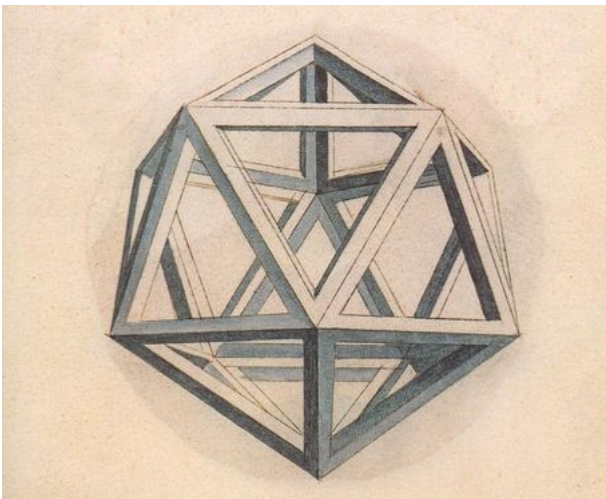


LAS MEGA-CONSTELACIONES DE SATÉLITES COMO

Hay en curso varios proyectos para construir mega-constelaciones de satélites para telecomunicaciones que podrían llenar la órbita terrestre baja con decenas de miles de objetos artificiales. En meses recientes ha crecido la preocupación por el posible impacto de estos proyectos en la observación del cielo, tanto con luz visible como en radio. La Sociedad Española de Astronomía ha constituido un grupo de trabajo para evaluar este asunto y ya es posible avanzar algunos resultados relevantes.



Grupo de trabajo SEA - ICOSAEDRO
(Impacto de las Constelaciones de Satélites
en Detectores de Radio y Ópticos)
Sociedad Española de Astronomía
dgaladi@caha.es

Los satélites artificiales forman parte del cielo nocturno desde los inicios de la era espacial en 1957 y cada noche es posible observar a simple vista una buena cantidad de ellos, tras la puesta de Sol o antes de su salida, en los intervalos en que el cielo está oscuro pero a la vez incide luz solar directa sobre los objetos en órbita. Esta observación de satélites artificiales a simple vista revela objetos en órbita terrestre baja (LEO, del inglés *low Earth orbit*) y es posible identificarlos gracias a servicios en la red como Heavens-Above (www.heavens-above.com). Además, cualquier telescopio modesto revela objetos más débiles hasta el punto de permitir observar satélites geoestacionarios.

No cabe duda de que los trazos lineales que estos satélites dejan sobre las imágenes de larga exposición perjudican las observaciones profesionales de campo amplio. En ambientes no profesionales, hasta ahora muchas personas disfrutaban con el seguimiento de satélites artificiales, la Estación Espacial Internacional o los impactantes destellos causados por las versiones antiguas de los satélites Iridium.

La Oficina de Basura Espacial de la Agencia Espacial Europea estima que en este momento hay alrededor de 22 000 objetos artificiales de tamaño considerable (decenas de centímetros, o mayores) en órbita alrededor de la Tierra, pero que solo unos 2300 de ellos corresponden a aparatos en funcionamiento. El resto constituye la población que suele denominarse basura espacial, un enjambre muy diverso que incluye desde satélites abandonados hasta etapas superiores de cohetes, fragmentos procedentes de choques o explosiones, o incluso herramientas perdidas por astronautas.

El número de fragmentos de basura espacial crece de manera exponencial cuando se consideran tamaños menores, piezas difíciles de seguir pero que aún podrían infligir daños considerables a satélites operativos o naves tripuladas, en caso de colisión. Diversas instituciones están preocupadas por la proliferación incontrolada de la basura espacial, pero la situación actual podría empeorar drásticamente si ciertas empresas cumplen sus planes de llenar la órbita terrestre baja con unas cantidades abrumadoras de satélites de telecomunicaciones. En caso de que culminaran estos proyectos, el número actual

