

El futuro de la fiabilidad de la navegación aérea dependiente del clima espacial

The future of air navigation reliability dependent on space weather

O futuro da confiabilidade da navegação aérea dependente do clima espacial

João Pedro Souza Aguiar^I

Dario Eberhardt^{II}

RESUMEN

La actividad aérea mundial está creciendo de manera constante, aumentando la densidad de aeronaves en todo el territorio geográfico. Por ello, existe una tendencia hacia las nuevas tecnologías de navegación que, cumpliendo con los requisitos de integridad, precisión, disponibilidad y continuidad, permitirán el mantenimiento de la seguridad aérea incluso con el aumento del número de vuelos. Los medios más utilizados para determinar el posicionamiento en las aeronaves en la actualidad dependen de los satélites. Navegación global - en ruso), y los sistemas de aumentación WASS (Sistema de aumento de área amplia) y EGNOS (Servicio de Superposición de Ngeoestacionaria Europea), por ejemplo, son los medios que componen el Sistema de Navegación por Satélite global (GNSS). Todo lo anterior depende del equilibrio geomagnético de la Tierra y del medio electrónico de la ionosfera. Ambos son objetivos de bombardeos de radiación solar y cósmica, es decir, el clima espacial. Dependiendo de la intensidad de estos fenómenos, pueden ocurrir daños graves a los sistemas de posicionamiento, así como a varias otras áreas, como las comunicaciones y las redes eléctricas. En retrospectiva, el clima espacial ya ha causado un gran daño, como en los eventos de 1989 en América del Norte y en octubre de 2003 en la región americana de CONUS. La calidad de la previsión de estos sucesos sigue siendo baja y la complacencia de la sociedad con respecto al problema es alta, incluso en la aviación, teniendo en cuenta los posibles daños.

Palabras clave: Clima espacial; ionosfera; GNSS; aviación.

ABSTRACT

The world's aviation activity rises constantly, increasing aircraft density in all geographic territories. For this reason, there is a tendency of new navigation technologies to arise that, attending requirements of integrity, accuracy, availability, and continuity, will promote maintenance of air safety, even with increasing flight numbers. The means of positioning determination most used today at aircraft are dependent on satellites. The constellations GPS (Global Positioning System) and GLONASS (Global Navigation Satellite System – in Russian), and the augmentation systems WAAS (Wide Area Augmentation System) and European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), for example, are compounds of the Global Navigation Satellite System (GNSS). All the mentioned, are dependent of Earth geomagnetic and ionosphere equilibrium. Both are targets of solar and cosmic radiation bombardments, i.e. space weather. Depending on that phenomenon intensity, serious damages could occur on positioning systems, as in several others, such communications and power grids. In retrospect, space weather already led to losses such as in the events of 1989 and October 2003

I. Pontificia Universidad Católica de Rio Grande do Sul (PUC-RS). Porto Alegre/RS – Brasil. Graduado en Ciencias Aeronáuticas en la Pontificia Universidad Católica de Rio Grande do Sul. *Email:* j.aguiar@edu.pucrs.br

II. Pontificia Universidad Católica de Rio Grande do Sul (PUC-RS). Porto Alegre/RS – Brasil. Doctorado en Microelectrónica por la Federal Universidad Federal de Rio Grande do Sul. *Email:* dario.eberhardt@pucrs.br

Recibido: 06/10/21

Aceptado: 15/09/21

Las siglas y abreviaturas contenidas en el artículo corresponden a las del texto original en lengua portuguesa.

on CONUS American region. The forecast quality for such occurrences is still poor, while society complacency associated to this subject is high, which further extends to the aviation, considering the potential damages.

Keywords: *Space weather; ionosphere; GNSS; aviation.*

RESUMO

A atividade aérea mundial cresce de forma constante, o que aumenta a densidade de aeronaves em todo o território geográfico. Por esse motivo, existe uma tendência para novas tecnologias de navegação que, atendendo requisitos de integridade, precisão, disponibilidade e continuidade, vão permitir a manutenção da segurança aérea mesmo com o aumento do número de voos. Os meios de posicionamento mais utilizados hoje são dependentes de satélites, que abrangem o Sistema de Satélites de Navegação Global (GNSS). O sistema é dependente do equilíbrio geomagnético da Terra e do meio eletrônico da ionosfera. Ambos são alvo de bombardeamentos de radiação solar e cósmica, i.e. clima espacial. O presente trabalho tem como objetivo ser uma fonte informativa, ou review, da relação entre clima espacial e aviação, para auxiliar na conscientização dos leitores, principalmente àqueles pilotos, principais responsáveis pela segurança dos voos. Será apresentada uma forma simplificada da teoria dos fenômenos do clima espacial, como estes podem afetar a aviação e as tecnologias, o histórico de eventos que atingiram o planeta e as iniciativas que foram e estão sendo desenvolvidas para sua mitigação e seu monitoramento. Como metodologia, foram consultados artigos científicos, livros teóricos, manuais, reportagens, sites de agências de pesquisa e apresentações de organizações. Essas fontes permitiram concluir que os estudos são recentes, há pouca conscientização para os usuários destas tecnologias e, visto a complexidade da origem dos fenômenos do clima espacial, existe uma falta de qualidade na sua previsão. Essa falta de qualidade, atrelada à necessidade de tecnologias mais confiáveis para o futuro do espaço aéreo, eleva a pertinência do objetivo deste trabalho.

Palavras-chave: *Clima espacial; ionosfera; GNSS; aviação.*

1 INTRODUÇÃO

La principal interferencia en los sistemas de posicionamiento y comunicaciones de las aeronaves proviene del equilibrio electrónico de la ionosfera

(OACI, 2019a). Esta capa de la atmósfera es un intermediario esencial de la vida social moderna, ya que influye en todas las tecnologías dependientes de los satélites, así como en las redes eléctricas y las comunicaciones. Las *Solar flares*, las eyecciones de masa coronal (CME) y la radiación cósmica - componentes de la meteorología espacial, siempre han estado presentes como fuente de este desequilibrio. Si los eventos golpean el planeta, dependiendo de su intensidad, es probable que influyan, en efecto cascada, en el equilibrio geomagnético de la Tierra, causando perturbaciones en la atmósfera, dañando la integridad de todas las señales de radio y pudiendo causar daños materiales y grandes pérdidas financieras. En la aviación, pueden afectar a los sistemas de comunicación de alta frecuencia (HF) y por satélite (SATCOM), a la navegación y a la vigilancia GNSS, y puede producirse un aumento de la radiación en las altitudes de vuelo (HAPGOOD, 2017; OACI, 2019a).

En una reunión del subcomité técnico científico de las Naciones Unidas (ONU) celebrada en 2013, se determinó que el clima espacial es una causa potencial de desastres naturales (UNITED NATIONS, 2013). Se están vigilando los fenómenos espaciales, analizando sus intensidades, así como las zonas de ocurrencia y los posibles daños. Existen varias iniciativas y estudios en curso para buscar una mayor precisión en la previsión de sucesos relacionados con la meteorología espacial, que se detallarán en este artículo. La conciencia de estos hechos es pequeña en la sociedad, especialmente en la aviación, porque las consecuencias de los eventos severos son raras, ocurriendo una o dos veces en 100 años (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008).

Este trabajo pretende informar y sensibilizar a los usuarios que pueden verse afectados, como los pilotos, los despachadores de vuelo y los controladores. Se alerta de la falta de calidad en las previsiones, dada la complejidad del origen de los fenómenos meteorológicos espaciales. Es pertinente ya que el espacio aéreo, en condiciones de no contingencia, es cada vez más denso y requiere una mayor fiabilidad.

1.1 Histórico

El evento meteorológico espacial más grave del que se tiene registro, ocurrido el 1 de septiembre de 1859, tiene 160 años, según el Consejo Nacional de Investigación (2008). El evento se conoce como “Evento Carrington” porque fue observado por el astrónomo inglés Richard Carrington en Redhill, Reino Unido (SHEEHAN, 2014). Si la misma magnitud del fenómeno se produjera hoy en día, con las modernas y complejas infraestructuras

presentes en nuestra sociedad, las consecuencias serían “profundas”¹ (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008, p. 20). El evento, es decir, las explosiones solares, también fueron observadas por el astrónomo aficionado Richard Hodgson en Londres, Inglaterra, quien confirmó el descubrimiento de Carrington (HOCKEY, 2014). Las influencias de las explosiones solares se observaron ampliamente en el periodo de medianoche, la madrugada del día 2. El cielo adquirió colores distintos a los que se suelen ver en las auroras. Los tonos eran rojizos y verdes. La luminosidad también era mucho más intensa, con informaciones de personas que incluso pensaban que ya era de día. Este efecto se observó en varios lugares, como se muestra en la Figura 1, en latitudes en las que no se producen efectos ionosféricos visibles, como Cuba, Bahamas, Jamaica, El Salvador, Hawai y la Guayana Francesa, muy cerca del círculo máximo. También se observó en otras regiones de Sudamérica (hasta el norte de Chile), Europa, Asia y Australia (BARBOSA, 2015).

Los daños causados fueron de menor alcance, ya que los inventos eléctricos estaban en su etapa inicial. Sin embargo, los telégrafos de la época sufrieron grandes influencias, desde chispas espontáneas hasta mensajes con código Morse ilegibles. Si desconectaban el instrumento de la batería, los “códigos” persistían debido a la corriente inducida en los cables del sistema. Esta corriente también se conoce como corrientes de Foucault.

