

Artículo N° 14/2026

METEOROLOGÍA ESPACIAL: LA NUEVA DIMENSIÓN DEL AMBIENTE OPERACIONAL AERONÁUTICO

SEGUNDA PARTE



Por Juan Carlos Sepúlveda Suárez, Encargado de Desarrollo Espacial de la empresa DTS SpA. Investigador Asociado al CEEA.

20 de agosto de 2026. 10 minutos de Lectura

La Actividad Solar Como Adversario Invisible Para La Aviación

Vulnerabilidad Creciente de la Aviación Moderna

La aviación civil y militar del siglo XXI depende de tecnologías que han evolucionado con el tiempo y, con ello, su vulnerabilidad a los efectos de la meteorología espacial ha aumentado con el tiempo. Esta vulnerabilidad progresiva se explica por:

ÁMBITO	EFEECTO
Miniaturización de componentes electrónicos (aviónica)	La electrónica integrada, voltajes reducidos, cableados extensos y la comunicación digital generan un escenario en el cual, la radiación solar, puede producir eventos asociados a daños de transistores, pérdidas o corrupción de datos, alteraciones en la frecuencia, corriente o voltaje; contextos que potencialmente son de riesgo para las operaciones aéreas.
Dependencia de Satélite	La navegación aérea moderna, particularmente en operaciones oceánicas y de latitud alta, depende crecientemente de sistemas de satélites para navegación (GNSS) y comunicaciones (SatCom), generando un vínculo o dependencia para los destinitos servicios o contextos operacionales, tales como ayudas a la navegación o procedimientos de vuelo (PNB, RNAV, etc.)
Automatización	La aviación contemporánea posee sistemas altamente automatizados que, ante fallos de componentes críticos, pueden comprometer la seguridad aeronáutica y la eficiencia de las operaciones.

Tabla 3: Vulnerabilidades en la aviación moderna



Fig.9: Eventos solares de relevancia histórica registrados por la humanidad (elaboración propia)

Operaciones en Altas y Medias Latitudes

Las operaciones aéreas en altas y medias latitudes (sobre los 45° N/S) presentan un incremento en las vulnerabilidades asociadas a:

- El campo magnético terrestre dirige los flujos de partículas solares hacia los polos, concentrando los efectos de la meteorología espacial en estas regiones.
- Las rutas polares, o cercanas a ellas, cada vez más utilizadas para vuelos comerciales y actividades en regiones antárticas, incrementando su exposición a radiaciones de alta energía, que pueden interferir en el funcionamiento de equipos (GNSS, por ejemplo) y generar un aumento en la dosis de absorción para tripulaciones y pasajeros.
- La radiación cósmica a altitudes de crucero es aproximadamente 300 veces mayor en latitudes altas que a nivel del mar.

Para el contexto de las operaciones aéreas chilenas, esto tiene relevancia estratégica considerable, dado que:

- La aviación militar opera regularmente en latitudes altas (expediciones antárticas)
- Las rutas comerciales hacia Oceanía y Asia operan en latitudes progresivamente mayores.

Ciclo Solar 25 y Perspectivas Futuras

El ciclo solar 25, que comenzó a fines de 2019, se proyectó como un ciclo de actividad moderada amoderada-alta. De acuerdo con las estadísticas, el máximo de actividad ocurrió alrededor de 2025 y principios del 2026, con implicaciones significativas en las distintas áreas del quehacer aeroespacial. Las proyecciones sugieren que la actividad del ciclo 25 es comparable o ligeramente superior al ciclo anterior, registrando 167 eventos significativos a la fecha (sobre Kp Index 5).

Se espera que la actividad comience a disminuir hasta alcanzar su mínimo el 2030. Sin embargo, la posibilidad de ocurrencia de un evento de relevancia se mantiene presente y requiere de un constante monitoreo por parte de los operadores aeronáuticos.