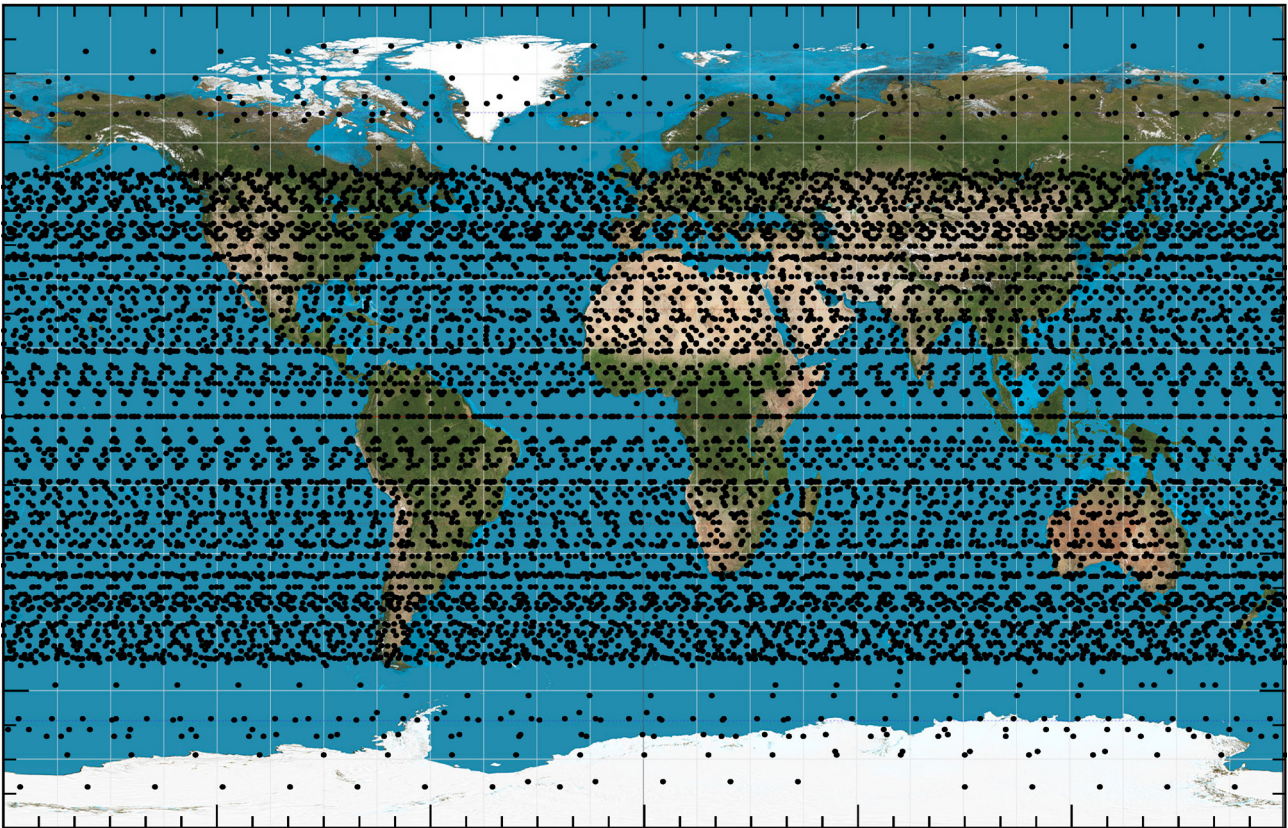


Figura 1. La constelación Starlink reflejada en la tabla 1. Casi 12 000 satélites cubren la Tierra en ocho capas con distintas altitudes e inclinaciones. Cada punto representa un satélite.

de objetos artificiales colocados en órbita de manera intencionada se vería más que duplicado. Estos proyectos conllevan consecuencias considerables y merecen una valoración detenida y detallada.

CONSTELACIONES DE WALKER

Una constelación de satélites es un grupo de ingenios espaciales con el mismo diseño y distribuidos entre una serie de órbitas con el fin de cubrir el planeta de la manera más completa posible. Entre sus aplicaciones se encuentra la observación del territorio, los servicios de posicionamiento global o los servicios de comunicaciones uni o bi-direccionales. Ya existen varias constelaciones, las más conocidas de las cuales son las de los sistemas de posicionamiento global GPS, Glonass y Galileo. Pero todas ellas incluyen un número pequeño de satélites, siempre por debajo del centenar.

Ahora hay varias empresas que han anunciado su intención de construir constelaciones de satélites cuyo tamaño supera el de las existentes en varios órdenes de magnitud, para proporcionar servicios de telecomunicaciones bidireccionales orientados al acceso a Internet con cobertura global. La información disponible sobre estos proyectos es incompleta, quizá porque las empresas prefieren no revelar sus intenciones a la competencia, pero también porque los detalles pueden irse decidiendo sobre la marcha, en función de las perspectivas de éxito comercial.

Entre la decena larga de proyectos de constelaciones relacionados con Internet encontramos los de Boeing y OneWeb, así como una iniciativa similar de la Corporación China de Ciencia y Tecnología Aeroespacial. Sin embargo, todo indica que el proyecto más adelantado es Starlink, impulsado por la

empresa SpaceX de Elon Musk, que planea lanzar al menos 12 000 satélites. La construcción de esta red ya se ha iniciado con varios centenares de satélites en órbita y con fechas fijadas para muchos otros lanzamientos. Las empresas afirman que estos satélites se retirarán de la órbita por sí solos al final de sus vidas operativas, pero es seguro que ocurrirán fallos que restringirán el alcance de esta promesa y, de hecho, varios satélites Starlink están ya fuera de control, lo que dispara las alarmas sobre seguridad espacial y sobre el crecimiento de la población de basura espacial.

El diseño habitual de estos enjambres de satélites se denomina «constelación de Walker». Una constelación de Walker se caracteriza por un cierto número de capas, cada una de las cuales contiene un número N de satélites que se sitúan en órbitas de la misma altitud sobre la superficie terrestre (por tanto, el mismo periodo) y la misma inclinación orbital, pero repartidos de modo que la cobertura del territorio sea la mejor posible. Esto conduce a que una capa con N satélites conste de \sqrt{N} órbitas de la misma inclinación, equiespaciadas (la longitud del nodo ascendente crece en $360/\sqrt{N}$ grados entre una órbita y la siguiente), y a que cada órbita albergue a su vez \sqrt{N} satélites que presentan entre sí separaciones iguales de fase orbital (de nuevo, entre un satélite y el siguiente median $360/\sqrt{N}$ grados).

Un satélite de telecomunicaciones en LEO solo puede prestar servicio a las regiones que sobrevuela, lo que deja sin cobertura las zonas con latitud cuyo valor absoluto es superior a la inclinación orbital. Las mega-constelaciones se diseñan teniendo en cuenta la distribución de la población mundial e incluyen varias capas con inclinaciones variadas, aparte de algunos satélites en órbitas muy inclinadas, incluso polares, que proporcionan una cobertura suficiente a las latitudes extremas.

