

MEGA-CONSTELACIONES SATELITALES Y EL IMPACTO AMBIENTAL ASOCIADO AL TRÁFICO ESPACIAL EN LA ANTÁRTICA

Mario Esquivel Lizondo y Marieta Valdivia Lefort

Desde 2019, la preocupación por el aumento de satélites en órbita terrestre, y particularmente la presencia de las mega-constelaciones satelitales, ha ido creciendo progresivamente. La comunidad astronómica fue la que inició la conversación sobre el impacto de los satélites en la observación astronómica y en la radio interferencia, evidenciando un vacío regulatorio respecto a la actividad espacial. Más recientemente, esta misma comunidad ha destacado los impactos medioambientales ligados a las mega-constelaciones satelitales, los cuales han fortalecido el argumento sobre la urgencia de esta problemática.

Hasta 2019 solo había unos 3.000 satélites en Órbita Terrestre Baja (LEO, por sus siglas en inglés), de los cuales aproximadamente la mitad eran funcionales. La mayoría de estos correspondían a satélites individuales o ‘pequeñas constelaciones’, es decir, grupos de satélites que trabajan juntos para proporcionar algún tipo de servicio. Por otro lado, las mega-constelaciones utilizan miles o incluso decenas de miles de satélites en LEO para proveer servicios, tales como las de SpaceX, que a 2023 ya operaba más de 3.000 satélites, es decir, aproximadamente el 50% de todos los satélites activos en órbita, y planeaba poner en órbita 12.000 satélites ya autorizados (Byers y Boley 2023: 48). Esta gran cantidad de objetos en órbita presenta significativos riesgos asociados, particularmente aquellos causados durante el proceso de reentrada de los satélites inactivos en la atmósfera. Durante este proceso, algunas partes de los satélites se desintegran mientras se desprenden, lo que implica un riesgo de impacto no controlado que incluso podría causar la muerte de personas. En el caso de los materiales que aparentemente se desintegran, la realidad es que estos no desaparecen realmente, sino que se convierten en un gran número de partículas finas, átomos y moléculas que conservan la misma masa acumulada y que podrían generar consecuencias en la composición química de la Tierra (Byers y Boley 2023: 63-64).

Algunos estudios han profundizado en estos riesgos y la necesidad de regular la actividad espacial satelital en torno a los daños observados y previstos que implica la

explotación comercial de los satélites, con énfasis en el impacto medioambiental de todos los aspectos de las constelaciones de satélites, incluidos el lanzamiento, el funcionamiento y el abandono de estos en la órbita (Lawrence et al. 2022). Así, se destaca la necesidad urgente de definir políticas, normas y reglamentos a escala nacional e internacional para regular dicha actividad en función de la protección medioambiental.

Similarmente, en torno al potencial impacto medioambiental de los satélites en la capa de ozono. En específico, a partir de una simulación el estudio argumenta que, al final de su vida útil y en etapa de reingreso a la atmósfera, los satélites se desintegran y generan óxidos de aluminio que podrían acelerar el desgaste de la capa de ozono, implicando consecuencias medioambientales significativas (Ferreira et al. 2024).

Estudios como los descritos son cruciales, ya que proveen información específica sobre los impactos medioambientales asociados a la explotación de la actividad satelital en órbita. Sin embargo, considerando que el diagnóstico sobre estos peligros es relativamente reciente, además de los estudios previamente descritos y otras iniciativas, la investigación asociada a esta temática sigue siendo escasa, lo que significa una ventana de oportunidad para explorar en torno al impacto medioambiental de los satélites, y especialmente las mega-constelaciones, en distintos contextos y espacios físicos.