Impactos Específicos en Operaciones Aéreas

Impacto en Sistemas de Navegación

Durante eventos de meteorología espacial severa, el sistema GNSS (GPS, GALILEO, GLONASS, BEIDOU) experimenta múltiples modos de degradación: aumento de la densidad electrónica en la ionosfera causa errores de propagación de señales; irregularidades ionosféricas provocan "centelleo" (scintillation) de señales, causando fluctuaciones de amplitud y fase; retrasos de propagación no caracterizados introducen errores de posicionamiento; en eventos severos, la pérdida completa de señal es posible durante horas.

Impacto en Comunicaciones

Tradicionalmente, las comunicaciones HF han sido el medio de comunicación primario para vuelos oceánicos y de latitud alta. Durante eventos de meteorología espacial severa, fenómenos de "apagón de radio" (radio blackout) pueden ocurrir en el lado iluminado de la Tierra; la absorción polar causada por radiación solar produce pérdida de comunicaciones en latitudes altas; el "desvanecimiento rápido" (fast fading) en latitudes aurorales reduce inteligibilidad. Estadísticamente, se espera al menos un evento significativo de apagón de HF por año, con eventos severos estimados una vez cada 100 años.

Impacto en Aviónica

Partículas de alta energía pueden causar cambios temporales o permanentes en circuitos electrónicos, en especial, los constituidos con transistores y elementos semiconductores.

El impacto se contextualiza en el llamado Efecto de Evento Único (SEE, por sus siglas en inglés), el cual se caracteriza en diversos tipos de impactos, tanto a nivel de hardware como software.

Un evento severo de radiación solar puede generar múltiples SEE simultáneamente, resultando en comportamientos inesperados en sistemas de aviónica, tales como reinicio de equipos, falla de componentes, pérdida de datos, entre otros. La tasa de ocurrencia de SEE depende del flujo de radiación y la vulnerabilidad específica del circuito.

Estudios de la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA) indican que el riesgo debe ser mitigado mediante el diseño robusto de circuitos, pero no puede ser completamente eliminado, requiriendo procedimientos operacionales para contrarrestar posibles incidentes asociados a este impacto.

Impacto en Radiación de Tripulación y Pasajeros

Durante un evento de tormenta solar severa, la radiación a altitudes de crucero puede aumentar considerablemente. Estimaciones de expertos en radiación del Reino Unido sugieren que, durante un evento de magnitud solar, ocupantes de aeronaves a altitudes de crucero típicas (10 km o superiores) podrían recibir aproximadamente 20 millisieverts en un único vuelo, aumentando el riesgo de cáncer fatal de por vida en aproximadamente 0.1%.

Si bien esto representa un riesgo estadísticamente pequeño comparado con riesgo de cáncer general de población (aproximadamente 25%), la exposición concentrada en operadores aéreos de alto nivel de exposición anual presenta consideraciones especiales. Los operadores aéreos son legalmente responsables de monitorear la exposición ocupacional de sus tripulaciones a radiación cósmica.

Construcción de una resiliencia operacional.

Marco Regulatorio Internacional

La Organización de Aviación Civil Internacional ha establecido requisitos para que todos los servicios de meteorología aeronáutica proporcionen información de meteorología espacial como parte mandatoria del briefing pre-vuelo. Desde noviembre de 2019, cuatro centros globales designados por OACI (ACFJ - Australia, Canadá, Francia, Japón; PECASUS - Europa; CRC - China y Rusia; SWPC - Estados Unidos) proporcionan avisos de meteorología espacial en rotación continua de 24 horas.

Estos avisos informan de fenómenos de meteorología espacial con impacto potencial en: comunicaciones HF; navegación y vigilancia basadas en GNSS; comunicaciones por satélite; exposición a radiación en altitudes de vuelo. Los avisos proporcionan información de eventos observados y pronósticos de hasta 24 horas, con resolución temporal de 6 horas.