RADIOASTRONOMÍA

Las voces de alarma se han centrado hasta ahora, sobre todo, en el impacto de estos proyectos sobre la observación del cielo en luz visible. Pero hay que tener en cuenta que se trata de satélites de telecomunicaciones que, como es natural, emiten y reciben en frecuencias a las cuales es transparente la atmósfera de la Tierra. Hay que subrayar que las emisiones de

estos sistemas estarán presentes día y noche, y que su intensidad podría no solo dificultar las observaciones radioastronómicas en las bandas afectadas, sino incluso dañar unos detectores diseñados para recibir la radiación procedente de fuentes naturales extremadamente débiles. Aunque en teoría hay bandas reservadas para radioastronomía, estos proyectos causan una preocupación considerable en la comunidad radioastronómica y varios grupos de trabajo están valorando su posible impacto sobre las infraestructuras de observación ya existentes y sobre las que se encuentran en fase de desarrollo, como el Square Kilometer Array (SKA).

En 2018 se realizó un estudio detallado que involucró a SpaceX, OneWeb y al Comité de expertos en Frecuencias para Radioastronomía (CRAF, del cual España es miembro). El informe ECC 271 considera la protección de la banda primaria de radioastronomía 10.6-10.7 GHz de los radioenlaces de bajada de la megaconstelación de satélites en la banda 10.7-12.75 GHz. También incluye protección para la línea espectral de radioastronomía en la banda 14.47 - 14.5 GHz de los enlaces de subida de los satélites que usan la banda 14.0 - 14.5 GHz. La protección de la radioastronomía en el informe de ECC 271 se mencionó más tarde en una decisión del Electronic Communications Committee (ECC), que puede considerarse un acuerdo legal vinculante en Europa. A medida que aumenta el número de satélites lanzados, se alienta a los observatorios de radio a monitorear la banda afectada e informar cualquier radiointerferencia. SpaceX y OneWeb planean cambiar varios parámetros en sus sistemas que requerirán actualizar el informe ECC 271. CRAF está siguiendo de cerca estos cambios y participará en los estudios de compatibilidad. Además, en la reciente conferencia mundial de Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) se tomaron nuevas decisiones para permitir operaciones de satélites no geoestacionarios en la banda 37-43.5 GHz, por lo que la banda primaria de radioastronomía 42.5-43.5 GHz necesitará nuevos estudios de compatibilidad en ECC para proteger las observaciones en dicha banda. Para las otras bandas de frecuencias que no están asignadas a la radioastronomía por los reglamentos de la UIT, CRAF podría considerar solicitar una protección especial para los radiotelescopios europeos, aunque dicha protección no se puede garantizar.

ASTRONOMÍA EN LUZ VISIBLE

Sin embargo, lo primero que llamó la atención del público general fueron los posibles efectos de estas redes de satélites sobre la observación del cielo nocturno mediante luz visible. Cada lanzamiento de la mega-constelación Starlink coloca en órbita unos 60 satélites que no se ubican de inmediato en sus órbitas de operación, sino que migran hacia ellas lentamente en el curso de varias semanas. Además, lo hacen a partir de órbitas iniciales más bajas y en una actitud espacial (una «configuración») distinta a la final, que los hace muy brillantes durante las fases iniciales de su presencia en el espacio. Esta circunstancia hizo saltar todas las alarmas desde el primer lanzamiento en mayo de 2019. Aunque luego se ha hecho evidente que los satélites Starlink se muestran mucho más débiles tras alcanzar las órbitas operativas, parece más que necesario estudiar el impacto potencial de estos proyectos sobre la observación del cielo.

Altitud de la capa (km)	Satélites en la capa	Inclinación (°)
550	1584	53
1110	1600	53.8
1130	400	74
1275	375	81
1325	450	70
335.9	2493	42
340.8	2478	48
345.6	2547	53

Tabla 1. Perfil de la constelación Starlink usado en este estudio.

Por supuesto, cualquier análisis debe partir del diseño previsto para la constelación y, como ya se ha indicado, no abunda la información de calidad al respecto. Los datos disponibles son incompletos y contradictorios incluso sobre el proyecto más avanzado, Starlink. Según algunas fuentes, la configuración final de esta constelación podría alcanzar la cifra, verdaderamente astronómica, de más de 45 000 satélites. Estimaciones más moderadas, basadas en los permisos ya solicitados en Estados Unidos por la empresa que lidera el proyecto, SpaceX, hablan de unos 12 000 aparatos en órbita. Para nuestro estudio nos hemos basado en este perfil de constelación, con exactamente 11 927 elementos,

como se describe en la tabla 1. Obsérvese que este perfil contempla órbitas que van desde unos 350 km de altitud hasta 1300, aproximadamente, con inclinaciones orbitales que se acumulan en torno a unos 50 grados pero incluyendo también un millar de satélites en órbitas de inclinación elevada, algunas casi polares. Desde el punto de vista estructural y de aspecto los satélites son gemelos, por lo que todos quedan descritos por los mismos parámetros de forma y albedo, lo que resulta relevante para la predicción de sus propiedades fotométricas. La figura 1 representa una toma instantánea de esta constelación y, en ella, cada punto corresponde a un satélite. Esta descripción se ha tomado como referencia para los cálculos que se describen a continuación, que corresponden tan solo a este perfil de constelación concreto. Las conclusiones que pasamos a describir podrían escalarse a constelaciones mayores, formadas por satélites del mismo tipo, aplicando el factor de escala adecuado, al menos como primera aproximación.

