

Ciencias de la Tierra

Artículo original

Actividad solar y clima espacial: desafíos científicos y oportunidades para el desarrollo en Colombia

Solar activity and space weather: Scientific challenges and opportunities for development in Colombia

✉ Santiago Vargas-Domínguez¹, ✉ Jeffersson Andrés Agudelo-Rueda², ✉ Juan Camilo Buitrago-Casas³, ✉ Hernán Darío Guerrero-Caguasango¹, ✉ Benjamín Calvo-Mozo¹

¹ Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

² Department of Mathematics, Physics, and Electrical Engineering, Northumbria University, UK

³ Space Sciences Laboratory, UC Berkeley, CA, USA

Artículo de posesión de Santiago Vargas-Domínguez como miembro correspondiente de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

Bajo la influencia de la actividad solar, el clima espacial representa un factor crítico para la estabilidad e integridad de las infraestructuras tecnológicas modernas. En este artículo se presenta una revisión integral sobre el tema, abordando la relación entre los fenómenos solares y sus efectos sobre sectores estratégicos como las telecomunicaciones, la aviación, la energía y la economía global. Se analizan eventos históricos relevantes, como la tormenta de Carrington de 1859 y los eventos Miyake, así como impactos recientes asociados al ciclo solar 25. Además, se examina la vulnerabilidad de Colombia frente a estos fenómenos y se propone la creación del Servicio Colombiano de Clima Espacial (SCCE) como una iniciativa clave para fortalecer la resiliencia nacional ante eventos solares extremos y promover el desarrollo científico y tecnológico del país en el ámbito espacial.

Palabras clave: Clima espacial; Actividad solar; Magnetosfera; Tormentas geomagnéticas; Telecomunicaciones; Economía; Colombia, SCCE.

Abstract

Space weather, driven by solar activity, poses a significant threat to the stability and reliability of modern technological infrastructures. This article offers a comprehensive review of the topic, examining the connection between solar phenomena and their effects on critical sectors such as telecommunications, aviation, energy, and the global economy. Historical events (including the 1859 Carrington storm and Miyake events) are analyzed alongside recent disturbances linked to Solar Cycle 25. Colombia's specific vulnerability to these events is also discussed, along with a strategic proposal for establishing the Colombian Space Weather Service (SCCE) as a critical initiative to enhance national resilience to extreme solar activity and foster technological and scientific progress in space-related fields.

Keywords: Space weather; Solar activity; Magnetosphere; Geomagnetic storms; Telecommunications; Economy; Colombia; SCCE.

Introducción

El clima espacial comprende las condiciones dinámicas del medio interplanetario y de las capas superiores de la atmósfera terrestre, generadas principalmente por la interacción entre la radiación electromagnética, el plasma y las partículas energéticas del Sol con el campo magnético y la atmósfera de la Tierra (Schwenn, 2006; Rodríguez, 2024).

Citación: Vargas-Domínguez S, *et al.* Actividad solar y clima espacial: desafíos científicos y oportunidades para el desarrollo en Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2026 Feb 13. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.3286>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Santiago Vargas Dominguez;
svargasd@unal.edu.co

Recibido: 28 de agosto de 2025

Aceptado: 15 de noviembre de 2025

Publicado en línea: 13 de febrero de 2026



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Los fenómenos más relevantes relacionados con el clima espacial incluyen el viento solar, las eyecciones de masa coronal (*coronal mass ejection*, CME), las fulguraciones solares y las tormentas geomagnéticas, todos ellos con potencial para afectar significativamente las tecnologías modernas (Eastwood *et al.*, 2017). Su interacción con la magnetosfera (campo magnético que rodea y protege la Tierra) puede inducir corrientes geomagnéticas (*geomagnetically induced currents*, GIC) que comprometen redes eléctricas, sistemas de navegación y telecomunicaciones (Lloyd's & AER, 2013).

A lo largo de la historia se han documentado eventos extremos capaces de alterar drásticamente las infraestructuras tecnológicas. La tormenta geomagnética de 1859, conocida como el evento Carrington, generó auroras en latitudes ecuatoriales (Figura 1) y provocó fallas generalizadas en las redes telegráficas (Tsurutani *et al.*, 2019; Hayakawa *et al.*, 2024). En Colombia se reportaron observaciones de auroras en Montería durante dicho evento (Moreno-Cárdenas *et al.*, 2016). Más recientemente, la tormenta de 1989 provocó el colapso de la red eléctrica de Quebec, y la tormenta de Halloween de 2003 afectó satélites y obligó a desviar vuelos debido a los niveles peligrosos de radiación en la atmósfera (National Research Council, 2008).

En la actualidad atravesamos el punto máximo del ciclo solar 25, cuya evolución hasta el momento se mantiene dentro de los parámetros de un ciclo típico (González-Esparza, 2022). Pero, incluso bajo estas condiciones consideradas normales, el riesgo de eventos extremos se ha intensificado, y con él, la vulnerabilidad de las infraestructuras tecnológicas críticas, en particular los sistemas satelitales de navegación (por ejemplo, el Sistema de Posicionamiento Global o GPS), comunicaciones y observación terrestre (EU Council, 2023). Este panorama subraya la necesidad urgente de fortalecer, aún más, las capacidades globales de monitoreo y desarrollar estrategias de mitigación frente a los efectos del clima espacial.

Por su ubicación ecuatorial, Colombia enfrenta desafíos específicos. Por ejemplo, se ha evidenciado un aumento de la radiación ultravioleta durante los máximos solares, lo que incrementa riesgos para la salud, como el cáncer de piel (Polefka *et al.*, 2012). Además, las interrupciones en la navegación y las telecomunicaciones tienen el potencial de afectar sectores críticos como la aviación, la gestión de emergencias y la agricultura de precisión.

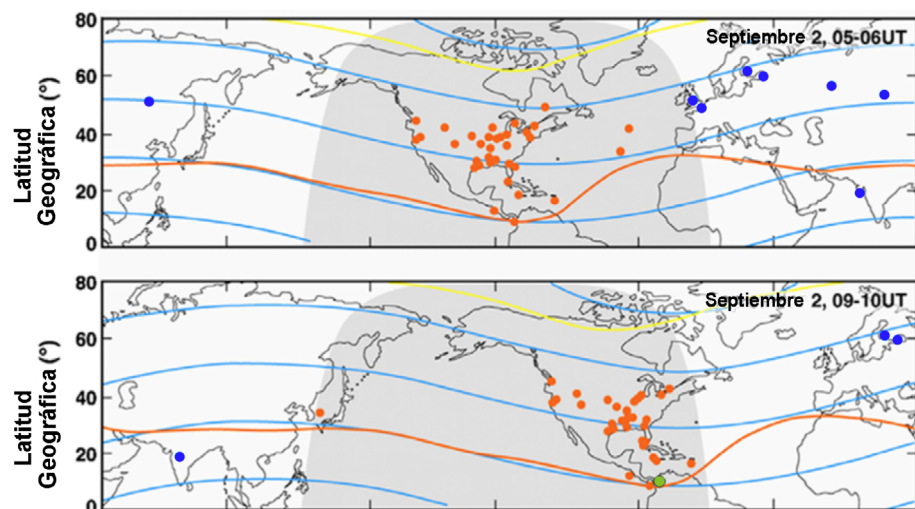


Figura 1. Mapa con los lugares donde se observó y reportó la gran actividad auroral el 2 de septiembre de 1859 (puntos naranjas), comenzando a las 3:00 UT según lo reportado por Green y Boardsen (2005). Se incluyen estaciones de magnetómetro (puntos azules), la latitud del dipolo geomagnético (líneas azules), la extensión mínima y la máxima del óvalo auroral (líneas amarilla y naranja, respectivamente). El punto verde señala la ubicación de Montería (Colombia) donde se avistó la aurora (Moreno-Cárdenas *et al.*, 2016).

(Young, 2009). A diferencia de países como Brasil, Argentina, México y Chile, Colombia aún no cuenta con un sistema nacional de monitoreo del clima espacial, lo cual la deja en una situación de mayor vulnerabilidad frente a eventos de clima espacial extremos. Contar con un sistema propio permitiría evaluar eventuales impactos locales en nuestras regiones que los sistemas internacionales difícilmente pueden cubrir.

Ante esta realidad, se plantea la creación del Servicio Colombiano de Clima Espacial (SCCE), una plataforma destinada al monitoreo, alerta temprana de eventos solares extremos y evaluación de sus potenciales efectos directos sobre el territorio nacional. Esta iniciativa no solo busca reducir la vulnerabilidad de infraestructuras críticas (como el sistema interconectado nacional de energía, o los servicios de navegación aérea de la Aeronáutica Civil), sino también fortalecer la capacidad científica y tecnológica del país mediante sinergias entre instituciones académicas, científicas y gubernamentales.

En este artículo se hace una revisión de los principales fenómenos del clima espacial, sus implicaciones para la tecnología y la economía, y el papel que puede desempeñar Colombia en su estudio y mitigación. Asimismo, se presenta la propuesta del SCCE como una estrategia clave para avanzar en soberanía tecnológica y resiliencia frente a amenazas solares extremas.

El Sol y la actividad solar

Como fuente principal de energía del sistema solar, el Sol desempeña un rol principal en el contexto del clima espacial. Su comportamiento, en la parte alta de su atmósfera, está determinado por procesos magneto-hidrodinámicos en los que la interacción entre el plasma y los campos magnéticos solares da lugar a diversos fenómenos que influyen sobre el entorno interplanetario (Priest, 2014). La interacción de estas emisiones con el campo magnético terrestre constituye la base del estudio del clima espacial y determina sus impactos sobre infraestructuras tecnológicas y la atmósfera terrestre (Figura 2).