Procedimientos Operacionales

Los operadores deben implementar procedimientos específicos, proponiéndose los siguientes, en base al estado del arte existente:

PROCEDIMIENTO	OBJETIVO
Planificación Pre-Vuelo	Revisar avisos de meteorología espacial como parte de la información meteorológica pre-vuelo; evaluar potenciales impactos en sistemas específicos de la aeronave; considerar cambios de ruta o altitud si es necesario.
Procedimientos en Vuelo	Tripulaciones deben estar conscientes de potenciales degradaciones de navegación y comunicación; procedimientos para pérdida de comunicaciones HF deben ser activados en caso de meteorología espacial severa; sistemas de comunicaciones alternativas (SatCom, CPDLC) deben ser considerados.
Descenso para Reducción de Radiación	Para aeronaves que operan sobre 49,000 pies (15,000 m), OACI Annex 6 requiere equipamiento para medir continuamente la dosis de radiación cósmica. Si se alcanzan umbrales de 50 mrem/h, procedimientos permiten a la tripulación solicitar descenso con el propósito de reducir exposición a radiación.

Tabla 4: Procedimientos a implementar para mitigar efectos de la actividad solar

Sistemas de Detección y Pronóstico

Satélites en la órbita Lagrange L1 (aproximadamente 1.5 millones de km del lado solar terrestre) proporcionan observación de eyecciones de masa coronal con aproximadamente 15-30 minutos de anticipación. Esta ventana de tiempo permite implementar medidas de mitigación limitadas.

Redes de ionosondas y receptores GNSS proporcionan información sobre el estado actual de la ionosfera, permitiendo a servicios meteorológicos entender qué regiones del planeta están siendo afectadas.

El Reino Unido y los Estados Unidos de América operan un servicio de pronóstico de meteorología espacial que proporciona: pronósticos de 4 días de probabilidad de eventos; alertas automáticas registrados por usuarios; información técnica detallada de impactos esperados. Servicios similares operan en otros países, incluyendo el Centro de Meteorología espacial del INPE, en Brasil.

Medidas de Mitigación Técnica

La industria aeroespacial ha trabajado en el desarrollo de especificaciones de protección contra radiación atmosférica. La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) ha establecido estándares para prueba de componentes eléctricos contra radiación. SAE/EUROCAE continúa desarrollando especificaciones de ambiente SEE para uso en procesos de desarrollo de sistemas aeronáuticos.

Aunque no es posible garantizar protección completa contra todos los niveles de radiación solar posibles (dada la baja frecuencia de eventos extremos e insuficiencia de datos), la industria ha adoptado un enfoque pragmático similar al usado para otros tipos de amenazas ambientales (campos de radiación de alta intensidad, rayos), demostrando robustez frente al ambiente resultante a pesar de no poder demostrar protección contra amenazas máximas teóricas.

Evaluaciones de Riesgo de Seguridad

OACI y autoridades aeronáuticas como la CAA (UK) han recomendado que operadores realicen evaluaciones de riesgo de seguridad dentro de sus Sistemas de Gestión de Seguridad. Estas evaluaciones deben considerar: vulnerabilidades específicas de la flota operada; rutas operadas y su vulnerabilidad a meteorología espacial (latitud, altitud típica); procedimientos alternativos en caso de pérdida de sistemas primarios; capacidad de la organización para interpretar correctamente información de meteorología espacial; planes de comunicación de crisis en caso de evento severo.

Consideraciones para la Aviación Nacional

Contexto General

La aviación chilena, tanto civil como militar, opera en contextos que presentan particularidades relevantes:

ÁMBITO	EFEECTO
Operaciones en medias y altas latitudes	Las operaciones en el cono sur de Chile y las antárticas (53°S a 90°S) operan en una zona de máxima exposición a efectos de meteorología espacial, debido a la proximidad de uno de los polos magnéticos del planeta, que incrementa la radiación circundante, afectando a la aviónica, sistemas de comunicaciones y de navegación.

