



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de vulnerabilidades y propuesta de procedimientos de actuación ante eventos de Tormenta Solar Geomagnética para las unidades de la flota de la Armada*

## Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** Boza Jermyn, José María

**DIRECTORES:** Eiras Barca, Jorge  
TN Amaya Mosquera, Sergio

**CURSO ACADÉMICO:** 2023-2024

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de vulnerabilidades y propuesta de procedimientos de actuación ante eventos de Tormenta Solar Geomagnética para las unidades de la flota de la Armada*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida<sub>d</sub>eVigo





## **RESUMEN**

Este trabajo de investigación ofrece una visión completa de las amenazas que representan las Tormentas Solares Geomagnéticas (TSG) para las unidades de la Armada, así como de los desafíos en su protección. La motivación detrás de este estudio radica en la necesidad de comprender los efectos potenciales de las TSG y desarrollar procedimientos para mitigar su impacto. A través de un exhaustivo análisis de este fenómeno, se identifican los orígenes, la historia y los métodos de detección y pronóstico de las TSG, así como sus efectos potenciales en la Tierra y la tecnología.

Las conclusiones principales destacan la confirmación de la hipótesis inicial sobre la falta de protección adecuada en las unidades de la Armada ante los efectos de las TSG. Se subraya la necesidad urgente de procedimientos de actuación para prevenir o paliar los efectos de estos fenómenos y preservar la operatividad de las unidades. Además, se señalan los desafíos económicos, logísticos y tecnológicos que complican la protección efectiva contra las TSG, destacando la dependencia tecnológica de la Armada y las limitaciones presupuestarias.

## **PALABRAS CLAVE**

Tormentas solares geomagnéticas (TSG), Eyección de masa coronal (EMC), Ciclo solar, Prevención y protección, Equipos eléctricos y electrónicos, Buques, Unidades, Protocolos de actuación.





## CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos .....	7
1.1 Contexto y motivación .....	7
1.2 Objetivos y metodología .....	9
1.3 Estructura .....	10
2 Estado del arte .....	11
2.1 Origen y naturaleza de las TSG .....	11
2.1.1 Descripción del viento solar y su impacto en la Tierra .....	11
2.1.2 Ciclo de actividad solar. Relación con las manchas solares .....	13
2.2 Historia y casos relevantes .....	16
2.2.1 Evento Carrington.....	16
2.2.2 Otros eventos significativos.....	19
2.3 Detección y pronóstico.....	20
2.3.1 Importancia de la predicción. Mecanismos físicos detrás de la interacción entre plasma solar y electrónica humana .....	20
2.3.2 Métodos para la detección de EMC y pronóstico de TSG.....	21
3 Desarrollo del TFG.....	27
3.1 Efectos potenciales de una TSG en la Tierra .....	27
3.1.1 Factores de riesgo físicos.....	27
3.1.2 Factores de riesgo tecnológicos .....	28
3.1.3 Consecuencias inmediatas de una TSG extrema .....	29
3.1.4 Consecuencias a corto-medio plazo.....	31
3.2 Preparación y protocolos de actuación.....	33
3.2.1 Revisión de planes de acción en algunas naciones .....	33
3.3 Impacto de las TSG en las Unidades de la Armada .....	37
3.3.1 Tecnología vulnerable .....	37
3.3.2 Impacto en sistemas específicos .....	38
3.3.3 Consecuencias para la dotación .....	41
4 Resultados .....	43
4.1 Procedimiento a seguir una vez que una unidad se ve afectada por una TSG .....	43