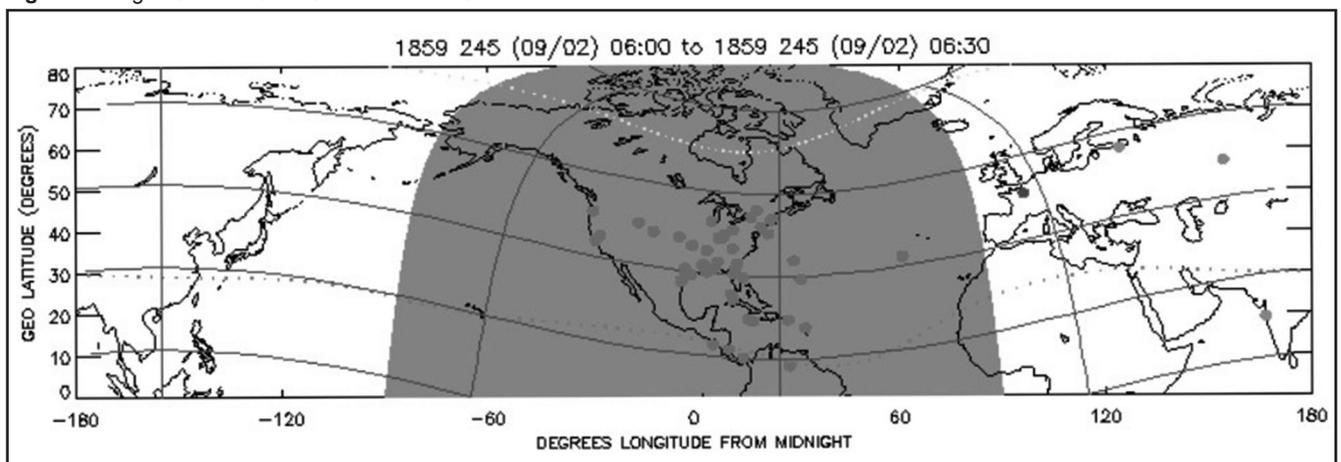
A partir de este considerable acontecimiento, los investigadores comenzaron, en la década de 1860, a relacionar el fenómeno de las auroras, las manchas solares y el magnetismo de la Tierra, considerándolos dependientes. Sin embargo, la comprensión de la naturaleza implicada no estaba clara. El mayor avance

científico en este sentido sólo se produjo durante la guerra fría, con la carrera espacial. En 1957, la Unificación de las Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) lanzó el primer satélite artificial llamado *Sputnik-1*, centrado en el estudio de la alta atmósfera. Luego, Estados Unidos lanzó el Explorer 1 en 1959 con los mismos objetivos que el *Sputnik-1*. Estos primeros satélites lanzados fueron esenciales para el estudio de los efectos de la radiación solar y cósmica, así como para la ciencia de la composición de la ionosfera. En los años 70 se descubrieron las eyecciones de masa coronal (GOSLING, 1993; HAPGOOD, 2017; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; TOUSEY, 1973).

Las consecuencias graves de la meteorología espacial son poco frecuentes. A modo de ejemplo, hay otros registros de fuertes influencias, como durante la Segunda Guerra Mundial. Las observaciones por radar se interrumpieron durante las emisiones de radiación solar, hecho que no se reconoció como causa solar hasta 1946 (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008). En 1972, el estado de Illinois, en Estados Unidos, sufrió una pérdida de comunicaciones. El 13 de marzo de 1989, otro fuerte bombardeo solar causó varios daños en Norteamérica, principalmente en el ámbito de las redes eléctricas. Esto provocó fallos generales en generadores y transformadores. La provincia de Quebec, en Canadá, se quedó sin electricidad durante este evento.

En 2003, 2005, 2015 y 2017 también se produjeron eventos fuertes, con amplias influencias en las tecnologías, expuestas respectivamente en (DOHERTY; COSTER; MURTAGH, 2004), (BARBOSA, 2015), (BLAŠKOVIĆ, 2015) y (REDMON et al., 2018). Sus efectos en la aviación se detallará en este trabajo.

Figura 1 - Lugares donde se observaron auroras en 1859.



Fuente: (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008, p. 21).

¹ Traducción de “*profound*”.

2 CLIMA ESPACIAL

La OMM (Organización Meteorológica Mundial) define la meteorología espacial como: “El estado físico y fenomenológico del entorno espacial, que incluye el Sol y los entornos interplanetarios y planetarios”² (OACI, 2019a, p. 5 traducción nuestra). Por lo tanto, la meteorología espacial incluye el Sol y otras estrellas, como los eventos de supernova, que emiten radiación intergaláctica que llega al planeta Tierra, radiación conocida como cósmica, o GCR (*Galactic Cosmic Rays*) (OACI, 2019a).

2.1 Clima espacial: el Sol

El origen solar de la meteorología espacial incluye los vientos solares, las CME y *Solar flares*. Se trata de fenómenos originados en su atmósfera, que pueden generar grandes nubes de plasma magnetizado y/o radiación de partículas altamente energizadas, que se propagan por el espacio (HAPGOOD, 2017). Las CME y las *Solar flares* pueden interferir en la seguridad de la aviación.

Las partículas expulsadas de esta estrella se propagan por el espacio a través de líneas de campo magnético (BOWHILL, 1971), producidas a través del proceso de dinamo. La teoría de este proceso está presente para la explicación de la generación del campo magnético de todos los planetas, en el que el núcleo presenta un intenso calor que libera iones. Con esto, hay un fluido cargado eléctricamente que tiene un movimiento constante de rotación y convección, ocurriendo la producción de campo magnético.

Los vientos solares, las CME y las *Solar flares* se producen por un proceso llamado reconexión magnética. Este proceso se produce en la atmósfera solar cuando dos campos magnéticos con direcciones convergentes se cruzan, transformando y liberando repentinamente la energía magnética en energía cinética. Dicho proceso también puede ocurrir fuera de la atmósfera solar, entre los campos magnéticos de la Tierra y el espacio interplanetario opuesto al Sol (*Dungey Cycle*), contribuyendo a las tormentas geomagnéticas al enviar plasma de vuelta al planeta (HAPGOOD, 2017; HESSE; CASSAK, 2020).

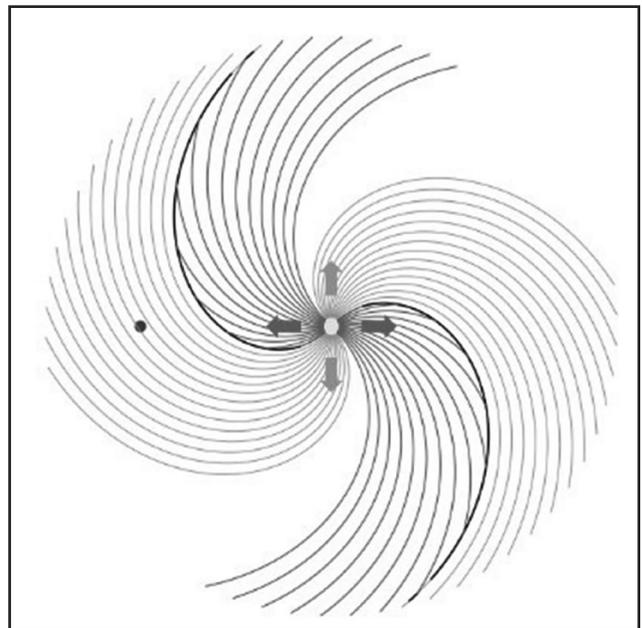
El campo magnético es transportado tanto por la CME como por los vientos solares. Esto ocurre de forma similar al proceso de fundación de la dinamo descrito anteriormente. El plasma tiene una alta conductividad hasta el punto para permitir la conducción del magnetismo a través del espacio.

El término “*frozen in*” se utiliza para el campo magnético cuando se transporta junto con la liberación de plasma (HAPGOOD, 2017, p. 17; MENK; WATERS, 2013, p. 2).

Los vientos solares son el plasma que escapa continuamente de la región coronal del Sol, ya que superan la gravitación debido a las altas temperaturas³, y no representan un riesgo de seguridad para la aviación. Tienen velocidades medias que oscilan entre los 500 y los 800 kilómetros por segundo y, cuando llegan a la Tierra, interactúan con el campo magnético terrestre a través de la fuerza de Lorentz, dándole forma y formando la magnetosfera (HAPGOOD, 2017; MENK; WATERS, 2013). Sin embargo, debido al proceso de reconexión magnética en la superficie solar, puede producirse la liberación de vientos solares de alta velocidad, perturbando el campo geomagnético de la Tierra (OACI, 2019a). En este contexto, son los principales responsables de las auroras, una manifestación de la meteorología espacial visible para el ojo, y que es la absorción y conducción de la energía solar por la ionosfera.

La rotación del Sol interfiere en la liberación de los vientos solares, de modo que, cuando salen de la atmósfera, ejecutan una trayectoria similar a la del agua de un aspersor de jardín, como se esquematiza en la figura 2. La forma de esta trayectoria también se conoce como “*Parker Spiral*” (MENK; WATERS, 2013). Este término apareció en los años 50, creado por Eugene Newman Parker al estudiar estos fenómenos solares.

Figura 2 - Esquema de la trayectoria de los vientos solares.



Fuente: (HAPGOOD, 2017, p. 7).

² Traducción de: “The physical and phenomenological state of the natural space environment, including the Sun and the interplanetary and planetary environments”.

³ Se cree que la liberación de energía cinética, a través de la reconexión magnética, es la causa del aumento de las temperaturas en la corona solar, que alcanzan un millón de Kelvins, frente a los 6000K de la superficie (HAPGOOD, 2017).