En este respecto, un contexto que merece exploración es la Antártica, ya que es un elemento clave en la geopolítica global. Debido a sus características de latitud, altitud, posición polar, despoblamiento y baja presencia humana, este continente se sitúa como el más cercano al espacio ultraterrestre y con menor nivel de contaminación del espectro electromagnético (Valdivia 2024: 7). Desafortunadamente, en la actualidad ha sido posible observar la circulación de numerosos satélites sobre el continente antártico, tanto en órbitas polares como helio-síncronas. Específicamente, se evidencian más de 1.300

satélites orbitando bajo los 600 kilómetros de altitud en tales órbitas, con un peso total de 842 toneladas, los cuales se estima reingresarán a la atmósfera en menos de 15 años. La gran mayoría de estos satélites reingresarán de forma descontrolada, ocupando Antártica un 13,7% del área probable de reingreso e impacto de tales trayectorias. Asimismo, la cantidad de lanzamientos que utilizan el espacio proyectado sobre la Antártica como trayecto para su puesta en órbita, especialmente satélites de percepción remota, ha aumentado ostensiblemente gracias a la irrupción de China, Corea del Sur, Corea del Norte, Japón y Nueva Zelanda y prontamente Australia como puntos de lanzamiento de órbitas polares y helio-sincrónicas (McDowell, 2024).

A pesar de que aún no existe una batería robusta de evidencia respecto de las implicancias medioambientales de dicho tráfico espacial en este territorio, sí es posible avizorar los potenciales efectos asociados a la emisión de gases tóxicos liberados durante este proceso, los cuales podrían impactar de diversa forma el espacio físico antártico. Lo anterior, cobra aún más relevancia si, considerando la presencia excesiva de satélites y basura espacial en órbita en la actualidad, en un futuro se requirieran nuevos espacios en órbita para la ubicación de satélites a partir de la regulación de ángulos de inclinación orbital, tales como los polos antárticos. En este contexto, el derecho internacional podría aportar a la protección ambiental del Continente Antártico, el cual posee invaluables recursos naturales tales como hidrocarburos, reservas de agua, espacios para asentamiento, entre otros (Valdivia e Ibarra 2022: 2). A través de la regulación de las trayectorias de reingreso atmosférico en órbitas polares, prohibiendo el descenso en territorio antártico o al menos mitigando el impacto de este a partir de la obligación del retiro inmediato de la basura espacial que haya caído al continente.

Sin embargo, es necesario evaluar si los marcos regulatorios existentes podrían en efecto aportar a lo señalado. Para ello, a continuación, presentamos una breve descripción de algunas de las regulaciones vigentes que parecen pertinentes a la discusión planteada, junto con sus limitaciones en el ámbito medioambiental y recomendaciones para su aplicación en el presente caso.

Actual sistema de gobernanza sobre protección del medioambiente en Antártica

El primer documento que es necesario abordar es el Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medioambiente (desde ahora, el Protocolo), el cual fue firmado en Madrid el 4 de octubre de 1991 y entró en vigor en 1998.¹ En su artículo 11, este protocolo establece la creación de un Comité para la Protección del Medioambiente (CPA), compuesto por un representante de cada Estado Parte. Anualmente, este comité presenta un informe a las Reuniones Consultivas del Tratado Antártico (RCTA), las que se conforman por 29 Estados Parte Consultivos con derecho a voz y voto y 29 Estados No Consultivos, y en donde se adoptan medidas vinculantes para la implementación de dicho Protocolo. Las RCTA examinan el trabajo del CPA y consideran plenamente su asesoramiento y sus recomendaciones, así como el asesoramiento del Comité Científico para las Investigaciones Antárticas (SCAR por sus siglas en inglés).

