

Capítulo 3

Meteorología espacial: un campo de proyección del espacio exterior colombiano*

DOI: <https://doi.org/10.25062/9786287602229.03>

Fabio Baquero-Valdés

Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto"

Richard Humberto Cáceres León

Fuerza Aérea Colombiana

Resumen: La presencia del Estado colombiano en el espacio ultraterrestre cobra valor en la proyección espacial de la Nación. Esta condición permite acceder al estudio de la meteorología espacial para entender los fenómenos solares que afectan el clima espacial y las diferentes formas de generación de energía. Del mismo modo, se estudia el efecto de la energía solar en la atmósfera y la magnetósfera terrestre, en particular en las comunicaciones y los sistemas de navegación empleados en las operaciones aéreas; cómo el clima espacial afecta los satélites por su exposición al Sol y a otros fenómenos meteorológicos espaciales, así como a las personas que incursionan en el espacio ultraterrestre y aéreo, y a quienes habitan la Tierra. También se resalta la importancia de la meteorología espacial en el pronóstico y medición de parámetros solares, la detección de eventos solares con prontitud y el suministro de información útil en modelos de predicción del tiempo espacial.

Palabras clave: clima espacial; espacio ultraterrestre; meteorología espacial; operaciones aéreas.

* Este capítulo presenta los resultados del proyecto de investigación "Proyección del empleo de las capacidades estratégicas aeroespaciales de Colombia para la seguridad y defensa nacional", del grupo de investigación Masa Crítica de la Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto", categorizado como A1 por MinCiencias y con código de registro COL0123247. Los puntos de vista pertenecen a los autores y no reflejan necesariamente los de las instituciones participantes.

Fabio Baquero-Valdés

Magíster en educación de la Universidad Santo Tomás y profesional en administración aeronáutica. Coronel de la Reserva Activa de la Fuerza Aérea Colombiana. Docente ocasional asociado e investigador junior del grupo Masa Crítica en la Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto". Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5509-322X> - Contacto: fabio.baquero@esdeg.edu.co

Richard Humberto Cáceres León

Doctor en física y meteorología de la Universidad de Barcelona (España), magíster en meteorología de la Universidad Nacional de Colombia y profesional en administración aeronáutica de la Escuela Militar de Aviación. Teniente Coronel de la Fuerza Aérea Colombiana. Jefe del Centro Tecnológico de Innovación Aeronáutica. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0244-1980> - Contacto: richard.caceres@fac.mil.co

Citación APA: Baquero-Valdés, F. y Cáceres León, R. H. (2022). Meteorología espacial: un cam-po de proyección del espacio exterior colombiano. En J. H. Conde Mesa (ed.), *Visión aeroespacial colombiana* (pp. 71-106). Sello Editorial ESDEG. <https://doi.org/10.25062/9786287602229.03>

VISIÓN AEROESPACIAL COLOMBIANA

ISBN impreso: 978-628-7602-21-2

ISBN digital: 978-628-7602-22-9

DOI: <https://doi.org/10.25062/9786287602229>

Colección Estrategia, Geopolítica y Cultura

Sello Editorial ESDEG

Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes prieto"

Bogotá D.C., Colombia

2022



Introducción

En este capítulo, elaborado bajo la metodología de revisión y análisis documental, se plantean argumentos sobre la importancia que reviste para el Estado colombiano fijar su presencia permanente en el espacio ultraterrestre, mediante el logro de capacidades que le permitan alcanzar, explotar y proteger los activos espaciales a los que tiene derecho.

Inicialmente, se aborda el tema relacionado con *los fenómenos solares que afectan el clima espacial*, producto de las continuas formas de generación de energía del sol, en su interacción con la atmósfera y la magnetósfera terrestre, lo cual causa variaciones que dan lugar al clima espacial.

Seguidamente, se aborda el tema relacionado con *el clima espacial y su impacto en las operaciones aéreas*, puesto que los sistemas naturales de protección de la Tierra se ven afectados y superados por los fenómenos solares, con efectos en el funcionamiento de las comunicaciones y los sistemas de navegación, entre otros sistemas vitales en las operaciones aéreas. Posteriormente, se presentan los efectos del *clima espacial sobre los satélites*, toda vez que las tormentas solares generan flujos de radiaciones y partículas que impactan sobre los satélites y ocasionan daños en su estructura y componentes de operación. Estas afectaciones ocurren como resultado de la exposición de los satélites al Sol, junto con otros fenómenos meteorológicos que genera el clima espacial. Para continuar, se describen *los efectos del clima espacial sobre las personas* que incursionan en el espacio ultraterrestre como las que desarrollan operaciones aéreas y de quienes habitan la Tierra.

Posteriormente, se explican *las formas de pronóstico y los productos para medir parámetros solares*, su interpretación en el campo de la meteorología espacial. Así mismo, se muestra cómo se utiliza la información satelital en la Tierra

para detectar eventos solares con prontitud y suministrar información útil en modelos de predicción del tiempo espacial.

Finalmente, se plantean las conclusiones que recogen los principales hallazgos y análisis de las categorías que componen el contenido y propósito del capítulo.

Generalidades

La apuesta del Estado colombiano de fijar su presencia permanente en el espacio ultraterrestre se convierte en el punto de partida de una política espacial relacionada con los objetivos esenciales del Estado. Es así como en la actualidad se adelantan esfuerzos en diferentes sectores estatales y privados para la consolidación de una estrategia en el logro de este gran propósito nacional.

Esta consolidación se realiza a partir de la materialización de proyectos en diferentes campos de acción del Estado como la academia, la investigación, la industria, la defensa nacional y el sector productivo, entre otros. Para lo anterior, el Gobierno colombiano ha manifestado la firme intención de robustecer una política pública espacial. De esta forma, se propuso transformar la Comisión Colombiana del Espacio con el propósito de diseñar una política de Estado tendiente a desarrollar, utilizar y potenciar el desarrollo espacial (MinTIC, 2019). No obstante, el esfuerzo colombiano en el desarrollo espacial aún es considerado por la comunidad internacional como incipiente.

Sin embargo, la anterior condición no ha sido una limitante para continuar generando conciencia nacional sobre la importancia que representa para el Estado, el valor de los recursos disponibles en el espacio exterior, a los que el país tiene el derecho de acceder, siempre y cuando se logre concretar una verdadera capacidad para alcanzar y proteger estos activos espaciales.

De este modo, y a fin de ofrecer mayor claridad conceptual sobre el tema espacial, es procedente resolver los siguientes interrogantes: ¿qué es el espacio exterior y dónde inicia?

En lo que respecta al espacio exterior, también considerado simplemente como *el espacio*, se le define como la zona del universo fuera de la atmósfera de los cuerpos celestes. Se emplea el término *espacio exterior* como una manera de diferenciarlo del espacio aéreo (Espacio exterior, 2019), pero no es simplemente un juego de palabras.

Desde un punto de vista científico, Drake (2018) afirma que la mayoría de los expertos están de acuerdo en que el espacio exterior comienza en el punto donde las fuerzas dinámicas orbitales se vuelven más importantes que las fuerzas aerodinámicas, o en donde la atmósfera sola no es suficiente para soportar una nave a velocidades suborbitales.

Políticamente, es cuestión de soberanía de un Estado, toda vez que las leyes que gobiernan el espacio aéreo y el espacio exterior son diferentes. Mientras que el espacio aéreo es soberano de cada Nación, los tratados internacionales permiten el libre uso y exploración del espacio exterior. Drake (2018) enfatiza que, una vez establecidos los límites del espacio aéreo y exterior, también se limitarán las leyes que regirán para cada uno de ellos.

Es entendible entonces que países desarrollados como Estados Unidos se resistan a delimitar el espacio exterior (Drake, 2018), toda vez que cuenta con la capacidad tecnológica para su uso y explotación. De forma opuesta, otras naciones sostienen que es fundamental establecer límites, puesto que se ha incrementado el número de programas espaciales nacionales y vuelos espaciales privados que incrementarían el tráfico aéreo espacial.

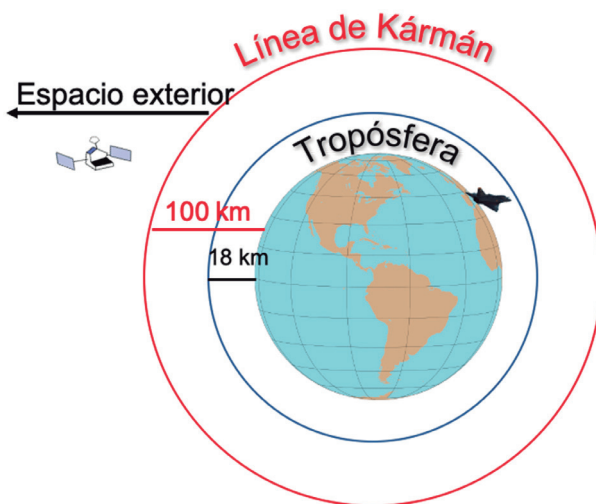
Los primeros esfuerzos científicos para determinar la altitud de inicio del espacio exterior fueron realizados por el físico húngaro Theodore Von Kármán, quien determinó en 1900 que ese nivel se encontraba a partir de los 100 km de altitud, una línea imaginaria que fue conocida como la línea de Kármán.

La Federación Aeronáutica Internacional (FAI) estaría de acuerdo con el límite de 100 km previamente establecido. No obstante, mientras que la Administración Federal de Aviación (FAA), la Fuerza Aérea de Estados Unidos, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), consideran que el espacio comienza a partir de los 80 km desde la superficie terrestre, el Centro de Control de Misión de la NASA, lo establece en 122 km (Lal y Nightingale, 2014).

Por su parte, la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) acoge la definición del espacio como el área sobre la atmósfera de la Tierra que se extiende infinitamente en todas las direcciones, comenzando aproximadamente a 100 km sobre la superficie terrestre (Álvarez & Corredor, 2019, p. 46), a partir de la denominada línea de Kármán, tal como se presenta en la Figura 1.

Igualmente, la FAC define el poder espacial como la capacidad de emplear defensiva u ofensivamente la totalidad de las capacidades espaciales en favor de los fines del Estado. Para ello, el poder espacial actúa en concierto con los poderes militares de los otros dominios, como el terrestre, naval, aéreo y ciberespacial.

Figura 1. Línea de Kármán como inicio del espacio exterior



Fuente: Elaboración propia

Es claro para la FAC que el desarrollo de capacidades espaciales, los recursos del espacio exterior y el aprovechamiento de una mejor posición geoestratégica brindan oportunidades para lograr la máxima libertad de acción política y militar, en la búsqueda de los intereses geopolíticos nacionales.

En este mismo sentido, en la Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial al 2042, la FAC creó el Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales en 2002, logró hacer presencia en el Espacio con el lanzamiento del FACSAT-I en 2018, con el futuro lanzamiento del FACSAT-II en 2022 y con la creación del Centro de Operaciones Espaciales (ESPOC) para el Comando, Control y Ejecución de Operaciones Espaciales, con total determinación y voluntad por avanzar en la misión que le otorga la constitución y la evolución del poder aéreo espacial.