En el curso de la simulación conviene diferenciar entre satélites «al alcance» y satélites «visibles». Dado un lugar concreto de la Tierra (como, por ejemplo, un observatorio), si se especifica una altura mínima sobre el horizonte, entonces puede considerarse que están «al alcance» todos los satélites situados por encima de esa altura. Los «visibles» son tan solo un subconjunto de los satélites «al alcance»: se trata de aquellos que reciben de manera directa la luz del Sol. Para una constelación específica, el número medio de satélites al alcance y su distribución depende tan solo de la latitud: de día o de noche, cada lugar de la Tierra tiene acceso a un número determinado de aparatos con los que es posible establecer comunicación para la obtención del servicio y es esta cobertura la que se tiene en cuenta para diseñar el sistema de satélites.

En contraste, para la observación astronómica en bandas ópticas lo que nos interesa es la cantidad de satélites *visibles* de noche, así como su reparto por el cielo, aspectos que varían muchísimo con la hora local y con la estación del año, porque ambos factores dependen de la configuración local del cono de sombra de la Tierra. Un satélite que se halle dentro del cono de sombra podría estar al alcance, pero no será visible por no estar iluminado.

latitud (grados)	Ejemplo	Satélites al alcance	
		Por encima de 30°	Por encima del horizonte
37	Calar Alto	68	615
30	Cerro Pachón (VRT)	54	553
29	Roque de los Muchachos (GTC)	53	543
24	Cerro Paranal (VLT)	49	491
20	Mauna Kea	47	444
00	Ecuador	42	386

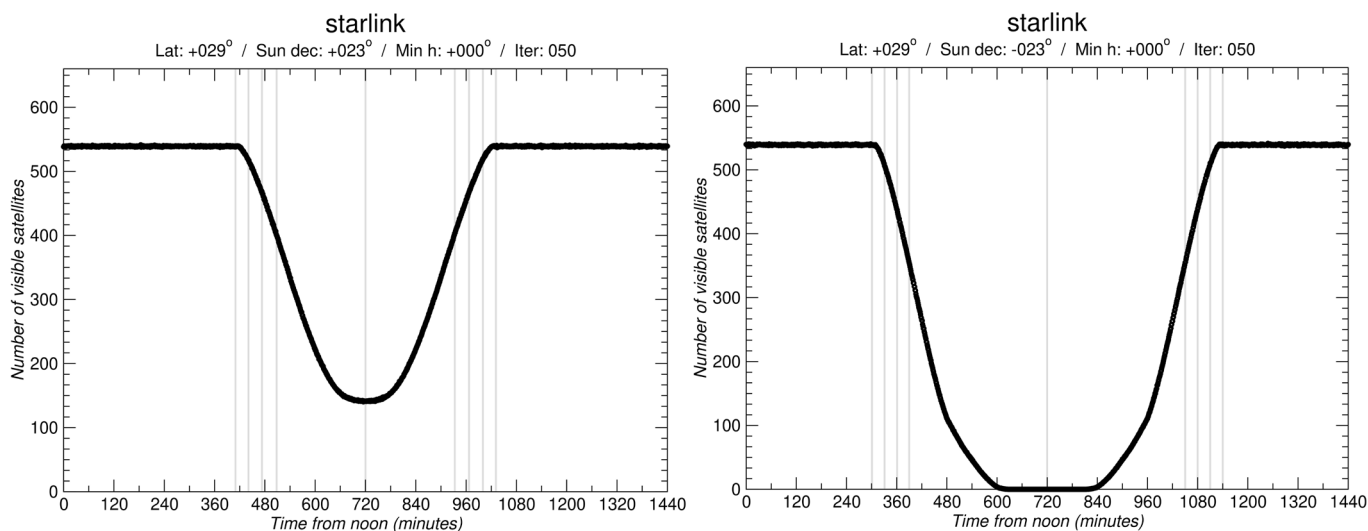
Tabla 2. Satélites al alcance para la configuración Starlink de la tabla 1, desde distintos observatorios y para dos alturas mínimas distintas sobre el horizonte: 30 grados y cero.

Al estudiar los detalles se aprecia una dependencia suave del número de satélites al alcance con la latitud del observatorio, como se muestra en la tabla 2. Pero tomemos como referencia la isla de La Palma, con latitud igual a +29°.

El número medio de satélites al alcance por encima del horizonte supera en este lugar los 500 en cualquier instante dado, aunque el 90 por ciento de ellos se concentra a menos de 30 grados de altura sobre el horizonte. En cualquier momento hay tan solo unos 50 satélites al alcance con alturas sobre el horizonte en las que se suelen realizar observaciones astronómicas profesionales, por encima de 30 grados.

Si pasamos a considerar no el número de satélites al alcance, sino la cantidad de los mismos que son visibles, se aprecia una dependencia muy fuerte con la hora local, a medida que va cambiando la configuración de la sombra de la Tierra. La cantidad de satélites visibles va descendiendo con el avance del crepúsculo de la tarde, desde el civil al náutico y de este al astronómico hasta la llegada de la noche astronómica. El número de satélites visibles por encima del horizonte alcanza siempre un nivel mínimo hacia media noche. Este valor mínimo ronda 120 en fechas cercanas al solsticio de verano aunque, de ellos, solo hay unos 10 por encima de 30 grados de altura. En el entorno del

Figura 2. Número de satélites Starlink visibles desde La Palma por encima del horizonte. La gráfica de la izquierda corresponde al solsticio de junio y la de la derecha al de diciembre. El tiempo se mide en minutos desde el mediodía anterior. Las líneas verticales marcan, de izquierda a derecha, la puesta de Sol y el fin de los crepúsculos civil, náutico y astronómico, la medianoche, y la sucesión de crepúsculos en orden inverso hasta el alba.



solsticio de invierno el número de satélites visibles sobre el horizonte llega a descender hasta cero durante cuatro horas centradas en la medianoche.