En el Anexo V del Protocolo, el cual fue adoptado en la XVI RCTA y que hace referencia a la protección y gestión de zonas, se establece un marco para la protección de áreas con valor ambiental.² En su artículo 6°, detalla el proceso para designar Zonas Antárticas Especialmente Protegidas (ZAEP) y Zonas Antárticas Especialmente Administradas (ZAEA), medidas vinculantes dictadas por la RCTA. El artículo 4° reconoce las ZAEA y establece las razones para su designación, incluyendo: (a) las zonas donde las actividades corran el riesgo de crear interferencias mutuas o impactos ambientales acumulativos; y (b) los sitios o monumentos de reconocido valor histórico. Las ZAEA tienen por objetivo planificar y coordinar actividades, evitando conflictos, mejorando la cooperación entre las partes y minimizando los impactos ambientales en aquellos lugares de convergencia de misiones antárticas. Una diferencia fundamental entre la designación de una ZAEP y de una ZAEA es que, en las primeras, a partir de la fecha de vigencia, el ingreso a la zona queda prohibido a menos que se obtenga un permiso de acceso, en cambio en la ZAEA el acceso es libre, pero se requiere cumplir con el Plan Gestión y el código de conducta al ingresar a la zona.

1 Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente, Madrid 4 de octubre de 1991, disponible en: <https://www.ats.aq/s/protocol.html>.

2 Anexo V al Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente: Áreas protegidas, Madrid el 4 de octubre de 1991, disponible en: <https://www.ats.aq/s/protected.html>.

Sistema de gobernanza espacial relativo a la protección del medioambiente en la puesta en órbita y el reingreso atmosférico

El Tratado del Espacio Ultraterrestre (OST, por sus siglas en inglés) entró en vigor en 1967 y establece los principios sobre los cuales deben regirse las actividades espaciales. El OST se refiere escasamente a la protección medioambiental, salvo en su artículo IX donde domina el Principio de Cooperación, el cual se manifiesta en la consideración debida de los intereses de los demás Estados a fin de no interferir perjudicialmente en sus actividades espaciales, estableciendo un mecanismo de consulta para tal efecto. Sin embargo, en materia de protección medioambiental, el Tratado se circunscribe a evitar la contaminación del espacio ultraterrestre y de los cuerpos celestes, y a prevenir efectos adversos en la Tierra derivados de la introducción de materia extraterrestre, sin regular la contaminación ambiental en la Tierra asociada a objetos espaciales de origen terrestre.

Asimismo, el Convenio sobre la responsabilidad internacional por daños causados por objetos espaciales (1972) establece un régimen de responsabilidad absoluta del Estado o Estados Lanzadores por los daños causados por objetos espaciales que se produzcan en la superficie terrestre o a aeronaves en vuelo, obligando a responder incluso en ausencia de negligencia. Esto es reforzado por los artículos 6º y 7º del OST, que establecen la responsabilidad internacional del Estado o Estados Lanzadores por los daños causados por objetos espaciales, así como la obligación del Estado de Registro de ejercer jurisdicción y control sobre las actividades espaciales nacionales, incluidas aquellas desarrolladas por actores privados.

Por su parte, el Acuerdo Sobre el Salvamento y la Devolución de Astronautas y la Restitución de Objetos Lanzados al Espacio Ultraterrestre (desde ahora, Convenio de Rescate) de 1967 establece en su artículo 5º que si se encuentra un objeto espacial (o sus partes) fuera de los límites territoriales del país de lanzamiento, este debe ser devuelto a dicho país. Los gastos asociados a la restitución serán responsabilidad del país que lanzó el objeto.

Además, las Directrices para la Reducción de Desechos Espaciales de la Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos (COPUOS, por sus siglas en inglés) promueven medidas preventivas específicas para mitigar los riesgos ambientales. Por ejemplo, la

Directriz 1 incentiva la reutilización de las primeras fases de los cohetes, mientras que la Directriz 6 recomienda la retirada controlada de naves y etapas orbitales al final de sus misiones en la órbita terrestre baja (LEO), evitando así la permanencia prolongada de desechos. Durante el reingreso atmosférico, la Directriz 5 exige la pasivación de las naves para reducir las posibilidades de desintegración como resultado de la energía almacenada, minimizando así el riesgo de contaminación medioambiental por sustancias peligrosas.

