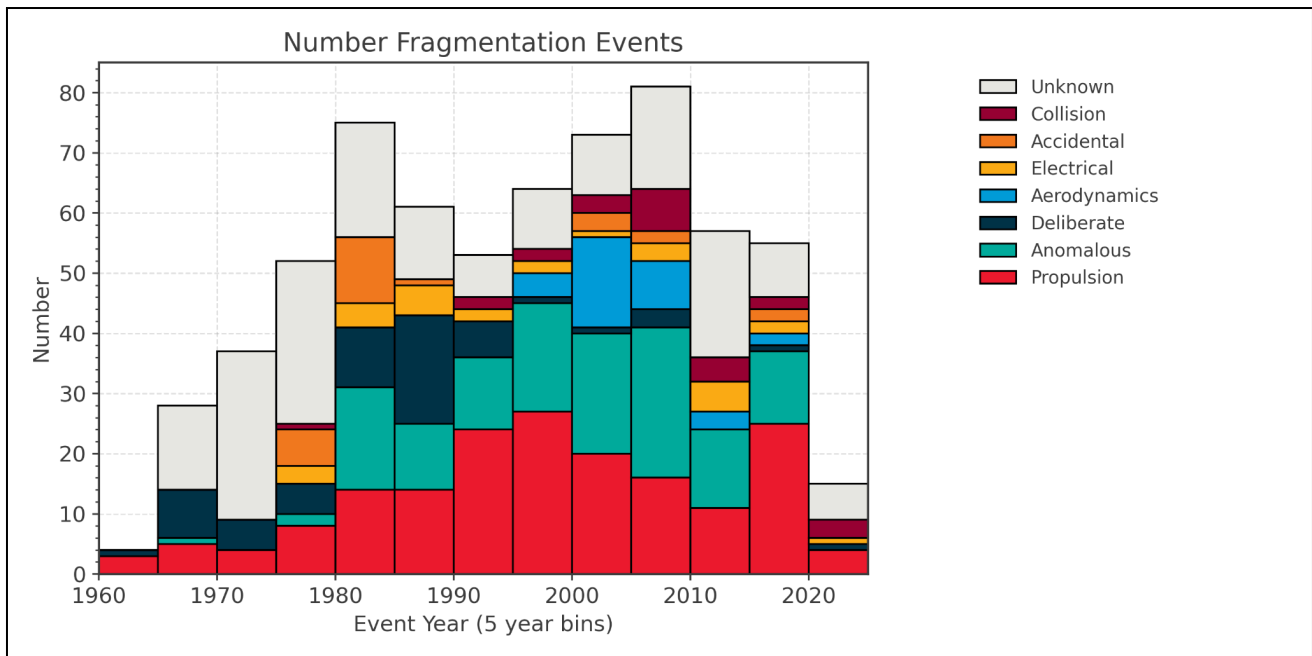
Ilustración de la órbita de transferencia para GEO (geostationary-equator-orbit)



Nota. Tomado de *Geostationary transfer orbit*, por European Space Agency (ESA), 2020. (https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/03/Geostationary_transfer_orbit)

Figura 5

Gráfico que compara cantidad de eventos de fragmentación con el año en que ocurrió.



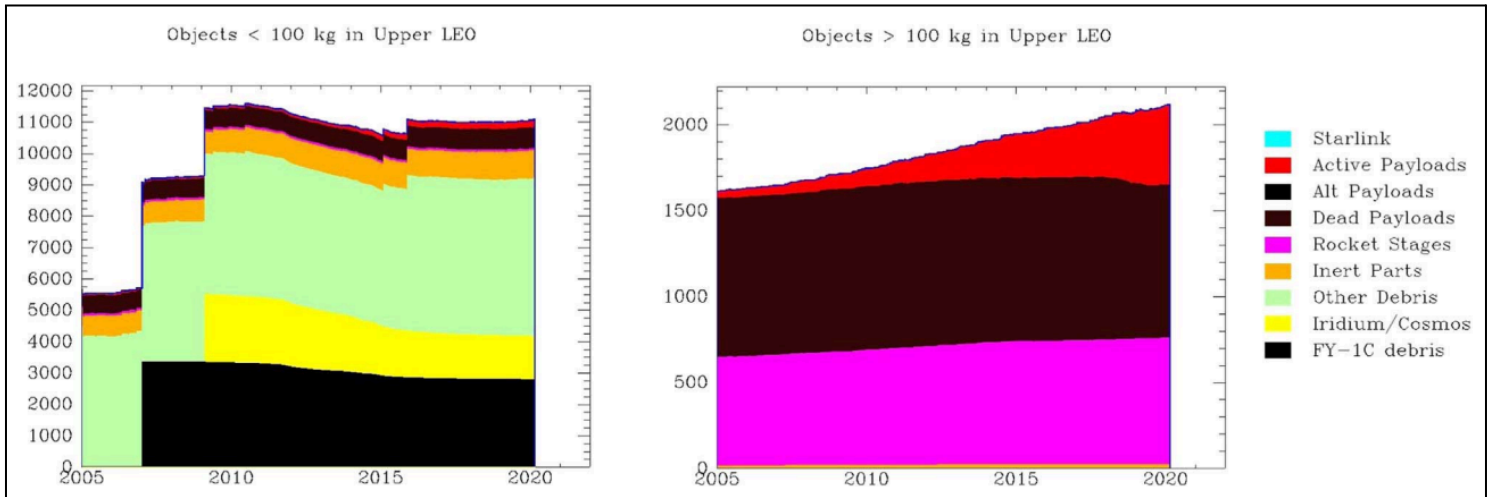
Nota. En diversos colores, se señalan las causas de los eventos causantes de fragmentos (colisión, accidente, propulsión, deliberado, etc).