Para otras latitudes las tendencias generales son muy parecidas. La situación siempre mejora en fechas cercanas al solsticio del invierno local, porque en esas condiciones el cono de sombra de la Tierra se alza más alto en el cielo durante la noche. Las condiciones peores siempre se dan en el entorno del solsticio de verano.

No todo es el número de satélites. Resulta de la mayor importancia aclarar su brillo aparente y, también, su distribución en el cielo. La dependencia con la configuración local instantánea de la sombra terrestre permite prever que ambos aspectos pueden llegar a ser bastante complejos de describir.

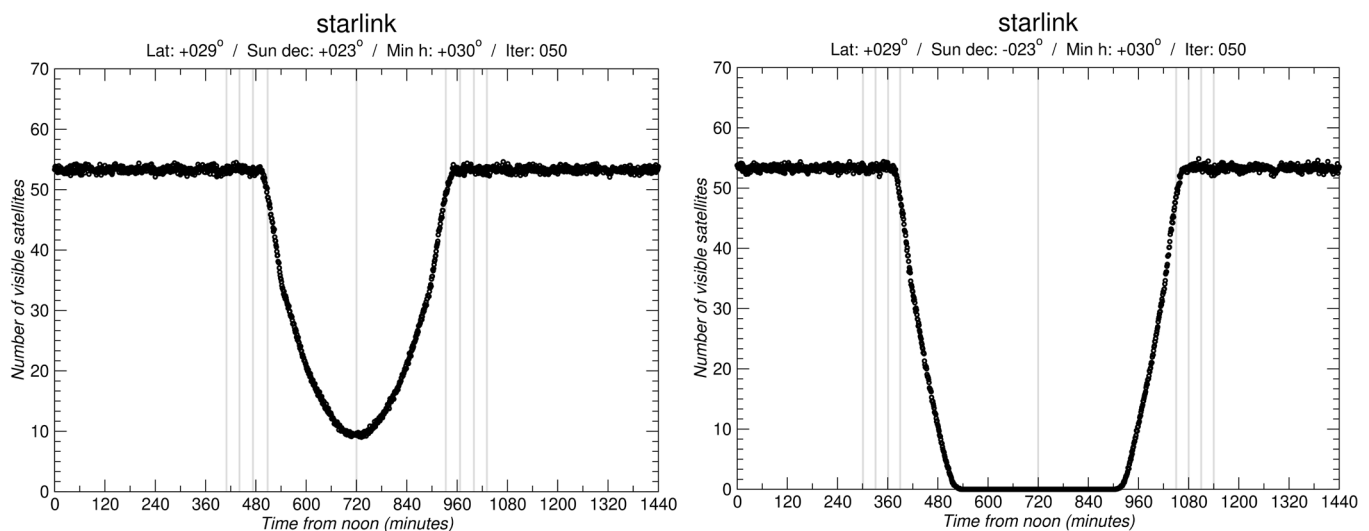
BRILLO APARENTE

El brillo aparente de los satélites visibles depende críticamente de la reflectividad de sus superficies. El modelo fotométrico incorporado a las simulaciones

es semejante al de Hainaut & Williams (2020) y tiene en cuenta tanto el ángulo de fase como la reflectividad de los aparatos, si bien de una manera bastante simplificada. Tratamos los satélites de la constelación Starlink como esferas de un metro de radio con un albedo geométrico igual a 0.25. A las características fotométricas resultantes de esos parámetros se añade una extinción atmosférica de 0.12 magnitudes por unidad de masa de aire. El modelo proporciona valores orientativos para la magnitud V aparente. A falta de introducir mejoras adicionales en el modelo, este al menos permite comparaciones directas con otras simulaciones publicadas hasta ahora.

Como era de esperar, la distribución de brillos aparentes de los satélites muestra una estructura que depende de la textura espacial de las capas de la constelación, así como de la distancia al observatorio. Los satélites visibles más alejados tienden a aparecer más cercanos al horizonte y a mostrarse mucho más débiles. Los satélites Starlink visibles por encima de 30 grados de altura presentan una distribución de brillos bimodal con máximos locales entorno a

Figura 3. Número de satélites Starlink visibles desde La Palma por encima de 30 grados de altura sobre el horizonte. La gráfica de la izquierda corresponde al solsticio de junio y la de la derecha al de diciembre. Véase la figura 2 para la interpretación detallada.