Las CME son vientos solares en forma de nubes de plasma que tienen una energía muy elevada, con masas que pueden ser de miles de millones de toneladas y velocidades de hasta 3.000 km/s. Pueden llegar a la Tierra en menos de un día, o incluso en más de 4 días, tras su salida de la corona. Las CME tienen una liberación dirigida y la posibilidad de alcanzar la Tierra es pequeña. Suponen un gran riesgo para la aviación y las tecnologías, ya que pueden desencadenar tormentas geomagnéticas, que son perturbaciones en el campo magnético de la Tierra debidas a la absorción de plasma en la magnetosfera, que generan ciclos de reconexión magnética en el lado del globo opuesto al Sol. Estos ciclos devuelven el plasma al planeta y pueden denominarse *Dungey Cycle* o subtormentas. Debido al proceso, una gran cantidad de energía se disipa en la ionosfera, contribuyendo a la alteración de las características físicas de las señales de los satélites cuando atraviesan dicha capa atmosférica. Esto reduce la precisión del posicionamiento de la aeronave (posiblemente causando la pérdida de posicionamiento) y perjudica los sistemas de comunicación HF y SATCOM (HAPGOOD, 2017; OACI, 2019a; MENK; WATERS, 2013; NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [s.d.]).

Otro proceso desencadenado por las tormentas geomagnéticas es la inducción de corrientes de tierra (GIC⁴), que pueden afectar a infraestructuras eléctricas como las redes eléctricas y los sistemas ferroviarios. Los daños en estos sistemas generarían grandes pérdidas, como se detalla en TAKAHASHI et al., (2015, p. 33).

Las *Solar flares* son liberaciones de energía a menor escala en forma de radiación electromagnética (longitudes de onda EUV y rayos X⁵). Los depósitos de energía son rápidos, llegando a la Tierra en cuestión de minutos. Su aparición está relacionada con las CME, ya que pueden ser un indicio que precede a la liberación de la eyección coronal, pero también pueden ocurrir por separado. Tienen el potencial de influir, sólo en las regiones iluminadas por el sol de la Tierra, en las comunicaciones de alta frecuencia y los sistemas de vigilancia, que utilizan frecuencias entre 1-20 Mhz; en los sistemas eléctricos de a bordo y en la salud de las tripulaciones. En las regiones polares, sus efectos son mayores, debido al comportamiento magnético de la Tierra que permite una mayor deposición de protones en las latitudes más altas. Por esta característica, la radiación alcanza altitudes más bajas e interfiere de forma más significativa en los sistemas de comunicación HF, principalmente en las rutas árticas, utilizadas para los vuelos entre América y Asia. También se puede recibir radiación en latitudes y altitudes

bajas⁶, debido a fenómenos ionosféricos ecuatoriales más complejos (HAPGOOD, 2017; OACI, 2019a).

El número de electrones depositados en la ionosfera, tras la llegada del plasma, tiene una unidad denominada TEC (*Total Electron Content*). Los valores del TEC se determinan por el número de electrones en una columna de 1m² entre la señal de un satélite y su receptor, que atraviesa la ionosfera. La variación del TEC provoca una variación proporcional en el equilibrio electrónico de la ionosfera, causando cambios en la velocidad, polarización, fase y amplitud (centelleo ionosférico) de las ondas de radio propagadas por el GPS. Los cambios pueden indicar una posición errónea del receptor, así como provocar la pérdida de la señal del satélite (AGUIAR, 2010; COSTER; KOMJATHY, 2008). Una unidad de TEC, equivalente a 10¹⁶ electrones/m², corresponde a 0,163 m de retraso en la medición de la posición del receptor, por lo que es un buen indicador de la calidad del posicionamiento. El TEC varía regularmente debido al ciclo de manchas solares, la época del año, la hora del día y la ubicación geográfica (KOMJATHY et al., 2003).

Estas eyecciones de energía solar se producen con mayor frecuencia en un periodo cíclico de la actividad del Sol, cuando hay mayor actividad. Este ciclo de mayor actividad dura aproximadamente 11 años (GOSLING, 1993; WEBB, 1991). La actividad solar es directamente proporcional a los grupos de manchas solares visibles, que son vigilados constantemente por observatorios, como los satélites de la agencia espacial NASA, SOHO y STEREO-A. Durante el periodo de máxima actividad, las solar flares se emiten una media de 25 veces al día y las CME 5 veces al día. La densidad de energía se libera de forma similar entre las solar flares y las CME, sin embargo, la posibilidad de que la Tierra sufra la influencia de una CME es menor, ya que tiene una liberación dirigida. Por el contrario, el daño sería mayor a través de las CME debido al fuerte campo magnético unido al plasma (HAPGOOD, 2017; OACI, 2019a; NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [s.f.]).

2.2 Clima espacial: radiación cósmica

Los rayos cósmicos, que provienen del exterior del sistema solar, golpean la Tierra constantemente, con una intensidad que varía poco con el tiempo. La interferencia de los rayos cósmicos en la Tierra es inversamente proporcional a la actividad solar, ya que las CME y las *Solar flares* interactúan con la radiación cósmica de manera que se reduce su interacción con la atmósfera terrestre.

⁴ Sigla de *Ground-Induced Currents*.

⁵ EUV es la sigla de Ultravioleta Extremo con un rango de longitud de onda de 10nm - 121nm (nanómetros). Los rayos X son de 1nm - 20nm.

⁶ Cerca del nivel de vuelo 300 (10-12km).

Al igual que con la radiación solar, sus efectos serán mayores en latitudes más altas (a partir de 55° de latitud magnética), como en los polos, y aumentan con la altitud, alcanzando un máximo entre los 60-65.000 pies. Dependiendo de la intensidad, pueden ser perjudiciales para los equipos electrónicos de a bordo y, con una exposición prolongada, para la salud de la tripulación (OACI, 2019a; ADMINISTRACIÓN NACIONAL DE OCEANOS Y ATMOSFÉRICOS, [s.f.]).

2.3 Clima espacial: Brasil

Brasil es una de las regiones del globo con mayores influencias ionosféricas, y mayores valores y variaciones de TEC. Se encuentra en una región ecuatorial y tiene parte del territorio cerca de la AMAS (Anomalía Magnética de América del Sur). El ecuador magnético presenta, junto con los polos, mayores irregularidades ionosféricas principalmente en los períodos posteriores a la puesta de sol local, produciéndose con mayor frecuencia centelleos en la frecuencia de las señales de los satélites. Las irregularidades son causadas por el aumento del campo eléctrico ionosférico en el período posterior a la puesta del sol, debido a un mayor movimiento del plasma (*Fountain Effect*), dando lugar también a burbujas de plasma (SPOGLI et al., 2013).

El AMAS es una región donde el campo geomagnético tiene los valores más bajos de intensidad, contribuyendo, al igual que los polos, al mayor depósito de radiación. Esta característica permite una mayor perturbación en la ionosfera, que también contribuye a los centelleos en las señales de los satélites GNSS (SPOGLI et al., 2013). Estos comportamientos de la ionosfera sobre Brasil son muy perjudiciales para la precisión del posicionamiento (KOMJATHY et al., 2003; MATSUOKA; DE OLIVEIRA CAMARGO; BATISTA, 2006).

3 TECNOLOGÍAS DE AVIACIÓN QUE MITIGAN LOS EFECTOS DEL CLIMA ESPACIAL

La OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) exige que los sistemas relacionados con la navegación aérea tengan precisión, integridad, disponibilidad y continuidad en todas las fases del vuelo. Estos requisitos se recogen en el Anexo 10 del Convenio de Aviación Civil Internacional a través de los SARPS (Normas y Prácticas de Seguridad Recomendadas). Para satisfacer estas exigencias de rendimiento de la navegación, se han necesitado nuevas tecnologías gracias a los avances en la investigación relacionada con la meteorología espacial.

En 2003, Estados Unidos certificó su propio SBAS (*Satellite Based Augmentation System*), llamado WAAS (*Wide Area Augmentation System*). Es un sistema de aumento del

posicionamiento, centrado en la corrección de los efectos ionosféricos presentes en el territorio americano, así como de los retrasos del reloj del satélite y de los errores de órbita. Su funcionamiento se compone de estaciones GPS en tierra, con sus posiciones definidas con precisión, y que miden continuamente las diferencias en relación con el aforo de los satélites. Estos datos se envían a una estación central, que genera los mensajes corregidos. Estos mensajes se transmiten a los satélites geoestacionarios que, en secuencia, los retransmiten a los receptores a bordo del avión. Con este sistema, las aeronaves pueden realizar procedimientos de precisión a través de LPV (*Localizer Performance with Vertical Guidance*) en diversos lugares del territorio estadounidense, donde no existen radioayudas para la navegación (COSTER; KOMJATHY, 2008; FAA, 2019).

Al igual que WAAS, hay otros sistemas que componen el SBAS y que funcionan de la misma manera. En Japón, utilizan el sistema MSAS (*Satellite Augmentation System*), operativo desde 2007. En Europa se utiliza el sistema EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), que comenzó en 2011. En India, utilizan GAGAN (*GPS Aided Geo Augmented Navigation*), certificado en 2014. Los 4 mencionados son operativos, mientras que hay otros sistemas que están en desarrollo, como el SDCM (*System for Differential Corrections and Monitoring*) de Rusia y el SNAS (*Satellite Navigation Augmentation System*) de China (DENNIS; HEMSTAD, 2016). Los sistemas operativos forman parte del IWG (*Interoperability Working Group*), cumpliendo los requisitos de la OACI, para ofrecer los servicios de aumento con transición libre entre ellos. De este modo, la tecnología de mejora de la precisión se unifica por el hemisferio (AGENCIA EUROPEA DEL ESPACIO, 2011).

