

O futuro da confiabilidade da navegação aérea dependente do clima espacial

The future of air navigation reliability dependent on space weather

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

João Pedro Souza Aguiar ^I

Dario Eberhardt ^{II}

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.

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).

I. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS). Porto Alegre/RS – Brasil. Graduando em Ciências Aeronáuticas da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. *E-mail:* j.aguiar@edu.pucrs.br

II. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS). Porto Alegre/RS – Brasil. Doutorado em Microeletrônica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. *E-mail:* dario.eberhardt@pucrs.br

Recebido: 06/10/21

Aceito: 15/09/21

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 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.

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.

1 INTRODUÇÃO

A principal interferência nos sistemas de posicionamento e comunicações de aeronaves advém do equilíbrio eletrônico da ionosfera (ICAO, 2019a). Essa camada da atmosfera é um intermediário essencial da vida social moderna, pois influencia todas as tecnologias dependentes de satélites, assim como redes elétricas e comunicações. *Solar flares*, ejeções coronais de massa (CMEs) e radiações cósmicas - componentes do clima espacial, sempre estiveram presentes como fonte desse desequilíbrio. Caso eventos atinjam o planeta dependendo da sua intensidade, são passíveis de influenciar, em efeito cascata, o equilíbrio geomagnético da Terra, causando perturbações na atmosfera, prejudicando a integridade de todos os sinais de rádio e podendo causar danos materiais e grandes prejuízos financeiros. Na aviação, podem afetar os sistemas de comunicação de alta frequência (HF) e por satélite (SATCOM), navegação e vigilância GNSS e pode ocorrer aumento da radiação nas altitudes de voo (HAPGOOD, 2017; ICAO, 2019a).

Em uma reunião do subcomitê técnico científico da Organização das Nações Unidas (ONU), ocorrida em 2013, ficou determinado que o clima espacial é um potencial causador de desastres naturais (UNITED NATIONS, 2013). Os fenômenos do espaço estão sendo monitorados, suas intensidades analisadas, bem como áreas de ocorrência e eventuais prejuízos. Diversas iniciativas e estudos em andamento existem para buscar melhor precisão nas previsões de ocorrências relacionadas com o clima espacial, que serão detalhados neste artigo. A consciência de tais fatos é pequena na sociedade, principalmente dentro da aviação, pois consequências de eventos severos são raras, ocorrendo uma ou duas vezes em 100 anos (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008).

Este trabalho objetiva a informação e a conscientização dos usuários que possam ser afetados, como pilotos, despachantes operacionais de voo e controladores. Traz o alerta para a falta de qualidade na previsão, visto a complexidade da origem dos eventos de clima espacial. Possui pertinência uma vez que o espaço aéreo, em condições não contingenciais, se apresenta cada vez mais denso e necessita de maior confiabilidade.

1.1 Histórico

O evento de clima espacial mais severo que se possui registro, ocorrido em 1 de setembro de 1859, completou 160 anos, de acordo com o National Research Council (2008). O evento é conhecido como “Evento

de Carrington” por ter sido observado pelo astrônomo inglês Richard Carrington, em Redhill, no Reino Unido (SHEEHAN, 2014). Se a mesma magnitude do fenômeno ocorresse atualmente, com as infraestruturas modernas e complexas presentes em nossa sociedade, as consequências seriam “profundas”¹ (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008, p. 20, tradução nossa).

O evento, i.e., as explosões solares, foram observadas também pelo astrônomo amador Richard Hodgson em Londres, na Inglaterra, e que confirmou a descoberta de Carrington (HOCKEY, 2014). As influências das explosões solares foram amplamente observadas no período da meia-noite, madrugada do dia 2. O céu adquiriu cores distintas das que comumente são vistas na aurora. Os tons eram avermelhados e verdes. O brilho também foi muito mais intenso, com relatos de pessoas que chegaram a pensar que já era dia. Esse efeito foi observado em diversas localidades, como demonstrado na Figura 1, em latitudes onde não ocorrem efeitos ionosféricos visíveis, como Cuba, Bahamas, Jamaica, El Salvador, Havaí e Guiana Francesa, bem próximas do grande círculo. Também foi observado em outras regiões da América do Sul (até norte do Chile), Europa, Ásia e Austrália (BARBOSA, 2015).

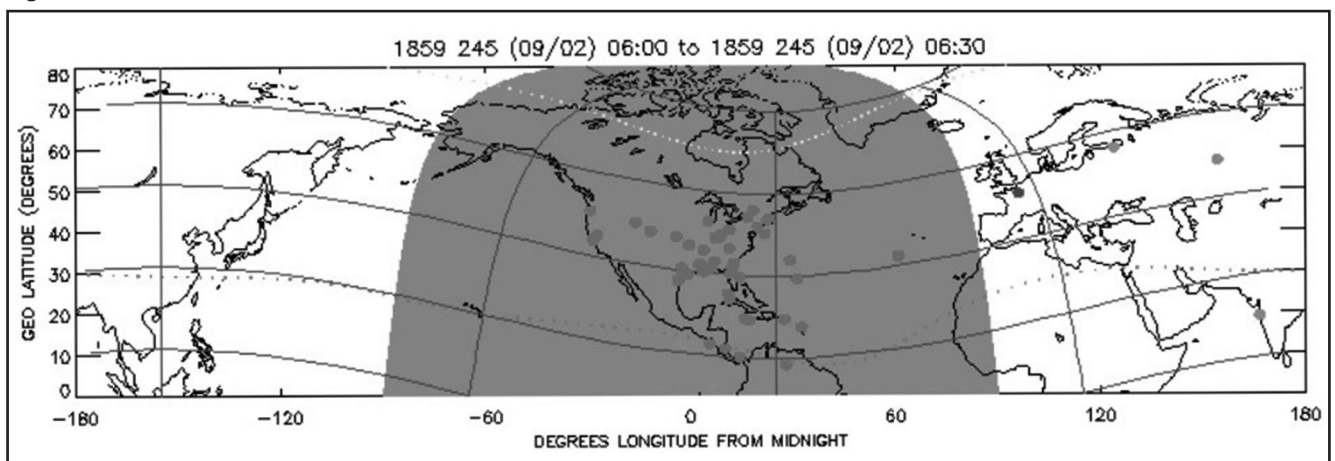
Os danos causados possuíam menor abrangência, pois as invenções elétricas estavam em seu início. No entanto, os telégrafos da época sofreram grandes influências, desde faíscas espontâneas até mensagens com códigos morse ilegíveis. Se desconectassem o instrumento da bateria, os “códigos” persistiam devido à corrente induzida nos cabos do sistema. Esta corrente também é conhecida como correntes parasitas, ou correntes de Foucault.