Resueltos en alguna medida los interrogantes planteados, es procedente retomar el planteamiento inicial relacionado con la importancia que tiene para el Estado el valor de los recursos disponibles en el espacio exterior. Una línea de acción estratégica del Estado para proteger estos activos espaciales es el campo de la investigación científica sobre temas espaciales, como el relacionado con la meteorología espacial, definida como: la ciencia que permite entender las cambiantes condiciones en la región comprendida entre el Sol y la atmósfera terrestre (Meteorología Espacial, 2015).

La National Research Council (1997) profundiza aún más en el concepto, afirmando que la meteorología espacial es la ciencia que se ocupa de analizar y predecir las variaciones en el plasma solar, el campo magnético terrestre, la radiación y otras variables del espacio exterior; definición que coincide con la propuesta por el Servicio Nacional de Meteorología Espacial de España (SeNMEs), que la define como: la ciencia que pretende comprender y predecir el estado del Sol, de los entornos interplanetario y planetarios, así como de las perturbaciones que les afectan, sean de origen solar o no. El SeNMEs habla también del tiempo espacial y lo define como el estado físico y fenomenológico de los entornos espaciales naturales.

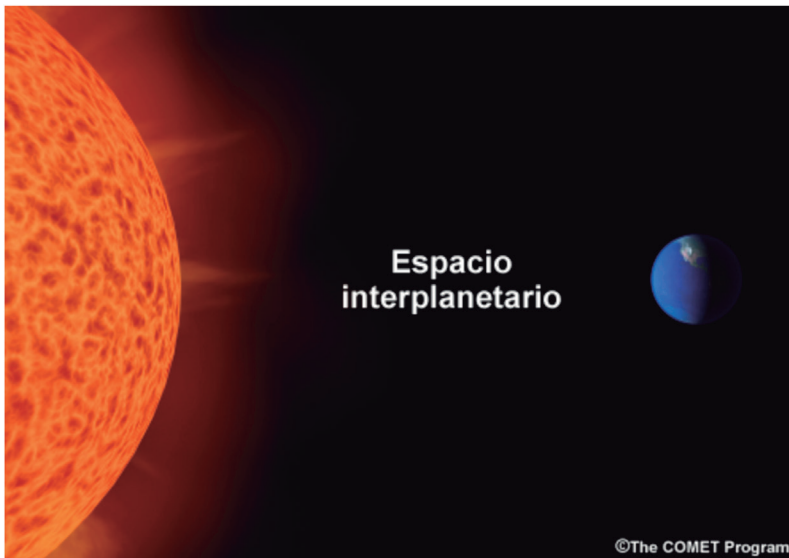
La Organización Meteorológica Mundial (OMM), por su parte, define el tiempo espacial como el estado físico y fenomenológico del ambiente espacial natural, incluido el Sol y los entornos interplanetarios y planetarios, mientras que la NOAA lo define como: las variaciones en el entorno espacial entre el Sol y la Tierra —y en todo el sistema solar— que pueden afectar las tecnologías en el espacio y en la Tierra (NOAA, 2017).

Aunque todas las definiciones anteriores son acertadas, en la FAC se adopta la tesis de la American Meteorological Society (2013), que considera que la meteorología espacial es la ciencia que estudia aquellos fenómenos que se encuentran total o parcialmente fuera de la atmósfera terrestre y las relaciones con los cambios solares. Si estos cambios se presentan en el orden de horas se habla de tiempo espacial; si, al contrario, suceden a lo largo de los años y hacen referencia a las condiciones normales o predominantes del sol en un largo periodo de tiempo, se trata del clima espacial.

El clima espacial es el resultado de la posición de la Tierra en el sistema solar, de la energía liberada por la actividad solar y de la influencia de dicha energía sobre el campo magnético y la atmósfera terrestre, específicamente, sobre la magnetósfera (esto es, el campo magnético de la Tierra) y la ionósfera terrestres. El clima espacial depende principalmente del Sol y del entorno espacial que afecta a la Tierra y los sistemas tecnológicos. En otras palabras, el clima espacial describe las lentas variaciones meteorológicas espaciales y los efectos del sol en la región entre el Sol y la Tierra, denominada espacio interplanetario (Figura 2).

Actualmente, es posible estimar las condiciones del entorno entre el Sol y la Tierra con base en datos solares, la heliósfera, la magnetósfera y la ionósfera, de tal manera que es posible realizar vigilancia y emitir alertas, avisos y pronósticos.

Figura 2. *Espacio interplanetario*



Fuente: Tomada de MetEd (<https://www.meted.ucar.edu/index.php>)

A continuación, se abordan los temas relacionados con los fenómenos solares que afectan el tiempo y el clima espacial, la forma en que el clima espacial afecta a los satélites, a las aeronaves y a las personas, a través de la exploración de los instrumentos utilizados para medir parámetros solares y su interpretación.

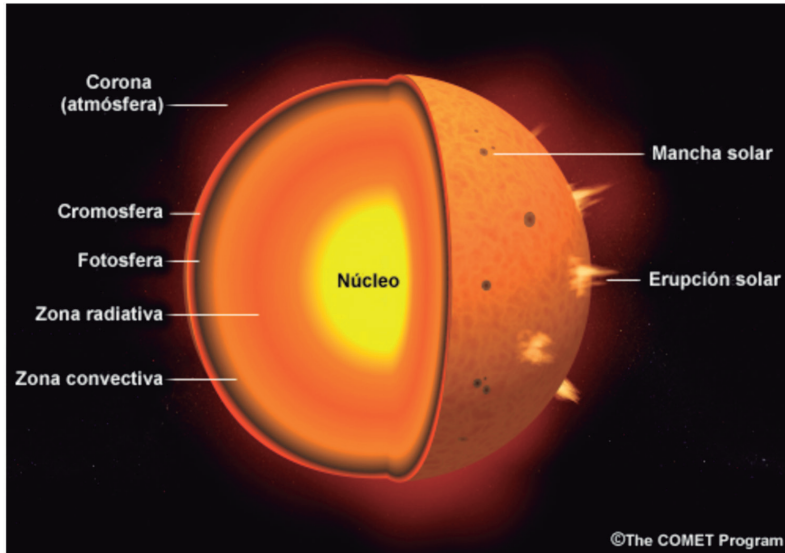
Fenómenos solares que afectan el clima espacial

El Sol es una estrella que emite continuamente y en forma variable diferentes formas de energía: 1) energía en forma de luz; 2) campos magnéticos y 3) plasma¹. Todas interactúan con la atmósfera y la magnetósfera terrestre, lo cual causa variaciones que dan lugar al clima espacial. La Figura 3 presenta un esquema de las capas del Sol, donde también son visibles las manchas solares², las cuales están directamente relacionadas con el ciclo solar.

1 Conjunto de partículas ionizadas; es decir, con una carga eléctrica, como los electrones y protones.

2 Regiones más frías y oscuras influenciadas por un fuerte campo magnético que inhibe la interacción entre el plasma del interior del Sol y el de su superficie.

Figura 3. *Capas del sol*



Fuente: Tomada de MetEd (<https://www.meted.ucar.edu/index.php>)

El ciclo solar

El ciclo solar es un periodo de 11 años que inicia con el aumento en el número de manchas solares dando paso al máximo solar y su posterior disminución, conocido como mínimo solar. Es de anotar que el aumento de la actividad solar es totalmente normal y cada ciclo puede oscilar entre 9 y 14 años (NASA, s.f.). Las manchas solares existen debido a la presencia de fuertes campos magnéticos solares locales y su aparición es, quizás, uno de los elementos más utilizados para medir la variabilidad climática solar.

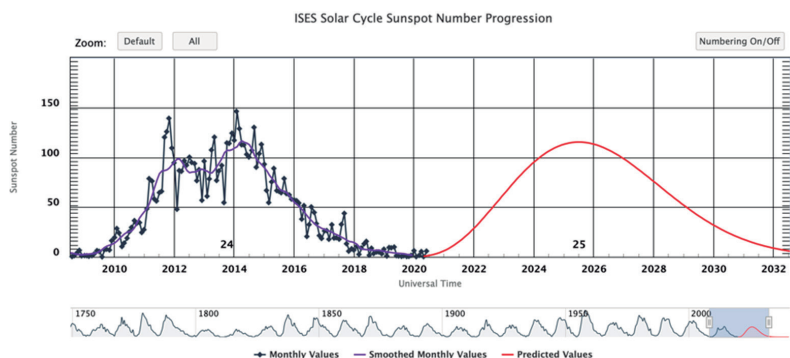
1. La variabilidad de las condiciones solares es visible en las emisiones de rayos X, las cuales aumentan hasta diez veces; en la radiación ultravioleta extrema, que aumenta de cuatro a cinco veces; y en la constante solar³, que aumenta aproximadamente un 0,1 % a medida que el Sol evoluciona desde sus fases más tranquilas a sus fases más activas (OACI, 2018).

No existe una reciprocidad entre la severidad del impacto de cualquier evento del clima espacial y el máximo o mínimo solar: los eventos de clima espacial pueden ocurrir en cualquier momento a lo largo del ciclo solar (Figura 4). Sin

3 Radiación solar promedio recibida en ausencia de la atmósfera, a la distancia media Tierra-Sol sobre una superficie plana orientada perpendicularmente a los rayos solares.

embargo, los efectos sobre la aviación son más abundantes durante el máximo solar y están directamente relacionados con los eventos solares más comunes.

Figura 4. *Ciclo solar*



Fuente: Tomado de NOAA (2020a)

Como se muestra en la figura 4, en 2014 el Sol tuvo la máxima actividad con mayores flujos de radiaciones y partículas con efectos sobre la vida y los sistemas tecnológicos, situación que se repetirá en 2025, según las estimaciones de la International Space Environment Service (ISES), encargada de gestionar la información de relevancia de la meteorología espacial a nivel planetario y la NOAA, entidad que también efectúa predicciones sobre el tiempo atmosférico.

Estas organizaciones estiman que el actual ciclo solar (ciclo 24) disminuirá cuando el Sol esté menos activo, estimación que se prevé a finales del 2020. Por otra parte, los expertos pronostican que el próximo ciclo (ciclo 25) podría tener un inicio lento y alcanzar su punto máximo solar entre el 2023 y 2026, con un rango de 90 a 130 manchas solares. Esta actividad está muy por debajo del promedio de manchas solares, que oscila entre 140 y 220 manchas solares por ciclo solar.

Eventos solares

En la capa visible del Sol, la fotosfera, ocurren tres eventos solares que modifican la meteorología espacial: 1) el viento solar, de naturaleza continua y proveniente de los agujeros coronales; 2) las erupciones solares y 3) las eyecciones de masa coronal, estas dos últimas de naturaleza eruptiva. Algunos de estos eventos pueden durar muy poco y sus efectos se perciben en la Tierra desde 8 minutos después del evento hasta después de unos días. Las erupciones repentinas causan

interrupciones de las radiocomunicaciones, tormentas de radiación y tormentas magnéticas sobre la Tierra.