El *ground-based augmentation system* (GBAS) es un segundo sistema de aumento del GNSS, desarrollado para mejorar la precisión del posicionamiento mediante correcciones diferenciales por parte de los equipos terrestres. Gracias a las correcciones de este sistema, los errores ionosféricos comunes se vuelven insignificantes. Cuando el sistema se instala en los aeropuertos, se pueden realizar aproximaciones y aterrizajes de precisión por instrumentos, denominados *GBAS Landing System* (GLS). Dependiendo del tipo de servicio de aproximación GBAS (GAST), las aproximaciones pueden realizarse con una precisión aún mayor (CAT II/III). Por ejemplo, en Estados Unidos los sistemas GBAS presentes son el LAAS (*Local Area Augmentation System*) y el SLS (*Satellite Landing System*) desarrollados por la Administración Federal de Aviación (FAA) y Honeywell, respectivamente. El primer GBAS se aprobó en 2012 en el aeropuerto internacional de Newark, en Estados Unidos (YOON et al., 2019).

Además de estas tecnologías de aumento, la gran mayoría de los aviones comerciales cuentan con un sistema de reversión en caso de que las señales GNSS fallen. La posición de la aeronave se determinará a partir de las señales combinadas del sistema inercial de la aeronave y de las señales de radio (VOR/DME). La tripulación puede hacer uso exclusivo de la navegación convencional o, si las señales de radio no están disponibles en la región, la tripulación puede solicitar la asistencia del ATC. Se trata de estrategias de mitigación, mientras que no existen procedimientos de contingencia adecuados para la ocasión (EUROCONTROL, 2020; OACI, 2018).

4 INTERFERENCIAS DE AVIACIÓN RESTANTES

El 29 de octubre de 2003 comenzó el evento conocido como las tormentas de *Halloween*, que afectó a varias regiones de Estados Unidos. El suceso inutilizó el servicio de aproximación de precisión WAAS, que estuvo inutilizado durante 15 horas el día 29 y 11,3 horas el día 30 (DOHERTY; COSTER; MURTAGH, 2004).

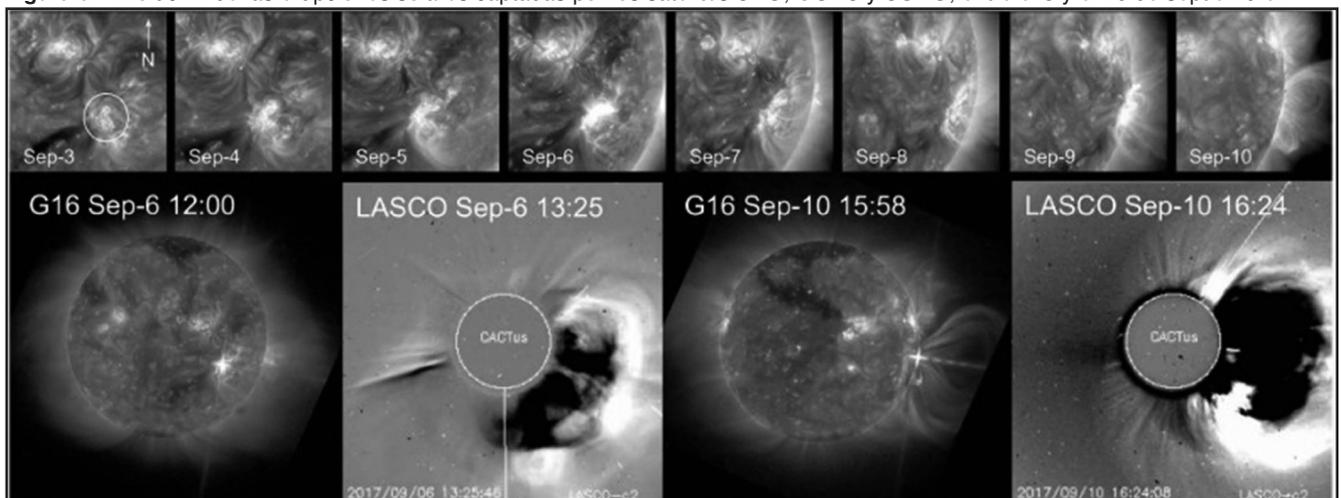
En diciembre de 2005, hubo una interrupción de los sistemas de navegación GPS que duró 10 minutos, desorientando a los aviones, barcos y plataformas petrolíferas (BARBOSA, 2015). El 4 de noviembre de 2015, el servicio de tráfico aéreo de Suecia informó de que los aviones no aparecían en sus radares. El problema duró aproximadamente 1 hora. La causa considerada fue una tormenta solar (BLAŠKOVIĆ, 2015).

El 3 de septiembre de 2017 se produjo un evento que solapó el SBAS estadounidense y el europeo. La región solar categorizada como región 46 del grupo Catania —

de la agencia estadounidense NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), inició una actividad magnética más compleja, generando una serie de *Solar flares* y CMEs, cuyos efectos se hicieron sentir los días 6, 7 y 10 del mes (REDMON et al., 2018). En la figura 3 se muestran imágenes del desarrollo de esta actividad solar. La región emitió un viento solar de magnitud X 9,3⁷. El último más fuerte había ocurrido en septiembre de 2005, con intensidad X17⁷ en el ciclo solar 23 (REDMON et al., 2018). En este evento de 2017, la NOAA emitió alertas con su escala más severa por riesgo de pérdida de comunicaciones, tormentas geomagnéticas y alta radiación de partículas. Se informó de la pérdida de comunicación HF en vuelo el día 6 y de la pérdida de capacidad para los procedimientos WAAS y EGNOS LPV el día 8 (REDMON et al., 2018). Además, durante este periodo, las comunidades del Caribe se enfrentaron al huracán José. Debido al evento meteorológico espacial, experimentaron dificultades en los servicios de comunicaciones para la respuesta de emergencia, reportados por HWN (*Hurricane Weather Net*) y DGAC (*French Civil Aviation Authority*) (REDMON et al., 2018).

El sistema de aumento europeo EGNOS sufrió una reducción considerable de su disponibilidad en 2017, conforme mostrado en la Figura 4. En el día 06 de septiembre, hubo pérdida de aproximadamente 10% de la tasa de disponibilidad, lo que afectó la seguridad de procedimientos LPV (BERDERMANN et al., 2018). Esa disminución ocurrió debido a CME que afectó el planeta, depositando plasma en la región de la ionosfera y aumentando los valores de TEC repentinamente. Esto dificulta los receptores de mantener correcciones de señal y, en la mayoría de los casos, ocurre pérdida de conexión entre el satélite. Esta pérdida se llama “*loss of lock*” (BERDERMANN et al., 2018).

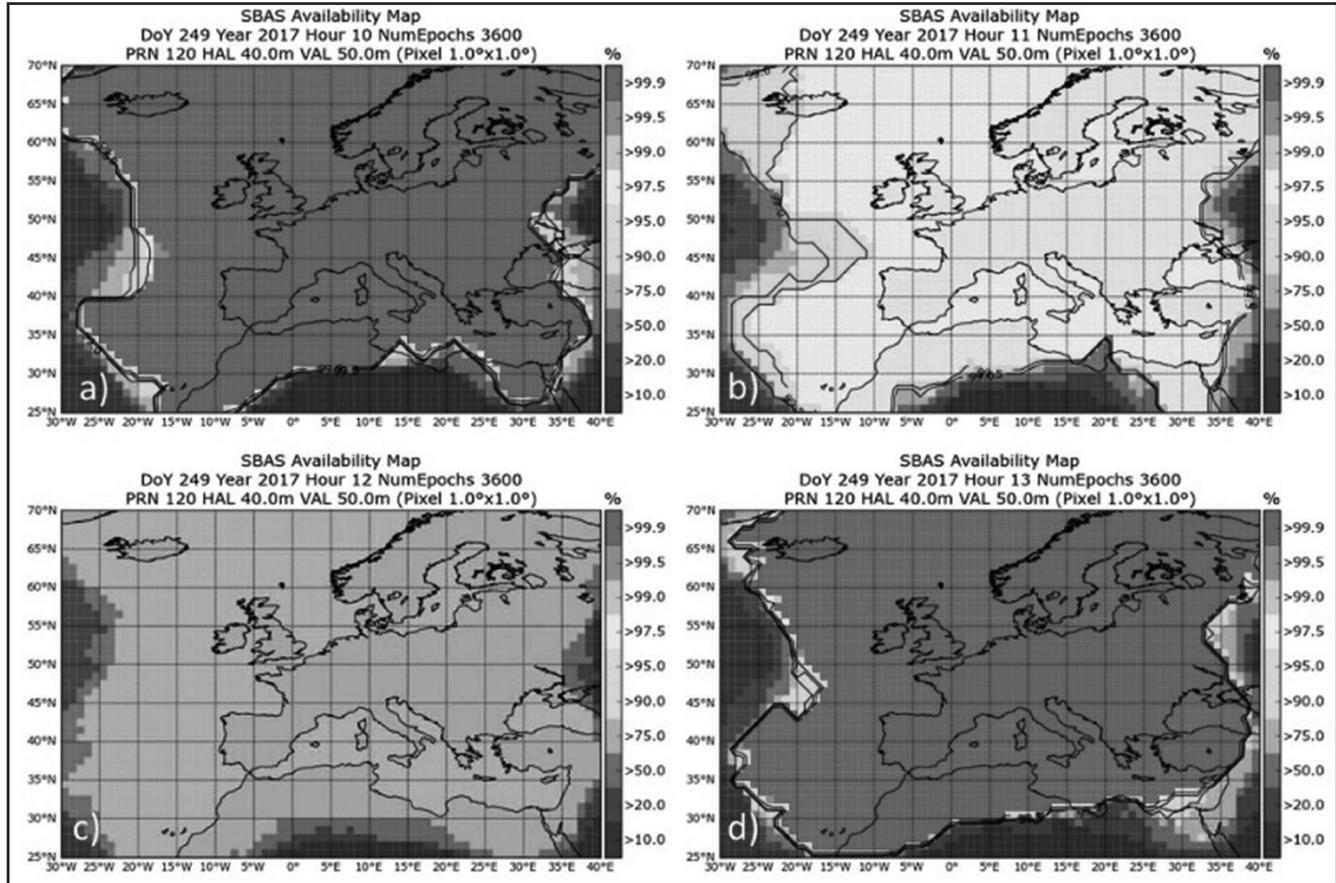
Figura 3 - Evolución de las erupciones solares captadas por los satélites SDO, GOES y SOHO, entre el 3 y el 10 de septiembre.