Recuperado de *Space Environment Statistics* por la Oficina de Basura Espacial de la ESA (ESA's Space Debris Office), 2023.

(<https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics/>)

Figura 6

Gráficos de la evolución de la cantidad de objetos en órbita LEO superior frente al año de registro. A la izquierda, para objetos menores a 100 kg, y a la derecha, para objetos mayores a 100 kg.



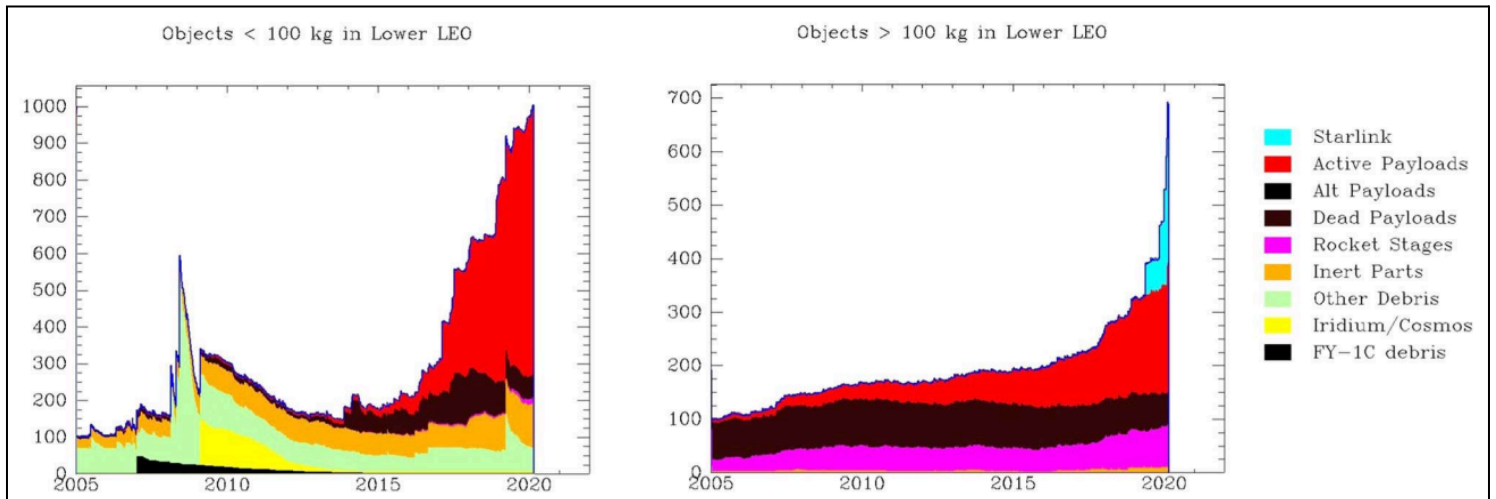
Nota. En diversos colores se señalan las categorías de los objetos clasificados (Starlink, colisión Iridium/Cosmos, accidente FY-1C, etc).

Recuperado de *The Low Earth Orbit Satellite Population and Impacts of the SpaceX Starlink Constellation* (p.2), por J. McDowell, 2020.

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ab8016/pdf>

Figura 7

Gráficos de la evolución de la cantidad de objetos en órbita LEO superior frente al año de registro. A la izquierda, para objetos menores a 100 kg, y a la derecha, para objetos mayores a 100 kg.



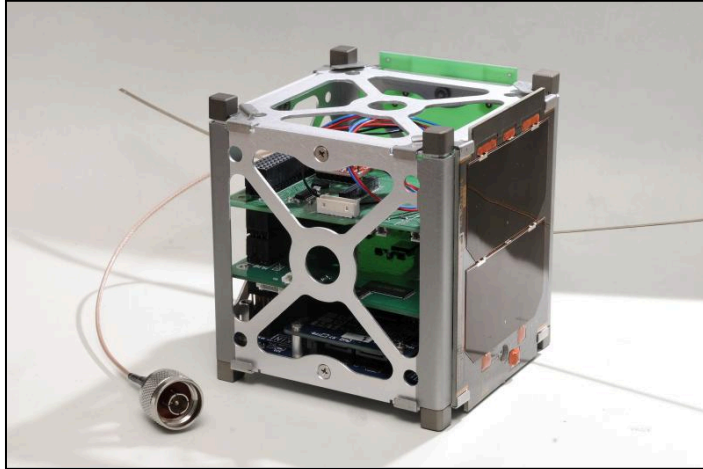
Nota. En diversos colores se señalan las categorías de los objetos clasificados (Starlink, colisión Iridium/Cosmos, accidente FY-1C, etc).