Viento solar

El viento solar está compuesto por una corriente continua de partículas ionizadas que se desplazan a velocidades de 300 a 600 km/s y por plasma. Es una consecuencia de la temperatura extrema de la corona solar y la expansión resultante de plasma al espacio; también es el responsable de transportar la energía de las erupciones solares que afectan la atmósfera terrestre (Vásquez et al., 2003; Cranmer, 2005).

Esta energía comprime la magnetósfera en el lado iluminado de la Tierra y lo estira en el lado nocturno sin causar impactos importantes sobre el planeta; pero durante los eventos de emisiones más violentos, el flujo de partículas se acelera e intensifica, modificando el clima espacial. El viento solar puede aumentar gradualmente debido al agujero coronal, que permite que el viento solar de alta velocidad escape sin obstáculos desde el interior del Sol, pero también puede ser extremadamente rápido y energético si se produce una erupción solar (Vásquez et al., 2003; Cranmer, 2005).

Erupciones solares

Son liberaciones rápidas de energía almacenada en campos magnéticos fuertes localizados en el Sol y denominadas como regiones activas, que casi siempre presentan manchas solares (OACI, 2018). La liberación de esta energía tiene la capacidad de variar de forma repentina toda la gama del espectro electromagnético, incluidas las longitudes de onda de rayos X, así como alterar la energía del plasma, lo que aumenta la velocidad con que los electrones y los protones viajan hacia la Tierra y causan interferencias importantes en las comunicaciones terrestres en cuestión de minutos.

Cuando esta energía entra en contacto con el campo magnético terrestre, las líneas del campo magnético las trasladan al lado nocturno de la Tierra y así se producen tormentas geomagnéticas que se visibilizan como fenómenos luminiscentes en el cielo nocturno, usualmente en zonas polares y conocidos como aurora boreal y austral en el hemisferio norte y sur, respectivamente.

Las erupciones solares son las causantes de la mayoría de las pérdidas de comunicaciones de radio, sobre todo, las transmitidas en HF, las cuales se intensifican durante los años de máximo solar, cuando pueden registrarse de 10 a 20 episodios de interrupciones en un solo día, fenómeno que disminuye durante los

años de mínimo solar. Las peores interrupciones de las radiocomunicaciones por erupciones solares ocurren en una proporción de una a dos por cada ciclo solar, junto con 175 a 2000 eventos de menor repercusión (OACI, 2018).

Eyecciones de masa coronal (CME)

Es la expulsión de enormes cantidades de plasma magnetizado del Sol a velocidades que pueden alcanzar los 2000 km/s en casos extremos. Las CME causan una perturbación mucho mayor del campo magnético de la Tierra en comparación con una erupción solar. Al interactuar esta energía con la atmósfera y el campo magnético terrestre, se producen las tormentas magnéticas más fuertes, debido a los dinámicos campos magnéticos que se encuentran encapsulados en una CME, de tal manera que es inminente una perturbación de las comunicaciones y las señales de los satélites.

La frecuencia de ocurrencia de las erupciones solares y las CME tiene una relación directa con el ciclo solar; no obstante, estas últimas se presentan con menor frecuencia. Las CME varían de una por semana durante el mínimo solar hasta cinco CME por día durante el máximo solar. Las CME son difíciles de detectar, no son brillantes como las erupciones solares y pueden pasar horas antes de que abandonen totalmente el Sol (OACI, 2018).

Es lógico pensar que no todos los eventos que modifican el tiempo espacial son causados por erupciones solares, también dependen, en gran medida, de las variaciones del viento solar y de la interacción con la magnetósfera terrestre.

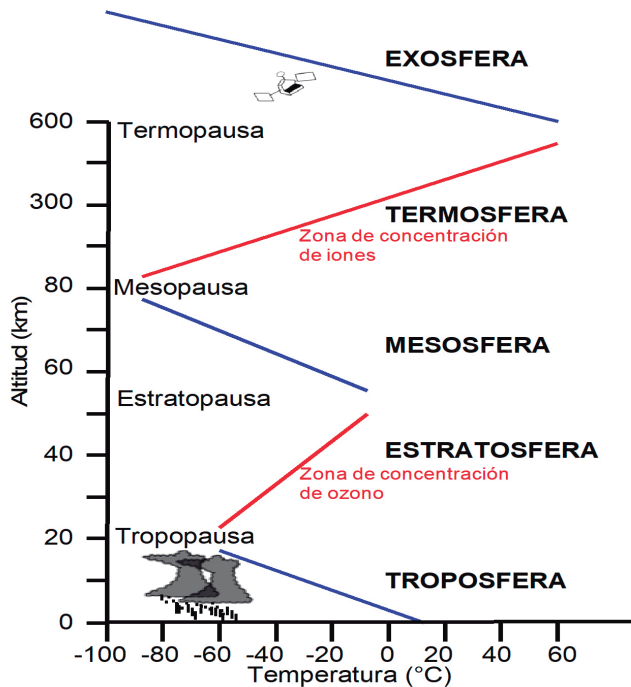
El clima espacial y las operaciones aéreas

En este punto es claro que la actividad solar afecta el clima espacial al aumentar el flujo de partículas y la radiación. Por ello, los sistemas naturales de protección de la Tierra se ven afectados y superados. En este sentido, es pertinente referir cómo el clima espacial afecta el funcionamiento de las comunicaciones y los sistemas de navegación, entre otros sistemas vitales en las operaciones aéreas.

En consonancia con lo anterior, la FAC cumple con la misión institucional, mediante distintas funciones, en las que se desarrollan las misiones y las operaciones aéreas. Gran parte de estas funciones, misiones y operaciones se desarrolla en la primera capa de la atmósfera: la tropósfera. La figura 5 muestra la división que se hace de las capas de la atmósfera teniendo como base el comportamiento de la temperatura, desde la superficie de la Tierra hasta más de 600 km.

Se suele pensar que las condiciones atmosféricas que se desarrollan en la tropósfera son las únicas que afectan las operaciones aéreas, pero se ha demostrado que esta capa también se ve afectada por el comportamiento de las otras capas, y a pesar de que la tropósfera es la capa más cercana a la superficie de la Tierra, también está afectada por los eventos solares que se presentan en el espacio exterior.

Figura 5. Capas de la atmósfera



Nota: Capas de la atmósfera según la relación entre la temperatura y la altitud, representadas por el eje X y el eje Y, respectivamente.

Fuente: Tomado de Cáceres (2017, p. 33)

Los efectos de clima espacial suelen ser más perceptibles por encima de los 50° de latitud en los hemisferios norte y sur. Sin embargo, durante un evento extremo, es posible que afecte varias regiones del planeta. Mientras que las aeronaves que realizan vuelos más cortos y de baja altitud se ven menos afectadas, los vuelos intercontinentales y con trayectos que sobrevuelan los polos, pueden sentir los impactos de los errores de navegación y los apagones, especialmente en el lado iluminado de la Tierra.

El Centro de Predicción del Clima Espacial (Space Weather Prediction Center, SWPC) de la NOAA vigila constantemente los posibles impactos y efectos del clima espacial sobre las operaciones aéreas, los cuales están relacionados con los tres eventos solares descritos al inicio de este capítulo y que causan principalmente: 1) apagones de radio y 2) fallos en el sistema de posicionamiento global (Global Positioning System, GPS) y el sistema mundial de navegación por satélite (Global Navigation Satellite System, GNSS).

Apagones de radio

Las aeronaves utilizan los equipos de comunicación que transmiten en muy alta frecuencia (*Very High Frequency*, VHF) y ultra alta frecuencia (*Ultra High Frequency*, UHF) para comunicarse con los servicios de tránsito aéreo en las regiones habitadas de latitudes bajas y medias. En las regiones polares remotas que sobrepasan los 78° N y 60° S, y en los océanos, se asignan a las operaciones aéreas dos canales de radio en alta frecuencia (*High Frequency*, HF), uno primario y otro secundario, para comunicarse con los controladores aéreos.

Mientras que el viento solar no suele causar perturbaciones importantes en las comunicaciones, la erupción solar y las CME envían fuertes emisiones de rayos X hacia la Tierra causando interferencia en los equipos de comunicación que transmiten en VHF, UHF y HF, especialmente en aeronaves que sobrevuelan las inmediaciones de los polos magnéticos⁴.

Las emisiones de rayos X aumentan la densidad de la ionósfera terrestre, ubicada a unos 80 km de la superficie. Los nuevos niveles de los gases ionizados absorben principalmente parte de las ondas de radio HF, llegando a causar hasta la pérdida total de las señales en esta frecuencia, acción que usualmente se presenta al mediodía.

Fallos en los sistemas GPS y GNSS

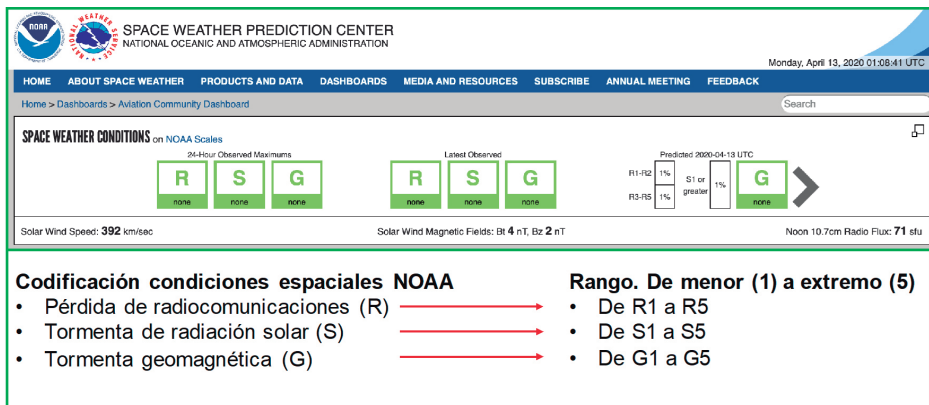
Estos sistemas son ampliamente utilizados en las operaciones aéreas, lo cual permite utilizar la posición de las aeronaves de forma muy precisa en tres dimensiones y facilitando la navegación aérea con cobertura mundial (OACI, 2018). Gracias a estos sistemas, los controladores aéreos pueden administrar mejor el espacio aéreo con un patrón eficiente de separación entre aeronaves y facilita las operaciones de aproximación en condiciones de visibilidad mínima.

4 Punto del globo terrestre que, debido al campo magnético de la Tierra, ejerce atracción sobre los elementos imantados. La ubicación de cada polo magnético no coincide con los polos geográficos, lo que confirma un desplazamiento frente al eje geográfico del planeta conocido como declinación.