Rutas Transpacíficas	Las rutas comerciales hacia Oceanía y Asia, que se caracterizan por amplias zonas sin geografía física o habitable, utilizan sistemas tecnológicos que dependen de capacidades espaciales o de frecuencias, las cuales poseen una alta probabilidad de ser afectadas por la actividad solar, incrementando el riesgo en la seguridad de las operaciones aéreas.
Anomalía del campo electromagnético terrestre	La Anomalía del Atlántico Sur (AAS) es una gran región predominante en Sudamérica, donde el campo magnético de la Tierra es más débil, lo que permite que la radiación espacial se acerque más a la superficie. Lo anterior, incrementa los efectos sobre la aviónica y sistemas aeronáuticos, aumentando las probabilidades de impacto en la seguridad operacional de los vuelos en estas latitudes.

Tabla 5: Ámbitos de operación aérea en Chile susceptibles a la radiación solar.

Aviación militar

En el contexto de las operaciones aéreas de índole militar, incluyendo los anteriores tópicos, se debe considerar lo siguiente:

ÁMBITO	EFEECTO
Uso de armamento guiado	El uso de armamento guiado aire-superficie, en específico, a través de sistemas GNSS, como las JDAM (GBU-31, GBU-32, GBU-38, entre otras), pueden presentar errores de precisión en su trayectoria y sitio de impacto, en caso de que exista una actividad solar de relevancia que, eventualmente, afecte electrónicamente a la red de satélites GNSS (GPS, Glonass, BeiDou o Galileo) o a las señales electromagnéticas que estos emiten. Igualmente, el armamento aire-aire guiado por radar es susceptible a la radiación solar, incrementando la probabilidad de impacto en la precisión, alcance y efectividad. Estos efectos deben ser incluidos en los ciclos de planificación operacional a objeto de optimizar el uso de este tipo de armamento.
Administración del espectro electromagnético	Las frecuencias y aplicaciones militares poseen una amplitud de uso superior a las civiles, aspecto que diversifica las probabilidades de impacto de la actividad solar. En este contexto, las frecuencias con mayor susceptibilidad a la actividad solar se concentran mayoritariamente en las HF (3 MHz a 30 MHz), usadas como respaldo de comunicaciones de larga distancia. Adicionalmente, el espectro de frecuencias UHF (300 MHz a 3 GHz), SHF (3 GHz a 30 GHz) y las EHF (30 GHz a 300 GHz), utilizadas en aplicaciones específicas de telecomunicaciones, en sistemas de detección (radar) y de guerra electrónica; presentan un creciente riesgo de afectación, tanto en los aspectos de alcance, velocidad de propagación, integridad de los datos, dispersión de la señal y sensibilidad de los receptores, aspectos que deben ser considerados como impactos del ambiente operacional en la planificación.
Aviónica	Si bien la electrónica aerotransportada militar posee estándares de calidad superiores a la civil, no es inmune a la actividad solar, en especial en operaciones aéreas que superen los 30.000 pies, en donde la atenuación atmosférica es menor, elevando la posibilidad de fallas temporales o permanentes en los sistemas de la aeronave. Equipamiento como sensores ópticos (FLIR, IR, TIR, etc.), pantallas (MFD) y dispositivos remotamente operados (Ej.: Displays montados en caco de pilotos – HDMS) son aquellos que, por su naturaleza, pueden presentar fallas o interrupciones en su operación.

Tabla 6: Ámbitos de operación militar aérea en Chile susceptibles a la radiación solar.

Recomendaciones Estratégicas

Considerando los efectos de la meteorología espacial expuestos en los párrafos precedentes,

- A Nivel de Regulación: Adopción e implementación de requisitos OACI para información de meteorología espacial en briefing pre-vuelo; desarrollo de normativa específica para operaciones en latitudes altas; establecimiento de procedimientos coordinados con Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) para respuesta a eventos de meteorología espacial.
Para este efecto, se requiere actualizar o complementar, con data de la actividad solar, la información vertida en los Reportes Meteorológicos de Aeródromos (METAR, por sus siglas en inglés), Pronostico de Aeródromo Terminal (TAF, por sus siglas en inglés), Información Meteorológica Significante (SIGMET, por sus siglas en inglés) y Notificación a Aviadores (NOTAM, por sus siglas en inglés); u otras fuentes de información en el contexto meteorológico.
- A Nivel Operacional: Capacitación de tripulaciones en interpretación de avisos de meteorología espacial; desarrollo de procedimientos específicos para pérdida de múltiples sistemas de comunicación y navegación; consideración de sistemas alternativos de comunicación para operaciones antárticas o de altas latitudes.
- A Nivel Táctico: Evaluación de vulnerabilidad de flotas específicas; coordinación con fabricantes de aeronaves respecto a procedimientos post-evento; monitoreo de evolución del ciclo solar 25, planificaciones alternativas de misiones, procedimientos ampliados de emergencias y recuperación, etc.