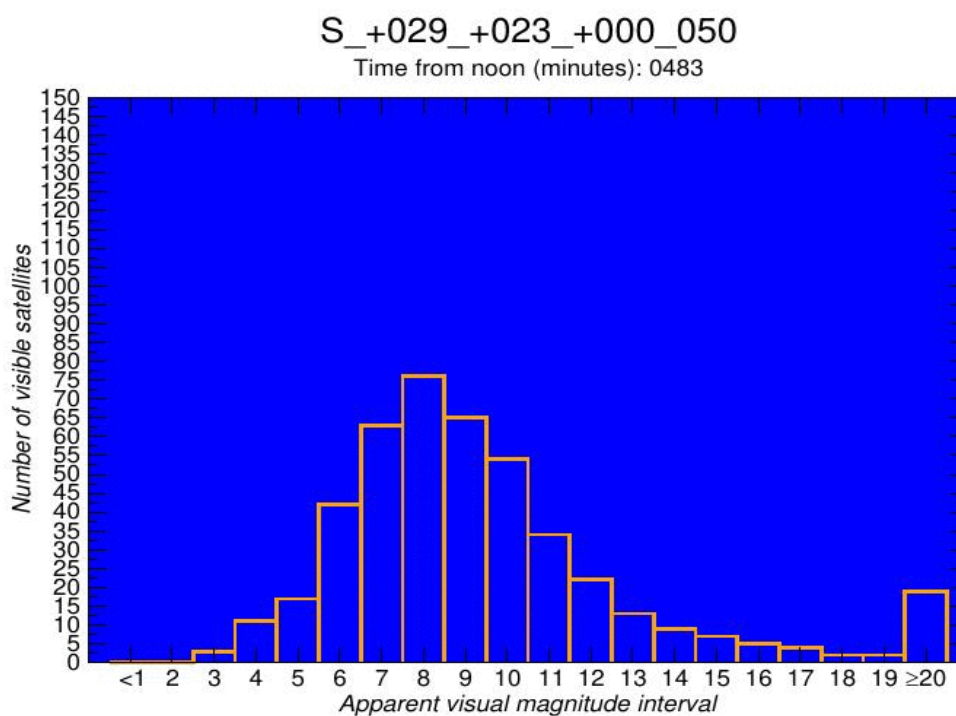
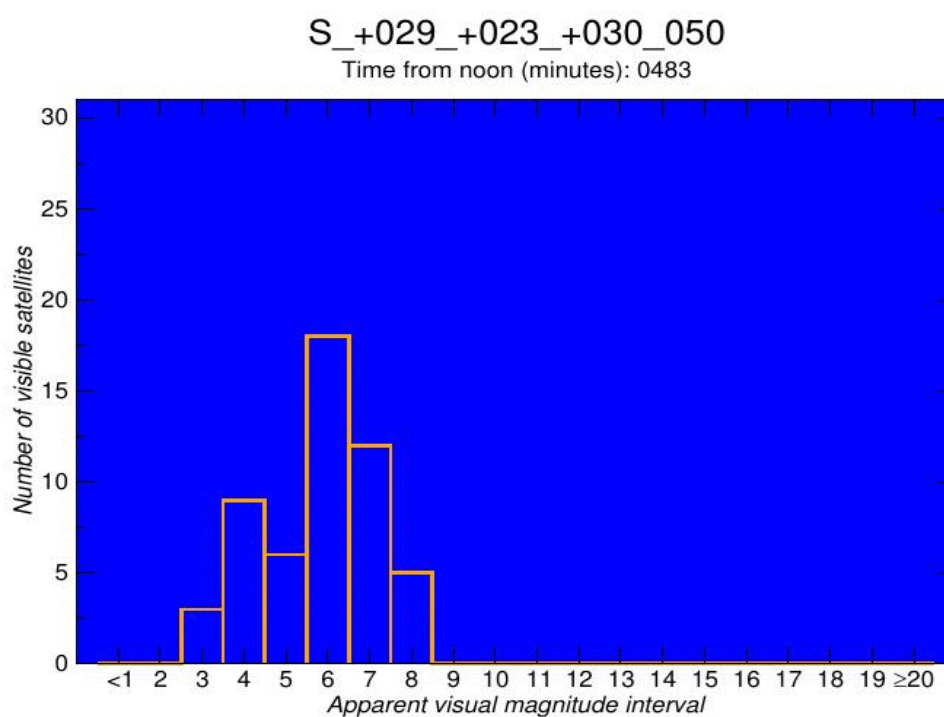


Figura 4. Histograma de magnitudes visuales aparentes de los satélites visibles desde La Palma por encima del horizonte, en condiciones de solsticio de verano, 483 minutos tras el mediodía anterior. Comparando con la figura 2 (izquierda) se aprecia que se trata de un instante sumido aún en el crepúsculo astronómico.

Figura 5. Histograma de magnitudes visuales aparentes de los satélites visibles desde La Palma por encima de 30 grados de altura sobre el horizonte, en condiciones de solsticio de verano, 483 minutos tras el mediodía anterior. Comparando con la figura 3 (izquierda) se aprecia que se trata de un instante sumido aún en el crepúsculo astronómico.



las magnitudes visuales 4 y 6. Si recordamos que la magnitud 6 es la más débil que puede percibirse a simple vista en un cielo oscuro, se concluye que la mayoría de los satélites Starlink visibles por encima de 30 grados de altura contaminarán visualmente el cielo nocturno de los lugares que aún conserven unas condiciones de oscuridad naturales, prístinas.

Los satélites visibles cercanos al horizonte tienden a ser significativamente más débiles y la mayoría de ellos permanece por debajo del umbral de sensibilidad del ojo humano sin ayuda óptica incluso bajo las condiciones de oscuridad más extrema: en este caso la distribución de brillos muestra un único máximo en torno a las magnitudes visuales aparentes 7 y 8, aunque sigue habiendo un número significativo de aparatos en los intervalos de magnitud 6 y 9. Esta debilidad general no significa que resulten inocuos, porque aún pueden afectar a las observaciones realizadas con instrumentos.