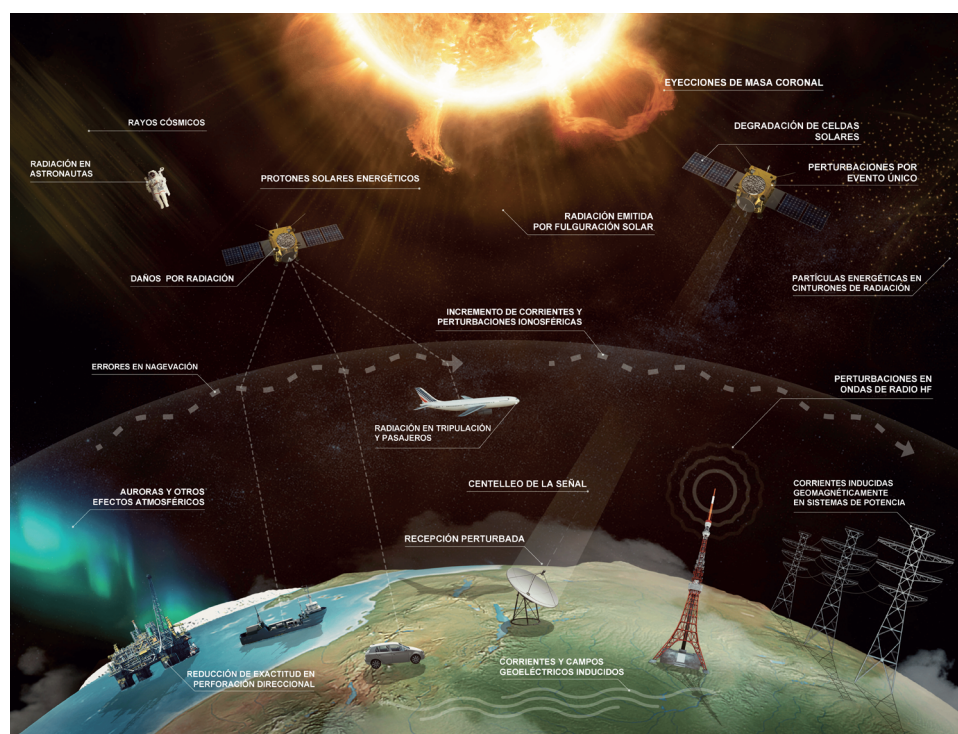


Figura 2. Componentes y efectos del clima espacial en las tecnologías en tierra y satelitales, así como en los seres humanos y la exploración espacial. Imagen adaptada de ESA – Science Office (2018)

La actividad solar presenta una variabilidad cíclica con periodos de aproximadamente 11 años, conocidos como ciclos solares, que históricamente se han caracterizado por el número de manchas solares. Estos ciclos fueron identificados inicialmente por Heinrich Schwabe en el siglo XIX, y formalizados por Rudolf Wolf mediante el índice que lleva su nombre (**Hathaway**, 2015). No obstante, si se considera la inversión del campo magnético global del Sol, el ciclo completo alcanza en realidad una periodicidad de 22 años, conocido como ciclo de Hale. Durante los máximos solares, el aumento en la cantidad de manchas se asocia con una mayor frecuencia e intensidad de las fulguraciones solares y las CME, fenómenos que resultan de la liberación súbita de energía magnética acumulada en la atmósfera solar (**Toriumi & Wang**, 2019).

Las fulguraciones solares (**Figura 3**) son explosiones breves pero intensas que liberan cantidades enormes de energía, de hasta 10^{25} julios, en cuestión de minutos (equivalentes a unos 10^{20} vatios), que se manifiestan principalmente en un aumento de la radiación electromagnética, la energización de partículas eléctricamente cargadas y el aumento de la temperatura local (**Benz**, 2017). El aumento de la radiación electromagnética se presenta en todo el espectro, con emisiones detectables desde las ondas de radio y el espectro visible hasta el ultravioleta extremo (EUV), los rayos X e, incluso, los rayos gamma. Estas emisiones pueden generar perturbaciones significativas en la ionosfera (capa ionizada de la atmósfera), produciendo apagones en las comunicaciones de radio de alta frecuencia y afectando otros sistemas de telecomunicaciones.

Las CME, por su parte, son eyecciones masivas de plasma magnetizado que pueden alcanzar velocidades de hasta 3.000 km/s. Cuando se dirigen hacia la Tierra y su campo magnético está orientado en dirección opuesta al campo terrestre, pueden acoplarse de manera eficiente con la magnetosfera y generar tormentas geomagnéticas (**Zhang et al.**, 2007). La intensidad de estas tormentas se cuantifica mediante el índice Dst (*Disturbance Storm Time*), que mide la disminución del campo magnético terrestre en regiones ecuatoriales.

Otro componente fundamental es el viento solar, un flujo continuo de partículas cargadas, principalmente protones y electrones, que se origina en la corona solar (**Parker**, 1958), con una velocidad media de entre 300 y 800 km/s. Cuando el viento solar transporta estructuras de campo magnético intenso, como las nubes magnéticas, puede desencadenar tormentas geomagnéticas graves.

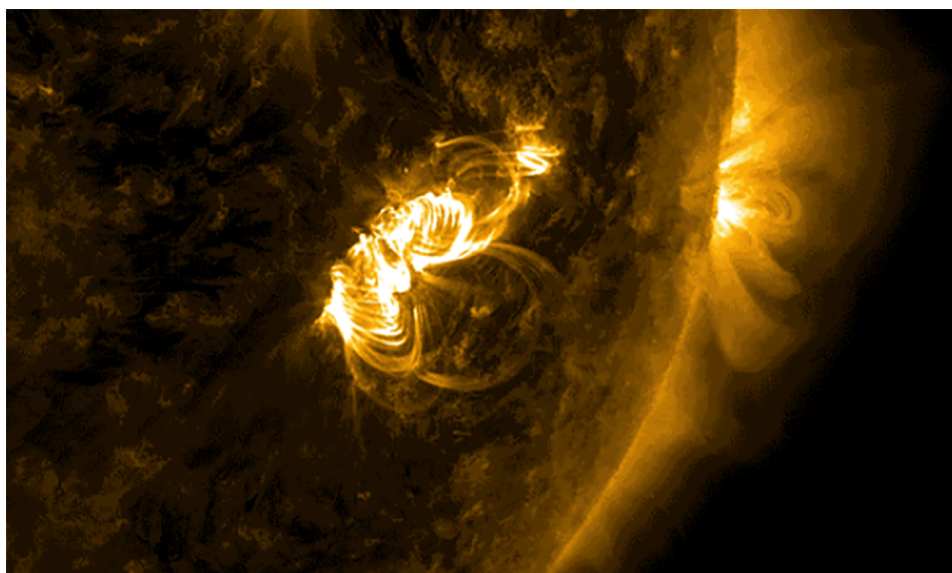


Figura 3. Fulguración solar de clase X del 6 de septiembre de 2017. Imagen captada por el satélite Solar Dynamics Observatory de la NASA. (NASA/GSFC/SDO, 2017)

En las últimas décadas la comprensión de estos fenómenos ha sido posible gracias a misiones espaciales como las del Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), el Solar Dynamic Observatory (SDO) y la Parker Solar Probe (PSP), que han permitido caracterizar en detalle la estructura del campo magnético solar y su evolución temporal (Howard *et al.*, 2008, Velli *et al.*, 2020, Guo *et al.*, 2021).

Además del ciclo de 11 años, la actividad solar presenta variaciones seculares, como los mínimos de Maunder (1645–1715) y de Dalton (1790–1830), durante los cuales la actividad disminuyó notablemente, coincidiendo con periodos fríos como la Pequeña Edad de Hielo (Usoskin, 2017). Por otra parte, los eventos Miyake, detectados en los anillos de los árboles mediante registros de carbono-14, evidencian la existencia de supertormentas solares (Miyake *et al.*, 2012).

El seguimiento continuo de la actividad solar y su impacto en la Tierra es esencial para garantizar la resiliencia de las infraestructuras críticas y la seguridad de misiones espaciales actuales y futuras.

Impacto del clima espacial en la tecnología, la economía y la sociedad

El clima espacial se ha convertido en un factor de creciente relevancia debido a la gran dependencia de la sociedad moderna en infraestructuras tecnológicas vulnerables a eventos solares extremos. Desde interrupciones en redes eléctricas y sistemas de navegación hasta pérdidas económicas de miles de millones de dólares, los efectos de estos fenómenos pueden escalar rápidamente a nivel global (Oughton *et al.*, 2017; NOAA Space Weather Prediction Center, Swedish Civil Contingencies Agency and UK Met Office, 2016). El aumento de la actividad del Sol durante el ciclo solar 25 ha evidenciado el potencial disruptivo del clima espacial sobre sectores críticos como las telecomunicaciones, la aviación y la energía.

Impacto en infraestructuras tecnológicas

Las redes eléctricas y el Sistema Global de Navegación por Satélite (*Global Navigation Satellite System*, GNSS) son particularmente sensibles a perturbaciones solares. Los satélites en todas las órbitas pueden sufrir daños graves en sus componentes electrónicos debido a la radiación ionizante, a la acumulación de carga inducida por partículas energéticas o a anomalías en sus sistemas de control (Baker *et al.*, 2004). Un ejemplo notable fue la falla de la constelación Starlink en febrero de 2022 (Figura 4), cuando una tormenta geomagnética causó la expansión de la termosfera (capa de la atmósfera entre unos 80 y 600 km de altitud donde la temperatura aumenta por la absorción de radiación solar) y generó un aumento del arrastre atmosférico que provocó la reentrada prematura de 40 satélites (Fang *et al.*, 2022; NOAA, 2022). Durante eventos recientes del ciclo solar 25, se reportaron múltiples fallas en rutas polares, donde la cobertura terrestre de navegación aérea es limitada (Coster & Erickson, 2022).

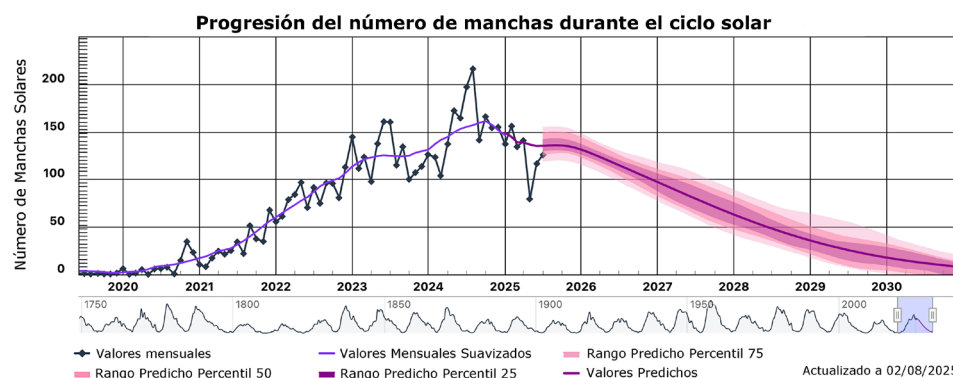


Figura 4. Escombros espaciales sobre Puerto Rico producto de la caída de los satélites de Starlink el 7 de febrero de 2022. Fuente: Sociedad de Astronomía del Caribe (SAC)

Impacto en redes eléctricas y sistemas energéticos

Uno de los riesgos más graves del clima espacial es la inducción de corrientes geomagnéticas (GIC) en redes eléctricas, que son capaces de sobrecargar transformadores y provocar apagones masivos. La tormenta geomagnética de marzo de 1989 colapsó la red de Hydro-Québec, afectando a seis millones de personas (**Boteler, 2019**). Investigaciones recientes muestran que incluso regiones de latitud media, como América del Sur, presentan mayor vulnerabilidad de la que se suponía (**Lanzerotti *et al.*, 2021**) por la presencia de numerosas redes eléctricas de gran alcance, como se muestra en la **Figura 5** para el caso de Colombia.