Reflexiones Finales

La meteorología espacial constituye uno de los desafíos emergentes más relevantes para la seguridad operacional aeronáutica del siglo XXI. A diferencia de los fenómenos meteorológicos atmosféricos tradicionales, sus efectos se originan fuera del entorno terrestre y poseen la capacidad de afectar de manera simultánea sistemas tecnológicos distribuidos a escala global, comprometiendo la disponibilidad, integridad y confiabilidad de infraestructuras críticas sobre las cuales descansa la aviación moderna. En consecuencia, su incorporación dentro de los procesos de evaluación de riesgos, planificación operacional y toma de decisiones deja de representar una consideración complementaria para transformarse en un requisito inherente a la gestión integral de la seguridad operacional.

La creciente digitalización de la aviación, la miniaturización de los sistemas electrónicos, la dependencia de servicios espaciales de navegación, comunicaciones y vigilancia, junto con el incremento de los niveles de automatización de las aeronaves, han generado un entorno operacional considerablemente más eficiente, pero también más susceptible a perturbaciones originadas por la actividad solar. Esta realidad modifica la concepción tradicional del ambiente operacional aeronáutico, extendiéndolo desde la atmósfera terrestre hacia el dominio espacial, donde variables físicas ajenas al control humano pueden condicionar el desempeño de plataformas, sensores, enlaces de datos y sistemas críticos para la conducción segura del vuelo.

Los antecedentes históricos analizados demuestran que los eventos de meteorología espacial no constituyen escenarios meramente teóricos. Episodios como el Evento Carrington de 1859, las tormentas geomagnéticas de 1989 y 2003, el incidente del sistema de control aéreo sueco en 2015 y

la pérdida de satélites Starlink en 2022; evidencian que la actividad solar posee la capacidad de generar consecuencias operacionales, económicas y estratégicas de gran magnitud. A ello se suma la evidencia de fenómenos extremos asociados a los denominados Eventos Miyake, cuya ocurrencia durante los últimos milenios sugiere la posibilidad de episodios de radiación solar significativamente superiores a aquellos registrados durante la era instrumental. Aunque la frecuencia e intensidad de estos eventos continúan siendo objeto de investigación científica, su sola posibilidad justifica el desarrollo de modelos de resiliencia capaces de enfrentar escenarios de muy baja probabilidad, pero de consecuencias potencialmente sistémicas.

Desde la perspectiva de la gestión del riesgo, la respuesta no puede limitarse exclusivamente al fortalecimiento de las capacidades de pronóstico. La incertidumbre inherente a la dinámica solar obliga a adoptar un enfoque basado en resiliencia, redundancia tecnológica, procedimientos operacionales robustos, entrenamiento especializado y procesos permanentes de vigilancia del ambiente espacial. En este contexto, la incorporación de la información de meteorología espacial en los procesos de planificación pre-vuelo, la integración de procedimientos específicos dentro de los Sistemas de Gestión de Seguridad (SMS), el fortalecimiento de la coordinación entre autoridades aeronáuticas, organismos meteorológicos y operadores, así como el desarrollo de tecnologías con mayor tolerancia a la radiación, constituyen elementos fundamentales para reducir la vulnerabilidad de la aviación frente a este tipo de amenazas.