A partir desse evento considerável, pesquisadores iniciaram, na década de 1860, a ligação do fenômeno das auroras, as manchas solares e o magnetismo da terra, considerando-os dependentes. Ainda assim, o entendimento da natureza envolvida não era nítido. O maior avanço científico a respeito somente ocorreu durante a guerra fria, com a corrida espacial. Em 1957, a União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) lançou o primeiro satélite artificial denominado *Sputnik-1*, focado no estudo da atmosfera superior. Em seguida, os EUA lançaram o Explorer 1 em 1959 com os mesmos objetivos do *Sputnik-1*. Estes primeiros satélites lançados foram essenciais para o estudo dos efeitos da radiação solar e cósmica, assim como para a ciência da composição da ionosfera. Na década de 1970, houve o descobrimento das ejeções coronais de massa (GOSLING, 1993; HAPGOOD, 2017; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; TOUSEY, 1973).

Consequências graves do clima espacial são raras. Como exemplo, houve outros registros de fortes influências, como durante a Segunda Guerra Mundial. Observações de radar foram interrompidas durante emissões solares de radiação, fato que somente foi reconhecido como causa solar em 1946 (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008). Em 1972, o estado de Illinois no EUA sofreu uma perda nas comunicações. Em 13 de março de 1989, outro forte bombardeamento solar causou diversos danos na América do Norte, principalmente na área das redes elétricas. Esse fato gerou falhas gerais em geradores e transformadores. A província de Quebec, Canadá, ficou sem luz durante este evento.

Em 2003, 2005, 2015 e 2017 também ocorreram fortes eventos, com amplas influências em tecnologias, expostos respectivamente em (DOHERTY; COSTER; MURTAGH, 2004), (BARBOSA, 2015), (BLAŠKOVIĆ, 2015) e (REDMON et al., 2018). Seus efeitos na aviação serão detalhados neste trabalho.

Figura 1 - Locais onde foram observadas auroras em 1859.



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

¹ Tradução de “profound”.

2 CLIMA ESPACIAL

WMO (*World Meteorological Organization*) define clima espacial como: “O estado físico e fenomenológico do ambiente espacial, que inclui o Sol e os ambientes interplanetários e planetários”² (ICAO, 2019a, p. 5, tradução nossa). Portanto, clima espacial inclui o Sol e outros astros, como eventos de supernovas, que emitem radiação intergaláctica que atinge o planeta Terra, radiação esta conhecida como cósmica, ou GCR (*Galactic Cosmic Rays*) (ICAO, 2019a).

2.1 Clima espacial: o Sol

A origem solar do clima espacial inclui ventos solares, CMEs e *solar flares*. Estes são fenômenos originados da sua atmosfera, que podem gerar grandes nuvens de plasma magnetizado e/ou radiação de partículas altamente energizadas, que se propagam através do espaço (HAPGOOD, 2017). As CMEs e os *solar flares* possuem potencial de interferir com a segurança da aviação.

As partículas expelidas deste astro se propagam pelo espaço através de linhas de campo magnético (BOWHILL, 1971), produzido através do processo de dínamo. A teoria deste processo é presente para a explicação da geração do campo magnético de todos os planetas, em que o núcleo apresenta calor intenso que libera íons. Com isto, há fluido carregado eletricamente que possui um movimento de rotação e convecção constante, ocorrendo a produção de campo magnético.

Os ventos solares, as CMEs e os *solar flares* são produzidos por meio de um processo denominado reconexão magnética. Este processo acontece na atmosfera solar quando dois campos magnéticos com direções convergentes se cruzam, transformando e liberando, repentinamente, energia magnética em energia cinética. Tal processo pode também ocorrer fora da atmosfera solar, entre os campos magnéticos da Terra e do espaço interplanetário contrário ao Sol (*Dungey Cycle*), contribuindo para tempestades geomagnéticas através do reenvio de plasma ao planeta (HAPGOOD, 2017; HESSE; CASSAK, 2020).

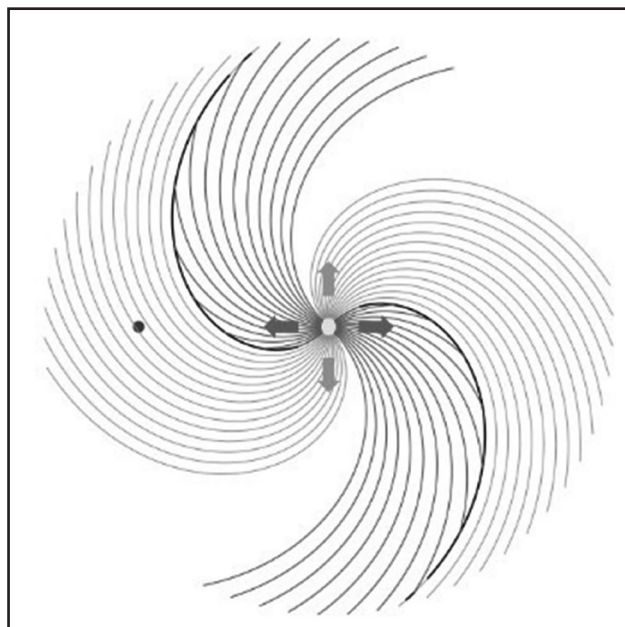
O campo magnético é transportado tanto pela CME como pelos ventos solares. Isto ocorre de forma semelhante ao fundamento do processo de dínamo descrito anteriormente. O plasma possui alta condutividade a ponto

de permitir a condução de magnetismo pelo espaço. É utilizado o termo “*frozen in*” para o campo magnético, quando transportado junto com a liberação do plasma (HAPGOOD, 2017, p. 17; MENK; WATERS, 2013, p. 2).

Os ventos solares são plasma que continuamente escapam da região coronal do Sol, pois superam a gravitação devido às altas temperaturas³, e não representam risco à segurança para a aviação. Possuem velocidades médias que variam de 500 a 800 quilômetros por segundo e, quando atingem a Terra, interagem com o campo magnético terrestre através da força de Lorentz, modelando-o e formando a magnetosfera (HAPGOOD, 2017; MENK; WATERS, 2013). No entanto, devido ao processo de reconexão magnética na superfície solar, pode ocorrer a liberação de ventos solares de alta velocidade, perturbando o campo geomagnético terrestre (ICAO, 2019a). Neste contexto, são os principais responsáveis pela aurora, manifestação do clima espacial visível aos olhos, e que é a absorção e condução da energia solar pela ionosfera.

A rotação do Sol interfere na liberação dos ventos solares de forma que, quando emergem da atmosfera, executam uma trajetória semelhante a da água de um aspersor de jardim, como esquematizado na Figura 2. O formato desta trajetória também é conhecido como “*Parker Spiral*” (MENK; WATERS, 2013). Este termo surgiu na década de 1950, criado por Eugene Newman Parker quando estudava tais fenômenos solares.

Figura 2 - Esquema da trajetória dos ventos solares.



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

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

³ Acredita-se que a liberação de energia cinética, através da reconexão magnética, seja a causa da elevação das temperaturas na coroa solar, que chegam ao milhão de Kelvins, comparado com 6000K na superfície (HAPGOOD, 2017).