Durante la tormenta del 10 de mayo de 2024, vinculada a una CME de alta velocidad, se observaron anomalías en sistemas de distribución eléctrica en América del Norte y Europa (**Hayakawa *et al.*, 2024**). En Colombia los efectos de este tipo de eventos han sido poco estudiados, pero se sabe que hay afectaciones, por ejemplo, en sistemas de navegación y en vuelos de drones (comunicación personal con operadores de drones). Estos casos y los daños documentados en transformadores durante tormentas geomagnéticas pasadas, como en Salem, Estados Unidos, en 1989, y en Sudáfrica tras la tormenta de Halloween de 2003 (**Figura 6**), refuerzan la necesidad de incorporar tecnologías del tipo de los transformadores resistentes a las GIC y de establecer protocolos de desconexión preventiva ante eventos graves.

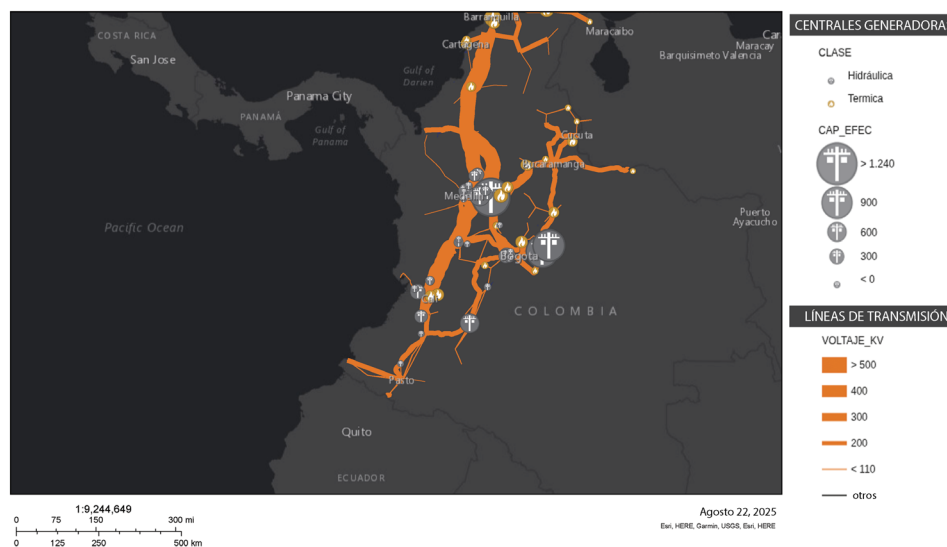


Figura 5. Mapa de las centrales generadoras y líneas de transmisión eléctrica en Colombia. Los círculos señalan las centrales generadoras de acuerdo a su capacidad efectiva y en naranja se muestran las líneas de transmisión según el voltaje. Fuente: DNP, 2010. Creado en ArcGIS para esta publicación.



Figura 6. Daños en transformadores asociados a tormentas geomagnéticas. A la izquierda, daño permanente en el transformador de la Planta Nuclear de Salem durante la tormenta del 13 de marzo de 1989 (**Thompson *et al.*, 2010**). A la derecha, un transformador en Sudáfrica que falló semanas después de la tormenta de Halloween de 2003 (Crédito: PSE&G).

Impacto económico y comercial

El impacto económico de un evento solar extremo podría ser devastador. Se estima que un evento de magnitud comparable al de Carrington podría causar pérdidas superiores a los dos billones de dólares solo en el primer año de recuperación (**Eastwood et al.**, 2017). En marzo de 2023 una tormenta geomagnética moderada generó interrupciones en sistemas de navegación de aerolíneas comerciales, afectando vuelos transatlánticos y ocasionando retrasos operativos (**ESA**, 2023). Estos casos evidencian la fragilidad de sectores económicos altamente tecnificados frente a la variabilidad solar.

Impacto en la salud humana y la exploración espacial

La radiación solar y cósmica también representa un riesgo para la salud humana, especialmente en vuelos a gran altitud y en misiones espaciales. Durante eventos de radiación solar, el flujo de protones energéticos puede elevar las dosis recibidas por pasajeros, tripulaciones y astronautas (**Mertens et al.**, 2018). La tormenta de octubre de 2021 obligó a suspender temporalmente rutas aéreas polares debido al incremento en los niveles de radiación estratosférica (**NOAA SWPC**, 2021).

En el contexto de la exploración espacial, misiones como Artemis o las futuras expediciones a Marte, deberán incorporar refugios contra radiación y sistemas de monitoreo en tiempo real para proteger la integridad de las tripulaciones ante eventos solares extremos.

Impacto en Colombia y la necesidad de un sistema de alerta

Por su ubicación cercana al ecuador magnético, Colombia, experimenta efectos ionosféricos particulares. Durante tormentas geomagnéticas se intensifican fenómenos como el electrochorro ecuatorial (EEJ) y la aparición de burbujas de plasma en la ionosfera, lo cual interfiere con la propagación de señales GNSS, afecta las telecomunicaciones y puede comprometer la operación de redes eléctricas (**Moldwin & Tsu**, 2016; **Pimenta et al.**, 2001).

Esta vulnerabilidad subraya la necesidad urgente de establecer un sistema nacional de monitoreo y alerta temprana. La creación y consolidación del SCCE permitiría anticipar los efectos de eventos extremos, proteger sectores estratégicos como la aviación, la energía y las comunicaciones, y posicionar a Colombia como un actor regional en la mitigación de amenazas solares.

Dinámica ionosférica ecuatorial y burbujas de plasma

Uno de los fenómenos ionosféricos más relevantes en regiones ecuatoriales es la formación de burbujas de plasma ecuatoriales (*Equatorial Plasma Bubbles*, EPB). Estas estructuras se originan en la región F de la ionosfera, principalmente después del atardecer, y se caracterizan por ser zonas con un notable agotamiento en la densidad electrónica local. Su formación responde a inestabilidades del tipo Rayleigh–Taylor, generadas por gradientes de densidad y campos eléctricos ascendentes que perturban el equilibrio del plasma más denso en altitudes más bajas (**Bhattacharyya**, 2022).

Las EPB pueden extenderse cientos de kilómetros en altitud y longitud, y su presencia está modulada por factores como la hora local, la longitud geográfica, la estación del año, el ciclo solar y la actividad geomagnética. Durante periodos de alta actividad solar, su frecuencia e intensidad aumentan, y pueden aparecer múltiples estructuras simultáneas que afectan extensas regiones. Estas irregularidades generan fenómenos como el centelleo, es decir, fluctuaciones rápidas en la intensidad de las señales GNSS, lo que puede degradar la precisión del posicionamiento o incluso provocar pérdida total de señal (**Pimenta et al.**, 2001; **Smith & Heelis**, 2017).

Estudios recientes indican que la aparición de las EPB no depende exclusivamente del ciclo solar, sino también de factores como la dinámica del EEJ, la propagación de ondas de gravedad desde la atmósfera inferior y la orientación del campo magnético interplanetario durante tormentas geomagnéticas (**González**, 2025). Estas complejidades hacen que los modelos ionosféricos desarrollados para latitudes medias no resulten adecuados para representar con precisión la ionosfera ecuatorial.

En el caso colombiano, la presencia recurrente de estas burbujas tiene implicaciones directas porque generan fuertes irregularidades en la densidad electrónica de la ionosfera (Kepkar *et al.*, 2020), que pueden distorsionar o interrumpir la propagación de señales de radio y GNSS. Por ello, sectores como la aviación, la navegación marítima, la agricultura de precisión y los sistemas de telecomunicaciones que utilizan enlaces satelitales son particularmente vulnerables. A pesar de este impacto potencial, la detección sistemática y la caracterización de las EPB en Colombia siguen siendo limitadas. Si bien existen iniciativas que han permitido observar variaciones en el contenido total de electrones (*Total Electron Content*, TEC) (Palacios-Caicedo, 2010), aún falta una estrategia nacional coordinada orientada al monitoreo ionosférico con fines predictivos y de evaluación de potenciales efectos.

Para mejorar esta capacidad, es fundamental incorporar instrumentación especializada, como receptores GNSS de doble frecuencia, digisondas, cámaras de luminiscencia atmosférica y magnetómetros de alta resolución. La integración de estas observaciones dentro del SCCE permitiría el desarrollo de modelos ionosféricos regionales más precisos y la emisión de alertas tempranas ante condiciones adversas, fortaleciendo así la seguridad tecnológica nacional.

El ciclo solar 25

El ciclo solar 25 (CS25) comenzó en diciembre de 2019 y desde sus primeras fases ha mostrado un comportamiento más activo de lo predicho inicialmente. Aunque las proyecciones de la NASA y la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) anticipaban un ciclo de intensidad comparable a la del CS24 (uno de los más débiles en más de un siglo), las observaciones recientes han revelado un aumento notable tanto en la frecuencia como en la intensidad de eventos eruptivos, lo que ha incrementado el impacto del clima espacial sobre sistemas tecnológicos en la Tierra y en el espacio (Yazev *et al.*, 2023). En la **Figura 7** se muestra la progresión observada y la predicha del número de manchas solares durante el CS25 según el Centro de Predicción de Clima Espacial de la NOAA. La línea magenta indica la predicción principal, en tanto que las regiones sombreadas representan la incertidumbre asociada a dicha predicción mediante un ajuste no lineal de los valores mensuales del número de manchas solares observado. Las áreas sombreadas corresponden a la incertidumbre en la predicción. Se espera que el ciclo solar 26 comience en algún momento entre enero de 2029 y diciembre de 2032, aunque aún no hay predicciones para dicho ciclo.