Fuente: (REDMON et al., 2018, p. 4).

⁷ Escala NOAA, disponible en el portal SWPC (Space Weather Prediction Center).

Figura 4 - Mapa que escala la disponibilidad del SBAS europeo EGNOS en el intervalo de tiempo entre las 10:00 y las 13:00 (UTC) del 6 de septiembre de 2017. El gris más intenso indica alta disponibilidad y el gris claro, baja.



Fuente: (BERDERMANN et al., 2018, p. 9).

Nunca se ha repetido un evento meteorológico espacial similar al de 1859. El daño es desconocido en la práctica, aunque existen algunas predicciones de intensidad, como en (BAKER et al., 2013). Mediante un modelo de predicción, midieron los daños que una CME podría haber causado en el planeta en 2012. Esta CME no golpeó el globo en cuestión de una semana de rotación solar. Utilizando el método, los autores concluyeron que la intensidad de la eyección coronal había sido más intensa que el evento Carrington de 1859, y el daño similar a la analogía de (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008): que la sociedad seguiría “recogiendo los pedazos”⁸ (BAKER et al., 2013, p. 590).

5 EL ALCANCE DEL MONITOREO CLIMÁTICO ESPACIAL ACTUAL

Los daños causados por la meteorología espacial, así como los daños potenciales, han generado iniciativas destinadas a comprender su origen, realizando observaciones, recoger datos y prever fenómenos.

⁸ Traducción de “picking up the pieces”.

Actualmente, la organización mundial central para la aviación que realiza estudios al respecto es la OMM (Organización Meteorológica Mundial). Trabaja conjuntamente con la OACI, mejorando las previsiones mundiales emitidas por el WAFS (*World Area Forecast System*) y, actualmente, el objetivo principal es mitigar los impactos meteorológicos espaciales (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, [s.d.]).

En Estados Unidos hay algunas organizaciones que proporcionan información. Entre ellos se encuentra el SWPC (*Space Weather Prediction Center*) bajo la administración de la NOAA. En este centro están disponibles escalas diarias en su página web, <<https://www.swpc.noaa.gov>>, que muestran las tecnologías y sistemas que pueden verse afectados por los fenómenos meteorológicos espaciales. Hay tres escalas que miden: el impacto en los sistemas de radio (HF y satélites); los niveles de radiación de las tormentas solares y los niveles de las tormentas geomagnéticas (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [n.d.]).

En Europa, la ESA (*European Space Agency*) creó en 2009 un programa para mejorar la concienciación de los usuarios sobre los peligros del espacio. Se llamó SSA (*Space Situational Awareness*). A partir de la iniciativa, se creó un segmento vinculado a la seguridad global, denominado *Space Weather Office* (Oficina de Meteorología Espacial), para estudiar la meteorología espacial, con el objetivo de mitigar sus efectos. Dentro de este segmento, se está desarrollando el *Space Weather Service Network* de la ESA para proporcionar productos y servicios en cinco áreas diferentes para los usuarios. Estas cinco áreas son gestionadas por especialistas y se dividen en: clima solar, clima de la heliosfera, radiación espacial, clima ionosférico y condiciones geomagnéticas. Esta iniciativa tiene como uno de sus principales objetivos proporcionar productos más precisos y fiables (AGENCIA EUROPEA DEL ESPACIO, [s.d.]).

En Brasil, también ha habido algunas iniciativas de estudio y desarrollo de tecnologías para hacer frente a las influencias de la meteorología espacial. El INPE (Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales) creó en 2007 el programa EMBRACE (Estudio y Vigilancia de la Meteorología Espacial Brasileña), con el objetivo de proponer mecanismos de alerta y procedimientos de defensa para los sistemas de comunicación por satélite, GNSS, sistemas de seguridad de vuelo, sistemas de energía a gran escala, protección de satélites y sistemas de control de altitud, entre otros. En el sitio web del programa, <www2.inpe.br/climaespacial/portal/es/>, se ponen a disposición escalas diarias que demuestran el daño potencial a las tecnologías, de forma similar a la NOAA, a través de SWPC. El proyecto forma parte de la DIDAE (División de Aeronomía) del INPE, que también tiene otras iniciativas de investigación, como el proyecto EQUARS (*Equatorial Atmosphere Research Satellite*), centrado en la vigilancia y el estudio de la región ecuatorial (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, [s.d.]).

Brasil también cuenta con una sólida infraestructura de redes de estaciones que monitorean las señales GNSS, principalmente de las constelaciones GPS y GLONASS. Está compuesto por la Red Brasileña de Monitoreo Continuo GNSS (RBMC), la red de proyectos CIGALA y CALIBRA, LISN y GNSS-NavAer. Analizan y estudian los efectos que la ionosfera, cerca del ecuador magnético, impone al posicionamiento, con

el fin de comprender mejor sus características y desarrollar tecnologías más precisas y fiables, así como nuevos métodos de posicionamiento.

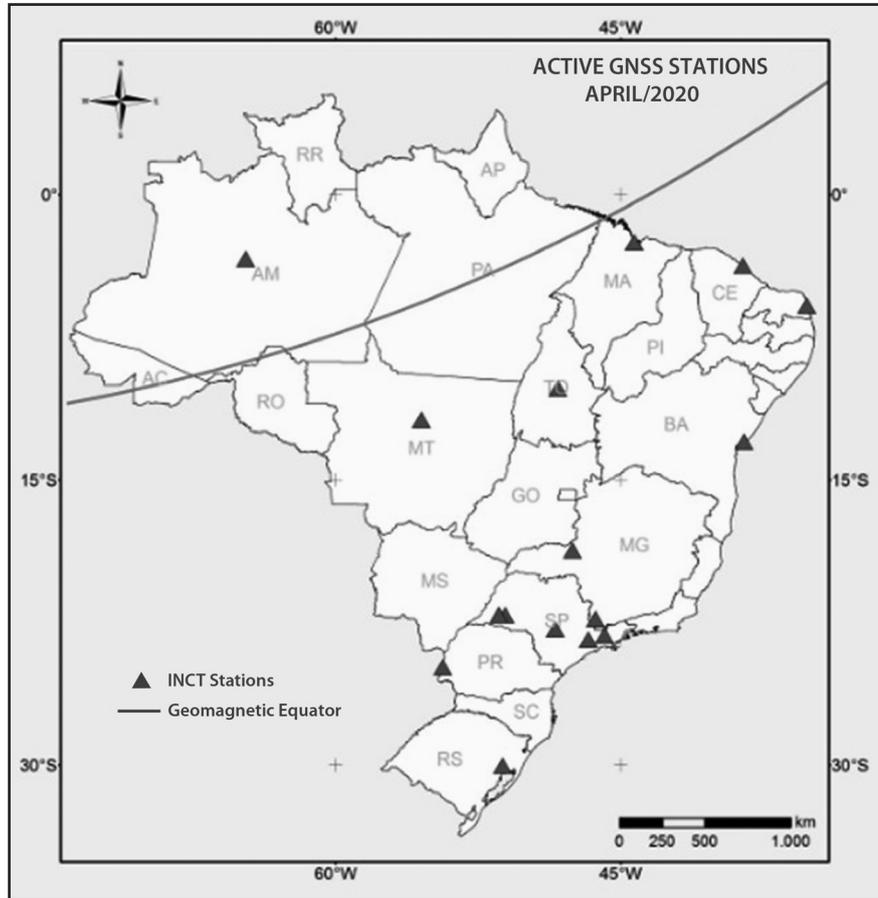
La Red Brasileña de Monitoreo Continuo de GNSS (RBMC), bajo la administración del IBGE, cuenta con estaciones GNSS desde 1996, que almacenan continuamente observaciones del código y la fase de las ondas portadoras transmitidas por los satélites de las constelaciones GPS o GLONASS (IBGE, [s.f.]). Sus datos se utilizan habitualmente en la investigación.