4.1.1 Buques que se encuentren atracados en puerto.....	44
4.1.2 Buques que se encuentren en la mar.....	44
4.1.3 Aeronaves .....	45
5 Conclusiones .....	47
5.1 Conclusiones .....	47
5.2 Desafíos en la Protección de las Unidades de la Armada .....	47
6 Bibliografía.....	49
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas, y Ambientales .....	55
Anexo II: Implementación de jaulas de Faraday como medida de protección .....	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Esquema de una tormenta solar geomagnética [2] .....	7
Figura 1-2 Excentricidad Milankovitch [3].....	8
Figura 1-3 Aurora boreal en la Laguna de Jökulsárlón (Islandia) [6] .....	8
Figura 2-1 Capas del sol [5] .....	11
Figura 2-2 Viento solar desviado por el campo magnético terrestre [5] .....	12
Figura 2-3 manchas solares [13] .....	14
Figura 2-4 Ciclo de actividad solar a partir de los registros de manchas solares desde 1750 hasta la actualidad [14].....	14
Figura 2-5 La Pequeña Edad de Hielo [18] .....	15
Figura 2-6 Richard Carrington [21].....	16
Figura 2-7 Dibujos de Richard Carrington durante el apogeo del evento Carrington en 1859 [21]	17
Figura 2-8 Observatorio de Sistemas Heliosféricos (HSO) [24].....	18
Figura 2-9 Presentación de la misión Vigil de la ESA [29] .....	19
Figura 2-10 Auroras boreales visibles el 13 de marzo de 1989 [33].....	19
Figura 2-11 Eyección de masa coronal (EMC) [36] .....	20
Figura 2-12 Esquema de los posibles efectos de una TSG en las tecnologías e infraestructuras [38] .....	21
Figura 2-13 Observatorio de manchas solares, Nuevo México, EE. UU. [39] .....	22
Figura 2-14 Puntos de Lagrange [41].....	22
Figura 2-15 Ejemplo de diagrama de protones solares [36].....	23
Figura 2-16 Imagen del cronógrafo SOHO/LASCO [36] .....	24
Figura 2-17 Software SIDC Cactus [36] .....	24
Figura 2-18 Diagrama EPAM justo después de una llamarada solar [36] .....	25
Figura 3-1 Mapa de latitud geomagnética [48] .....	27
Figura 3-2 Esquema conductividad eléctrica por tipo de suelo [50] .....	28
Figura 3-3 Radio de las órbitas de las diferentes constelaciones de satélites [51] .....	29
Figura 3-4 Red global de cables submarinos [56] .....	30
Figura 3-5 Centros de distribución de suministros esenciales [62].....	31
Figura 3-6 Energías sostenibles [67] .....	32
Figura 3-7 Portada de la estrategia nacional de clima espacial de EE. UU. [68].....	34
Figura 3-8 Esquema de los efectos potenciales de una TSG incluido en la "UK Severe Space Weather Preparedness Strategy" [64].....	36
Figura 3-9 LHD "Juan Carlos I" [69] .....	37
Figura 3-10 Esquema del posicionamiento por satélite (GPS) [73] .....	39

Figura 3-11 Operadores de sistemas de radar a bordo de una fragata clase "Álvaro de Bazán" [69] .....39

Figura 3-12 Misil Harpoon con guiado semiactivo [76] .....40

Figura 4-1 Sextante náutico empleado para observaciones astronómicas [78] .....45

Figura 4-2 Procedimiento de actuación propuesto ante una alerta temprana por TSG .....46

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Escala TSG por la NOAA (National Oceanic and Atmosphere Institution) [12].....	13
Tabla 2-2 Tiempo de viaje de las EMC [36] .....	26



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Contexto y motivación

En la búsqueda constante de comprender la interacción entre el Sol y la Tierra, este trabajo de investigación aborda la relevancia del comportamiento solar irregular y su capacidad para desencadenar fenómenos extremos de alto impacto para la Tierra. En particular, se enfoca en la preparación de la Flota Naval Española ante un evento intenso de tormenta solar.

Existen dos tipos de tormentas solares: las ionosféricas y las geomagnéticas [1]. Las tormentas ionosféricas son aquellas que afectan a la ionosfera terrestre, una capa de la atmósfera en la que interactúan los campos magnéticos tanto de la Tierra como del Sol. Estas tormentas pueden tener implicaciones en las comunicaciones y el posicionamiento.

Por otro lado, las tormentas solares geomagnéticas (en adelante TSG) afectan a la magnetosfera, una región extendida por encima de la ionosfera que actúa como escudo protector ante la radiación. Estas pueden provocar graves alteraciones en la magnetosfera terrestre y, dado su alcance y más amplia importancia, nos centraremos en ellas.