Escalas del tiempo espacial según la NOAA

La NOAA, por intermedio del SWPC, clasificó la severidad de los apagones de radio (R), de las tormentas de radiación solar (S) y las tormentas geomagnéticas (G) en una escala de 1 a 5, determinada por la menor a mayor severidad respectivamente. Mencionada clasificación facilita que las instituciones que puedan verse afectadas tengan la posibilidad de ejercer algún tipo de acción que ayude a mitigar el impacto del tiempo espacial. La Figura 6 ejemplifica las condiciones del tiempo espacial actualizadas, las que se presentaron en las últimas 24 horas y las pronosticadas para las siguientes 72 horas a partir del día 12 de abril de 2020.

Figura 6. Ejemplo de condiciones del tiempo espacial



Nota: Condiciones del tiempo espacial para el día 12 de abril de 2020. Se indican las condiciones actuales, las de las últimas 24 horas y el pronóstico a 72 horas.

Fuente: Tomado de NOAA (2020a)

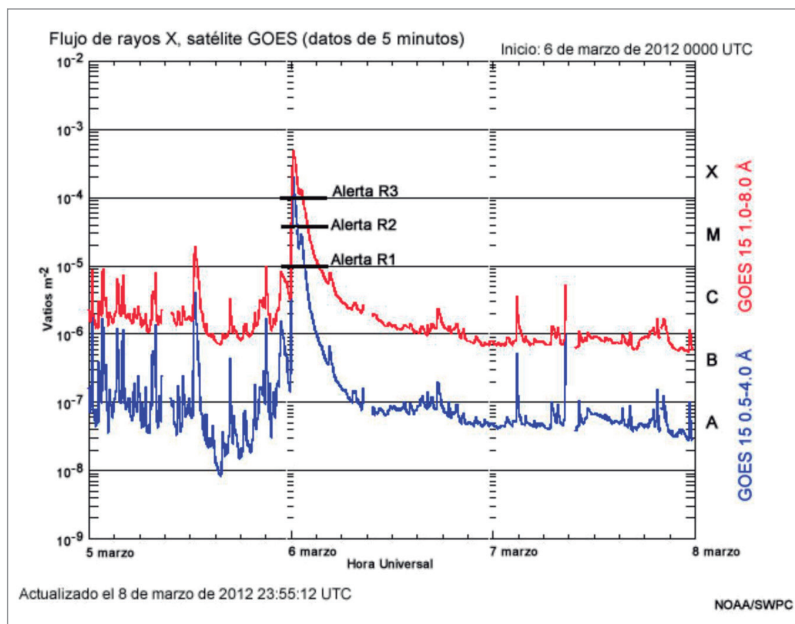
Apagones de radio

Para el caso de la pérdida de radiocomunicaciones por apagones de radio ®, el SWPC estableció una escala de clasificación del evento (Anexo A), donde se indica la categoría en términos de severidad, el efecto esperado, el grado de intensidad y la frecuencia de los eventos.

Muchos de los satélites pertenecientes al Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) pueden captar evidencia de las erupciones solares midiendo las emisiones solares de rayos X en tiempo real, las cuales son las directas responsables de la radiación electromagnética que genera perturbaciones en la ionósfera.

En los productos del SWPC, la producción solar de rayos X se mide en las bandas de paso de 1,0 a 8,0 Å⁵ (rojo) y de 0,5 a 4,0 Å (azul) y se emite una alerta de categoría R1 y R2 cuando dichos valores exceden el nivel M1 (10^{-5}Wm^{-2}) y M5 ($5 \times 10^{-5} \text{Wm}^{-2}$), respectivamente como lo muestra la Figura 7.

Figura 7. *Fluctuaciones de rayos X*



Nota: Alertas R1, R2 y R3 de apagón de radio o pérdida de comunicaciones causada por erupciones solares medidas en fluctuaciones de rayos X.

Fuente: Tomado de National Oceanic and Atmospheric Administration / Space weather prediction center (<https://www.swpc.noaa.gov/>)

Dichos flujos afectan a las radiocomunicaciones en HF y, en cierta medida, a los canales VHF en el lado iluminado de la Tierra. Durante un evento importante pueden causar problemas con los enlaces satelitales, lo que dificulta la navegación por satélite. Los efectos se perciben pocos minutos después de la erupción solar y pueden permanecer por varias horas. En las regiones más energizadas de la ionósfera, donde la actividad de las auroras se incrementa, existe mayor probabilidad de experimentar perturbaciones en las comunicaciones.

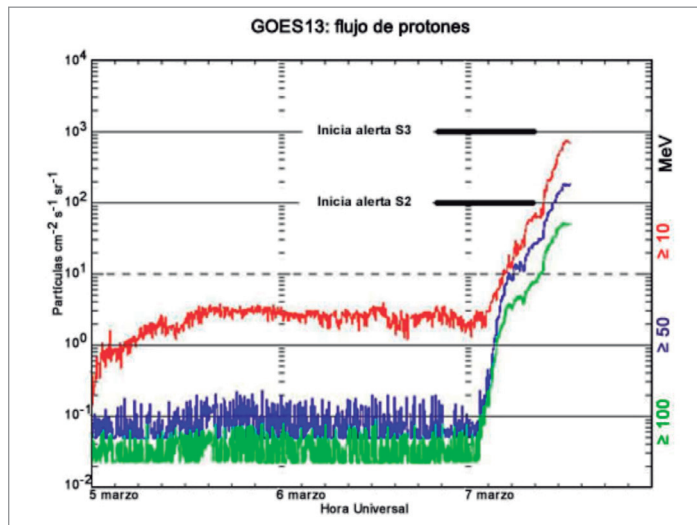
5 El ángstrom (Å) es una unidad longitudinal utilizada principalmente para medir longitudes de onda, equivalente a 0,000000001 metros.

Tormentas de radiación solar

Las tormentas de radiación solar ocurren cuando las eyecciones de masa coronal energizan y aceleran los protones en el viento solar, elevando los niveles de radiación en la Tierra (OACI, 2018). Los satélites GOES pueden advertir de eyecciones de masa coronal gracias a la medición de la unidad de flujos de protones (pfu) que alcanzan la Tierra con niveles de energía ≥ 10 , ≥ 50 y ≥ 100 MeV⁶.

El SWPC estableció una escala de clasificación del evento (Anexo B), donde se emite una alerta de tormenta de radiación solar de categoría S1, S2, S3, S4 y S5, cuando el flujo de protones excede las 10^1 , 10^2 , 10^3 , 10^4 y 10^5 MeV de partículas por centímetro cuadrado por segundo por estereorradián, respectivamente (Figura 8).

Figura 8. Flujo de protones



Nota: Flujo de protones 10, 50 o 100 MeV representados por la línea roja, azul y verde, respectivamente.

Fuente: Tomado de National Oceanic and Atmospheric Administration / Space weather prediction center (<https://www.swpc.noaa.gov/>)

Las tormentas de radiación solar se intensifican cerca del máximo solar. Sin embargo, pueden aparecer en cualquier momento del ciclo, incluso las más severas, que aparecen con una frecuencia de una a dos veces y afectan las operaciones aéreas en los polos entre 10 y 15 veces por ciclo.

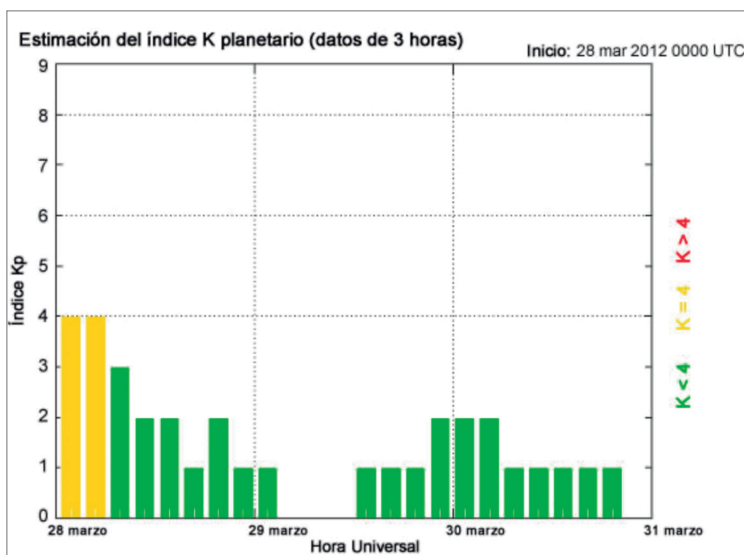
6 El megaelectronvoltio (MeV) es una unidad de energía equivalente a 1 000 000 de electronvoltios (eV). El eV es la energía adquirida por un electrón al trasladarse a través de un potencial eléctrico de 1 voltio. Su valor es $1,6 \times 10^{-19}$ julios.

El flujo de protones causa peligros a los astronautas, las personas en vuelos de gran altitud y en latitudes altas, daños a los sistemas de aviónica, la operación de los satélites, las radiocomunicaciones en HF y exposición a la radiación en la superficie de la Tierra. Las tormentas de radiación solar, en especial aquellas que tienen una gran cantidad de protones de alta energía, exponen a la tripulación y los pasajeros a cantidades considerables de radiaciones (OACI, 2018).

Tormentas geomagnéticas

Las tormentas geomagnéticas son fuertes perturbaciones del campo geomagnético de la Tierra, ocurren cuando las CME producen un aumento en el plasma solar magnetizado que colisiona con la ionósfera y la magnetósfera terrestre. Para determinar si una CME afectará a la Tierra, se estudian las imágenes coronográficas y las mediciones del flujo de protones.

Figura 9. Estimación de Índice K



Nota: Promedio de flujo máximo de protones en tres horas. El índice Kp se ubica en el eje Y; los días analizados se colocan en el eje X.

Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration / Space weather prediction center (<https://www.swpc.noaa.gov/>)

En distintas partes del mundo existe una red de magnetómetros que censan las fluctuaciones máximas de protones observadas durante intervalos de tres horas. El promedio de esas observaciones planetarias genera el índice

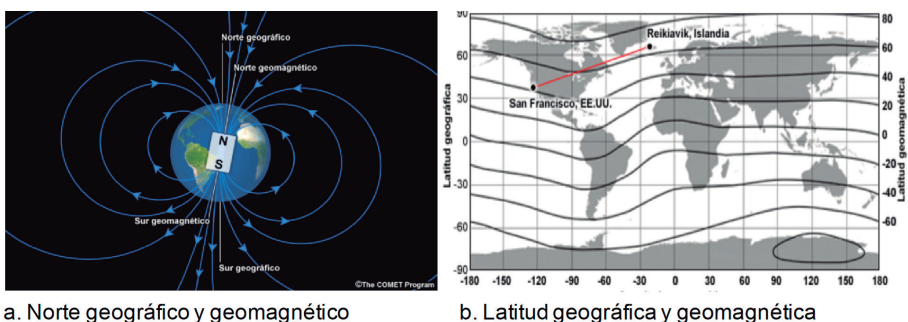
adimensional Kp (NOAA, 2020c), tal como puede observarse en la figura 9. Este índice puede alcanzar mediciones de 5, 6, 7, 8 y 9 (Anexo C), que indican tormentas electromagnéticas en curso o de intensidad leve (G1), moderada (G2) fuerte (G3), severa (G4) y extrema (G5), respectivamente.