Para Chile, este desafío adquiere una relevancia estratégica aún mayor debido a sus características geográficas y operacionales. La proyección hacia el continente antártico, el incremento de las operaciones transpacíficas, la influencia de la Anomalía del Atlántico Sur y el creciente desarrollo de capacidades espaciales nacionales configuran un escenario donde los efectos de la meteorología espacial deben ser considerados como una variable permanente del ambiente operacional. En consecuencia, la integración de esta disciplina dentro de la doctrina aeronáutica, la formación de tripulaciones, la planificación de misiones y el diseño de políticas públicas constituye una oportunidad para fortalecer la resiliencia del sistema aeronáutico nacional y reducir la exposición frente a riesgos de naturaleza global.

Finalmente, la evolución tecnológica continuará incrementando la dependencia de la aviación respecto de infraestructuras espaciales y sistemas electrónicos altamente sensibles, haciendo que la interacción entre la actividad solar y las operaciones aéreas adquiera una importancia creciente durante las próximas décadas. En este escenario, comprender la meteorología espacial no debe considerarse únicamente como un desafío científico, sino como una capacidad estratégica indispensable para la seguridad, continuidad y sostenibilidad del transporte aéreo moderno. La consolidación de una cultura organizacional basada en el conocimiento del ambiente espacial, sustentada en evidencia científica, cooperación internacional e innovación tecnológica, permitirá transformar un riesgo natural inevitable en un fenómeno gestionable, fortaleciendo la capacidad de adaptación de la aviación frente a un entorno operacional cada vez más complejo y multidominio.

Referencias

- Cannon, P. S., Barclay, L., Buxton, J., Chapman, C., Cree, B., Dyer, C., ... & Wise, A. (2013a). *Extreme space weather: Impacts on engineered systems - a summary report*. Royal Academy of Engineering, Londres.
- Cannon, P. S., Barclay, L., Buxton, J., Chapman, C., Cree, B., Dyer, C., ... & Wise, A. (2013b). *Extreme space weather: Impacts on engineered systems*. Royal Academy of Engineering, Londres.
- Civil Aviation Authority. (2020). *Impacts of space weather on aviation (CAP 1428)*. Civil Aviation Authority, Reino Unido.
- European Union Aviation Safety Agency. (2012). *Single event effects (SEE) on aircraft systems caused by cosmic rays (SIB 2012-10)*. EASA, Colonia.
- Hathaway, D. H. (2010). *The solar cycle*. Living Review in Solar Physics, 7, 1-63.
- International Civil Aviation Organization. (2018). *Amendment 78 to ICAO Annex 3. Meteorological Service for International Air Navigation*.
- International Civil Aviation Organization. (2019). *Manual on space weather information in support of international air navigation (Doc 10100)*. ICAO, Montreal.
- International Civil Aviation Organization. (2023). *Procedures for air navigation services - Air traffic management (Doc 4444)*. ICAO, Montreal.
- Met Office. (2024). *Space weather operations centre*. Retrieved from <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/space-weather>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2024). *Space weather prediction center*. Retrieved from <https://www.swpc.noaa.gov/>
- Österberg, K., & Pusa, R. (2019). *ICAO space weather service for aviation*. PECASUS Consortium.
- Public Health England. (2020). *Cosmic radiation advisory group: Guidance on the protection of air crew from the effects of solar and cosmic radiation*. PHE, Londres.
- Sepúlveda, Juan. (2024). *Integración del dominio espacial a las operaciones aéreas en la Fuerza Aérea de Chile*. Trabajo de Investigación para optar al Título de Oficial de Estado Mayor. Academia de Guerra Aérea, Las Condes
- Statutory Instrument Air Navigation (2019). *Cosmic Radiation: Protection of Air Crew and Space Crew and Consequential Amendments) Order 2019*. Her Majesty's Stationery Office, Reino Unido.
- Taleb, Nassim. (2007). *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*. Random House, Nueva York
- UK Space Agency. (2015). *Space weather preparedness strategy*. Cabinet Office, Reino Unido.
- United Kingdom Ministry of Defence. (2017). *National risk register of civil emergencies*. Cabinet Office, Londres.