Recuperado de *The Low Earth Orbit Satellite Population and Impacts of the SpaceX Starlink Constellation* (p.3), por J. McDowell, 2020.

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ab8016/pdf>

Figura 8

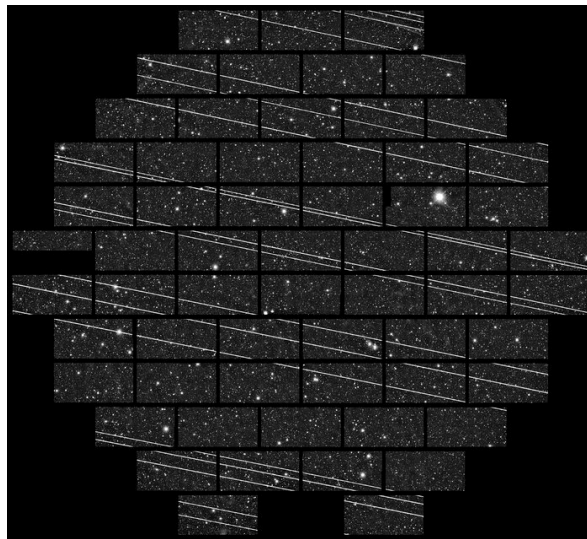
Nanosatélite "Suchai 1" de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile



Nota. Recuperado de *Suchai*, por SPEL (Space and Planetary Exploration Laboratory), 2017. (<https://spel.ing.uchile.cl/suchai.html>)

Figura 9

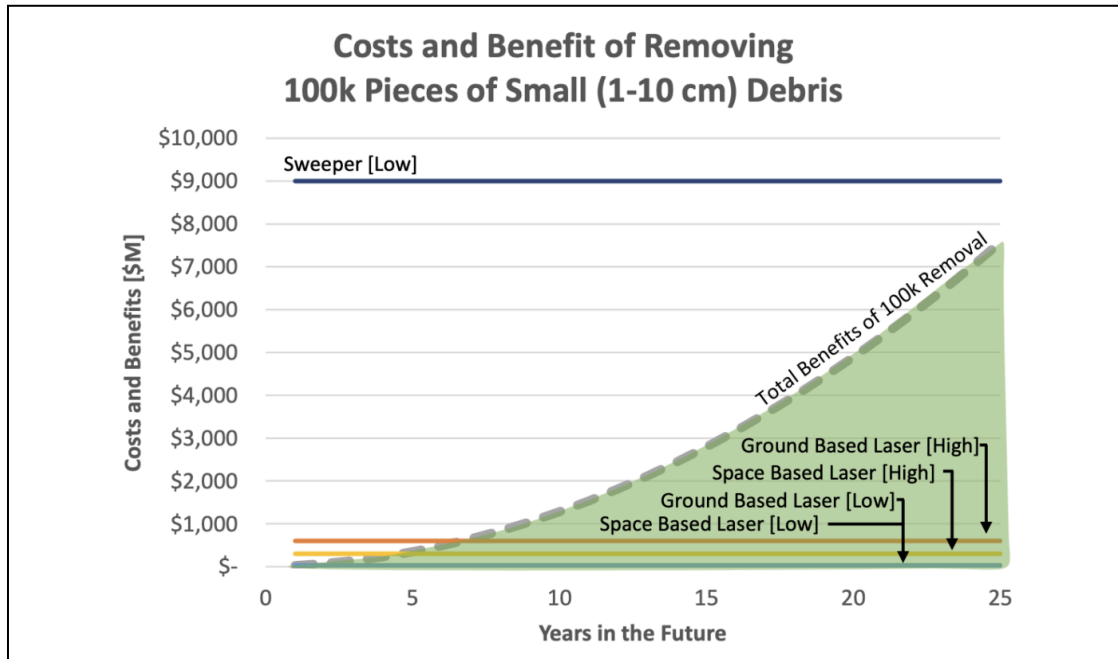
Exposición tomada por el telescopio Victor Blanco de Cerro Tololo (CTIO) que se encuentra manchada por líneas blancas provenientes de satélites Starlink.



Nota. Recuperado de *satélites Starlink captados en Imágenes de CTIO*, por NOIRLab, 2019. (<https://noirlab.edu/public/es/images/iotw1946a/>)

Figura 10

Gráfico de comparación entre costos y beneficios de remover basura espacial (en millones de dólares) y años en el futuro.



Nota. En línea punteada verde, se demarcan los beneficios de la eliminación de 100 mil fragmentos. En líneas coloreadas se señalan diversos métodos para remover basura espacial (láser espacial/terrestre, satélite, etc).

Recuperado de *How Do You Clean Up 170 Million Pieces Of Space Junk?*, por Federación de Científicos Estadounidenses (Federation of American Scientists), 2023. (<https://fas.org/publication/how-do-you-clean-up-170-million-pieces-of-space-junk/>)