As CMEs são ventos solares em forma de nuvens de plasma que possuem energia altíssima, com massa que pode ter bilhões de toneladas e velocidade de até 3.000 km/s. Podem chegar à Terra em menos de um dia, ou até mais de 4 dias, após sua liberação da coroa. As CMEs possuem liberação direcionada e a chance de atingir a Terra é pequena. Representam grande risco à aviação e tecnologias, pois podem desencadear as tempestades geomagnéticas, que são perturbações no campo magnético terrestre, devido à absorção de plasma na magnetosfera, que geram ciclos de reconexão magnética no lado do globo oposto ao Sol. Estes ciclos reenviam plasma ao planeta e podem ser chamados de *Dungey Cycle* ou sub-tempestades. Devido ao processo, grande quantidade de energia é dissipada na ionosfera, contribuindo para a alteração das características físicas dos sinais de satélites, quando atravessam tal camada atmosférica. Isto reduz a precisão do posicionamento das aeronaves (podendo ocasionar a perda do posicionamento) e prejudica os sistemas de comunicação HF e SATCOM (HAPGOOD, 2017; ICAO, 2019a; MENK; WATERS, 2013; NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [s.d.]).

Outro processo desencadeado por tempestades geomagnéticas é a indução de correntes em solo (GIC⁴), que pode afetar infraestruturas elétricas como redes de energia e sistemas ferroviários. Danos a estes sistemas gerariam grandes prejuízos, como detalhado em TAKAHASHI et al., (2015, p. 33).

Os *solar flares* são liberações de energias em menor escala na forma de radiação eletromagnética (comprimentos de ondas EUV e Raios-X⁵). Os depósitos de energia são rápidos, atingindo a Terra em minutos. Sua ocorrência tem relação com as CMEs, pois podem ser um indicativo antecedente à liberação da ejeção coronal, mas também podem ocorrer separadamente. Têm potencial de influenciar, somente nas regiões da Terra iluminadas pelo sol, os sistemas de comunicações e monitoramento HF, que utilizam frequência entre 1-20 Mhz; os sistemas elétricos embarcados e a saúde das tripulações. Nas regiões polares, seus efeitos são maiores, devido ao comportamento magnético terrestre que permite maior depósito de prótons nas latitudes mais altas. Através desta característica, a radiação atinge altitudes inferiores e interfere de forma mais significativa nos sistemas de comunicação HF, principalmente das rotas árticas, utilizadas para voos entre América e Ásia. A radiação pode ser também recebida em latitudes e altitudes baixas⁶, devido a fenômenos ionosféricos equatoriais mais complexos (HAPGOOD, 2017; ICAO, 2019a).

O número de elétrons depositados na ionosfera, após a chegada do plasma, possui unidade denominada de TEC (*Total Electron Content*). Valores de TEC são determinados pelo número de elétrons em uma coluna de 1m² entre um sinal de satélite e o seu receptor, que atravessa a ionosfera. Variação de TEC causa variação proporcional no equilíbrio eletrônico da ionosfera, ocasionando alterações na velocidade, polarização, fase e amplitude (cintilação ionosférica) das ondas de rádio propagadas pelo GPS. As alterações podem indicar posição errônea do receptor, assim como podem ocasionar a perda do sinal do satélite (AGUIAR, 2010; COSTER; KOMJATHY, 2008). Uma unidade de TEC, igual a 10¹⁶ elétrons/m², corresponde a 0,163 m de atraso na aferição da posição do receptor, sendo portanto, um bom indicador para a qualidade do posicionamento. O TEC varia regularmente devido ao ciclo das manchas solares, à época do ano, hora do dia e localização geográfica (KOMJATHY et al., 2003).

Estas ejeções de energia solar ocorrem com maior frequência em um período cíclico de atividade do Sol, quando há maior atividade. Este ciclo de maior atividade possui 11 anos aproximadamente (GOSLING, 1993; WEBB, 1991). A atividade solar é diretamente proporcional aos grupos de manchas solares visíveis, que são constantemente monitoradas por observatórios, como os satélites da agência espacial NASA, SOHO e STEREO-A. Durante o período de máxima atividade, os *solar flares* são emitidos, em média, 25 vezes por dia e as CMEs, 5 vezes por dia. A densidade energética é liberada de forma semelhante entre *solar flares* e CMEs, no entanto, a chance de a Terra sofrer a influência de uma CME é menor, pois possui liberação direcionada. Em contrapartida, os danos seriam maiores através das CMEs devido ao forte campo magnético unido ao plasma (HAPGOOD, 2017; ICAO, 2019a; NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [s.d.]).

2.2 Clima espacial: radiações cósmicas

Os raios cósmicos, que são provenientes de fora do sistema solar, atingem a Terra constantemente, com intensidade que varia pouco com o tempo. A interferência dos raios cósmicos sobre a Terra é inversamente proporcional à atividade solar, pois as CMEs e os *solar flares* interagem com a radiação cósmica de forma a reduzir sua interação com a atmosfera terrestre.

Assim como as radiações solares, seus efeitos serão maiores em latitudes mais altas (acima de 55° de latitude

⁴ Sigla de Ground-Induced Currents.

⁵ EUV é sigla para Ultravioleta Extremo com faixa de comprimento de onda de 10nm – 121nm (nanômetros). Raios-X possuem 1nm – 20nm.

⁶ Próximas ao nível de voo 300 (10-12km).

magnética), como nos polos, e aumentam com a altitude, atingindo um máximo entre 60-65.000 pés. Dependendo da intensidade, podem ser prejudiciais aos equipamentos eletrônicos embarcados e, com longa exposição, à saúde da tripulação (ICAO, 2019a; NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [s.d.]).

2.3 Clima espacial: o Brasil

O Brasil é uma das regiões do globo terrestre com maiores influências ionosféricas, e maiores valores e variações de TEC. Está localizado em uma região equatorial e possui parte do território próximo à AMAS (Anomalia Magnética da América do Sul). O equador magnético apresenta, juntamente com os polos, maiores irregularidades ionosféricas principalmente nos períodos após o pôr do sol local, ocorrendo com maior frequência cintilações na frequência dos sinais de satélite. As irregularidades são causadas pelo aumento do campo elétrico ionosférico no período pós-vespertino, devido a uma maior movimentação do plasma (*Fountain Effect*), dando origem também a bolhas de plasma (SPOGLI et al., 2013).

A AMAS é uma região onde o campo geomagnético possui os menores valores de intensidade, contribuindo, de forma semelhante aos polos, para o maior depósito de radiação. Tal característica permite maior perturbação na ionosfera, o que também contribui para cintilações nos sinais de satélites do GNSS (SPOGLI et al., 2013). Tais comportamentos da ionosfera sobre o Brasil são muito prejudiciais para a precisão do posicionamento (KOMJATHY et al., 2003; MATSUOKA; DE OLIVEIRA CAMARGO; BATISTA, 2006).