Las predicciones de ciclos solares son de gran relevancia para diversas agencias e industrias. El ciclo solar influye, por ejemplo, en la vida útil de los satélites en órbita baja, ya que la fricción atmosférica que experimentan depende de la actividad solar. Un

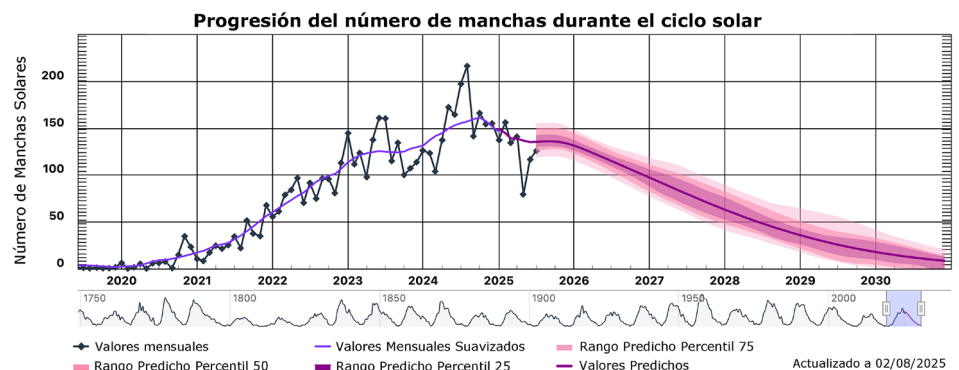


Figura 7. Progresión del número de manchas solares durante el ciclo solar 25 (gráfico principal superior) y durante los últimos ciclos desde el año 1750 (gráfico inferior). La línea magenta muestra la predicción principal, en tanto que las zonas sombreadas representan la incertidumbre asociada (25, 50 y 75 % de probabilidad). Adaptado de NOAA

máximo solar más intenso acorta la vida útil de los satélites, mientras que uno más débil la prolonga. Asimismo, las predicciones permiten estimar la frecuencia de fenómenos de clima espacial de todo tipo, desde apagones de radio hasta tormentas geomagnéticas y de radiación, siendo herramientas clave para anticipar su impacto en los próximos años.

Uno de los episodios más intensos del CS25 ocurrió en mayo de 2024, cuando una secuencia de erupciones solares y CME dio lugar a una de las tormentas geomagnéticas más graves registradas en décadas. Estas tormentas generaron perturbaciones en las comunicaciones satelitales, errores en las señales GPS, fallas en los satélites de órbita baja, como los de la constelación Starlink, y permitió la observación de auroras en latitudes inusualmente bajas.

A principios de mayo de 2024 emergió la región activa NOAA 13664 (panel superior de la **Figura 8**), que acumuló más de 10^{26} J de energía magnética libre, convirtiéndose en una de las más activas del ciclo.

Entre el 8 y el 15 de mayo, la región produjo 12 fulguraciones de clase X, entre ellas, la X8.7 (14 de mayo de 2024), la fulguración más intensa del CS25 hasta la fecha (finales de 2025); la X5.8 (11 de mayo de 2024), acompañada de una CME que impactó directamente la Tierra, y la X3.9 (10 de mayo de 2024), asociada con la primera gran eyección que alcanzó el planeta.

Las CME generadas durante mayo de 2024 viajaron a velocidades cercanas a los 2.000 km/s y transportaron campos magnéticos intensos que alteraron significativamente el entorno interplanetario.

Impactos en la magnetosfera

A las 17:05 UTC del 10 de mayo de 2024 se observó una compresión extrema de la magnetopausa, que redujo su distancia a tan solo 5,04 radios terrestres (R_E), situándose por debajo de la órbita de los satélites geoestacionarios. El índice Dst alcanzó un valor mínimo

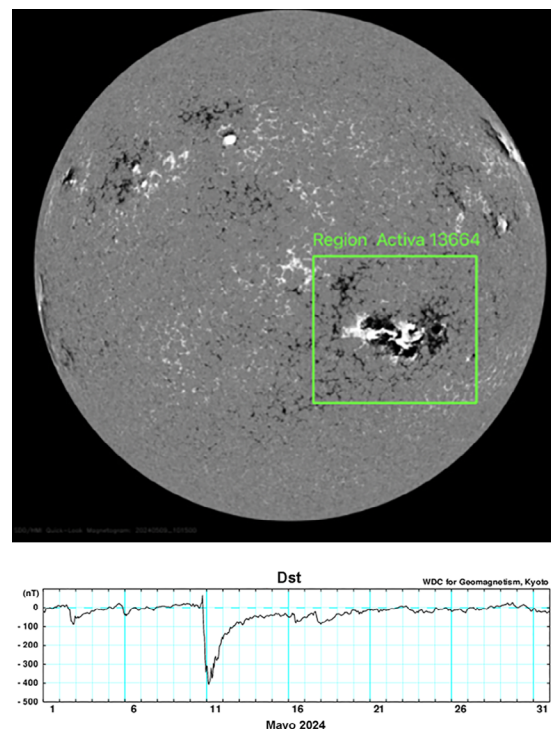


Figura 8. Panel superior: magnetograma en la línea de visión del disco solar donde se resalta la región activa NOAA 13664 en mayo de 2024. Fuente: NASA/SDO. Panel inferior: índice Dst provisional durante mayo de 2024. Fuente: WDC for Geomagnetism, Kyoto, 2024.

de -412 nT (ver panel inferior de la **Figura 8**), lo que llevó a clasificar la tormenta como extrema, comparable a las históricas de marzo de 1989 y octubre de 2003. Además, los índices AE (correspondiente al electrojet auroral) y AL (el auroral más bajo), que reflejan la intensidad de las corrientes aurales, alcanzaron valores de 4098 nT y -3797 nT, respectivamente, evidenciando una expansión significativa del óvalo auroral y un fuerte acoplamiento entre el viento solar y la magnetosfera.

Auroras en latitudes bajas y fallas tecnológicas

La magnitud del evento permitió la observación de auroras incluso en regiones como España, Italia y México. En particular, se registró una aurora roja sobre el volcán de Colima en México (**Figura 9**), una manifestación extremadamente rara en esas latitudes.

Los efectos tecnológicos fueron inmediatos: múltiples satélites de navegación experimentaron errores de sincronización y degradación de señal; los satélites en órbita baja reportaron desviaciones inesperadas en sus trayectorias debido a la expansión de la termosfera, y varios sistemas GNSS fueron afectados en aeronaves y embarcaciones. La tormenta también desencadenó un aumento en la radiación cósmica en la atmósfera terrestre, activando la alerta por evento de nivel del suelo (GLE #74), lo cual pone de relieve su intensidad (González-Esparza *et al.*, 2024; Kwak *et al.*, 2024).

Relevancia para la predicción y mitigación

Las tormentas geomagnéticas de mayo de 2024 son, hasta ahora (finales de 2025), las más graves del CS25 y constituyen un caso de estudio fundamental para mejorar las capacidades de pronóstico y respuesta ante fenómenos solares extremos. Las visualizaciones generadas con modelos como MAGE han permitido simular en detalle la interacción Sol-Tierra durante este episodio, evidenciando la importancia de combinar datos satelitales con modelos físicos de alta resolución (imagen inferior de la **Figura 9**).



Figura 9. Imagen superior: aurora roja observada sobre el volcán de Colima, México. Crédito de la imagen: R. Arámbula. Tomado de González-Esparza *et al.*, (2024). Imagen inferior: respuesta geomagnética a la tormenta solar de mayo de 2024. Visualización generada con el modelo MAGE, que simula la interacción entre la tormenta geomagnética del 10 al 11 de mayo de 2024 y la magnetosfera terrestre. Se muestran líneas de campo magnético alrededor de la Tierra (naranja a púrpura), trazadores de la velocidad del viento solar (azul) y corrientes inducidas (verde). Crédito: NASA Scientific Visualization Studio / NASA DRIVE Science Center for Geospace Storms

Hacia la consolidación de un Servicio Colombiano de Clima Espacial - (SCCE)

Si bien es un fenómeno de escala global, el clima espacial tiene efectos locales que dependen en gran medida de la geografía, el entorno ionosférico y la infraestructura tecnológica de cada país. En las últimas décadas, numerosas naciones han desarrollado servicios nacionales de monitoreo y predicción del clima espacial como parte de sus estrategias de resiliencia tecnológica. Entre los más destacados se encuentran el Space Weather Prediction Center (SWPC) de la NOAA (Estados Unidos), el European Space Weather Centre de la ESA, el Servicio de Clima Espacial Mexicano (SCiESMEX) y el Laboratorio Argentino de Meteorología del Espacio (LAMP) (Schrijver *et al.*, 2015; Knipp, 2021).

Aunque Colombia comparte con las sociedades modernas una marcada dependencia tecnológica, no existen todavía esfuerzos institucionales consolidados en materia de monitoreo y predicción del clima espacial, lo que evidencia una brecha crítica frente a la gestión de riesgos asociados a fenómenos solares. La creación del SCCE surge como una necesidad estratégica que busca reducir vulnerabilidades, fortalecer las capacidades científicas del país y consolidar su soberanía tecnológica en un campo emergente de gran relevancia.

Antecedentes históricos, capacidades actuales y perspectivas

El estudio del Sol en Colombia tiene una historia que se remonta a la astronomía colonial, cuando José Celestino Mutis (1732-1808) y Francisco José de Caldas (1768-1816) realizaron observaciones para la cartografía y la medición del tiempo. La fundación del Observatorio Astronómico Nacional (OAN) en 1803 por parte de Mutis marcó el inicio de la astronomía institucional en el país, aunque en sus primeras décadas el foco estuvo en la observación astronómica para la determinación de tiempos y posiciones (Portilla, 2020).

Durante el siglo XX, el interés en la radiación solar y las mediciones meteorológicas creció con el establecimiento del Observatorio Nacional de San Bartolomé en 1922 y la participación colombiana en el Año Geofísico Internacional (1957-1958). Esto permitió avances en la medición de la radiación solar y su impacto en la ionosfera ecuatorial. En la segunda mitad del siglo XX, el establecimiento de facultades de ciencias y de líneas de investigación en Física en la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad de los Andes fortalecieron los estudios en áreas relacionadas con la espectroscopía solar y radioastronomía. En la década de 2010, el Grupo de Astrofísica Solar (GoSA) (Vargas-Domínguez *et al.*, 2023) del OAN se consolidó como el principal grupo de investigación en heliofísica en Colombia. Sus líneas de trabajo incluyen la observación de la fotosfera y la cromosfera solares, el modelado numérico de eventos solares y el desarrollo de instrumentación, como el primer radiointerferómetro solar colombiano (FiCoRI) para el monitoreo de emisiones solares en radiofrecuencia.

En la actualidad, el GoSA continúa expandiendo sus capacidades mediante el desarrollo de nuevos instrumentos (Figura 10) y la consolidación de una Red Radio-Interferométrica Nacional, integrando datos de FiCoRI con el interferómetro de Michelson en frecuencia de radio de 11 GHz (IMFR11GHz) y el interferómetro de radio con arreglo en fase de múltiples antenas (PhARaON). Esta red busca mejorar la calibración de observaciones solares en radio, permitiendo la conversión de señales captadas en unidades físicas como la densidad de flujo (Hincapié, 2023; Sánchez-González, 2025).