El proyecto CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*), financiado por la Comisión Europea (CE) a través de la Agencia Europea del GNSS (GSA), se creó para desarrollar y probar tecnologías que mitiguen el centelleo ionosférico en Sudamérica a través de las estaciones terrestres del GNSS. Este proyecto se centró en el análisis de los posibles efectos del periodo de máxima actividad solar del año 2013. El proyecto comenzó en marzo de 2010 y concluyó en febrero de 2012, siendo continuado por el proyecto CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAZIL*). Este tuvo como objetivo evolucionar los algoritmos correctores de las técnicas de posicionamiento de alta precisión GNSS, ampliando el número de estaciones GNSS del anterior proyecto CIGALA, concluyéndose en febrero de 2015 (AGUIAR, 2010).

La LISN (*Low-Latitude Ionospheric Sensor Network*) es un proyecto internacional para el estudio de los fenómenos ionosféricos, con instrumentos geofísicos situados en América del Sur, cerca del ecuador magnético y hasta el meridiano 70°W. Cuenta con varias instituciones colaboradoras, con investigadores del INPE como representantes brasileños (INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ, [s.d.]).

GNSS-NavAer fue creado por el INCT (Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología) en 2017. El objetivo principal de la iniciativa es mejorar el conocimiento teórico de las influencias ionosféricas en la señal del GNSS, para su aplicación segura en la navegación aérea. Dispone de una red de estaciones GNSS para la recogida de datos ionosféricos, denominada red GNSS NavAer, repartida por todo el territorio brasileño, como se ilustra en la Figura 5. Cuenta con varias instituciones colaboradoras, entre ellas la UNESP, el INPE, el ITA y la UFRGS (INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, [s.d.]).

Figura 5 - Mapa de las estaciones de la red NavAer GNSS.



Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA, [s.d.].

En junio de 2017, la OACI preguntó a los Estados sobre su interés en colaborar en la información meteorológica espacial. De los interesados, el Consejo de la OACI designó, en noviembre de 2018, tres centros mundiales: PECASUS (Finlandia, con socios de Bélgica, Austria, Italia, Inglaterra, Chipre, Polonia, Países Bajos, Alemania y Sudáfrica), SWPC (NOAA, Estados Unidos) y ACFJ (consorcio entre Australia, Canadá, Francia y Japón) (OACI, 2019b). Denominados SWXC, los centros, sin jerarquía, se dedicarían a vigilar y proporcionar información y recomendaciones, emitiendo avisos de fenómenos meteorológicos espaciales que puedan afectar a las comunicaciones, a la navegación basada en el GNSS y a los sistemas de vigilancia, así como a los casos de riesgo de radiación para la tripulación. Las recomendaciones deben seguir las normas internacionales del Convenio de Aviación Civil Internacional, establecidas en el Anexo 3 - *Meteorological Service for International Air Navigation*. Para los usuarios de la aviación específicamente, un material de orientación para el clima espacial - Documento 10100, *Manual on Space Weather Information in Support of International Air Navigation* (OACI, 2019b) fue publicado en 2019 por la OACI.

Por lo tanto, tras la enmienda 78 del anexo 3 del Convenio, operativa en noviembre de 2018, la documentación requerida

en el prevuelo prevé el incremento de la presentación de eventos relevantes para la ruta, relacionados con la meteorología espacial, emitidos por los SWXC. El lenguaje de la información es abreviado, siendo los efectos sobre las comunicaciones HF, las comunicaciones por satélite (SATCOM), la degradación del GNSS y la exposición a la radiación, clasificados como HF COM, SATCOM, GNSS y RADIACIÓN, respectivamente. En términos de la intensidad de los fenómenos, MOD se utiliza para los moderados y SEV para los graves. En los cuadros I y II figuran ejemplos de los mensajes emitidos.

En consonancia con los cambios del Anexo 3, Brasil, mediante la Ordenanza 335 del 25 de enero de 2021, estableció una cooperación técnico-científica entre el INPE y el DECEA, a través de EMBRACE y CIMAER (Centro Integrado de Meteorología Aeronáutica) respectivamente. La cooperación tiene como objetivo mejorar el Servicio de Meteorología Espacial Aeronáutica, proporcionando información y asesoramiento sobre los fenómenos meteorológicos espaciales, de acuerdo con las recomendaciones del Anexo 3, con la intención de convertirse en un SWXC regional en América del Sur (BRASIL, 2021; INSTITUTO NACIONAL DE BÚSQUEDA ESPACIAL, 2021).

Tablas 1 e 2 - Ejemplos de avisos de eventos que puede emitir un SWXC.

(communication header)	
SWX ADVISORY	
DTG:	20161108/0000Z
SWXC:	(to be determined)
SWX EFFECT:	RADIATION MOD
ADVISORY NR:	2016/2
FCST SWX:	20161108/0100Z HNH HSH E18000 – W18000 ABV FL350
FCST SWX +6 HR:	20121108/0700Z HNH HSH E18000 – W18000 ABV FL350
FCST SWX +12 HR:	20161108/1300Z HNH HSH E18000 – W18000 ABV FL350
FCST SWX +18 HR:	20161108/1900Z HNH HSH E18000 – W18000 ABV FL350
FCST SWX +24 HR:	20161109/0100Z NO SWX EXP
RMK:	RADIATION LEVELS HAVE EXCEEDED 100 PERCENT OF BACKGROUND LEVELS AT FL350 AND ABOVE. THE CURRENT EVENT HAS PEAKED AND LEVELS ARE SLOWLY RETURNING TO BACKGROUND LEVELS. SEE WWW.SPACEWEATHERPROVIDER.WEB
NXT ADVISORY:	NO FURTHER ADVISORIES

(communication header)	
SWX ADVISORY	
DTG:	20161108/0100Z
SWXC:	(to be determined)
SWX EFFECT:	GNSS MOD AND HF COM MOD
ADVISORY NR:	2016/1
OBS SWX:	20161108/0100Z HNH HSH E18000 – W18000
FCST SWX +6 HR:	20121108/0700Z HNH HSH E18000 – W18000
FCST SWX +12 HR:	20161108/1300Z HNH HSH E18000 – W18000
FCST SWX +18 HR:	20161108/1900Z HNH HSH E18000 – W18000
FCST SWX +24 HR:	20161109/0100Z NO SWX EXP
RMK:	LOW-LEVEL GEOMAGNETIC STORMING IS CAUSING INCREASED AURORAL ACTIVITY AND SUBSEQUENT MOD DEGRADATION OF GNSS AND HF COM AVAILABILITY IN THE AURORAL ZONE. THIS STORMING IS EXPECTED TO SUBSIDE

Fuente: (RUTLEDGE, 2020).

A pesar de los avances y los sistemas disponibles, algunos acontecimientos siguen siendo imprevisibles. Las pérdidas de comunicación en HF, que se producen en las regiones diurnas de la Tierra, ocurren sin previo aviso. Las radiaciones más intensas, causadas por las tormentas solares, pueden predecirse, pero a veces son rápidas y golpean a las personas y los sistemas sin preparación previa (OACI, 2019a).

6 NUEVAS INICIATIVAS

Los avances en el estudio de la meteorología espacial y sus efectos en las tecnologías siguen caminos científicos y técnicos. La NASA y la ESA son agencias que profundizan en la línea de estudio científico, aportando conocimientos más teóricos, como a través de las misiones espaciales MMS y LaGrange. En Brasil,

la cooperación del INPE con DECEA constituye la principal fuente de investigación. A partir de estos conocimientos se producen avances en el ámbito técnico, como la creación del sistema SBAS DFMC de GNSS.

En la actualidad, el sistema de posicionamiento utilizado en una aeronave consta de una constelación de satélites y una frecuencia de señal. Para la constelación GPS se utiliza la frecuencia denominada L1 (1575 MHz), y debe haber al menos 4 satélites para el aforo tridimensional de la posición del receptor (OACI, 2017). Este sistema se utiliza en PBN (*Performance Based Navigation*), ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*) y TAWS (*Terrain Avoidance Warning System*).

El sistema DFMC (*Dual-Frequency Multi-Constellation*) es un sistema futuro que pretende aumentar la robustez del actual GNSS SBAS. Añadirá una frecuencia al sistema, denominada L5 (1176,45 MHz), y permitirá la integración

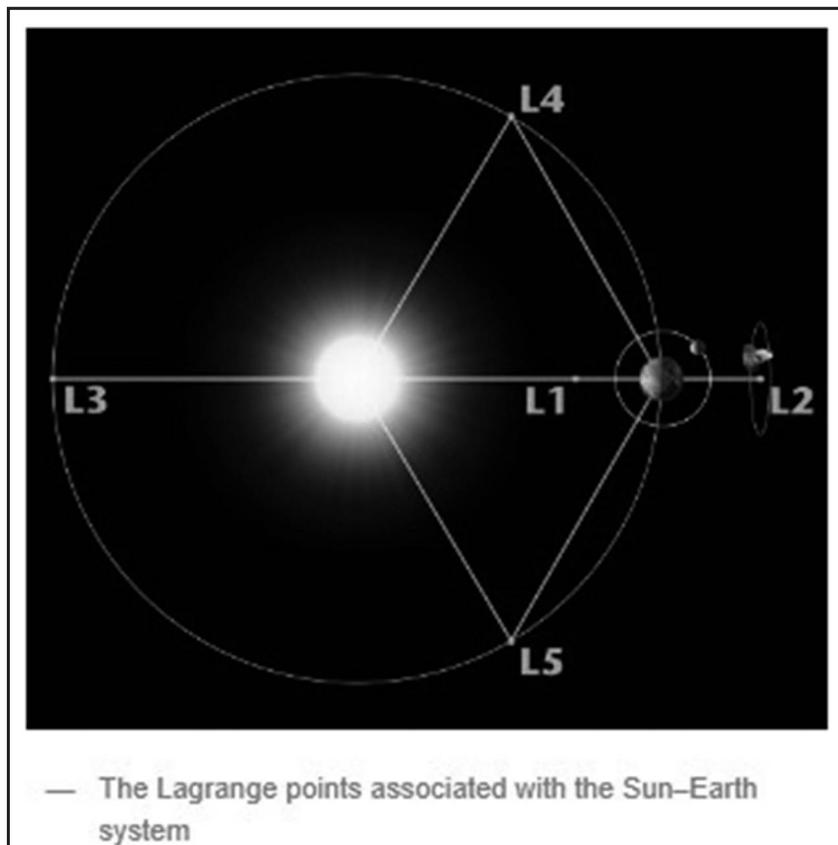
entre las constelaciones GPS, Galileo, GLONASS y BeiDou. Mediante estas implementaciones, este sistema contribuirá a proporcionar una mayor resistencia contra el centelleo ionosférico y a mejorar la geometría entre los satélites. El DFMC está en proceso de certificación. La OACI ha desarrollado el concepto de operación (CONOPS) del sistema, que describe cómo se utilizará en la aviación en los próximos años. Está previsto que los respectivos SARP se validen en el año 2022 (OACI, [s.f.]; RICARD, 2019).