3 TECNOLOGIAS PARA A AVIAÇÃO QUE MITIGAM EFEITOS DO CLIMA ESPACIAL

A ICAO (Organização Internacional de Aviação Civil) exige para os sistemas concernentes à navegação aérea que possuam precisão, integridade, disponibilidade e continuidade para todas as fases de voo. Estes requisitos são expostos no Anexo 10 da Convenção de Aviação Civil Internacional através das SARPs (Práticas e Padrões Recomendadas de Segurança). Para atender estas demandas de performance de navegação, foram necessários novas tecnologias, por meio dos avanços nas pesquisas relacionadas com o clima espacial.

Em 2003, nos EUA, foi certificado o SBAS (*Satellite Based Augmentation System*) próprio, denominado de WAAS (*Wide Area Augmentation System*). É um sistema

de aumento do posicionamento, focado para corrigir os efeitos ionosféricos presentes no território americano, além de atrasos de relógio do satélite e erros de órbita. Seu funcionamento é composto de estações GPS em solo, com suas posições precisamente definidas, e que continuamente medem as diferenças em relação ao aferimento dos satélites. Estes dados são então enviados a uma estação central, que gera as mensagens corrigidas. Estas mensagens são transmitidas para satélites geoestacionários que, em sequência, retransmitem para os receptores embarcados nas aeronaves. Com este sistema, as aeronaves são capazes de executar procedimentos de precisão através do LPV (*Localizer Performance with Vertical Guidance*) em localidades diversas pelo território americano, onde não há auxílios-rádio para navegação (COSTER; KOMJATHY, 2008; FAA, 2019). Semelhante ao WAAS, há outros sistemas que compõem o SBAS e que operam da mesma forma. No Japão, utilizam o MSAS (*MTSAT Satellite Augmentation System*), operacional desde 2007. Na Europa utiliza-se o sistema EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), iniciado em 2011. Na Índia, utilizam o GAGAN (*GPS Aided Geo Augmented Navigation*), certificado em 2014. Os 4 citados estão operacionais, enquanto há outros sistemas que estão em desenvolvimento, como o SDCM (*System for Differential Corrections and Monitoring*) da Rússia e o SNAS (*Satellite Navigation Augmentation System*) da China (DENNIS; HEMSTAD, 2016). Os sistemas operacionais fazem parte do IWG (*Interoperability Working Group*), atendendo requisitos ICAO, para oferecerem os serviços de aumento com livre transição entre si. Desta forma, unifica-se a tecnologia de melhora de precisão pelo hemisfério (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2011).

O *ground-based augmentation system* (GBAS) é um segundo sistema de aumento do GNSS, desenvolvido para melhorar a precisão do posicionamento por meio de correções diferenciais por equipamentos em solo. Através das correções deste sistema, os erros ionosféricos comuns se tornam negligíveis. Quando o sistema é instalado em aeroportos, podem ser executadas aproximações e pousos por instrumentos com precisão, chamados de *GBAS Landing System* (GLS). Dependendo do tipo de serviço de aproximação GBAS (GAST), as aproximações podem ser realizadas com precisão ainda maior (CAT II/III). Por exemplo, nos EUA os sistemas GBAS presentes são o LAAS (*Local Area Augmentation System*) e SLS (*Satellite Landing System*) desenvolvidos pela Administração Federal de Aviação (FAA) e pela Honeywell, respectivamente. O primeiro GBAS foi aprovado em 2012 no Aeroporto Internacional de Newark, nos Estados Unidos (YOON et al., 2019).

Somado a estas tecnologias de aumento, a grande maioria das aeronaves comerciais possui um sistema de reversão, caso os sinais GNSS apresentem falha. Será determinada a posição da aeronave com base no conjunto entre sinais do sistema inercial da aeronave e sinais de rádio (VOR/DME). A tripulação pode fazer uso exclusivo da navegação convencional ou, se não houver sinais de rádio disponíveis na região, a tripulação pode pedir auxílio ao ATC. Estas são estratégias de mitigação enquanto não houver procedimentos de contingência próprios para a ocasião (EUROCONTROL, 2020; ICAO, 2018).

4 INTERFERÊNCIAS REMANESCENTES NA AVIAÇÃO

Em 29 de outubro de 2003, se iniciou o evento que ficou conhecido como Tempestades de Halloween, que atingiu diversas regiões dos Estados Unidos. O evento inabilitou o serviço de aproximação de precisão do WAAS, que ficou inutilizável durante 15 horas no dia 29, e 11.3 horas no dia 30 (DOHERTY; COSTER; MURTAGH, 2004).

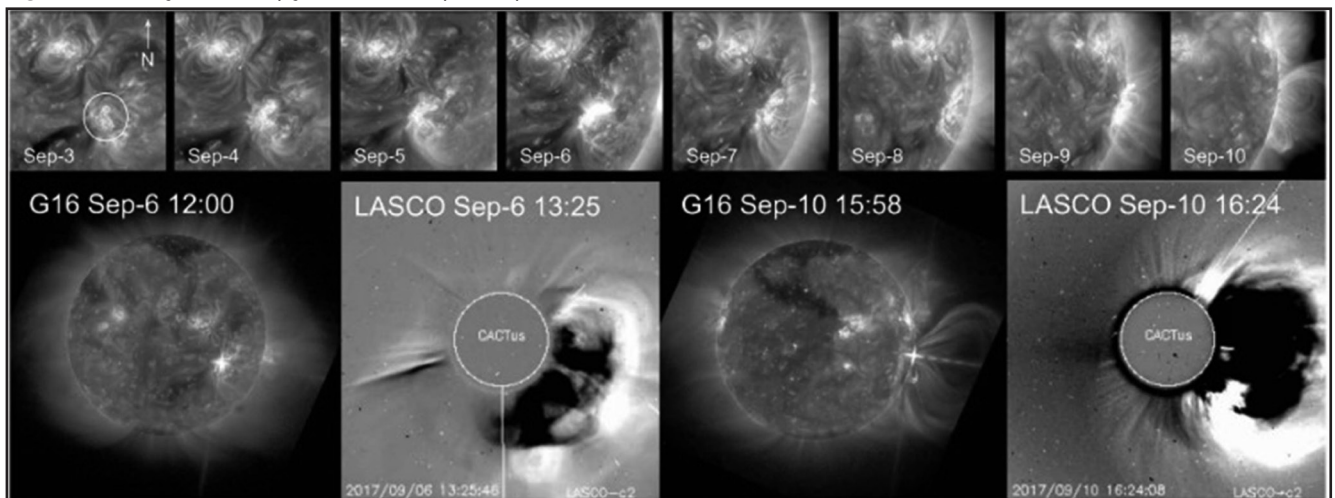
Em dezembro de 2005, houve perturbação nos sistemas de navegação de GPS que durou 10 minutos, desorientando aeronaves, navios e plataformas de petróleo (BARBOSA, 2015). No dia 4 de novembro de 2015, o serviço de tráfego aéreo da Suécia reportou que aeronaves não apareciam em seus radares. O problema durou aproximadamente 1 hora. A causa considerada foi uma tempestade solar (BLAŠKOVIĆ, 2015).