Las tormentas geomagnéticas tienden a seguir el ciclo solar de 11 años con una tasa aproximada de 4 fuertes tormentas por cada ciclo (OACI, 2018). De esa manera, las tormentas más fuertes se manifiestan en dos ciclos: el primero, cerca al máximo solar, y el segundo, durante el mínimo solar, lo que evidencia un comportamiento bimodal. Esto no significa que las tormentas geomagnéticas no puedan aparecer en cualquier momento.

Debido al acoplamiento estrecho entre la magnetósfera y la ionósfera, se produce otro tipo especial de tormentas, las tormentas ionosféricas, las cuales son consecuencia de agregar energía al plasma ligeramente ionizado presente en la ionósfera. La ionósfera es otra capa de la atmósfera, la cual se encuentra normalmente a los 80 km de altura, y es una capa que contiene gran cantidad de iones, que permite la reflexión de las ondas largas de radio y el uso de sus características físicas para comunicaciones de voz en HF.

Las tormentas geomagnéticas se intensifican en las altas latitudes geomagnéticas, pueden afectar la navegación GPS, GNSS y las radiocomunicaciones en HF. También pueden causar fallos en las redes eléctricas. Las líneas de latitud geomagnética son curvas y están basadas en los polos geomagnéticos de la Tierra (Figura 10), los cuales dependen de la intensidad del campo magnético y, por lo tanto, no coinciden con los polos geográficos terrestres.

Figura 10. Comparativo norte geográfico y latitud geográfica



Nota: Diferencias entre norte geográfico y geomagnético (a) y diferencias entre la latitud geográfica y geomagnética (b).

Fuente: Adaptado de MetEd (<https://www.meted.ucar.edu/index.php>) y National Oceanic and Atmospheric Administration / Space Weather Prediction Center (<https://www.swpc.noaa.gov/>)

En las latitudes más altas de los polos geomagnéticos de los hemisferios norte y sur, se observan los impactos más fuertes de los eventos de meteorología espacial y es allí donde las auroras se perciben con mayor frecuencia. La tabla 1 resume las características principales de los tres eventos solares reportados por el SWPC.

Tabla 1. *Eventos solares*

Evento	Niveles	Impactos	Escalas temporales
Apagones de radio causados por una erupción solar	R1 R2 R3 R4 R5	Fallas en los sistemas de comunicación vía HF y VHF	El evento tiene una duración de unas cuantas horas. Los primeros efectos se sienten 8 minutos después del evento
Tormentas de radiación solar causadas por la erupción solar o una eyección de masa coronal	S1 S2 S3 S4 S5	Fallas en los sistemas de comunicación vía HF. Problemas con los sistemas de aviónica Exposición a la radiación	El evento tiene una duración entre horas y días. Los primeros efectos se sienten entre 30 minutos y varias horas después del evento.
Tormentas geomagnéticas causadas por una eyección de masa coronal	G1 G2 G3 G4 G5	Fallas en los sistemas de comunicación vía HF. Fallas en la red eléctrica. Problemas en la navegación GPS y GNSS	El evento tiene una duración entre horas y días. Los primeros efectos se sienten entre 20 y 90 horas después del evento.

Fuente: Modificado de NOAA/SWPC

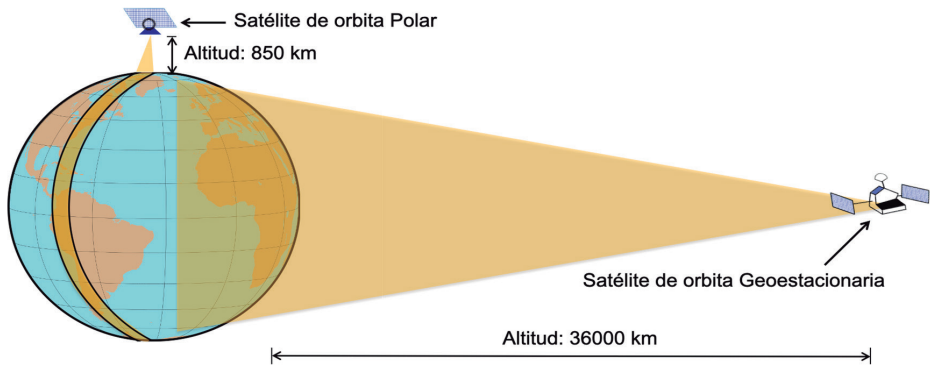
Efectos del clima espacial sobre los satélites

Las tormentas solares generan flujos de radiación y partículas que impactan sobre los satélites ocasionando daños en su estructura y componentes de operación. Comprender estos fenómenos meteorológicos conduce a entender las consecuencias sobre los satélites geoestacionarios y los satélites polares. En este sentido, Cáceres explica (Figura 11):

Un satélite meteorológico es una plataforma de teledetección espacial que lleva a bordo espectroradiómetros, instrumentos ultrasensibles que captan radiaciones reflejadas (visual) y emitidas (infrarrojo) del espectro electromagnético en diferentes bandas, captando así datos e imágenes de la atmósfera y de la superficie terrestre para luego enviarlos a estaciones receptoras en Tierra.

Los satélites se clasifican según su órbita en dos grandes grupos: *satélites geoestacionarios* y *satélites polares*. (2017, p. 172)

Figura 11. Órbita de los satélites meteorológicos



Fuente: Tomado de Cáceres (2017, p. 172)

De forma complementaria, Cáceres (2017, p. 172) expone las órbitas de los satélites, cómo se categorizan y qué organizaciones administran su operación:

Los satélites de órbita polar, como su nombre lo indica, orbitan la Tierra aproximadamente de polo a polo; también son llamados satélites heliosíncronicos⁷. Este grupo de satélites está compuesto principalmente por los satélites POES de la agencia NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), de origen norteamericano, y los METOP, FY y METEOR, de origen europeo, chino y ruso respectivamente.

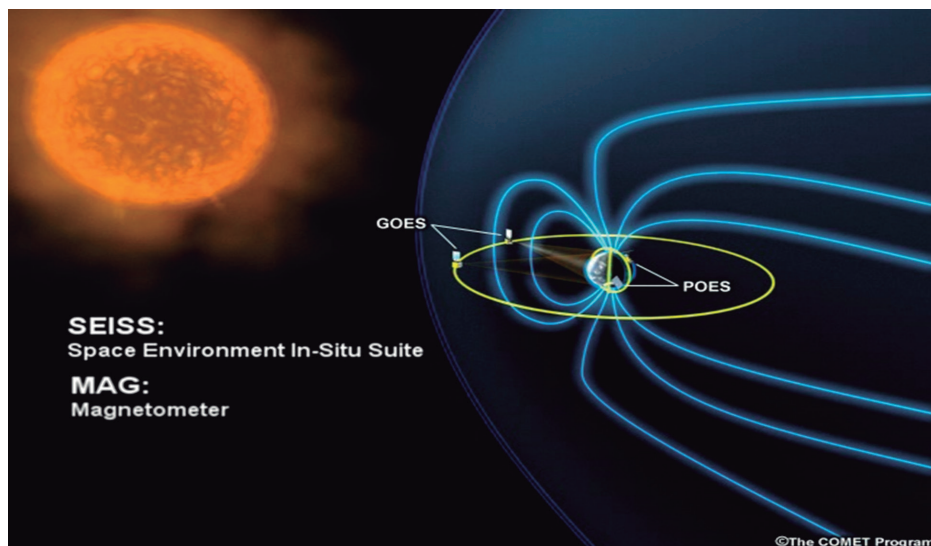
La constelación de satélites POES de la NOAA está compuesta por: NOAA-15, NOAA-18 y NOAA-19. Se prevé que la nueva generación de satélites, es decir, NOAA-20, haga parte de una nueva constelación llamada Joint Polar Satellite System (JPSS), la cual ya cuenta con su primer satélite, el Suomi NPP. Los satélites geoestacionarios o geosíncronicos⁸ orbitan a una altura mucho más superior que los polares y se encuentran sobre la línea del ecuador. Están conformados principalmente por la serie GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) de la NOAA que cubren las Américas y parte del océano Atlántico y Pacífico. El resto del planeta está cubierto por diferentes agencias/satélites tales como METEOSAT (Unión Europea), INSAT (India), ELEKTRO (Rusia), HIMAWARI (Japón), principalmente Cáceres (2017, p. 173).

⁷ Satélites que están en una órbita que les permite pasar sobre cualquier punto de la superficie terrestre a la misma hora solar local.

⁸ Están sincronizados con el movimiento de rotación de la Tierra.

Con base en lo anterior, es evidente que los satélites orbitan en diferentes condiciones y distancias en una relación entre la Tierra y el Sol, tal y como se observa en la Figura 12. Estas afectaciones ocurren como resultado de la exposición de los satélites al Sol y a los diversos fenómenos meteorológicos que esta estrella genera en el clima espacial.

Figura 12. Órbita interpol y geoestacionaria



Fuente: MetEd (<https://www.meted.ucar.edu/index.php>)

Los fenómenos meteorológicos en el espacio cobran especial interés en la comunidad científica, por los daños considerables que ocasionan sobre los satélites, lo cual limita la operación y su vida útil en el espacio. Es así como Moreno (2011) determinó que los principales problemas que la meteorología espacial puede causar a los satélites son: 1) degradación de los paneles solares; 2) re-entrada prematura de satélites en baja órbita; 3) interferencia en las cámaras y detectores; 4) envejecimiento de los materiales y equipos electrónicos; 5) carga y descargas electrostáticas; 6) destrucción de equipos; 7) pérdida de la función y 8) indisponibilidad temporal.

En este sentido, el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) realizó en 2013 un estudio para analizar los efectos del clima espacial sobre los satélites, según el cual concluyó que la mayoría de las fallas se originan a consecuencia de las erupciones solares o las tormentas geomagnéticas. Estos fenómenos

solares se produjeron entre 1996 y 2012, lo que coincidió con una actividad solar de alta energía durante las fases de disminución del ciclo solar (Selding, 2013).

El estudio del MIT analizó las condiciones del clima espacial durante 26 fallas en ocho satélites geoestacionarios, los que proporcionan acceso a la televisión por cable, servicios de internet y comunicaciones globales, orbitando a la misma velocidad que la rotación de la Tierra, por lo que constantemente se encuentran sobre el mismo lugar durante toda su vida.

Estos satélites fueron diseñados para orbitar aproximadamente durante 15 años. Sin embargo, aunque la mayoría están preparados para soportar la radiación, esta igual puede penetrar y degradar los componentes y el rendimiento de un satélite. Por tal razón, los investigadores señalan que la acumulación de radiación causa una carga interna que daña los amplificadores de los satélites necesarios para transmitir la señal de regreso a la Tierra (Selding, 2013).