El avance en estas tecnologías ha posicionado a Colombia como un actor emergente en la heliofísica y radioastronomía solar y ha facilitado la colaboración con observatorios internacionales. Estas investigaciones son relevantes para fortalecer la capacidad de análisis y calibración de los datos obtenidos, y se enmarcan en un esfuerzo global por comprender la actividad solar y su impacto en el clima espacial.

Además, el desarrollo de estas infraestructuras ha promovido la formación de talento humano en instrumentación y análisis de datos, consolidando una comunidad científica nacional en el estudio del Sol. Con estos avances, el GoSA/OAN no solo contribuye a la investigación en heliofísica y clima espacial, sino que también impulsa el desarrollo tecnológico en el país en otras líneas científicas y tecnológicas. También se ha dado



Figura 10. Equipos desarrollados en el Observatorio Astronómico Nacional de Colombia. Los equipos en las imágenes superiores e inferior izquierda corresponden al PhARaON, y el de la imagen inferior derecha corresponde al IMFR11GHZ (Cortesía OAN).

especial énfasis a la colaboración internacional, campo en el que se destaca el proyecto internacional Solar Activity Monitor Network (SAMNet) (Erdélyi *et al.*, 2022), una iniciativa para la configuración de una red internacional de telescopios solares terrestres diseñada para monitorear de manera continua la intensidad, los campos magnéticos y las velocidades Doppler en distintas alturas de la atmósfera solar, con el objetivo de mejorar las capacidades de predicción del clima espacial. Sus instrumentos, basados en filtros magneto-ópticos, permiten obtener mapas sinópticos del Sol y anticipar la aparición de fulguraciones y eyecciones de masa coronal con varias horas de antelación (Granados-Hernández & Vargas-Domínguez, 2020). Colombia participa activamente en esta iniciativa a través del OAN, la Universidad Sergio Arboleda y el Observatorio AstroExplor en Boyacá (Molina *et al.*, 2025), como un nodo estratégico en la red global.

En este contexto surge la propuesta de desarrollar detectores portátiles y de bajo costo, capaces de complementar esas redes en el futuro. Un ejemplo es la red gLOWCOST, creada por el Grupo de Física Nuclear de la Universidad Estatal de Georgia (GSU), que estudia variaciones de rayos cósmicos vinculadas con fenómenos solares, interplanetarios y atmosféricos. Actualmente cuenta con nueve estaciones distribuidas en Estados Unidos, Colombia (Santa Marta), Serbia, Nigeria, Sri Lanka y Singapur.

Comprender las variaciones en el flujo de rayos cósmicos en distintos lugares, teniendo en cuenta factores como el tipo de detector, la altitud, la latitud, la rigidez geomagnética y la rotación terrestre, es esencial para interpretar adecuadamente series

temporales y análisis de correlación (Mubashir *et al.*, 2023). Estos parámetros determinan la intensidad y el momento de detección, por lo que se requieren mediciones específicas en cada sitio. La precipitación de rayos cósmicos en la atmósfera y la generación de secundarios dependen de la rigidez de corte geomagnético local, lo que hace necesaria una red global de detectores terrestres. Actualmente existen iniciativas de gran escala como el Observatorio Pierre Auger, la base de datos de monitores de neutrones (NMDB) y la red global de detectores de muones (GMDB). Sin embargo, su mantenimiento implica altos costos.

El proyecto gLOWCOST contempla la instalación de instrumentos de última generación en múltiples continentes, con un énfasis en la cobertura longitudinal y latitudinal que permita caracterizar fenómenos globales. La participación de Colombia resulta estratégica, no solo por su ubicación privilegiada en la región ecuatorial, lo que la convierte en un laboratorio natural para la dinámica atmosférica y espacial, sino también por la posibilidad de integrar instrumentos locales a esta red global. Con ello, el país puede contribuir con datos únicos para fortalecer la capacidad de predicción del clima espacial y fomentar espacios de cooperación científica internacional en el ámbito de la geofísica y la astrofísica, entre otros.

Los resultados preliminares obtenidos hasta el momento (Mubashir *et al.*, 2025) demuestran la factibilidad y relevancia científica de la instrumentación propuesta. Las primeras pruebas han mostrado mejoras en la sensibilidad y en la resolución temporal de las observaciones en radio, lo que permite una detección más precisa de ráfagas en radio de tipo II y III y su correlación con CME. Estos avances muestran el potencial de la red para contribuir al monitoreo global del clima espacial y para proyectar la ampliación de la red con la instalación de nuevos instrumentos en Colombia, cuya ubicación estratégica en latitud ecuatorial y altitud ofrece ventajas únicas para el monitoreo continuo de la actividad solar, complementando las observaciones existentes en latitudes medias y aportando a una comprensión más integral de los fenómenos heliofísicos.

Por otra parte, un nuevo proyecto para el estudio de la ionosfera, desarrollado por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) y la Universidad Nacional de Colombia (UNAL), tiene como objetivo la instalación y operación de un radar ionosférico de pulsos de incidencia vertical (VIPIR) en Paipa, Boyacá. Este instrumento permitirá medir la densidad electrónica en la ionosfera, particularmente en la capa F, aportando datos fundamentales para comprender la dinámica del entorno espacial en la región ecuatorial (Pradipta, 2024). La iniciativa busca consolidar un núcleo de estudios sobre la ionosfera en Colombia, con beneficios directos para la investigación, la formación de talento humano y la articulación con instituciones nacionales e internacionales, entre ellas, el Boston College y el Instituto Geofísico del Perú. La ubicación estratégica del radar en Paipa y la cooperación interinstitucional posicionarán al país como un actor clave en el monitoreo y análisis de procesos ionosféricos de relevancia global.

Además de este proyecto, a partir del 2024 y hasta el 2028, Colombia (con un nodo en el OAN) es parte del proyecto internacional DynaSun (Horizonte Europa), que tiene una gran relevancia en el estudio de la dinámica y actividad solar y fortalece la capacidad científica de nuestro país con la participación de nodos en instituciones de Alemania, Argentina, Austria, Bélgica, República Checa y Reino Unido.

Importancia de un Servicio Nacional de Clima Espacial en Colombia

Colombia se encuentra en una posición única en términos de clima espacial debido a su proximidad al ecuador magnético. En esta región, la interacción entre el viento solar y la ionosfera genera fenómenos como las burbujas de plasma ionosféricas y las fluctuaciones en la densidad de electrones, los cuales afectan la propagación de señales de radio y GPS (Abdu, 2012). Durante periodos de alta actividad solar, estos efectos pueden intensificarse, generando problemas en la navegación aérea, en los sistemas de telecomunicaciones y en la gestión de redes eléctricas (González, 2022).

Además, el crecimiento continuo en la infraestructura tecnológica en el país, incluido el uso de satélites para la observación del territorio y el desarrollo de la conectividad mediante constelaciones satelitales como Starlink, hace urgente la implementación de un sistema de monitoreo que permita alertar a sectores estratégicos en caso de perturbaciones geomagnéticas o tormentas solares (**Coster & Erickson, 2022**).

La falta de un servicio de alerta y monitoreo en Colombia deja en situación de vulnerabilidad a sectores como la aviación, el comercio marítimo y la generación de energía. Otros países de América Latina han avanzado significativamente en este ámbito, estableciendo centros de monitoreo y desarrollando capacidades propias para la predicción del clima espacial. Argentina, por ejemplo, ha integrado sus observaciones del clima espacial con el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) para prever los impactos del clima espacial en la agricultura de precisión (**Comisión Nacional de Actividades Espaciales, s. f.**). En México el SCiESMEX se ha convertido en una referencia en la región, ofreciendo pronósticos regulares y reportes de actividad geomagnética que benefician a la aviación civil y a la industria energética (**Carrillo *et al.*, 2016**).

Colaboración interinstitucional en la investigación del clima espacial en Colombia

El monitoreo y el estudio del clima espacial requieren un enfoque interdisciplinario que integre el conocimiento y la experticia de diversas instituciones y grupos de investigación. En Colombia, varias entidades han desarrollado capacidades en áreas clave relacionadas con el clima espacial, como el geomagnetismo, la ionosfera, los rayos cósmicos y la meteorología. Sin embargo, la falta de una estructura de cooperación consolidada ha limitado el desarrollo de un sistema nacional unificado para la predicción y mitigación de los efectos del clima espacial.

El grupo ARGOS de la Universidad Nacional de Colombia ha estudiado el TEC en la ionosfera colombiana mediante la utilización de una red de estaciones de rastreo satelital (REICO), así como el efecto de las tormentas geomagnéticas (**Palacios-Caicedo, 2010**). El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) ha realizado estudios en geomagnetismo contribuyendo con datos fundamentales sobre el campo magnético terrestre en la región, que cubren un rango temporal de siete décadas (**Alva-Carmona *et al.*, 2025**). Esta información es crucial para evaluar la influencia de tormentas geomagnéticas en la infraestructura tecnológica del país. En el ámbito de la ionosfera, la Universidad Industrial de Santander (UIS) ha llevado a cabo investigaciones sobre la variabilidad ionosférica y los efectos de la radiación cósmica, incluidas las perturbaciones ionosféricas, lo que es esencial para la navegación y las telecomunicaciones, y aplicaciones prácticas como la muongrafía (**Asorey *et al.*, 2018**).

Por otro lado, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), junto con el Servicio Geológico Colombiano (SGC), desempeña un papel central en la monitorización de fenómenos climáticos y geofísicos que pueden estar influenciados por la actividad solar, incluida la radiación solar extrema y la variabilidad de la ionosfera ecuatorial. Además, el IDEAM cuenta con datos sobre la incidencia de la radiación ultravioleta en el territorio colombiano, lo que es relevante para la comprensión del impacto del ciclo solar en la atmósfera y la salud humana.

El sector aeronáutico y de telecomunicaciones también tiene un papel fundamental en esta articulación. Se sugiere que la Aerocivil Colombiana integre información de clima espacial en sus sistemas de predicción y control de tráfico aéreo, ya que las tormentas solares pueden representar un riesgo para la radiocomunicación tanto en vuelos de gran altitud y rutas polares como en regiones ecuatoriales, donde las perturbaciones ionosféricas y los apagones en radio-frecuencias también afectan de manera significativa la propagación de las señales. Asimismo, las empresas de telecomunicaciones deberían considerar el impacto de la actividad solar en la estabilidad de sus infraestructuras y en la calidad de los servicios que dependen de enlaces satelitales y terrestres.