No dia 3 de setembro de 2017, ocorreu um evento que sobrepôs o SBAS dos EUA e Europa. A região solar categorizada como região 46 do grupo Catania —

nomenclatura da agência americana NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), iniciou uma atividade magnética mais complexa, gerando uma série de *solar flares* e CMEs, cujos efeitos foram sentidos nos dias 6, 7 e 10 do mês (REDMON et al., 2018). Na Figura 3, tem-se imagens do desenvolvimento desta atividade solar. A região emitiu um vento solar de magnitude X9.3⁷. O último mais forte havia ocorrido em setembro de 2005, com intensidade X17⁷ no ciclo solar 23 (REDMON et al., 2018). Neste evento de 2017, a NOAA emitiu alertas com sua escala mais severa para risco de perda de comunicações, tempestades geomagnéticas e alta radiação de partículas. Foi reportada perda de comunicação HF em voo no dia 6 e perda de capacidade para procedimentos LPV do WAAS e EGNOS no dia 8 (REDMON et al., 2018). Além disso, neste período, as comunidades do Caribe enfrentavam o furacão José. Devido ao evento de clima espacial, sofreram dificuldades nos serviços de comunicações para atendimento à emergência, reportadas por HWN (*Hurricane Weather Net*) e DGAC (*French Civil Aviation Authority*) (REDMON et al., 2018).

O sistema de aumento europeu EGNOS sofreu uma redução considerável de sua disponibilidade em 2017, conforme demonstrado na Figura 4. No dia 06 de setembro, houve perda de aproximadamente 10% da taxa de disponibilidade, o que afetou a segurança de procedimentos LPV (BERDERMANN et al., 2018). Esse decréscimo ocorreu devido a CME que atingiu o planeta, depositando plasma na região da ionosfera e aumentando valores de TEC repentinamente. Isto dificulta os receptores de manter correções de sinal e, na maioria dos casos, ocorre perda de ligação entre o satélite. Esta perda é chamada de “*loss of lock*” (BERDERMANN et al., 2018).

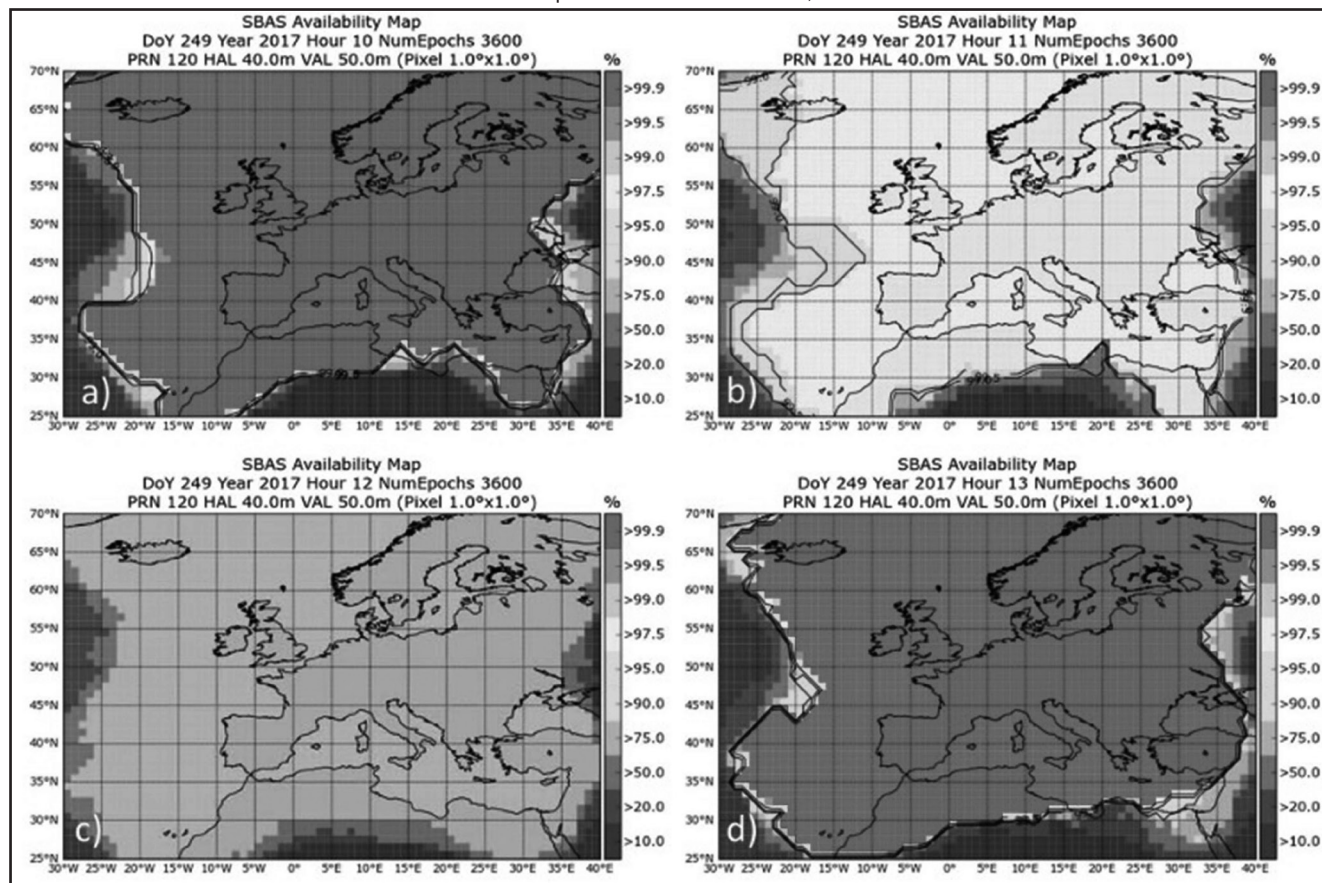
Figura 3 - Evolução das erupções solares captadas pelos satélites SDO, GOES e SOHO, no intervalo entre os dias 3 e 10 de setembro.



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

⁷ Escala do NOAA, disponibilizada no portal do SWPC (*Space Weather Prediction Center*).

Figura 4 - Mapa com escala da disponibilidade do SBAS europeu EGNOS no intervalo de tempo entre as 10:00 e 13:00 (UTC) do dia 6 de setembro de 2017. Cinza mais forte indica alta disponibilidade e cinza claro, baixa.



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

Um evento de clima espacial semelhante ao de 1859 nunca foi repetido. Os danos são desconhecidos na prática, apesar de existirem algumas previsões de intensidade, como em (BAKER et al., 2013). Por meio de um modelo preditivo, eles mediram o dano que uma CME poderia ter causado no planeta em 2012. Esta CME não atingiu o globo por questão de uma semana de rotação solar. Com o método, os autores concluíram que a intensidade da ejeção coronal havia sido mais intensa que a do evento de 1859 de Carrington, e os danos semelhantes à analogia de (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008): que a sociedade ainda estaria “pegando os pedaços”⁸ (BAKER et al., 2013, p. 590).