En la línea científica, la misión espacial MMS de la NASA está compuesta por 4 aeronaves que navegan en formación por la magnetosfera, la región donde se encuentra el campo magnético de la Tierra. Su lanzamiento tuvo lugar en marzo de 2015 con el objetivo de estudiar el fenómeno de la reconexión magnética. Las 4 aeronaves forman un esquema piramidal que permite la visualización tridimensional del fenómeno magnético. A partir del éxito de la visualización, se estudia con mayor claridad lo que ocurre, con el objetivo de evaluar y evolucionar el conocimiento predictivo sobre la reconexión magnética (NASA, [s.f.]).

La misión *LaGrange* es un futuro concepto de exploración científica de la Agencia Espacial Europea

(ESA). En la página web de presentación del concepto (EUROPEAN SPACE AGENCY, [s.d.]), la agencia afirma: “Las observaciones y las previsiones sólo son posibles si se dispone constantemente de suficientes datos de observación, mediante el suministro de información climática espacial precisa y oportuna”⁹ (nuestra traducción). La misión tiene como objetivo los puntos de *LaGrange* del espacio, tal y como se presenta en la figura 6. Se trata de puntos en los que las fuerzas de gravedad del Sol y de la Tierra interactúan sobre ellos, de modo que crean estabilidad, es decir, en estas posiciones los objetos no orbitan. Hay cinco puntos con esta característica en la heliosfera, identificados como L1, L2, L3, L4 y L5. La misión consistirá en colocar aviones en los puntos L1 y L5. El objetivo del primer puesto es mejorar las observaciones interplanetarias para evaluar la velocidad de los vientos solares, sus densidades, temperatura y presión dinámica. El objetivo de la aeronave en la posición L5 será complementar las observaciones de la aeronave en L1, observando la propagación de las nubes de plasma emitidas por el Sol en un mejor ángulo, así como observar la cara del Sol precedente, antes de que se enfrente a la Tierra.

Figura 6 - Diagrama de las posiciones de *LaGrange*.



Fuente: (EUROPEAN SPACE AGENCY, [s.d.]).

⁹ Traducción de: “Providing timely and accurate space weather information, nowcasts and forecasts is possible only if sufficient observation data are continuously available.”

7 CONCLUSIÓN

Se prevé que el sistema de navegación GNSS sea el principal recurso de la PBN (*Performance Based Navigation*) en 2030 (EUROCONTROL, 2020). En las reuniones de la OACI se definen los planes futuros del sistema, que incluyen el aumento continuo de la disponibilidad, la predicción y la integridad del posicionamiento (SMAOUI, 2017). Estas mejoras son necesarias ya que el espacio aéreo, en condiciones de no contingencia, es cada vez más denso y requiere una mayor fiabilidad.

Una de las principales amenazas para la precisión del GNSS tiene un origen complejo y es difícil de predecir. Los daños que se pueden causar en las más diversas redes tecnológicas son inconmensurables, ya que nunca se ha repetido un suceso como el de 1859. Sin embargo, es conocido entre los investigadores que los daños materiales serían graves, afectando profundamente la cuestión financiera de los países (BAKER et al., 2013; BERDERMANN et al., 2018; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008).

Los sistemas de predicción actuales todavía no son fiables, ya que hay fenómenos solares que no son predecibles (OACI, 2019a). Durante los citados eventos de 2017, por ejemplo, la aviación no estaba al tanto, y solo recibió la alerta de que dicho servicio no estaba disponible (HF y LPV) (REDMON et al., 2018). La Unión Europea está exigiendo en los próximos años que los proveedores de servicios de navegación aérea (ANSP) creen procedimientos de contingencia en caso de que falle el único medio de navegación global común (GNSS). Estos procedimientos fueron ampliamente discutidos en EUROCONTROL (2020), detallando las acciones de reversión a los medios convencionales, como el VOR/DME, además de los procedimientos de responsabilidad del ATC. El documento ayudará a la creación de un segundo documento futuro, pero con carácter normativo.

Las nuevas misiones espaciales dirigidas por la NASA y la ESA pueden suponer un gran avance

teórico sobre el tema, mejorando las capacidades de predicción. Sin embargo, los nuevos estudios son recientes y otros están aún por llegar, como los de MMS y *LaGrange*, respectivamente.

Para aumentar la seguridad y reducir los daños que puede causar la meteorología espacial, es necesario que los principales usuarios de las tecnologías amenazadas, principalmente los aviadores, estén más concienciados sobre esta naturaleza. Existe el recurso entre algunas fuentes, como BERDERMANN et al. (2018), REDMON et al., (2018) y HAPGOOD, (2017, p. 3), quienes discuten sobre la necesidad de la mejora continua en el aprendizaje y el conocimiento predictivo sobre el tema.

Brasil no dispone de un sistema de mitigación de los efectos ionosféricos similar al SBAS y GBAS para la aviación. Sin embargo, hay varias investigaciones y proyectos, como los del INPE y el INCT, que pueden aportar nuevos métodos de posicionamiento a Brasil en el futuro.

En 2017, hubo una reunión entre DECEA y representantes de la FAA, el Boston College y las empresas Mirus, Honeywell, Boeing y las aerolíneas, para discutir y diseñar la certificación de GBAS en el aeropuerto Galeão de Río de Janeiro (GALEMBECK, 2017). En el trabajo de SURCO ESPEJO et al., (2020), se simuló la precisión de la fase de aproximación y aterrizaje de una aeronave en el aeropuerto de Galeão, en Río de Janeiro. Se llegó a la conclusión de que el sistema de aumento GBAS instalado en el lugar no puede certificarse para su uso, debido a los efectos ionosféricos ecuatoriales presentes, que reducen su precisión.

La ubicación geomagnética brasileña contribuye a que se produzcan mayores efectos negativos si se producen fenómenos meteorológicos espaciales (SPOGLI et al., 2013). Por lo tanto, la concienciación al respecto en el país debería existir con igual o mayor rigor, teniendo en cuenta los hechos. La falta de conocimiento sobre el tema existe en Brasil, así como en toda la sociedad, incluidos los usuarios de tecnologías susceptibles. Para HAPGOOD, (2017), este es un gran reto a resolver.