A lo largo de las últimas décadas, Colombia ha desarrollado esfuerzos relevantes para registrar variaciones en el campo magnético terrestre, destacando el trabajo realizado desde

el Observatorio Geomagnético de Fúquene (instalado en 1953). Los datos registrados allí desde mediados del siglo XX han generado información relevante para profundizar en las perturbaciones geomagnéticas como respuesta a tormentas solares (Pinzón-Cortés *et al.*, 2025), al igual que una reducción sostenida de la intensidad magnética asociada tanto a variaciones seculares como a eventos geomagnéticos extremos (Hernández *et al.*, 2022). Este debilitamiento progresivo incrementa la vulnerabilidad del país ante perturbaciones geomagnéticas intensas, como las inducidas por eyecciones de masa coronal, al facilitar la penetración de partículas energéticas hacia capas internas de la atmósfera. En este contexto, la Universidad Nacional de Colombia ha consolidado capacidades técnicas y científicas relevantes a través de estructuras como el Laboratorio de Instrumentación Geofísica, que opera estaciones de monitoreo en tiempo real, y del GoSA en el OAN, el cual lidera estudios sobre actividad solar, fulguraciones y radio-emisión desde la corona solar, como ya se expuso. Estas iniciativas, articuladas con redes académicas internacionales, han podido desarrollar instrumentación propia y constituyen una base sólida para la creación de un sistema nacional de monitoreo del clima espacial adaptado a las condiciones ecuatoriales de Colombia.

Una estructura de cooperación consolidada permitiría integrar datos, desarrollar modelos regionales, emitir alertas tempranas y articular a Colombia con redes internacionales de monitoreo. Esta integración también fortalece la respuesta a temas transversales como el cambio climático, la sostenibilidad y la seguridad energética.

En este contexto, formalizar el SCCE es una oportunidad para consolidar esfuerzos y establecer mecanismos de cooperación entre estas entidades. La articulación de los datos generados por estos grupos permitiría mejorar la predicción y respuesta ante eventos extremos, fortaleciendo la resiliencia del país ante las amenazas del clima espacial.

Para lograr esta sinergia, es necesario establecer protocolos de intercambio de información y desarrollar estrategias conjuntas para la recolección, organización y análisis de datos. La implementación de redes de sensores distribuidos en el país, en combinación con modelos computacionales avanzados, permitiría mejorar significativamente la capacidad de predicción y alerta temprana en Colombia.

Componentes claves del Servicio Colombiano de Clima Espacial

Para que el SCCE cumpla eficazmente sus funciones, es fundamental que cuente con una estructura técnica robusta y multidisciplinaria. A continuación, se describen los principales componentes que debe integrar.

1. Red de monitoreo de clima espacial: una red nacional de observación debe incluir estaciones distribuidas estratégicamente en el territorio para registrar variaciones del campo geomagnético mediante magnetómetros de alta sensibilidad, emisiones solares en radiofrecuencia a través de radiotelescopios e interferómetros solares como el FiCoRI, el IMFR11GHz y el PhARaON, y perturbaciones ionosféricas mediante digisondas, receptores GNSS de doble frecuencia, cámaras de luminiscencia atmosférica y sensores TEC. Esta red permitiría generar alertas tempranas, evaluar en tiempo real el impacto de eventos solares y alimentar modelos numéricos de predicción espacial.
2. Centro nacional de predicción y alerta: este centro debe operar de forma continua y estar conformado por especialistas en física solar, heliofísica, geofísica, modelado numérico y procesamiento de datos satelitales. Utilizaría herramientas computacionales avanzadas, modelos, datos en tiempo real y herramientas de inteligencia artificial para producir pronósticos sobre tormentas geomagnéticas, fulguraciones solares, CME y variaciones ionosféricas regionales, los cuales serían compartidos con sectores sensibles como los de energía, aviación, defensa y telecomunicaciones.
3. Infraestructura de divulgación y capacitación: el SCCE debe promover la sensibilización y formación técnica en entidades públicas, privadas y académicas mediante cursos y seminarios especializados, material educativo adaptado a distintos públicos, boletines regulares de clima espacial y protocolos de actuación frente a alertas, ya que la apropiación social del conocimiento fortalecerá la toma de decisiones basada en la evidencia.

4. Integración con redes internacionales: el éxito del SCCE dependerá también de su articulación con redes globales como la NASA y la NOAA en Estados Unidos, la Agencia Espacial Europea (ESA) y el International Space Environment Service (ISES), ya que ello facilitaría el acceso a bases de datos satelitales y modelos de predicción de frontera y permitiría la ‘interoperabilidad’ con alertas internacionales, reforzando la capacidad del país para anticipar y responder a eventos solares extremos.

Beneficios científicos, tecnológicos y económicos

El desarrollo del SCCE traería múltiples beneficios para Colombia, no solo en términos de reducción del riesgo ante eventos de clima espacial, sino también en el impulso a la investigación y la innovación en áreas estratégicas para el país, incentivando el desarrollo de nuevas tecnologías para la protección de infraestructuras críticas, la optimización de sistemas de telecomunicaciones y la capacitación de especialistas en ciencias del espacio.

Desde el punto de vista económico, contar con un sistema de alerta temprana permitiría evitar pérdidas millonarias en sectores como la aviación y la energía, entre otros. Se estima que un apagón masivo debido a una tormenta geomagnética extrema podría causar pérdidas de hasta 40 mil millones de dólares en un país con una infraestructura energética interconectada como Colombia (Eastwood *et al.*, 2017). La integración de un servicio de alerta basado en modelos predictivos y monitoreo satelital reduciría significativamente estos riesgos.

En el ámbito académico, la creación del SCCE impulsaría la formación de nuevas generaciones de científicos e ingenieros especializados en física solar, magnetosfera e instrumentación geoespacial.

Hacia un liderazgo regional en clima espacial

Si bien países como Argentina, Brasil y México han tomado la delantera en la implementación de servicios de clima espacial en América Latina, Colombia tiene la oportunidad de desarrollar un enfoque innovador basado en su ubicación estratégica y su capacidad científica en crecimiento. La consolidación del SCCE podría posicionar al país como un centro de referencia regional para el monitoreo del clima espacial, facilitando la cooperación con otras naciones y organismos internacionales.

El contexto actual del CS25, que ha exhibido un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos solares en los últimos años, refuerza la necesidad de que Colombia desarrolle su propia infraestructura de monitoreo y predicción.

Además de los beneficios directos para la seguridad tecnológica nacional, el SCCE puede impulsar la integración de Colombia en la economía espacial global, que crece aceleradamente con la proliferación de constelaciones satelitales, nuevos lanzamientos y servicios de observación terrestre; contribuir a la soberanía tecnológica, al reducir la dependencia de alertas extranjeras y fomentar el desarrollo de capacidades locales en instrumentación, modelado y procesamiento de datos mediante la capacitación de recurso humano en estas líneas de trabajo, y facilitar la toma de decisiones en sectores clave, desde la agricultura hasta la aviación, la defensa y la energía, consolidando a Colombia como un país resiliente frente a amenazas del entorno espacial.

Existen diversas formas posibles de estructurar un eventual SCCE. A modo de sugerencia, y considerando la estructura institucional actual del país, una opción viable podría ser un modelo interinstitucional en el que el IDEAM albergue un Centro Nacional de Predicción de Clima Espacial (encargado de la operación continua y la emisión de alertas oficiales), mientras que un consorcio de universidades y centros de investigación conformen un brazo científico-técnico dedicado a la instrumentación, modelación, validación, y propuesta de mejoras. La Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) podría integrar las alertas del SCCE a los protocolos de respuesta sectorial (energía, aviación, telecomunicaciones, marítimo), y un comité directivo conformado por entidades como el IDEAM, el OAN-Universidad Nacional de Colombia, el SGC, el IGAC, la Aerocivil, la Comisión de Regulación de Comunicaciones del Ministerio de Tecnologías

de la Información y las Comunicaciones (CRC/MinTIC), la Unidad de Planeación Minero-Energética y el Ministerio de Minas y Energía, la Dirección General Marítima (DIMAR) y el Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación, podría definir estándares, políticas de datos abiertos y prioridades de inversión. Este esquema, entre otros posibles, buscaría equilibrar la autoridad operativa con la capacidad científica y la coordinación institucional para la gestión del riesgo.

Con visión a largo plazo, el SCCE puede convertirse en una plataforma de articulación regional, liderando iniciativas en predicción, mitigación y formación técnica, y posicionando a Colombia como líder latinoamericano en clima espacial.

Conclusiones y discusión

En los últimos años el estudio del clima espacial ha demostrado ser un campo de investigación de relevancia creciente debido a su impacto en múltiples sectores tecnológicos, económicos y sociales. A medida que la humanidad incrementa su dependencia de las tecnologías satelitales, las telecomunicaciones y la infraestructura eléctrica, la necesidad de comprender y mitigar los efectos del clima espacial se hace más urgente. Los eventos extremos asociados al CS25 han puesto de manifiesto la vulnerabilidad de los sistemas tecnológicos modernos y la importancia de desarrollar estrategias de monitoreo y predicción más precisas.

A nivel mundial, las agencias espaciales y científicas han redoblado esfuerzos en la investigación y monitoreo del clima espacial. Recientemente, el informe *The Next Decade of Discovery in Solar and Space Physics* de la **National Academies of Sciences** (2024) resaltó la necesidad de fortalecer la cooperación internacional, mejorar la capacidad de predicción y avanzar en el desarrollo de modelos numéricos que permitan anticipar los efectos de fenómenos como las eyecciones de masa coronal y las tormentas geomagnéticas. En este sentido, los países con mayor desarrollo en ciencia y tecnología han implementado servicios de monitoreo y alerta temprana, como el Space Weather Prediction Center (SWPC) de la NOAA en Estados Unidos, el Servicio de Clima Espacial de la Agencia Espacial Europea (ESA) y el Servicio de Clima Espacial de Brasil (EMBRACE).

Debido a su ubicación ecuatorial, Colombia experimenta condiciones únicas en términos de interacción con el campo magnético terrestre y el impacto del clima espacial. Aunque no se encuentra en latitudes altas donde los efectos de las tormentas geomagnéticas son más notorios, el electrochorro ecuatorial y la presencia de burbujas de plasma en la zona ecuatorial hacen que el país no esté exento de impactos significativos (Sahai *et al.*, 2000, Picanço *et al.*, 2022). Los registros históricos indican la observación de auroras en Colombia, atribuidas al evento Carrington, lo que demuestra que los eventos extremos pueden afectar a la región. Además, la creciente infraestructura satelital y la implementación de redes eléctricas interconectadas hacen que el país deba prepararse ante posibles interrupciones tecnológicas.