OBSERVACIÓN TELESCÓPICA

El impacto sobre las observaciones con instrumentos depende mucho del campo de visión y del tiempo de integración. La probabilidad de que se vean afectadas las observaciones de campo estrecho es pequeña, pero crece mucho para telescopios de campo amplio. Las simulaciones efectuadas implican fijar la latitud del observatorio, la declinación del Sol, el campo de visión y el tiempo de integración. Con esos parámetros fijos, se simula un conjunto muy amplio de apuntados en cinco direcciones canónicas: cenit, N, S, E, W. Las direcciones no cenitales se orientan a 45 grados de altura sobre el horizonte. El resultado de las simulaciones, para distintas alturas del Sol sobre (o, más bien, bajo) el horizonte permite derivar una serie de descriptores de afectación entre los que se incluye el número esperado de trazas satelitales en cada disparo, su longitud, el brillo aparente medio de los satélites o su velocidad angular aparente típica.

Si seguimos tomando como referencia la latitud de Canarias, podemos comparar dos casos de estudio: un instrumento profesional de campo estándar, como Hipercam en el William Herschel Telescope (WHT), y la toma de imágenes de campo muy amplio.

Hipercam es una cámara para la obtención de imágenes directas multi-banda simultáneas, diseñada

para su posible uso en varios telescopios. Cuando se instala en el Gran Telescopio Canarias (GTC) abarca 3 minutos de arco de campo en diagonal, mientras que en el WHT cubre 10 minutos, una anchura bastante representativa de otros instrumentos profesionales para la captación de imágenes directas, por lo que se ha tomado este dato como referencia. Los resultados indican que la toma de imágenes directas con campos de visión de este orden se ve muy poco afectada por una constelación de satélites como la mostrada en la tabla 1. El número de imágenes de 30 s de integración afectadas se mantiene en todas las condiciones por debajo del 1 %, salvo en circunstancias muy concretas. Se alcanza o supera muy ligeramente ese 1 % de afectación solo cuando el Sol se encuentra a -12° de altura, es decir, en el paso del crepúsculo civil al náutico. Los satélites responsables de estas trazas ocasionales presentan magnitud visual aparente media igual a 4.3, con una desviación estándar superior a una magnitud. Estas cifras infunden cierta tranquilidad sobre el impacto de las constelaciones de tipo Starlink sobre una de las formas más habituales de observación, puesto que incluso un gran incremento en la población de satélites en el diseño de la constelación seguiría manteniendo su impacto potencial en niveles manejables.

La situación cambia radicalmente cuando se consideran campos más amplios. Una simulación similar a la anterior pero con un campo de visión más típico de la fotografía paisajística o no profesional, con 20 grados de ancho, arroja resultados muy distintos. Aun manteniendo el resto de parámetros sin alterar (en particular, el tiempo de integración, que sigue estando en 30 segundos), el apuntado en las direcciones canónicas cenital y N, S, E, W (a 45° de altura) conduce a resultados muy variables, según la época del año y la hora de la noche. De nuevo las horas crepusculares son las más dadas a la aparición de satélites en las imágenes, con entre 3 y 4 trazas, habitualmente, en cualquier imagen obtenida con esta configuración, cuando el Sol se halla a -12° de altura, causadas por satélites con magnitudes visuales aparentes entre 4 y 5. Incluso en la noche astronómica, con el Sol ya a -25° de altura, cada imagen presenta típicamente entre 1 y 3 trazas, más probables para apuntados no cenitales, debidas a satélites cuya magnitud media está en el entorno de 6. En noche profunda, con el Sol en una altura de -37° , la

afectación sobre la toma de imágenes de campo amplio resulta muy poco probable y solo supera el umbral de 1 % en circunstancias concretas y para algunas direcciones de observación.

Si las imágenes de campo amplio se toman no a 45° de altura, sino a tan solo 15°, lo cual es habitual en fotografía artística y del paisaje, entonces los números se disparan. Aun con mucha variabilidad estacional y horaria, para alturas tan bajas es muy habitual que el número de trazas en una sola imagen supere la decena, incluso en noche cerrada. Por ejemplo, un apuntado a 15° de altura en acimut norte, en el solsticio de verano y con el Sol a -37° de altura, presentará típicamente 18 trazas debidas a satélites cuya magnitud visual aparente media ronda 9.5.

INSTRUMENTOS PROFESIONALES DE CAMPO AMPLIO

Comprobado que el campo de visión es determinante, nos preguntamos qué impacto podrían tener constelaciones del tipo de la mostrada en la tabla 1 sobre algunos de los instrumentos de mayor campo accesibles a la comunidad de la SEA.

Se simularon las circunstancias de la cámara Baker-Nunn del Telescopio Fabra-ROA Montsec (TFRM), con sus más de seis grados de campo. Mantenemos 30 segundos como tiempo de integración de referencia. Con las consabidas variaciones horarias y estacionales, se concluye que cabe esperar una traza por imagen durante el crepúsculo, debida a objetos de magnitud 5 (N, S, E, W) o 4 (Z). Con el Sol a -25° los satélites aparecen entre el 20 % y el 70 % de las veces, con magnitudes entre 5 y 6. Cuando el sol se halla en torno a -35° de altura lo más habitual es que no haya impacto, aunque en algunas épocas del año y en ciertas direcciones puede aparecer cierta afectación. Por ejemplo, la mitad de los apuntados de 30 s hacia el norte y a 45° de altura muestran trazas en condiciones de equinoccio, debidas a satélites con magnitud 6.5.