REFERENCIAS

- AGUIAR, Claudinei. Grade ionosférica para aplicações em posicionamento e navegação com GNSS. **Aleph**, [S. l.], 2010.
- BAKER, D. N.; LI, X.; PULKKINEN, A.; NGWIRA, C. M.; MAYS, M. L.; GALVIN, A. B.; SIMUNAC, K. D. C. A major solar eruptive event in July 2012: Defining extreme space weather scenarios. **Space Weather**, [S. l.], v. 11, n. 10, p. 585–591, 2013. DOI: 10.1002/swe.20097. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/swe.20097>. Acesso em: 16 jun. 2020.
- BARBOSA, Cássio. **Os 156 anos de Carrington I G1 - Ciência e Saúde - Observatório**. 2015. Disponível em: <http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/blog/observatorio/post/os-156-anos-de-carrington.html>. Acesso em: 16 maio. 2020.
- BERDERMANN, J.; KRIEGEL, M.; BANY, D.; HEYMANN, F.; HOQUE, M. M.; WILKEN, V.; BORRIES, C.; HESSELBARTH, A.; JAKOWSKI, N. Ionospheric Response to the X9.3 Flare on 6 September 2017 and Its Implication for Navigation Services Over Europe. **Space Weather**, [S. l.], v. 16, n. 10, p. 1604–1615, 2018. DOI: 10.1029/2018SW001933. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/2018SW001933>. Acesso em: 11 jun. 2020.
- BLASKOVIC, Teo. **The Sweden Case: Airplanes disappear from radars due to “solar storm.”** 2015. Disponível em: <https://watchers.news/2015/11/05/the-sweden-case-aircrafts-disappear-from-radars-due-to-solar-storm/>. Acesso em: 23 set. 2021.
- BOWHILL, S. A. Introduction to ionospheric physics. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, [S. l.], v. 33, n. 2, p. 301, 1971. DOI: 10.1016/0021-9169(71)90209-1.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Portaria nº 335, de 25 de janeiro de 2021**. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=515&pagina=5&data=28/01/2021>.
- COSTER, Anthea; KOMJATHY, Attila. Space Weather and the Global Positioning System. **Space Weather**, [S. l.], v. 6, n. 6, p. n/a-n/a, 2008. DOI: 10.1029/2008sw000400.
- DENNIS, Jed; HEMSTAD, Mark. Selecting among Dual Frequency Multiple Constellation (DFMC) Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS) during En-route and Non-Precision Flight Operations. **Navigation, Journal of the Institute of Navigation**, [S. l.], v. 63, n. 1, p. 65–83, 2016. DOI: 10.1002/navi.127.
- DOHERTY, Patricia; COSTER, Anthea J.; MURTAGH, William. Space weather effects of October–November 2003. **GPS Solutions**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 267–271, 2004. DOI: 10.1007/s10291-004-0109-3.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. **The “no name” space weather mission**. [s.d.]. Disponível em: https://www.esa.int/Safety_Security/Lagrange_mission2. Acesso em: 6 jun. 2020.
- EUROCONTROL. **European GNSS Contingency/ Reversion Handbook for PBN Operations**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: www.trainingzone.eurocontrol.int. Acesso em: 28 maio. 2020.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. **SBAS Interoperability**. 2011. Disponível em: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Interoperability. Acesso em: 31 maio. 2020.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. **Space Weather Office**. [s.d.]. Disponível em: http://www.esa.int/Safety_Security/Space_Weather_Office. Acesso em: 2 jun. 2020.
- FAA. **Satellite Navigation - WAAS - How It Works**. 2019. Disponível em: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/waas/howitworks/. Acesso em: 27 maio. 2020.
- GALEMBECK, Glória. **Cooperação entre Brasil e Estados Unidos fomenta pesquisa de GBAS para baixas latitudes**. 2017. Disponível em: https://www.decea.gov.br/?i=midia-e-informacao&p=pg_noticia&materia=cooperacao-entre-brasil-e-estados-unidos-fomenta-pesquisa-de-gbas-para-baixas-latitudes. Acesso em: 8 set. 2020.
- GOSLING, J. T. The solar flare myth. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, [S. l.], v. 98, n. A11, p. 18937–18949, 1993. DOI: 10.1029/93JA01896. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/93JA01896>.
- HAPGOOD, Mike. **Space Weather**. [S.l.]: IOP Publishing, 2017. DOI: 10.1088/978-0-7503-1372-8. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/book/978-0-7503-1372-8>.
- HESSE, M.; CASSAK, P. A. Magnetic Reconnection in the Space Sciences: Past, Present, and Future. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, [S. l.], v. 125, n. 2, p. 1–24, 2020. DOI: 10.1029/2018ja025935.
- HOCKEY, Thomas; HODGSON, Richard. In: **Biographical Encyclopedia of Astronomers**. [S.l.]: Springer New York, 2014. p. 989–989. DOI: 10.1007/978-1-4419-9917-7_9075.

Disponível em: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-9917-7_9075. Acesso em: 23 jun. 2020.

IBGE. **RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=sobre>. Acesso em: 25 ago. 2020.

ICAO. **Doc 9849 AN/457 - Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual**. Third ed. [S.l.: s.n.].

ICAO. **MID Doc 011 - Guidance on GNSS implementation in the MID region**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.icao.int/MID/MIDANPIRG/Pages/MID-Docs.aspx>.

ICAO. **DOC 10100 - Manual on Space Weather Information in Support of International Air Navigation**. First ed. [S.l.: s.n.].

ICAO. **ICAO Space Weather Advisories**. Singapore. Disponível em: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/mission_support/ato_intl/cross_polar/. Acesso em: 3 jun. 2020b.

ICAO. **DFMC SBAS SARPS - Baseline draft for validation**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.icao.int/airnavigation/Pages/DFMC-SBAS.aspx>. Acesso em: 8 jun. 2020.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ. **Presentation**. [s.d.]. Disponível em: <http://lisn.igp.gob.pe/about/detail/presentation/>. Acesso em: 7 set. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **O Projeto**. [s.d.]. Disponível em: <http://inct-gnss-nsaer.fct.unesp.br/pt/projeto.php>. Acesso em: 6 set. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Relatório Descritivo - EMBRACE**. São José dos Campos. Disponível em: http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/wp-content/uploads/2020/08/PROGRAMA_EMBRACE.pdf. Acesso em: 23 set. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **O Programa Embrace**. [s.d.]. Disponível em: <http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/o-programa-embrace/>. Acesso em: 30 jul. 2020.

KOMJATHY, Attila; SPARKS, Lawrence; MANNUCCI, Anthony J.; XIAOQING, Pi. An assessment of the current waas ionospheric correction algorithm in the South American region. **Navigation, Journal of the Institute of Navigation**, [S. l.], v. 50, n. 3, p. 193–204, 2003. DOI: 10.1002/j.2161-4296.2003.tb00329.x.

MATSUOKA, Marcelo Tomio; DE OLIVEIRA CAMARGO, Paulo; BATISTA, Inez Staciarini. Impacto de explosões solares no comportamento da ionosfera e no posicionamento com GPS na região Brasileira: Estudo de caso para o dia 28 de Outubro de 2003. **Boletim de Ciências Geodesicas**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 315–334, 2006.

MENK, Frederick W.; WATERS, Colin L. **Magnetoseismology**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. DOI: 10.1002/9783527652051. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/9783527652051>.

NASA. **The Magnetospheric Multiscale Mission**. [s.d.]. Disponível em: https://mms.gsfc.nasa.gov/about_mms.html. Acesso em: 5 jun. 2020.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Coronal Mass Ejections**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/coronal-mass-ejections>. Acesso em: 30 jul. 2020a.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Galactic Cosmic Rays**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/galactic-cosmic-rays>. Acesso em: 13 ago. 2020b.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **NOAA Space Weather Scales**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>. Acesso em: 13 ago. 2020c.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Severe Space Weather Events — Understanding Societal and Economic Impacts**. Washington, D.C.: National Academies Press, 2008. DOI: 10.17226/12507. Disponível em: <http://www.nap.edu/catalog/12507>.

REDMON, R. J.; SEATON, D. B.; STEENBURGH, R.; HE, J.; RODRIGUEZ, J. V. September 2017's Geoeffective Space Weather and Impacts to Caribbean Radio Communications During Hurricane Response. **Space Weather**, [S. l.], v. 16, n. 9, p. 1190–1201, 2018. DOI: 10.1029/2018SW001897.

RICARD, Nathalie. **Dual Frequency Multiconstellation SBAS Key Concepts**. Rome. Disponível em: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/EWS19%20GSA%20-%20Introduction%20to%20EGNOS%20DFMC%20services.pdf. Acesso em: 8 jun. 2020.

RUTLEDGE, Bob. **Space Weather Update**. Boulder, CO. Disponível em: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/mission_support/ato_intl/cross_polar/.

SHEEHAN, William. Carrington, Richard Christopher. In: **Biographical Encyclopedia of Astronomers**. New York, NY: Springer New York, 2014. p. 373–375. DOI: 10.1007/978-1-4419-9917-7_9034. Disponível em: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-9917-7_9034. Acesso em: 23 jun. 2020.

SMAOUI, Mohamed. **ICAO Global Provisions and Regional Developments related to GNSS**. [S.l.: s.n.]. Acesso em: 14 jun. 2020.

SPOGLI, Luca; ALFONSI, Lucilla; ROMANO, Vincenzo; DE FRANCESCHI, Giorgiana; JOAO FRANCISCO, Galera Monico; HIROKAZU SHIMABUKURO, Milton; BOUGARD, Bruno; AQUINO, Marcio. Assessing the GNSS scintillation climate over Brazil under increasing solar activity. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, [S. l.], v. 105–106, n. November 2018, p. 199–206, 2013. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.10.003.

SURCO ESPEJO, Teddy M.; COSTA, Emanuel; DE MORAES, Alison O.; DE PAULA, Eurico R.; FRANCISCO GALERA MONICO, João. **Ionospheric Effects on Signal in Space and on Ground Based Augmentation System**. [S.l.: s.n.]. Acesso em: 30 ago. 2020.

TAKAHASHI, Directions Kazue; CHI, Peter J.; DENTON, Richard E.; EDS, Robert L. Lysak;

ABERCROMBIE, Faulting Rachel; MCGARR, Art; HYNDMAN, Processes David W.; DAY-, Frederick D. Geophysical Monograph Series. [S. l.], p. 1–4, 2015. DOI: 10.1029/164GM03.

TOUSEY, R. The solar corona. In: SPACE RESEARCH CONFERENCE 1973, **Anais [...]**. [S.l.: s.n.] p. 713–730.

UNITED NATIONS. **Preliminary draft report and proposed candidate guidelines of expert group C: Space Weather**. Vienna. Disponível em: https://www.unoosa.org/pdf/limited/c1/AC105_C1_2013_CRP13E.pdf. Acesso em: 23 set. 2021.

WEBB, David F. The solar cycle variation of the rates of CMEs and related activity. **Advances in Space Research**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 37–40, 1991. DOI: 10.1016/0273-1177(91)90086-Y. Acesso em: 17 jun. 2020.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Aeronautical Meteorology Programme**. [s.d.]. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/programmes/aeronautical-meteorology-programme>. Acesso em: 1 jun. 2020.

YOON, Moonseok; KIM, Dongwoo; PULLEN, Sam; LEE, Jiyun. Assessment and mitigation of equatorial plasma bubble impacts on category I GBAS operations in the Brazilian region. **Navigation, Journal of the Institute of Navigation**, [S. l.], v. 66, n. 3, p. 643–659, 2019. DOI: 10.1002/navi.328.