Problemas en la aplicación de la gobernanza Antártica medioambiental y espacial medioambiental en relación al riesgo de reingreso atmosférico intensivo sobre el continente Antártico

Considerando lo previamente expuesto, es posible advertir una serie de obstáculos en la aplicación del derecho internacional en la presente problemática. En primer lugar, el mecanismo de consulta establecido en el artículo IX respecto de actividades espaciales presentes y futuras y su eventual obstáculo que pudiese interferir las actividades de otros Estados y sus nacionales (privados), está reducido al ámbito del Espacio Ultraterrestre. Además, la Antártica no es un Estado Parte del OST, lo que significa que, al no tener un gobierno nacional, no puede exigir responsabilidades en el caso de un daño ambiental. Por ejemplo, si un satélite se estrellara en la Antártica, no habría un gobierno local que demande una compensación por los daños. En cuanto a la situación de no producir una contaminación nociva ni cambios desfavorables en el medioambiente terrestre establecido en el artículo IX del OST, esta preocupación está reducida al ámbito de no introducir en él sustancias extraterrestres.

En segundo lugar, en relación con el Convenio de Responsabilidad, si bien este resulta aplicable a los daños causados a personas naturales, su aplicación respecto del daño ambiental puro presenta limitaciones en el contexto antártico. Ello se debe a que en la Antártica no existe ejercicio de soberanía estatal, conforme al régimen de suspensión de reclamaciones territoriales del Tratado Antártico, por lo que no hay un Estado territorial legitimado para reclamar indemnización por los daños medioambientales ocasionados en la superficie. En consecuencia, las reclamaciones posibles se circunscriben a los daños sufridos por personas naturales, tales como

aquellos que afecten su integridad física o psíquica, quedando excluida la reparación del daño ambiental al territorio en sí mismo.

En tercer lugar, están las Directrices para la Reducción de Desechos Espaciales. Todas ellas tienen carácter de recomendaciones preventivas y no cuentan con directrices de reparación ante el daño medioambiental en los territorios sin jurisdicción, sin perjuicio al menos la Directriz 5 y Directriz 6 que representan un apronte hacia la regulación de dicho ámbito a nivel general sobre cualquier territorio, esté o no bajo jurisdicción de un Estado.

Finalmente, en relación a la Gobernanza Antártica Medioambiental, actualmente las ZAEP y las ZAEA son áreas circunscritas a determinadas zonas específicas y sólo contemplan algunas fases operacionales del tráfico aéreo, en específico los vuelos de baja cota y aterrizajes. Sin embargo, la diferencia en cuanto a la prohibición de acceso, hacen más pertinente las ZAEA en relación a las actividades espaciales intra atmosféricas que están inmersas en el contexto de libertad de acceso y exploración del derecho del espacio que informa la costumbre jurídica internacional espacial sobre paso inocente del espacio aéreo durante la reentrada atmosférica.

Recomendaciones

A partir de lo descrito a lo largo del presente documento, es posible identificar un vacío regulatorio en la gobernanza tanto espacial como antártica actual que podría resolverse con un enfoque conjunto. Si bien aún se requieren más discusiones sobre cómo abordar esta problemática desde el derecho internacional, es preciso sugerir recomendaciones para iniciar dicho proceso.

De esta forma, proponemos la creación de una Zona Antártica Especialmente Administrada (ZAEA) para gestionar exclusivamente los desechos espaciales que ingresen a la atmósfera. Esta ZAEA abarcaría todo el continente y establecería dos obligaciones clave: primero, que los Estados Parte del Tratado Antártico deben retirar cualquier basura espacial que caiga en la Antártica; y segundo, que los reingresos controlados o descontrolados de satélites sobre la región antártica sean evitados. Esta propuesta debe estar alineada con las disposiciones del artículo 3 del Convenio de Registro; el artículo 5 del Convenio de Rescate; y los artículos 2 y 4 de la Convención

de Responsabilidad, el OST y la Costumbre Jurídica Internacional Espacial respectivamente, expresando que esta ZAEA no pretende regular el espacio ultraterrestre, sino los efectos ambientales en el Continente Antártico derivados del reingreso atmosférico y su eventual impacto.