La investigación del MIT también contribuyó a mejorar el diseño de los satélites enviados al espacio, puesto que “lograr entender cómo el ambiente afecta a los satélites, permite hacer que los satélites sean más tolerantes a la radiación, algo que sería muy beneficioso no sólo en el costo, sino también en la eficiencia” (Selding, 2013).

Por otra parte, como resultado de la investigación realizada por la British Antarctic Survey (BAS), la Universidad de Cambridge y DH Consultancy y presentada ante la Royal Astronomical Society en julio de 2019, se pudo establecer que:

El uso de propulsión eléctrica para elevar los satélites a la órbita geoestacionaria puede provocar una degradación significativa de las células solares. Toda vez que, el viaje prolongado resulta en una mayor exposición a los efectos dañinos del clima espacial. De tal forma, que comprender el tamaño de este riesgo, es esencial para que los operadores comerciales tomen precauciones a fin de proteger sus activos. (British Antarctic Survey, 2019)

Dicha investigación también concluyó que:

Después de una tormenta de radiación, la potencia máxima de salida de la célula solar podría reducirse hasta en un 8 % para el momento en que los satélites lleguen a su destino objetivo mediante la elevación de la órbita eléctrica. Esto es equivalente al nivel de daño que se esperaría después de pasar unos 15 años en órbita geoestacionaria.

Así mismo que, durante una tormenta de radiación, las partículas cargadas liberadas por el Sol quedan atrapadas dentro del campo magnético de la Tierra, formando los cinturones de radiación de Van Allen que rodean la Tierra, y las

colisiones con estas partículas cargadas causan daños a las células solares. Esta degradación es de hasta el 8 % de la potencia de salida en el peor de los casos, pero incluso en un entorno tranquilo, el estudio predice una reducción del 1-3 % en la producción. (British Antarctic Survey, 2019)

Por su parte, el autor principal del estudio, Alexander Lozinski, científico del clima espacial de la BAS, señala que:

Ahora entendemos el nivel de daño causado por un viaje más lento a la órbita geoestacionaria, los operadores de satélites comerciales pueden planificar rutas óptimas durante las fases de diseño y planificación de la misión para garantizar la mejor vida útil de sus productos. (British Antarctic Survey, 2019)

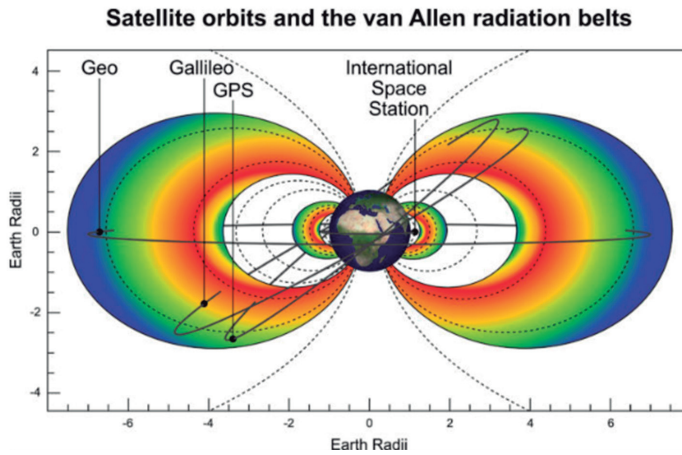
En consecuencia, las misiones comerciales por satélite han comenzado a emplear el uso de propulsión eléctrica para elevar la órbita, para no tener la necesidad de llevar propulsores químicos a bordo. Esto permite que el tamaño y la masa del satélite se reduzcan, lo cual implica ahorros de costos significativos. Reducir el tamaño de los satélites podría permitir el lanzamiento de dos naves espaciales en el mismo cohete —*casi la mitad del costo de lanzamiento*—. Alternativamente, los ahorros en masa podrían usarse para acomodar cargas útiles adicionales o más grandes, lo que permitiría incrementar los ingresos o la capacidad técnica.

En un lanzamiento convencional, el satélite se sitúa en una órbita de transferencia geoestacionaria por el vehículo de lanzamiento y utiliza propulsores químicos para alcanzar la órbita geosincrónica. Esta maniobra de transferencia orbital generalmente toma algunos días. Sin embargo, cuando se usa únicamente propulsión eléctrica, puede llevar hasta 200 días alcanzar la órbita objetivo debido a un empuje más bajo. Esto hace que los satélites pasen más tiempo en los cinturones de Van Allen, donde están expuestos a los efectos nocivos de la radiación espacial (Figura 13).

Por ejemplo, las órbitas de transferencia con un alto apogeo⁹ inicial —*altitud máxima*— permiten que los satélites pasen a través de regiones donde los protones atrapados están presentes, a mayor velocidad, lo que reduce el nivel de daño por radiación.

9 Punto en una órbita elíptica en el que un cuerpo se encuentra más alejado del centro de la Tierra.

Figura 13. Órbitas satelitales y los cinturones de Van Allen



Fuente: British Antarctic Survey (2019)

Richard Horne, jefe del equipo de Meteorología Espacial en BAS, manifiesta que:

Los satélites comerciales con propulsión totalmente eléctrica se introdujeron por primera vez en 2015. Nunca esperábamos una reducción tan grande en el poder de una tormenta de radiación. Lo bueno es que este estudio ayudará a la industria satelital a planificar la mejor órbita que reduzca el daño por radiación. (British American Council, 2019)

Las anteriores evidencias dan cuenta de algunas situaciones en las que el clima espacial afecta a los satélites como la degradación de sus paneles solares, la puesta en órbita, la interferencia en sus componentes de observación y detección, la vida útil de los materiales y equipos electrónicos, la carga y descargas electrostáticas que ocasionan destrucción de equipos, pérdida de funcionalidad y salida temporal de servicio.

Efectos del clima espacial sobre las personas

El Sol y el planeta Tierra se relacionan a través de la energía solar, la que incide en varios de los procesos terrestres. Uno de estos procesos es la cadena trófica¹⁰,

¹⁰ Se conoce como cadena trófica, cadena alimenticia o cadena alimentaria al mecanismo de transferencia de materia orgánica (nutrientes) y energía a través de las distintas especies de seres vivos que componen una comunidad biológica o ecosistema.

en donde la energía solar se transfiere a través de diferentes eslabones como las plantas, las cuales mediante la fotosíntesis aprovechan la energía lumínica del Sol y la convierten en energía química para generar nutrientes, los que luego consumen otras especies de la cadena hasta que, finalmente, llega a especies más complejas como los seres humanos, lo que en últimas asegura la supervivencia.

Otro proceso importante ocurre en la atmósfera terrestre mediante la generación de gases, sin los cuales no se podría respirar. La atmósfera también es un escudo natural de la Tierra y es vital para detener gran parte de la radiación solar que llega en múltiples formas como luz visible, infrarroja o los rayos ultravioletas. Estos rayos conocidos como UV son nocivos para la salud de las personas. Sin embargo, otros componentes de la atmósfera terrestre, entre los que se destaca el ozono, actúan como filtros que detienen la mayor parte de esta radiación.

En este sentido, Cáceres argumenta:

Cada componente del sistema Tierra-atmósfera emite radiación en todo momento y en todas direcciones. También la emite el Sol y constituye la principal fuente de energía utilizada en todos los procesos en los que interactúan Tierra y Atmósfera, y está compuesta principalmente por radiación visible, infrarroja y ultravioleta, las cuales se desplazan a la velocidad de la luz (300 000 000 m/s). (2017, p. 40)

No obstante, la protección natural de la Tierra no es completa, puesto que una pequeña fracción de radiación UV penetra la atmósfera e impacta a las personas. En lugares de mayor elevación, la intensidad de la radiación UV aumenta de forma proporcional con la altitud. Incluso en ambientes nublados la radiación UV puede traspasarla, además, la radiación solar reflejada por la superficie hacia arriba puede volver a ser reflejada por las nubes de regreso hacia la superficie terrestre, lo que incrementa su efecto.

Estos fenómenos solares ocasionan problemas en las personas, como quemaduras en la piel, envejecimiento prematuro, daños oculares y hasta cáncer de piel, que ocurre cuando los rayos UV dañan el ADN de los genes que controlan el crecimiento de las células de la piel. Los efectos del clima espacial sobre la Tierra y su impacto en la salud de las personas son objeto de investigación. El Servicio de Clima Espacial de México manifiesta que el clima terrestre depende de la cantidad de energía radiada por el Sol, por los componentes químicos presentes en la atmósfera y la biósfera terrestre, el efecto invernadero, así como la circulación de los océanos. El Sol calienta más en la región media de la Tierra (ecuador) que en los polos (Norte y Sur).

Ahora bien, el efecto invernadero natural permite el funcionamiento adecuado de los seres vivos; sin embargo, este puede ser afectado por los contaminantes derivados de la quema de los combustibles fósiles hecha por los seres humanos. Los contaminantes peligrosos son gases y partículas que se encuentran en el aire y que son altamente nocivos para la salud. De esta manera, el clima espacial en específico, el viento solar y las tormentas solares influyen en los aspectos de salud de la vida en la Tierra (Ruiz et al., 2017).

Estudios de carácter epidemiológico de morbilidad citadina realizados en México hallaron una relación entre el aumento en la tasa de infartos y los decrementos Forbush, y de mortalidad en el país, que muestra un incremento en la muerte por infartos al miocardio después de grandes tormentas magnéticas y después de un decremento Forbush. Se ha notado sobre todo una mayor incidencia de estos problemas de salud en personas vulnerables, como los ancianos, y en épocas en que la actividad solar es mayor (Mendoza et al., 2006).

En este mismo sentido Scherer et al. (2005) manifiestan que las partículas de gran nivel energético asociadas a las tormentas de radiación solar pueden ser dañinas y potencialmente mortales para los astronautas que durante la tormenta se encuentren fuera de las naves realizando actividades extravehiculares.

De igual forma, en el transcurso de una tormenta de radiación solar, los niveles de exposición pueden ser significativos para los pasajeros y los tripulantes de aviones que se encuentren en vuelo a elevadas latitudes, especialmente sobre el Polo Norte y si la componente B_z^{11} del campo magnético interplanetario está apuntando hacia el sur, hecho que favorece la entrada en la atmósfera de las partículas de alto nivel energético procedentes del Sol.

Aunque las investigaciones sobre estos riesgos para las personas todavía no son del todo concluyentes, los diferentes sistemas de alerta existentes contemplan avisos al respecto. De hecho, en la actualidad, algunos de los mayores consumidores sobre información operativa relativa al clima espacial son las compañías aéreas que operan sobre el Polo Norte (Dirección General de Protección Civil y Emergencias de España, 2010).

De esta manera, el clima espacial específicamente, el viento solar, las tormentas solares y la radiación solar influyen en diferentes aspectos de la salud de las personas, bien sea de quienes exploran el espacio, vuelan a elevadas latitudes o de quienes habitan la Tierra.