5 ESCOPO DE MONITORAMENTO DO CLIMA ESPACIAL ATUAL

Os danos causados pelo clima espacial, assim como os danos potenciais, geraram iniciativas com objetivo de entender a sua origem, realizar observações,

recolher dados e prever fenômenos. Atualmente, a organização mundial central para a aviação que realiza estudos a respeito é a WMO (*World Meteorological Organization*). Ela trabalha de forma conjunta com a ICAO, melhorando as previsões mundiais emitidas pelo WAFS (*World Area Forecast System*) e, atualmente, o principal objetivo é mitigar os impactos do clima espacial (*WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION*, [s.d.]).

Os EUA possuem algumas organizações de fornecimento de informações. Dentre elas o SWPC (*Space Weather Prediction Center*) sob administração do NOAA. Neste centro, são disponibilizadas em seu site, <<https://www.swpc.noaa.gov>>, escalas diárias que demonstram as tecnologias e os sistemas que podem ser afetados com os eventos de clima espacial. São três escalas que mensuram: impacto em sistemas de rádio (HF e satélites); níveis de radiações provenientes de tempestades solares e níveis das tempestades geomagnéticas (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, [s.d.]).

⁸ Tradução de “picking up the pieces”.

Na Europa, a ESA (*European Space Agency*) criou um programa em 2009 para melhorar a consciência dos usuários a respeito dos perigos do espaço. Foi denominada de SSA (*Space Situational Awareness*). A partir da iniciativa, foi criado um segmento atrelado à segurança global, chamado de *Space Weather Office*, para estudo do clima espacial, com foco em mitigar os seus efeitos. Dentro deste segmento, está em desenvolvimento o *Space Weather Service Network* da ESA, que visa prover produtos e serviços de cinco áreas diferentes para usuários. Estas cinco áreas são administradas por especialistas e são divididas em: clima solar, clima da heliosfera, radiação espacial, clima ionosférico e condições geomagnéticas. Esta iniciativa tem como um de seus principais objetivos fornecer produtos mais precisos e confiáveis (EUROPEAN SPACE AGENCY, [s.d.]).

No Brasil, também foram criadas algumas iniciativas para estudo e desenvolvimento de tecnologias para enfrentar influências do clima espacial. O INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) criou o programa EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial) em 2007, com o objetivo de propor mecanismos de alerta e procedimentos de defesa para sistemas de comunicação via satélite, GNSS, sistemas de segurança de voo, sistemas energéticos de grande dimensão, sistema de proteção e de controle de altitude de satélites, entre outros. No site do programa, <www2.inpe.br/climaespacial/portal/pt/>, são disponibilizadas, de forma semelhante ao NOAA, através do SWPC, escalas diárias que demonstram os potenciais danos às tecnologias. O projeto faz parte do DIDAE (Divisão de Aeronomia) do INPE, que conta, também, com outras iniciativas de pesquisa, como o projeto EQUARS (*Equatorial Atmosphere Research Satellite*), com foco no monitoramento e estudo da região equatorial (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, [s.d.]).

O Brasil também possui infraestrutura robusta de redes de estações que monitoram sinais GNSS, principalmente das constelações GPS e GLONASS. Ele é composta pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GNSS (RBMC), da rede dos projetos CIGALA e CALIBRA, do LISN e do GNSS-NavAer. Elas analisam e estudam os efeitos que a ionosfera, próxima ao equador magnético, impõe ao posicionamento, com propósito de entender

melhor suas características e desenvolver tecnologias mais precisas e confiáveis, assim como novos métodos de posicionamento.

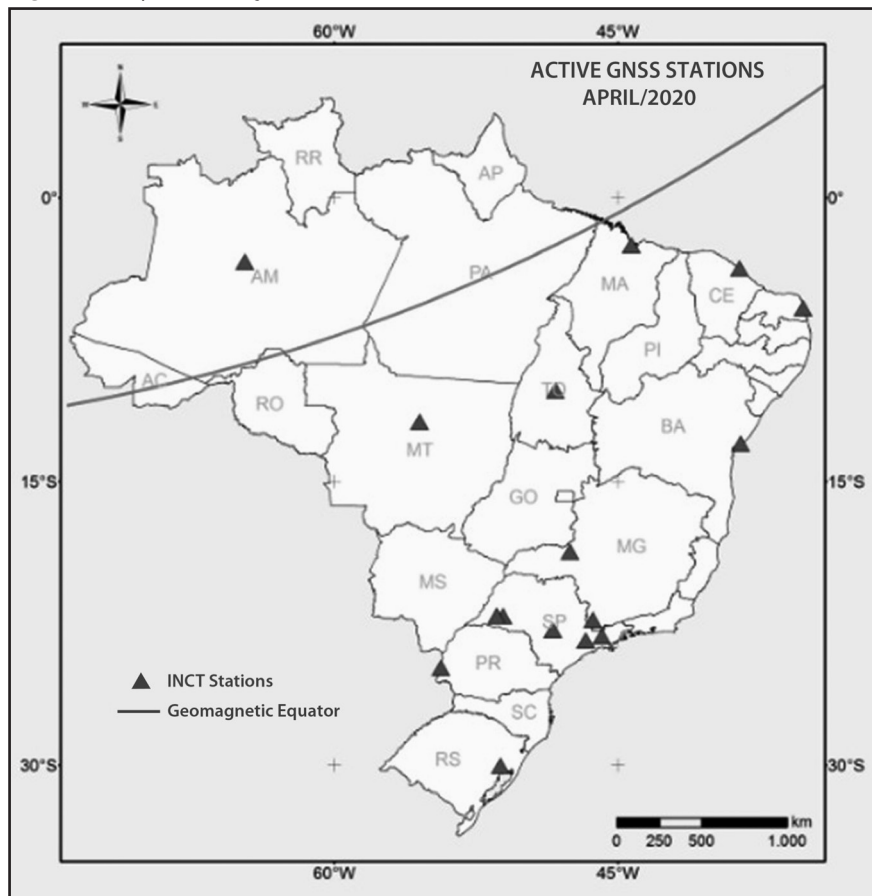
A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do GNSS (RBMC), sobre administração do IBGE, possui estações GNSS desde 1996, que armazenam continuamente as observações do código e da fase das ondas portadoras transmitidas pelos satélites das constelações GPS ou GLONASS (IBGE, [s.d.]). Seus dados são comumente utilizados em pesquisas.

O projeto CIGALA (*Concept for Ionospheric Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*), financiado pela Comissão Europeia (EC) da Agência Europeia do GNSS (GSA), foi criado para desenvolver e testar tecnologias de mitigação a cintilação ionosférica na América do Sul, através de estações GNSS em solo. Esse projeto possuiu como foco analisar os potenciais efeitos do período de máxima atividade solar do ano de 2013. O projeto teve início em março de 2010 e foi concluído em fevereiro de 2012, sendo continuado pelo projeto CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAZIL*). Este possuía objetivo de evoluir os algoritmos corretivos para as técnicas de posicionamento GNSS de alta precisão, expandindo o número de estações GNSS do projeto anterior CIGALA, sendo concluído em fevereiro de 2015 (AGUIAR, 2010).