Bibliografía

AGREEMENT ON THE RESCUE OF ASTRONAUTS, THE RETURN OF ASTRONAUTS AND THE RETURN OF OBJECTS LAUNCHED INTO OUTER SPACE. 1967. Disponible en https://www.unoosa.org/pdf/gares/ARES_22_2345S.pdf

BYERS, Michael, and Aaron BOLEY. Who Owns Outer Space? International Law, Astrophysics, and the Sustainable Development of Space. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.

CONVENIO SOBRE LA RESPONSABILIDAD INTERNACIONAL POR DAÑOS CAUSADOS POR OBJETOS ESPACIALES. 1972. Disponible en https://www.unoosa.org/pdf/gares/ARES_26_2777S.pdf

DIRECTRICES PARA LA REDUCCIÓN DE DESECHOS ESPACIALES. Disponible en <https://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/COPUOS-GuidelinesS.pdf>

FERREIRA, José P., ZIYU HUANG, Ken-Ichi Nomura, and Joseph WANG. "Potential ozone depletion from satellite demise during atmospheric reentry in the era of mega-constellations". Geophysical Research Letters 51, e2024GL109280 (2024). <https://doi.org/10.1029/2024GL109280>

LAWRENCE, Andy, MEREDITH L. Rawls, Moriba JAH, Aaron BOLEY, Federico DI VRUNO, Simon GARRINGTON, Michael KRAMER, Samantha LAWLER, James LOWENTHAL, Jonathan MCDOWELL, and Mark MCCAUGHREAN. "The case for space environmentalism". Nature Astronomy, no. 6 (2022): 428–435. <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01655-6>

MCDOWELL, Jonathan C. 2024. "GCAT: General Catalog of Artificial Space Objects". Jonathan Space Report. Published on May 5 2024 and updated on July 19 2024. <https://planet4589.org/space/gcat/index.html>

OUTER SPACE TREATY. 1967. Disponible en <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/outerspacetreaty.html>

PROTOCOLO AL TRATADO ANTÁRTICO SOBRE PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE. 1998. Disponible en <https://www.ats.aq/s/protocol.html#>

VALDIVIA, Victoria, and Mauricio IBARRA. “Conflicto geopolítico Antártico: Perfilando los escenarios sobre

el futuro de la gobernanza internacional Antártica”. Cuaderno de trabajo, no. 4 (2022): 1-21. <https://www.publicacionesanepe.cl/index.php/cdt/article/download/1004/679>

VALDIVIA, Victoria. “Armas contraespaciales en Antártica. Ciclos de conocimiento e innovación, implicancias y rinocerontes grises”. Cuaderno de trabajo, no. 3 (2024): 1-18. <https://www.publicacionesanepe.cl/index.php/cdt/article/download/1075/743>

Sobre los autores Mario Esquivel Lizondo

ORCID:0009-0001-7985-2673

Licenciado en Ciencias Jurídicas y Sociales, Abogado. Gerente (CEO) de Magellan Space Industries, Punta Arenas.

Miembro Asociación Chilena del Espacio [ACHIDE], Presidente Comité de Política, Institucionalidad y Entorno Legal.

Correo: mario.esquivel.lizondo@gmail.com

Marieta Valdivia Lefort

ORCID: 0000-0002-3521-1487

Master's in Public Policy (MSc), PhD Candidate in Politics and History, Institute of the Americas, University College London. Miembro Asociación Chilena del Espacio [ACHIDE], Comité de Política, Institucionalidad y Entorno Legal. Head of Internship and Senior Research Officer, Space Court Foundation. Member and Researcher, International Astronomical Union's Centre for the Protection of the Dark and Quiet Sky [IAU CPS] Policy Hub. Policy and Diversity Officer, Royal Astronomical Society.

Correo: marieta.lefort@spacecourtfoundation.org