La propuesta del SCCE representa un paso clave hacia el fortalecimiento de la capacidad de monitoreo y respuesta ante eventos de clima espacial. Su desarrollo permitiría la recopilación y análisis de datos en tiempo real, proporcionando información crítica para la comunidad científica, la industria y los organismos gubernamentales. La integración de sensores de monitoreo geomagnético, la colaboración con redes internacionales y el uso de modelos predictivos avanzados pueden posicionar a Colombia como un actor relevante en la investigación del clima espacial en la región.

Los efectos económicos del clima espacial han sido ampliamente documentados, con estimaciones que sugieren que un evento de magnitud similar al de Carrington podría generar pérdidas superiores al 1 % del PIB mundial en un solo día, debido a interrupciones en servicios esenciales como las telecomunicaciones, la energía y el transporte. En el caso colombiano, la dependencia de tecnologías satelitales para la agricultura de precisión, el monitoreo ambiental y la seguridad nacional hace que la implementación del SCCE sea una inversión estratégica a largo plazo.

En el contexto global, la economía del espacio está en crecimiento, con la proliferación de constelaciones satelitales como Starlink y OneWeb, que dependen de un monitoreo constante del entorno espacial para evitar fallas operativas. Al establecer su propio sistema de monitoreo de clima espacial, Colombia podría integrarse a redes internacionales y ofrecer servicios de valor agregado, promoviendo el desarrollo de capacidades científicas y tecnológicas en el país.

El clima espacial es un factor determinante en la estabilidad de la infraestructura tecnológica global y su estudio es esencial para mitigar riesgos y mejorar la resiliencia de los sistemas críticos. La creación del SCCE es un paso fundamental para alcanzar estos objetivos, alineando al país con las tendencias globales en este campo. El desarrollo de capacidades nacionales en la predicción y monitoreo del clima espacial no solo fortalecerá la seguridad tecnológica, sino que también impulsará la colaboración internacional, la formación de talento humano y la innovación en tecnologías espaciales. La próxima década será crucial para establecer las bases de este sistema, garantizando que Colombia pueda enfrentar los desafíos que plantea la variabilidad solar en un mundo cada vez más dependiente de la tecnología.

Agradecimientos

Este trabajo fue patrocinado por el proyecto DynaSun y, por lo tanto, ha recibido financiación en el marco del programa Horizonte Europa de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención No. 101131534. No obstante, las opiniones y puntos de vista expresados son únicamente de los autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea. En consecuencia, la Unión Europea no puede ser considerada responsable de ellos.

Contribución de los autores

SVD: concepción del trabajo, documentación, análisis y escritura del texto. **JAAR, JCBC, HDG y BCM:** documentación, análisis, escritura del texto. Todos los autores revisaron y aprobaron la versión final del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores expresamos que no tenemos conflictos de intereses.

Referencias

- Abdu, M. A.** (2012). Equatorial ionosphere–thermosphere system: Electrodynamics and irregularities. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 90, 1-12.
- Alva-Carmona, M. R., Vargas-Domínguez, S., Villafane, J., Cortés-Rojas, E., Pinzón-Cortés, S., Gómez-Pérez, N., Torres Moya, E., Franco Prieto, C. A.** (2025). El Observatorio Geomagnético Nacional de Fúquene: un recorrido por su pasado, su presente y su futuro. *Revista de la Academia NColombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 49(190), 146-162. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.3166>
- Asorey, H., Calderón-Ardila, R., Forero-Gutiérrez, K., Núñez, L. A., Peña-Rodríguez, J., Salamanca-Coy, J., Sanabria-Gómez, D., Sánchez-Villafrades, J., Sierra-Porta, D.** (2018). MiniMuTe: Un prototipo de telescopio de muones para el estudio de estructuras volcánicas con flujos de rayos cósmicos. *Scientia et Technica*, 23(3), 386-393. <https://doi.org/10.22517/23447214.17497>
- Baker, D.N., Daly, E., Daglis, I., Kappenman, J.G. and Panasyuk, M.** (2004). Effects of Space Weather on Technology Infrastructure. *Space Weather*, 2: <https://doi.org/10.1029/2003SW000044>
- Benz, A. O.** (2017). Flare observations. *Living Reviews in Solar Physics*, 14(2), 1-72.
- Bhattacharyya, A.** (2022). Equatorial plasma bubbles: A review. *Atmosphere* 13 (10), 1637.
- Boteler, D. H.** (2019). Geomagnetic hazards to power grids and the effects of space weather. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 9, A24.
- Comisión Nacional de Actividades Espaciales.** (s. f.). Clima espacial. <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/aplicaciones-de-lainformacion-satelital/clima-espacial>

- Carrillo, M., Lara, A., González-Esparza, J. (2016). SCiESMEX: The Mexican Space Weather Service. *Space Weather*, 14(2), 112-124.
- Coster, A. J. & Erickson, P. J. (2022). Ionospheric irregularities and their impact on GNSS signals during solar cycle 25. *Radio Science*, 57(2), 112-125.
- Eastwood, J. P., Biffis, E., Hapgood, M.A., Green, L., Bisi, M.M., Bentley, R.D., Wicks, R., McKinnell, L.A., Gibbs, M., Burnett, C. (2017). The economic impact of space weather: Where do we stand? *Risk Analysis*, 37(2), 206-221. <https://doi-org/10.1111/risa.12765>
- Erdélyi, R., Korsós, M. B., Huang, X., Yang, Y., Pizzey, D., Wrathmall, S. A., Hughes, I. G., Dyer, M. J., Dhillon, V. S., Belucz, B., Brajša, R., Chatterjee, P., Cheng, X., Deng, Y., Vargas-Domínguez, S., Joya, R., Gömöry, P., Gyenge, N. G., Hanslmeier, A., Kucera, A., ..., Zuccarello, F. (2022). The Solar Activity Monitor Network – SAMNet. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 12, 2. <https://doi.org/10.1051/swsc/2021025>
- European Space Agency (ESA) – Science Office. (2018). Space weather effects. ESA. Multimedia Gallery. https://www.esa.int/ESAMultimedia/Images/2018/11/Spaceweather_effects (Image credit: ESA/Science Office. Licensed under CC BY-SA 3.0 IGO).
- ESA (2023). *Solar storms and their effects on aviation and GNSS*. European Space Agency Report.
- EU Council (2023). *Solar storms: A new challenge on the horizon?* European Union.
- Fang, T. W., Kubaryk, A., Goldstein, D., Li, Z., Fuller-Rowell, T., Millward, G., Singer, H. J., Steenburgh, R., Westerman, S., Babcock, E. (2022). Space weather environment during the SpaceX Starlink satellite loss in February 2022. *Space Weather*, 20(11), e2022SW003193.
- González, G. (2022). Storm-time variability of ionospheric irregularities over South America. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 241. 10.1016/j.jastp.2022.105980.
- González-Esparza, J. A. (2022). *La Tormenta Solar Perfecta*. UNAM.
- Gonzalez-Esparza, J. A., Sanchez-Garcia, E., Sergeeva, M., Corona-Romero, P., Gonzalez-Mendez, L. X., Valdes-Galicia, J. F., Aguilar-Rodriguez, E., Rodriguez-Martinez, M., Ramirez-Pacheco, C., Castellanos, C. I., Pazos, M., Mendoza, B., Gatica-Acevedo, V. J., Melgarejo-Morales, A., Caraballo, R., Andrade-Mascote, E., Villanueva-Hernandez, P., Bonifaz-Alfonzo, R., ..., Hernandez-Quintero, E. (2024). The mother's day geomagnetic storm on 10 May 2024: Aurora observations and low latitude space weather effects in Mexico. *Space Weather*, 22, e2024SW004111. <https://doi.org/10.1029/2024SW004111>.
- González, G. (2025). Global Patterns of Equatorial Plasma Bubbles from ICON Data. *Advances in Space Research*, 76 (4), 2265-2279. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.06.055>
- Granados-Hernández, N. & Vargas-Domínguez, S. (2020). Análisis de polaridades magnéticas en regiones activas para la predicción de fulguraciones solares. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(173), 984-995. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1161>
- Green, J. & Boardsen, S. (2005). Duration and extent of the great auroral storm of 1859. *Advances in Space Research*, 38(2), 130-135.
- Guo, Y., Thompson, P., Wirzburger, J., Pinkine, N., Bushman, S., Goodson, T., Haw, R., Hudson, J., Jones, D., Kijewski, S., Lathrop, B., Lau, E., Mottinger, N., Ryne, M., Shyong, W., Valerino, P., Whittenburg, K. (2021). Execution of Parker Solar Probe's unprecedented flight to the Sun and early results. *Acta Astronautica*, 179, 425-438. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.11.007>.
- Hathaway, D. H. (2015). The solar cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 12(1), 1-87.
- Hayakawa, H., Ebihara, Y., Mishev, A., Koldobskiy, S., Kusano, K., Bechet, S., Yashiro, S., Iwai, K., Shinbori, A., Mursula, K., Miyake, F., Shiota, D., Silveira, M., Stuart, R., Oliveira, D., Akiyama, S., Ohnishi, K., Ledvina, V., Miyoshi, Y. (2024). The solar and geomagnetic storms in May 2024: A flash data report. *The Astrophysical Journal*, 979(1), id.49.
- Hernández, H. D., Calderón, J. F., Chacón, C. A. (2022). Estudio temporal del campo magnético terrestre en Colombia: Observatorio Geomagnético Fúquene. *Ciencia en Desarrollo*, 13(1), 31-41. <https://doi.org/10.19053/01217488.v13.n1.2022.12941>
- Hincapié, T. & Juan, S. (2023). *Design and Construction of a Multi-element Phased Array Radio Interferometer*. Master Thesis in Astronomy. National University of Colombia.
- Howard, R. A., Moses, J. D., Vourlidas, A., Newmark, J. S., Socker, D. G., Plunkett, S. P., Korendyke, C. M., Cook, J. W., Hurley, A., Dávila, J. M., Thompson, W. T., St Cyr, O. C., Mentzell, E., Mehalick, K., Lemen, J. R., Wuelser, J. P., Duncan, D. W., Tarbell, T. D., Wolfson, C. J., Moore, A., Harrison, R. A., Waltham, N. R., Lang, J. ... Carter, T. (2008). Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI). *Space Science Reviews*, 136(1), 67-115. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9341-4>