11 Corresponden a ventanas temporales del viento solar para un grupo de nubes magnéticas y plasmoides.

Pronósticos y productos del SWPC

Los centros de meteorología espacial designados (Space Weather Centres, SWXC) utilizan información satelital y en tierra, que les permite detectar eventos solares con prontitud y suministrar información para ser analizada por los modelos de predicción del tiempo espacial. Estos modelos están en la capacidad de predecir la trayectoria de las CME y, por lo tanto, también pueden pronosticar tormentas ionosféricas y geomagnéticas con una antelación de hasta 8 horas.

Los pronosticadores suelen fijarse y hacer seguimiento a las regiones activas del Sol, que casi siempre presentan manchas solares, las cuales son numerosas y comunes durante el máximo solar y escasas durante el mínimo solar. Según la Organización de Aviación Civil Internacional (2018), cada región activa es importante porque es justo allí donde se determina su potencial de erupción, determinado por factores como: 1) el tamaño de la región; 2) su naturaleza dinámica o estática reciente; 3) la fuerza y orientación de sus campos magnéticos y 4) su historia de actividad eruptiva reciente.

La divulgación de información meteorológica espacial para la navegación aérea internacional fue reglamentada mediante la Enmienda 78 del Anexo 3: Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional. Allí quedó estipulado que los SWXC brindaran información sobre los fenómenos meteorológicos espaciales las 24 horas del día, prestando especial atención a los fenómenos que involucren un riesgo de radiación para la tripulación, afectar las comunicaciones satelitales, aeronáuticas y los sistemas de navegación aérea basados en el GNSS. También se estipuló que los SWXC deben suministrar información de la meteorología espacial a los centros de control de área, los centros de información de vuelo, oficinas NOTAM internacionales y las oficinas meteorológicas de aeródromo que puedan verse afectadas.

Según la OACI (2018), dentro de la información meteorológica espacial reportada por los SWXC se encuentra: 1) amplitud y fase de los centelleos ionosféricos y contenido total de electrones para garantizar el correcto funcionamiento del sistema mundial de navegación por satélite; 2) cantidad de radiación y 3) índice Kp, absorción en capa polar, flujo solar de rayos X y frecuencia máxima utilizable, con el fin de garantizar comunicación vía HF. La Tabla 2 presenta la lista de umbrales utilizada por los SWXC para describir los eventos meteorológicos espaciales que afectan las operaciones aéreas.

Tabla 2. Reporte meteorológico de los SWXC por eventos meteorológicos espaciales

Eventos meteorológicos espaciales		Unidad	Moderado	Severo
GNSS	Centelleo de amplitud	Adimensional	0,5	0,8
	Centelleo de fase	Radián	0,4	0,7
	TEC* vertical	Unidades TEC	125	175
Radiación	Dosis efectiva***	micro-Sieverts/hora	30	80
HF	Absorción auroral	Kp	8	9
	Absorción en capa polar	dB a 30	2	5
	Rayos X solares entre 0,1 y 0,8 nm	MUF**	30%	50%
	Depresión posterior a la tormenta			

*TEC: Contenido total de electrones

**MUF: Frecuencia máxima utilizable

***Los avisos MOD solo se emitirán cuando el umbral MOD se encuentre por debajo o igual a FL460.
Los avisos SEV se emitirán cuando el umbral SEV alcance cualquier nivel de vuelo

Fuente: Modificado a partir de OACI (2018)

Los reportes meteorológicos espaciales también deben relacionar toda la información respecto a: 1) tipo de impacto esperado por el fenómeno reportado; 2) tiempo específico en el que se producirá el evento o si ya está ocurriendo; 3) tiempo estimado de duración; 4) estimación del lugar principal de la afectación y aumento de la extensión espacial prevista para las siguientes 24 horas y 5) estimación de la severidad del impacto en las categorías de moderado (MOD) o severo (SEV).

Los productos distribuidos por el Centro de Predicción del Clima Espacial abarcan una amplia gama de escalas temporales. Los pronósticos se realizan con 27 días (la duración de una rotación solar), 7 días y 3 días antes del evento. Los pronósticos a plazos cortos brindan información más detallada y se pueden obtener en las páginas del *Space Weather Now* y *Today's Space Weather* del sitio web del SWPC.

Conclusiones

El gobierno colombiano demuestra compromiso en el diseño de una política de Estado tendente a utilizar y potenciar el desarrollo espacial. Sin embargo, estas condiciones aún son incipientes frente a los avances y capacidades que poseen otros países a nivel regional y mundial.

La intención de la política espacial colombiana tiende a ampliar el concepto de soberanía nacional; toda vez que acceder al espacio exterior representa para la nación un valor geoespacial, que permite disponer de las ventajas y los recursos a los que el país tiene derecho, siempre y cuando logre consolidar una verdadera capacidad para alcanzar y proteger estos activos espaciales.

El propósito espacial colombiano facilita la participación de diferentes actores de los sectores público-privado, a través de proyectos e iniciativas estratégicas en diversos campos de estudio como la meteorología espacial, que analiza y predice las variaciones en el plasma solar, el campo magnético terrestre, la radiación y otras variables del espacio exterior.

Abordar el campo de la meteorología espacial conduce al estudio de temas relacionados con los fenómenos solares que afectan el tiempo y el clima espacial. De igual manera, implica estudiar la forma como el clima espacial afecta a los satélites, a las aeronaves y a las personas. Así mismo, exige explorar sobre los instrumentos utilizados para medir parámetros solares y su interpretación.

Los fenómenos solares que afectan el clima espacial están relacionados con la energía liberada por la actividad solar y la influencia sobre el campo magnético y la atmósfera terrestre, específicamente, sobre la magnetósfera. En la capa visible del Sol, la fotosfera, ocurren tres eventos solares que modifican la meteorología espacial: El viento solar, de naturaleza continua y proveniente de los agujeros coronales; las erupciones solares y las eyecciones de masa coronal, estas dos últimas de naturaleza eruptiva.

La actividad solar afecta el clima espacial al aumentar el flujo de partículas y la radiación. Por lo anterior, los sistemas naturales de protección de la Tierra se ven afectados y superados. En este sentido, es pertinente referir cómo el clima espacial afecta el funcionamiento de las comunicaciones y los sistemas de navegación, entre otros sistemas vitales en las operaciones aéreas.

Los apagones de radio (R), las tormentas de radiación solar (S) y las tormentas geomagnéticas (G) alcanzan su más alta frecuencia e intensidad durante el máximo solar de un periodo de 11 años, motivo por el cual es el periodo en el que se genera más afectación para el desarrollo seguro de las operaciones aéreas.

El clima espacial incide en componentes que orbitan en el espacio como los satélites geoestacionarios y los satélites polares. Los principales problemas que la meteorología espacial provoca en los satélites están relacionados con la degradación de sus paneles solares; efectos en la reentrada prematura de satélites en baja órbita; interferencia en las cámaras y detectores de abordaje; envejecimiento de los materiales y equipos electrónicos; carga y descargas electrostáticas; destrucción de equipos con pérdida de la función e indisponibilidad temporal.

Los fenómenos solares inciden en el comportamiento del clima espacial, de modo que causan efectos negativos en la salud de las personas, como a los astronautas quienes incursionan en el espacio, a las tripulaciones que desarrollan operaciones aéreas y a todos los seres humanos que habitan la Tierra.

Las radiaciones de onda corta del Sol y las partículas energéticas ocasionan daños en los astronautas en los momentos de mayor exposición, cuando las radiaciones aumentan su flujo, lo que ocurre en épocas de alta actividad solar. Durante las tormentas de radiación solar, cuando los niveles de exposición pueden ser significativos para los pasajeros y los tripulantes de aviones que se encuentran en vuelo a elevadas latitudes, especialmente sobre el Polo Norte; si la componente Bz del campo magnético interplanetario está apuntando hacia el Sur, hecho que favorece la entrada en la atmósfera de las partículas de alto nivel energético procedentes del Sol.

Los rayos UV también causan efectos en la salud de las personas por la intensidad de la energía radiada por el Sol.

El margen de tiempo entre los eventos solares y su afectación en la Tierra permite a los centros de meteorología espacial (SWXC) hacer un pronóstico de afectación, lo cual permite anticiparse y planificar el deterioro de los sistemas de comunicación y navegación aérea, de tal manera que sea posible aumentar los márgenes de seguridad operacional.

Las tormentas de radiación solar constituyen el evento meteorológico espacial que requerir una respuesta más rápida debido a que su impacto sobre la Tierra puede ser de apenas unos pocos minutos. Es necesario tomar medidas decisivas para mitigar la amenaza ocasionada por el exceso de radiación emitida por el Sol.

Referencias

- Álvarez, C. & Corredor, G. (2019). *El espacio exterior: una oportunidad infinita para Colombia. Mirando hacia las estrellas: una constante necesidad humana* (Vol. 1). Escuela Superior de Guerra y Fuerza Aérea Colombiana.
- American Meteorological Society. (2012, enero 26). *Space weather*. http://glossary.amet-soc.org/wiki/Space_weather
- Bjerknes, V. (1904). *Das problem der wettervorhersage, betrachtet vom standpunkte der mechanik und der physik*. [The problem of weather forecasting from the standpoint of mechanics and physics]. *Meteorologische Zeitschrift*, 21, 1-7.
- British Antarctic survey. (2019, July 1). *Space weather causes radiation damage to satellites*. Natural Environment Research Council. <https://shortly.cc/F0dfx>
- Cáceres, L. R. (2017). *Meteorología aplicada a la seguridad de las operaciones aéreas*. Colección Ciencia y Poder Aéreo No. 12. Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana.
- Cranmer, S. R. (2005). Why is the fast solar wind fast and the slow solar wind slow? A survey of geometrical models. En *Solar wind 11 / SOHO 16: Connecting Sun and Heliosphere*, ESA, SP-592, 159. <https://inspirehep.net/literature/685549>
- Dirección General de Protección Civil y Emergencias. (2010). *Riesgos derivados del clima espacial*. Ministerio del Interior de España. <https://shortly.cc/n6pEZ>
- Drake, N. (2018, 27 de diciembre). ¿Dónde empieza exactamente el Espacio Exterior? *National Geographic*. <https://shortly.cc/QUuPL>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2020). *Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial Fuerza Aérea Colombiana 2042*. Fuerza Aérea Colombiana. <https://www.fac.mil.co/edaesfac2042>
- Lal, B. & Nightingale, E. (2014). Where is space? And why does that matter? En *Space Traffic Management Conference*, 14. <https://commons.erau.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1052&context=stm>
- Mendoza, B., Ramírez, J., y Díaz, S. R. (2006, enero-marzo). Efectos de la actividad solar en el clima y en los seres vivos. *Ciencia. Revista de la Academia Mexicana de Ciencias*, 57(1), 32-38. <https://shortly.cc/b5S71>
- MetEd. (s.f.). University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) - National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). http://meted.ucar.edu/index_es.php
- MinTIC. (2019, 19 de julio). *Gobierno impulsa componente tecnológico para potenciar el desarrollo espacial*. Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. <https://shortly.cc/4jgVa>
- Moreno, J. (2011). *Efectos del clima espacial en los sistemas electrónicos: Problemas y medidas de prevención*. *Astrium*. <https://shortly.cc/AMOF1>
- NOAA. (2017, enero 12). *What Is Space Weather?* National Centers for Environmental Information. <https://www.ncei.noaa.gov/news/what-is-space-weather>
- NOAA. (2020a). *Solar cycle progression*. *Space Weather Prediction Center*. <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>