O LISN (*Low-Latitude Ionospheric Sensor Network*) é um projeto internacional para estudo de fenômenos ionosféricos, com instrumentos geofísicos localizados na América do Sul, próximos do equador magnético e até o meridiano 70°W. Possui diversas instituições colaboradoras, com pesquisadores do INPE como representantes brasileiros (INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ, [s.d.]).

O GNSS-NavAer foi criado pelo INCT (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia) em 2017. O principal objetivo da iniciativa é melhorar o conhecimento teórico das influências ionosféricas sobre o sinal GNSS, para aplicação segura na navegação aérea. Possui uma rede de estações GNSS para coleta de dados ionosféricos, denominada rede GNSS NavAer, espalhadas pelo território brasileiro, conforme ilustrado na Figura 5. Possui várias instituições colaboradoras, entre elas a UNESP, o INPE, o ITA e a UFRGS (INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, [s.d.]).

Figura 5 - Mapa das estações da rede GNSS NavAer.



Fonte: INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, [s.d.].

Em junho de 2017, a ICAO questionou dos Estados o interesse em colaborar com informações a respeito do clima espacial. Dos interessados, o conselho da ICAO designou, em novembro de 2018, três centros globais: PECASUS (Finlândia, com parceiros da Bélgica, Áustria, Itália, Inglaterra, Chipre, Polônia, Holanda, Alemanha e África do Sul), SWPC (NOAA, EUA) e ACFJ (consórcio entre Austrália, Canadá, França e Japão) (ICAO, 2019b). Denominados de SWXC, os centros, sem hierarquia, se comprometeriam ao monitoramento e fornecimento de informações e recomendações, emitindo avisos de eventos do clima espacial que possam afetar comunicações, navegação baseada em GNSS e sistemas de monitoramento, assim como casos de risco de radiação à tripulação. As recomendações devem seguir a regulamentação internacional da Convenção de Aviação Civil Internacional, expostas no Anexo 3 – *Meteorological Service for International Air Navigation*. Para os usuários da aviação especificamente, foi lançado em 2019, pela ICAO, um material guia para o clima espacial – Documento 10100, *Manual on Space Weather Information in Support of International Air Navigation* (ICAO, 2019b).

Portanto, após a emenda 78 do Anexo 3 da Convenção, operacional em novembro de 2018, a

documentação exigida no pré-voos possui o acréscimo da apresentação de eventos relevantes à rota, relacionados com o clima espacial, emitidos pelos SWXC. A linguagem das informações é abreviada, sendo os efeitos sobre comunicações HF, comunicações via satélite (SATCOM), degradação do GNSS e exposição à radiação, classificados, respectivamente, como HF COM, SATCOM, GNSS e RADIATION. No quesito da intensidade dos fenômenos, é utilizado MOD para moderada e SEV para severa. Exemplos das mensagens emitidas estão listadas nas tabelas I e II.

Em consonância com as alterações do Anexo 3, o Brasil, por meio da portaria 335 de 25 de janeiro de 2021, estabeleceu uma cooperação técnico-científica entre o INPE e o DECEA, através do EMBRACE e CIMAER (Centro Integrado de Meteorologia Aeronáutica) respectivamente. A cooperação visa aprimorar o Serviço de Meteorologia Espacial Aeronáutica, disponibilizando informações e assessoramento sobre fenômenos meteorológicos espaciais, conforme recomendações do Anexo 3, com intenção de tornar-se um SWXC regional da América do Sul (BRASIL, 2021; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2021).

Tabelas 1 e 2 - Exemplos de avisos de eventos que podem ser emitidos por um 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

Fonte: (RUTLEDGE, 2020).

Apesar dos avanços e dos sistemas disponíveis, alguns eventos ainda são imprevisíveis. Perdas de comunicação HF, que ocorrem nas regiões diurnas da Terra, acontecem sem aviso prévio. Radiação mais intensa, causada por tempestade solar, pode ser prevista, mas por vezes é rápida e atinge as pessoas e os sistemas sem prévio preparo (ICAO, 2019a).

6 NOVAS INICIATIVAS

Os avanços nos estudos do clima espacial e seus efeitos em tecnologias seguem por caminhos científicos e técnicos. A NASA e ESA são agências que se aprofundam na linha científica de estudo, provendo maior conhecimento teórico, como por meio das missões espaciais MMS e LaGrange. No Brasil, a cooperação do INPE com o DECEA forma a principal fonte de

pesquisa. A partir de tais conhecimentos, avanços na área técnica passam a existir, como a criação do sistema SBAS DFMC do GNSS.

Atualmente, o sistema de posicionamento usado sobre uma aeronave consta de uma constelação de satélite e uma frequência de sinal. Para a constelação GPS, usa-se a frequência denominada L1 (1575 MHz), devendo haver no mínimo 4 satélites para aferição tridimensional da posição do receptor (ICAO, 2017). Este sistema é utilizado em PBN (*Performance Based Navigation*), ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*) e TAWS (*Terrain Avoidance Warning System*).

O sistema DFMC (*Dual-Frequency Multi-Constellation*) é um sistema futuro que possui como objetivo aumentar a robustez do atual SBAS do GNSS. Adicionará uma frequência ao sistema, denominada de L5 (1176,45 MHz), e permitirá a integração entre as constelações

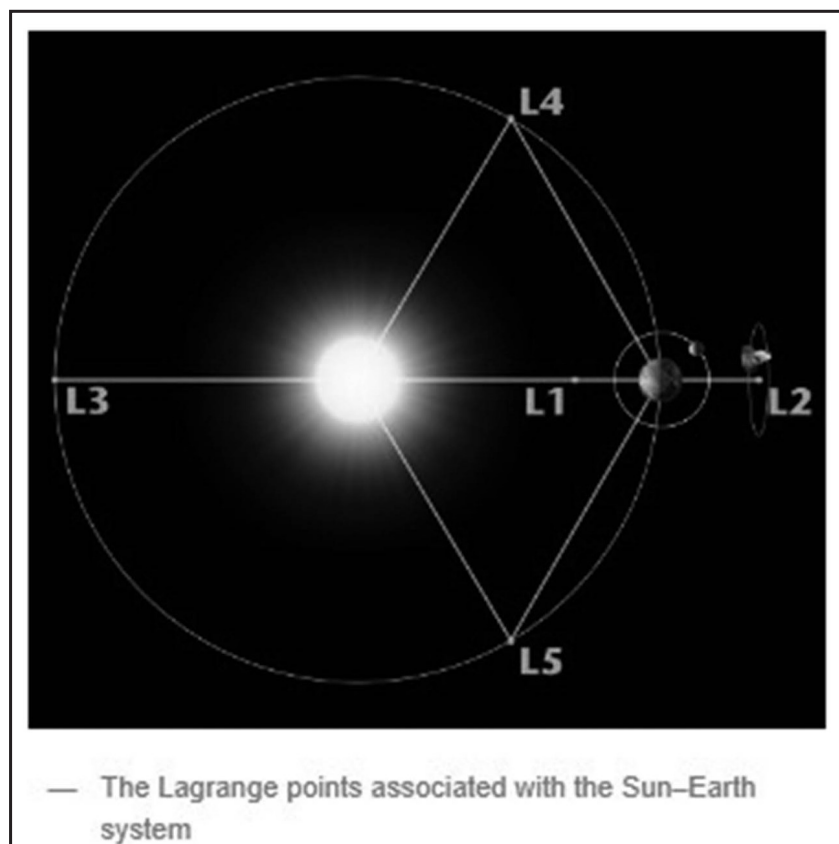
GPS, Galileo, GLONASS e BeiDou. Através destas implementações, esse sistema contribuirá para dar maior resistência contra a cintilação ionosférica e melhorar a geometria entre satélites. O DFMC está em processo de certificação. A ICAO desenvolveu o conceito de operação (CONOPS) do sistema, descrevendo como será utilizado na aviação nos próximos anos. As respectivas SARPs estão previstas para serem validadas no ano de 2022 (ICAO, [s.d.]; RICARD, 2019).