Los reconocimientos del cielo J-PAS y J-PLUS, del Observatorio Astrofísico de Javalambre, emplean telescopios e instrumentos diferentes cuyos campos de visión son, respectivamente, 2.4° y 1.6°. Por supuesto, el grado de afectación en estos casos no es nulo, si bien los ejemplos anteriores ya permiten intuir que el impacto no alcanzará niveles excesivos, al menos con el perfil de constelación de

satélites utilizado en este estudio. En noche astronómica, con el Sol a -25°, se espera detectar trazas entre el 10 % y el 30 % de los disparos de un minuto de tiempo de integración, debidos a satélites con magnitud entre 6 y 6.5. El equipo responsable de este proyecto deberá valorar hasta qué punto esto supone una limitación para su ciencia, teniendo en cuenta que la velocidad típica de los satélites que cruzan el campo de visión está en el entorno de 15 a 20 minutos de arco por segundo.

El grupo de trabajo ha producido simulaciones para otros instrumentos y ubicaciones, y está abierto a considerar simulaciones específicas a petición del colectivo de la SEA. Asimismo, los resultados detallados de las simulaciones efectuadas hasta ahora están también disponibles en las páginas del grupo de trabajo en el sitio de la SEA en Internet.

SOLUCIONES

Todo lo anterior apunta a que el impacto de las mega-constelaciones de satélites tipo Starlink sobre la astronomía profesional puede ser inferior al que se temía a primera vista. Aun así, dista de ser nulo. Por un lado, proyectos de campo amplio, sobre todo si son de gran *étendue*, pueden verse muy afectados, como es el caso del Legacy Survey of Space and Time (LSST) del Observatorio Vera C. Rubin (Cerro Pachón, Chile). Por otro lado, la peor parte recae sobre la fotografía de paisaje y campo amplio, una técnica poco relevante desde el punto de vista profesional pero a la que se dedica un gran multitud de entusiastas de nuestra ciencia.

¿Cuál puede ser la solución? Si partimos de la suposición de que las empresas responsables construirán constelaciones de tipo Starlink, y otras, entonces solo cabe considerar soluciones de carácter paliativo. Estas soluciones se engloban en dos categorías: técnicas de evitación y técnicas de atenuación.

Las técnicas de evitación consisten en el cálculo en tiempo real de las posiciones y trayectorias de los satélites, para disparar alarmas en caso de que vaya a producirse un cruce ante el campo de visión del telescopio. Las simulaciones efectuadas indican con claridad que en la mayoría de los casos la probabilidad de afectación es lo bastante reducida como para hacer posible este enfoque. Se trataría, por tanto, de un

sistema similar al desarrollado para prevenir colisiones entre satélites o piezas de basura espacial pero para evitar la «colisión» entre satélites y zonas de observación. Por supuesto, tal ataque del problema requiere que alguna entidad externa tal como CelesTrak o quizá la propia empresa operadora, proporcione elementos orbitales fiables y actualizados de los aparatos. Cada observatorio, dependiendo de las características concretas de su instrumental y de su ciencia, deberá valorar si un sistema de evitación le resulta útil o necesario.

Las técnicas de atenuación recaen sobre la empresa propietaria de los satélites y consisten en adoptar medidas para reducir la reflectividad de los satélites y, por tanto, su brillo aparente. La empresa SpaceX, propietaria de Starlink, ha iniciado experimentos en esta dirección y, mediante técnicas diferentes (superficies oscurecidas, dispositivos productores de sombra sobre partes clave de los aparatos) consideran posible atenuar los satélites en al menos una magnitud. Cabe la posibilidad de que las técnicas de atenuación logren que ningún satélite de tipo Starlink llegue a distinguirse a simple vista, pero probablemente sigan suponiendo un problema para los proyectos que pudieran verse afectados por las trazas de los satélites en su diseño actual.

Para los proyectos en los que no sea posible la evitación (todo indica que reconocimientos del tipo LSST lo tienen realmente muy complicado), queda también la planificación de la estrategia de observación (por ejemplo, en detectores de bajo o nulo ruido de lectura, dividir una exposición única en varias de menor tiempo, si ello es posible, para luego superponer los datos) y como último recurso el tratamiento *a posteriori* de los datos. La situación es muy variable dependiendo de cada instrumento y motivación científica en concreto pero, aun así, los cálculos preliminares realizados en el marco del grupo de trabajo Icosaedro de la SEA presentan un panorama menos preocupante de lo temido en un principio, al menos para la astronomía óptica. No cabe decir lo mismo en lo respecta a la proliferación de la basura espacial.

Nuestra intención es seguir avanzando en la simulación y modelado de las constelaciones de satélites, en particular en la previsión fotométrica por medio de modelos más complejos y basados en observaciones sistemáticas.

REFERENCIAS

- Hainaut O. & Williams A. (2020), A&A 636 A121 <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037501>
- CRAF, Committee on Radio Astronomy Frequencies: <http://www.craf.eu/>
- Electronic Communications Committee (ECC) report 271: <https://www.ecodocdb.dk/download/3ab9e6bc-0afd/ECC%20Report%20271.pdf>

AUTORAS/ES DE ESTE ARTÍCULO:

Francisco Colomer Sanmartín: Observatorio Astronómico Nacional (Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana), comisión B4 (Radioastronomía) de la IAU

David Galadí Enríquez: Observatorio de Calar Alto, comisión CB7 (Protección de Sitios de Observación) de la IAU

Daniel Marín Arcones: astrofísico, Consejería de Educación, Universidades, Cultura y Deportes del Gobierno de Canarias

Jorge Núñez de Murga: Universitat de Barcelona, Observatori Fabra (Reial Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona), comisión A1 (Astrometría) de la IAU

Olga Zamora Sánchez: astrofísica, Instituto de Astrofísica de Canarias