- NOAA. (2020b). NOAA space weather scales. *Space Weather Prediction Center*. <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>
- National Research Council. (1997). *Space weather: A research perspective*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/12272>
- Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). (2018). Manual on space weather information in support of international air navigation. <https://shortly.cc/sxwK5>
- Ruiz, J. A., Ambrocio, P., y Díaz, O. (2017, octubre-diciembre). ¿Cómo nos afecta el clima solar? *Ciencia. Revista de la Academia Mexicana de Ciencias*, 68(4), 62-67 <https://shortly.cc/cBln6>
- Scherer, K., Fichtner, H., Heber, B., & Mall, U. (Eds.). (2005). *Space Weather. The physics behind a slogan*. Springer.
- Selding, P. B. (2013, 23 de septiembre). Solar storms are bad for satellites, right? MIT researchers not so sure. *Space News*. <https://shortly.cc/kwmLv>
- Servicio Nacional de Meteorología Espacial de España. (s.f.). ¿Qué es la Meteorología espacial? *SenMEs*. <http://www.senmes.es/learn.html>
- Vásquez, A. M., van Ballegooijen, A. A., & Raymond, J. C. (2003, 1 de diciembre). The effect of proton temperature anisotropy on the solar minimum corona and wind. *The Astrophysical Journal*, 598(2), 1361-1374. <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/379008>

Anexos

Anexo A. Escala de severidad según los apagones de radio causados por las erupciones solares

Escala	Efectos ¹	Parámetro físico ²	Frecuencia promedio ³
R 5 Extremo	Radio HF: bloqueo completo por varias horas de HF (altas frecuencias) en todo el lado diurno terrestre. Esto resulta en que no hay comunicación HF con marineros o aviadores en este sector. Navegación: se interrumpen por varias horas las señales de baja frecuencia utilizadas por los sistemas de navegación en el lado diurno del planeta, lo cual provoca pérdidas en los sistemas de posicionamiento. Durante un periodo similar, se incrementan los errores de los sistemas de navegación por satélites en el lado diurno, lo que puede extenderse al lado nocturno de la Tierra.	X20 (2×10^{-3})	Menos de 1 por ciclo
R 4 Severo	Radio HF: bloqueo de HF por una a dos horas en la mayor parte del lado diurno terrestre; durante este tiempo se pierde el contacto por radio HF. Navegación: las interrupciones por una a dos horas de las señales de navegación de baja frecuencia incrementan el error en los posicionamientos. Posibilidad de interrupciones menores en los sistemas de navegación por satélites en el lado diurno.	X10 (10^{-3})	8 por ciclo (8 días por ciclo)
R 3 Fuerte	Radio HF: bloqueo de las señales HF en amplias áreas, pérdida durante cerca de una hora del contacto por radio en el lado diurno de la Tierra. Navegación: disminución de la calidad de las señales de baja frecuencia durante aproximadamente una hora.	X1 (10^{-4})	175 por ciclo (140 días por ciclo)
R 2 Moderado	Radio HF: bloqueo limitado de las señales HF en el lado diurno, pérdida de radiocombato por decenas de minutos. Navegación: alteración de las señales de navegación de baja frecuencia por decenas de minutos.	M5 (5×10^{-5})	350 por ciclo (300 días por ciclo)
R 1 Menor	Radio HF: afectaciones débiles o menores de las señales de HF en el lado diurno, pérdida ocasional de radiocomunicación. Navegación: alteraciones de corta duración de las señales de navegación de baja frecuencia.	M1 (10^{-5})	2000 por ciclo (950 días por ciclo)
¹ La duración del evento influye en la gravedad de los efectos. ² Brillo máximo de rayos X del GOES por clase y por flujo. ³ Número de eventos o días de tormenta (1 ciclo = 11 años)			

Fuente: Modificado a partir de NOAA (2020b)

Anexo B. Escalas de severidad según los efectos biológicos y la operación de satélites para eventos causados por erupciones solares

Escala	Efectos ¹	Parámetro físico ²	Frecuencia promedio ³
S 5 Extremo	Biológicos: peligro inevitable de alta radiación para astronautas en actividades extravehiculares (AEV); son posibles altos niveles de radiación para pasajeros y tripulación de naves aéreas comerciales a altas latitudes (equivalente a unas 100 radiografías del torso). Operaciones de satélites: pérdida de algunos satélites, daños en memoria provocan pérdida de control, intenso ruido en datos de imágenes, los seguidores de estrellas no pueden localizar las fuentes, daño permanente a paneles solares. Otros sistemas: no se pueden establecer comunicaciones HF en las regiones polares, los errores en los sistemas de posicionamiento hacen la navegación extremadamente difícil.	10 ⁵	Menor que 1 por ciclo
S 4 Severo	Biológicos: peligro inevitable de alta radiación para astronautas en AEV; son posibles altos niveles de radiación para pasajeros y tripulación de naves aéreas comerciales en altas latitudes (equivalente a unas 10 radiografías del torso). Operaciones de satélites. Dificultades con los dispositivos de memoria, ruidos en sistemas de imágenes, malfuncionamiento en los localizadores de estrellas causan problemas de orientación, los paneles solares son afectados. Otros sistemas: bloqueo de las comunicaciones HF a través de las regiones polares, incremento en los errores de navegación durante varios días.	10 ⁴	3 por ciclo
S 3 Fuerte	Biológicos: se recomienda que los astronautas en AEV eviten los peligros de radiación; son posibles bajos niveles de radiación para pasajeros y tripulación de naves aéreas comerciales a altas latitudes (equivalente a 1 radiografía del torso) Operaciones de satélites. Ocurrencia de eventos simples, ruido en las señales de imágenes, es posible ligera disminución de la eficiencia de los paneles solares. Otros sistemas: se deteriora la radio comunicación HF a través de las regiones polares, posibilidad de algunos errores en los sistemas de navegación.	10 ³	10 por ciclo
S 2 Moderado	Biológicos: los pasajeros y la tripulación de las aeronaves que vuelan a gran altitud sobre latitudes altas pueden sufrir un riesgo elevado de radiación. Operaciones de satélites. Baja probabilidad de ocurrencia de eventos simples. Otros sistemas: Efectos no importantes en la propagación HF y en los sistemas de navegación a través de las regiones polares.	10 ²	25 por ciclo
S 1 Menor	Biológicos: ningún efecto. Operaciones de satélites. Ningún efecto. Otros sistemas: afectaciones menores a las señales HF en las regiones polares.	10	50 por ciclo
¹ La duración del evento influye en la gravedad de los efectos. ² Nivel de flujo ≥ 10 MeV partículas (iones) ³ Número de eventos o días de tormenta (1 ciclo = 11 años)			

Fuente: Modificado a partir de NOAA (2020b)

Anexo C. Escala de severidad de las tormentas geomagnéticas

Escala	Efectos ¹	Parámetro físico ²	Frecuencia promedio ³
G 5 Extremo	Sistemas eléctricos de transmisión: extensos problemas de control del voltaje y de los sistemas de protección. Algunas redes de transmisión pueden colapsar y los transformadores pueden llegar a sufrir daños. Operaciones de sistemas espaciales: inducción de carga eléctrica superficial extensiva, dificultades con la orientación, problemas con los enlaces y el seguimiento de satélites. Otros sistemas: la corriente inducida en las redes de combustibles es de cientos de amperes, en extensas áreas se bloquean las ondas de radio de alta frecuencia (HF) por varios días, se afecta la navegación por satélites durante un intervalo similar, se bloquea por horas la navegación por señales de baja frecuencia, y pueden verse auroras en zonas como Florida y el sur de Texas (típicamente 40° de latitud geomagnética).	Kp = 9	4 por ciclo (4 días por ciclo)
G 4 Severo	Sistemas eléctricos de transmisión: posibilidad de extensos problemas de control del voltaje y de los sistemas de protección, irregular funcionamiento de la red de transmisión. Operaciones de sistemas espaciales: posibilidad de inducción de carga eléctrica superficial y de dificultades con el seguimiento, se podrían requerir correcciones a los problemas de orientación. Otros sistemas: la inducción eléctrica en las redes de distribución de combustibles afecta las medidas preventivas, hay bloqueos esporádicos de señales de radio de HF, se afecta durante varias horas la navegación por satélites, se afecta la navegación por baja frecuencia, la aurora ha sido observada hasta en Alabama y el norte de California (típicamente 45° de latitud geomagnética).	Kp = 8	100 por ciclo (60 días por ciclo)
G 3 Fuerte	Sistemas eléctricos de transmisión: se podrían requerir acciones de control del voltaje, se disparan en falso las alarmas de protección. Operaciones de sistemas espaciales: posibilidad de inducción de carga eléctrica en los componentes, puede ocurrir un incremento de la razón de decaimiento de satélites de órbitas bajas, podrían requerirse correcciones de la orientación. Otros sistemas: intermitencia en la navegación por satélites y por señales de baja frecuencia, señales de radio de HF intermitentes, la aurora ha sido observada hasta en Illinois y Oregon (típicamente 50° de latitud geomagnética).	Kp = 7	200 por ciclo (130 días por ciclo)
G 2 Modera- do	Sistemas eléctricos de transmisión: pueden producirse alarmas de voltaje en los sistemas de distribución de altas latitudes. Tormentas de larga duración pueden producir daño en transformadores. Operaciones de sistemas espaciales: se requieren acciones correctivas por el centro de control, los cambios en el decaimiento de los satélites afectan los cálculos de órbitas. Otros sistemas: la propagación de señales de HF se desvanece a altas latitudes, la aurora se ha visto hasta en Nueva York e Idaho (típicamente 55° de latitud geomagnética).	Kp = 6	600 por ciclo (360 días por ciclo)
G 1 Menor	Sistemas eléctricos de transmisión: débiles fluctuaciones de potencia. Operaciones de sistemas espaciales: afectaciones menores a la operación de satélites. Otros sistemas: los animales migratorios se ven afectados a este y a niveles superiores. La aurora se ve comúnmente a altas latitudes (norte de Michigan y Maine).	Kp = 5	1700 por ciclo (900 días por ciclo)
1La duración del evento influye en la gravedad de los efectos. 2Valores de Kp 3Número de eventos o días de tormenta (1 ciclo = 11 años)			

Fuente: Modificado a partir de NOAA (2020b)