- Kepkar, A., Arras, C., Wickert, J., Schuh, H., Alizadeh, M., Tsai, L.** (2020). Occurrence climatology of equatorial plasma bubbles derived using FormoSat-3/COSMIC GPS radio occultation data. *Annales Geophysicae*, 38, 611-623. <https://doi.org/10.5194/angeo-38-611-2020>
- Kwak, Y. S., Kim, J. H., Kim, S., Miyashita, Y., Yang, T., Park, S. H., Talha, M., Lim, E-K, Jung, J., Kam, H., Lee, J., Lee, H., Yoo, J-H., Lee, H., Kwon, R-Y., Seough, J., Nam, U-W., Lee, W.K., Hong, J., Sohn, J., Kwak, J., ..., Talha, M.** (2024). Observational overview of the May 2024 G5-level geomagnetic storm: from solar eruptions to terrestrial consequences. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 41(3), 171-194.
- Knipp, D. J.** (2021). *Understanding space weather and its effects: A multidisciplinary approach*. Cambridge University Press.
- NOAA Space Weather Prediction Center, Swedish Civil Contingencies Agency and UK Met Office, Space weather & critical infrastructures – Findings and outlook, Publications Office.** (2016). <https://data.europa.eu/doi/10.2788/152877>
- Lanzerotti, Louis & Erickson, Philip & Coster, Anthea.** (2021). Introduction: Space Weather Underlies Reliable Technologies. 10.1002/9781119815570.ch0.
- Lloyd's & AER.** (2013). *Solar storm risk to the North American electric grid*. Lloyd's & AER.
- Mertens, C. J., Slaba, T. C., & Hu, S.** (2018). Active dosimeter-based estimate of astronaut acute radiation risk for real-time solar energetic particle events. *Space Weather*, 16, 1291-1316. <https://doi.org/10.1029/2018SW001971>.
- Miyake, F., Nagaya, K., Masuda, K., Nakamura, T.** (2012). A signature of cosmic-ray increase in AD 774-775 from tree rings in Japan. *Nature*, 486(7402), 240-242.
- Moldwin, M. B. & Tsu, J. S.** (2016). Stormtime equatorial electrojet ground- induced currents: Increasing power grid space weather impacts at equatorial latitudes. En: *Ionospheric Space Weather: Longitude and Hemispheric Dependences and Lower Atmosphere Forcing*, Editor(s): Timothy Fuller-Rowell, Endawoke Yizengaw, Patricia H. Doherty, Sunanda Basu. American Geophysical Union.
- Molina-Córdoba, J. N., Triana-Ortiz, C., Buitrago-Casas, J. C.** (2025). Ruido espectral en radiofrecuencias en el desierto de la Candelaria: un estudio preliminar para la instalación de radiotelescopios. *eSPECTRA*, 3(1), 18-22.
- Moreno, F., Sánchez, Cristancho., Vargas-Domínguez, S.** (2016). The Grand Aurorae Borealis Seen in Colombia in 1859. *Advances in Space Research*, 57(1), 257-267.
- Mubashir, A., Ashok, A., Bourgeois, A., Chien, Y. T., Connors, M., Potdevin, E., He, X., Martens, P., Mikler, A., Perera, A. G. U., Sadykov, V., Sarsour, M., Sharma, D., Tiwari, C..** (2023). Muon flux variations measured by low-cost portable cosmic ray detectors and their correlation with space weather activity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128(12), e2023JA031943. <https://doi.org/10.1029/2023JA031943>
- Mubashir, A., Ashok, A., Connors, M., He, X., Hettiarachchi, H. A. T. G., Martens, P., Mudiyanse, E. H., Perera, U. A. G., Potdevin, E., Sadykov, V. M., Sarsour, M., Savić, M., & Veselinović, N.** (2025). Time lag analysis of the space weather effects on muon and neutron flux at different geomagnetic cutoff rigidities. *Advances in Space Research*, 76(12), 7587–7599. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.04.032>
- NASA/GSFC/SDO.** (2017). X-class solar flare observed on 6 september 2017. Solar Dynamics Observatory, NASA Goddard Space Flight Center. <https://sdo.gsfc.nasa.gov> (Image credit: NASA/GSFC/SDO).
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.** (2024). *The next decade of discovery in solar and space physics: Exploring and safeguarding humanity's home in space*. National Academies Press.
- National Research Council** (2008). *Severe space weather events: Understanding societal and economic impacts*. National Academies Press.
- NOAA Space Weather Prediction Center.** (2021, 28 de octubre). S1 Minor Radiation Storm – 28 October 2021. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.swpc.noaa.gov/news/s1-minor-radiation-storm->
- NOAA.** (2022). *Starlink satellite failure report: February 2022*. National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Oughton, E. J., Skelton, A., Horne, R. B., Thomson, A. W., Gaunt, C. T.** (2017). Quantifying the daily economic impact of extreme space weather due to failure in electricity transmission infrastructure. *Space Weather*, 15(1), 65-83.

- Palacios-Caicedo, J. C.** (2010). Cálculo del contenido total de electrones (TEC) en la ionosfera colombiana mediante la utilización de una red de estaciones de rastreo satelital (REICO) (Master dissertation). Universidad Nacional de Colombia.
- Parker, E. N.** (1958). Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields. *The Astrophysical Journal*, 128, 664.
- Picanço, G., Denardini, C., Nogueira, P., Resende, L., Carmo, C., Chen, S., Barbosa-Neto, P., Romero-Hernández, E.** (2022). Study of the equatorial and low-latitude total electron content response to plasma bubbles during solar cycle 24-25 over the Brazilian region using a Disturbance Ionosphere index. *Annales Geophysicae*, 40, 503-517. <https://doi.org/10.5194/angeo-40-503-2022>
- Pimenta, A. A., Fagundes, P. R., Bittencourt, J. A., Sahai, Y.** (2001). Relevant aspects of equatorial plasma bubbles under different solar activity conditions. *Advances in Space Research*, 27(6-7), 1213-1218.
- Pinzón-Cortés, S., Gómez-Pérez, N., Vargas-Domínguez, S.** (2025). Ring current local time dependence during geomagnetic storms using equatorial Dst-proxies. *Acta Geodaetica et Geophysica*. <https://doi.org/10.1007/s40328-024-00459-6>
- Polefka, T. G., Meyer, T. A., Agin, P. P., Bianchini, R. J.** (2012). Effects of solar radiation on the skin. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 11(2), 134-143.
- Portilla, J. G.** (2020). Firmamento y atlas terrestre: la astronomía que practicó Francisco José de Caldas. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80656>
- Pradipta, R.** (2024). *Spatial Imaging and Zonal Drift Motion Tracking of Equatorial Plasma Bubbles over South America Using Specially Detrended GPS TEC Data*. United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM), 216-216. <https://doi.org/10.23919/USNC-URSINRSM60317.2024.10465163>
- Priest, E.** (2014). *Magnetohydrodynamics of the Sun*. Cambridge University Press.
- Rodríguez, J.** (2024). *El clima espacial: La influencia del Sol en la Tierra y otros planetas*. Editorial Publicia. <https://doi.org/10.36198/978363955737>
- Sahai, Y., Fagundes, P., Bittencourt, J.** (2000). Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62, 1377-1383. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00179-6)
- Sánchez-González, J.** (2025). *Red Radio-Interferométrica Solar del Observatorio Astronómico Nacional (RRIS-OAN): intercalibración e integración instrumental* (Tesis de maestría), Universidad Nacional de Colombia.
- Schrijver, C. J., Kauristie, K., Aylward, A.D., Denardini, C.M., Gibson, S.E., Glover, A., Gopalswamy, N., Grande, M., Hapgood, M., Heynderickx, D., Jakowski, N., Kalegaev, V.D., Lapenta, G., Linker, J.A., Liu, S., Mandrini, C.H., Mann, I.R., Nagatsuma, T., Nandy, D., Obara, T., ... Vilmer, N.** (2015). Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015-2025. *Advances in Space Research*, 55(12), 2745-2807.
- Schwenn, R.** (2006). Space weather: The solar perspective. *Living Reviews in Solar Physics*, 3(1), 1-72.
- Smith, J. & Heelis, R. A.** (2017). Equatorial plasma bubbles: Variations of occurrence and spatial scale in local time, longitude, season, and solar activity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122, 5743-5755.
- Thomson, A., Gaunt, C., Cilliers, P., Wild, J., Opperman, B., McKinnell, L., Kotze, P., Ngwira, C., Lotz, S.** (2010). Present day challenges in understanding the geomagnetic hazard to national power grids. *Advances in Space Research*, 45(9), 1182-1190. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.11.023>
- Toriumi, S. & Wang, H.** (2019). Flare-producing solar active regions. *Living Reviews in Solar Physics*, 16(1), 1-54.
- Tsurutani, B. T., González, W. D., Lakhina, G. S., Alex, S.** (2003). The extreme magnetic storm of 1-2 September 1859. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 108(A7), 1268.
- Universidad Nacional.** (2024). *Laboratorio de Instrumentación Geofísica*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias. https://ciencias.bogota.unal.edu.co/laboratorios/geociencias/instrumentacion_geofisica
- Usoskin, I. G.** (2017). A history of solar activity over millennia. *Living Reviews in Solar Physics*, 14(1), 1-97.
- Vargas-Domínguez, S., Calvo-Mozo, B., Martínez Oliveros, J. C., Buitrago-Casas, J. C.** (2023). El Grupo de Astrofísica Solar (GoSA) del Observatorio Astronómico Nacional de Colombia: 10 años indagando sobre la ciencia del Sol. *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 47(183), 445-452. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1930>

- Velli, M., Harra, L., Vourlidas, A., Schwadron, N., Panasenco, O., Liewer, P., Müller, D., Zouganelis, I., Cyr, O., Gilbert, H., Nieves-Chinchilla, T., Auchère, F., Berghmans, D., Fludra, A., Horbury, T., Howard, R., Krucker, S., Maksimović, M., Owen, C., Rodríguez-Pacheco, J., ..., Williams, D. (2020). Understanding the origins of the heliosphere: integrating observations and measurements from Parker Solar Probe, Solar Orbiter, and other space- and ground-based observatories. *Astronomy & Astrophysics*. 642, A4, 1-13. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038245>
- WDC for Geomagnetism, Kyoto. (2024). Dst index service: Hourly Equatorial Dst Values (PROVISIONAL) MAY 2024. https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/202405/index.html
- Yazev, S., Elena I., Khos-Erdene B. (2023). Solar activity cycle 25: the first three years. *Solar-Terrestrial Physics*, 9(3), 3-9.
- Young, C. (2009). Solar ultraviolet radiation and skin cancer. *Occupational Medicine*, 59(2), 82-88.
- Zhang, J., Richardson, I. G., Webb, D. F., Gopalswamy, N., Huttunen, E., Kasper, J. C., Nitta, N. V., Poomvises, W., Thompson, B. J., Wu, C.C., Yashiro, S., Zhukov, A. N. (2007). Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) during 1996-2005, *Journal of Geophysical Research*, 112, A10102, doi:10.1029/2007JA012321.