Na linha científica, a missão espacial da NASA MMS é composta de 4 aeronaves que navegam em formação pela magnetosfera, região onde está presente o campo magnético da Terra. Seu lançamento ocorreu em março de 2015 com o objetivo de estudar o fenômeno de reconexão magnética. As 4 aeronaves formam um esquema de pirâmide, que possibilita a visualização tridimensional do fenômeno magnético. A partir do sucesso da visualização, estudam com maior nitidez o que ocorre, com o objetivo de avaliar e evoluir o conhecimento preditivo sobre a reconexão magnética (NASA, [s.d.]).

A missão LaGrange é um conceito de exploração científica futura da European Space Agency (ESA). No

site de apresentação do conceito (EUROPEAN SPACE AGENCY, [s.d.]), a agência afirma: “Observações e previsões somente são possíveis se dados suficientes de observações estiverem constantemente disponíveis, através do fornecimento de informações precisas e pontuais do clima espacial”⁹ (tradução nossa). A missão visa os pontos de LaGrange do espaço, como apresentados na Figura 6. São pontos em que as forças de gravidade do Sol e da Terra interagem sobre eles, de forma que criam estabilidade, ou seja, nessas posições os objetos não orbitam. Há cinco pontos com esta característica na heliosfera, identificados como L1, L2, L3, L4 e L5. A missão será colocar aeronaves nos pontos L1 e L5. O objetivo da primeira posição é melhorar as observações interplanetárias para se avaliar a velocidade dos ventos solares, suas densidades, temperatura e pressão dinâmica. O objetivo da aeronave na posição L5 será complementar as observações da aeronave em L1, observando-se a propagação das nuvens de plasma emitidas pelo Sol em melhor ângulo, assim como observar a face do Sol antecedente, antes da mesma facear a Terra.

Figura 6 - Esquema das posições *LaGrange*.



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

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

7 CONCLUSÃO

O sistema de navegação GNSS está projetado para ser o principal recurso da PBN (*Performance Based Navigation*) até 2030 (EUROCONTROL, 2020). Reuniões da ICAO definem planos futuros para o sistema, que incluem aumento contínuo da disponibilidade, previsão e integridade do posicionamento (SMAOUI, 2017). Estas melhorias são necessárias uma vez que o espaço aéreo, em condições não contingenciais, se apresenta cada vez mais denso e necessita de maior confiabilidade.

Uma das principais ameaças à acurácia do GNSS possui origem complexa e de difícil previsão. Os danos que podem ser causados nas mais diversas redes tecnológicas são imensuráveis, pois nenhum evento como o de 1859 se repetiu. No entanto, é conhecido, entre pesquisadores, que os danos materiais seriam graves, afetando profundamente a questão financeira dos países (BAKER et al., 2013; BERDERMANN et al., 2018; NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008).

Os sistemas atuais preditivos ainda não são confiáveis, pois existem fenômenos solares que não são previsíveis (ICAO, 2019a). Durante os eventos citados de 2017, por exemplo, a aviação não estava ciente, e apenas receberam o alerta de que tal serviço estava indisponível (HF e LPV) (REDMON et al., 2018). Está sendo exigido pela União Europeia, nos próximos anos, que, os provedores de serviço de navegação aérea (ANSP) criem procedimentos de contingência, caso o único meio comum global de navegação (GNSS) falhe. Estes procedimentos foram amplamente discutidos em EUROCONTROL (2020), detalhando ações de reversão para meios convencionais, como VOR/DME, além de procedimentos de responsabilidade do ATC. O documento auxiliará na criação de um segundo documento futuro, mas com caráter regulatório.

As novas missões espaciais lideradas pela NASA e ESA podem transmitir um grande avanço teórico sobre o tema, melhorando as

capacidades preditivas. No entanto, os novos estudos são recentes e outros ainda são futuros, como a MMS e LaGrange, respectivamente.

Para o aumento da segurança, assim como para a redução dos danos que podem ser causados pelo clima espacial, é necessário que haja maior consciência a respeito desta natureza pelos principais usuários das tecnologias ameaçadas, principalmente pelos aviadores. Existe o apelo entre algumas fontes, como BERDERMANN et al. (2018), REDMON et al., (2018) e HAPGOOD, (2017, p. 3), que discutem sobre a necessidade da contínua melhora no aprendizado e conhecimento preditivo sobre o tema.

O Brasil não possui sistema de mitigação aos efeitos ionosféricos semelhante ao SBAS e GBAS para a aviação. No entanto, existem diversas pesquisas e projetos, como os do INPE e do INCT, que podem futuramente trazer novos métodos de posicionamento para o Brasil.

Em 2017, houve uma reunião entre DECEA e representantes da FAA, do Boston College e das empresas Mirus, Honeywell, Boeing e companhias aéreas, para discutirem e projetarem a certificação do GBAS no aeroporto Galeão do Rio de Janeiro (GALEMBECK, 2017). No trabalho de SURCO ESPEJO et al., (2020), foi simulada a precisão da fase de aproximação e pouso de uma aeronave no aeroporto do Galeão, no Rio de Janeiro. Foi concluído que o sistema de aumento GBAS instalado no local não pode ser certificado para uso, devido aos efeitos ionosféricos equatoriais presentes, que reduzem sua precisão.

A localização geomagnética brasileira é contribuinte para maiores efeitos negativos, caso ocorram eventos de clima espacial (SPOGLI et al., 2013). Portanto, a conscientização a respeito no país deveria existir com igual ou maior rigor, considerando os fatos. A falta de conhecimento sobre o tema existe no Brasil, como também em toda a sociedade, incluindo usuários de tecnologias suscetíveis. Para HAPGOOD, (2017), este é um grande desafio a ser resolvido.

REFERÊNCIAS

- 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-नावर.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.