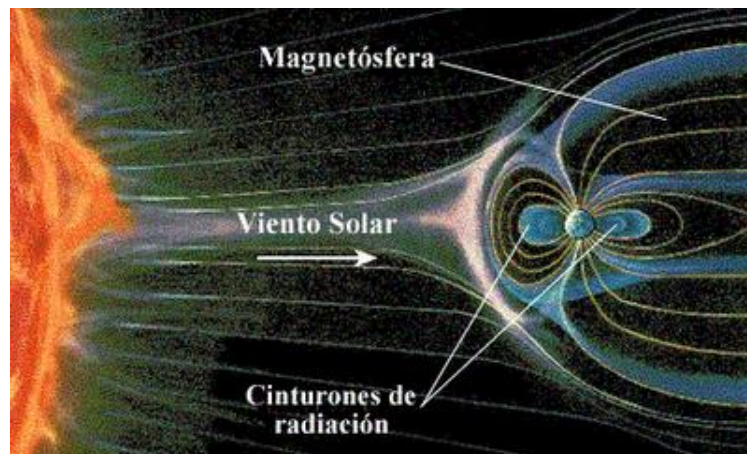
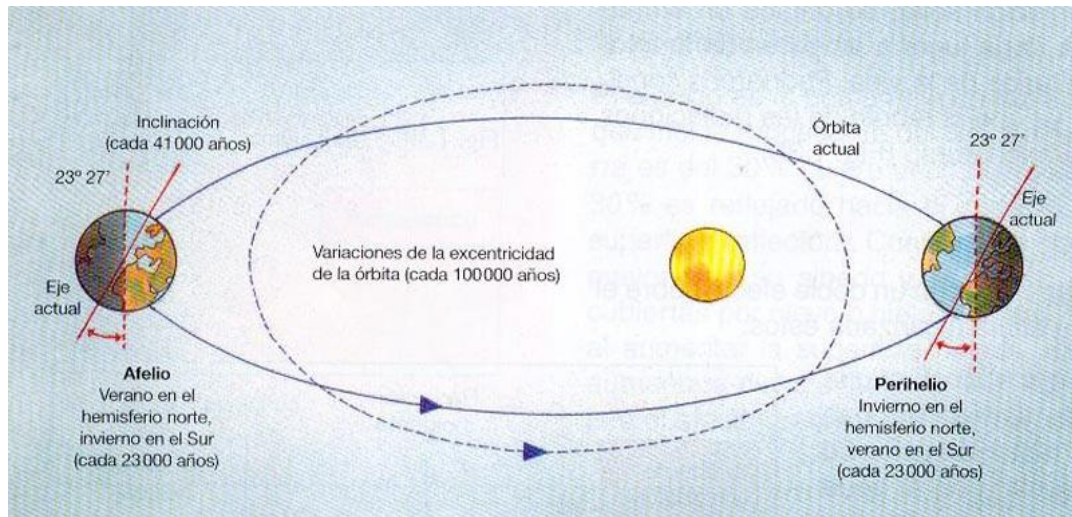


Figura 1-1 Esquema de una tormenta solar geomagnética [2]

El sol, fuente primordial de energía para nuestro planeta, no es una entidad estática. Su actividad varía a lo largo del tiempo, manifestándose en ciclos solares de distinta frecuencia, siendo los ciclos de más alta frecuencia de once años. Durante estos ciclos, el sol experimenta cambios en la emisión de radiación y plasma, así como en la formación de manchas solares<sup>1</sup>. Además, existen ciclos solares de baja frecuencia que se extienden a escalas temporales más largas y pueden influir en el clima terrestre a lo largo de períodos más extensos. Estos ciclos de baja frecuencia, junto con los ciclos de Milankovitch [3] -que son variaciones en la órbita terrestre y la inclinación del eje de la Tierra- desempeñan un papel clave en la variabilidad climática a lo largo del tiempo. Por ejemplo, se ha sugerido que la interacción entre los ciclos solares de baja frecuencia y los ciclos de Milankovitch podría contribuir a la generación de las glaciaciones, periodos en los que extensas capas de hielo cubren grandes áreas de la Tierra [3].

---

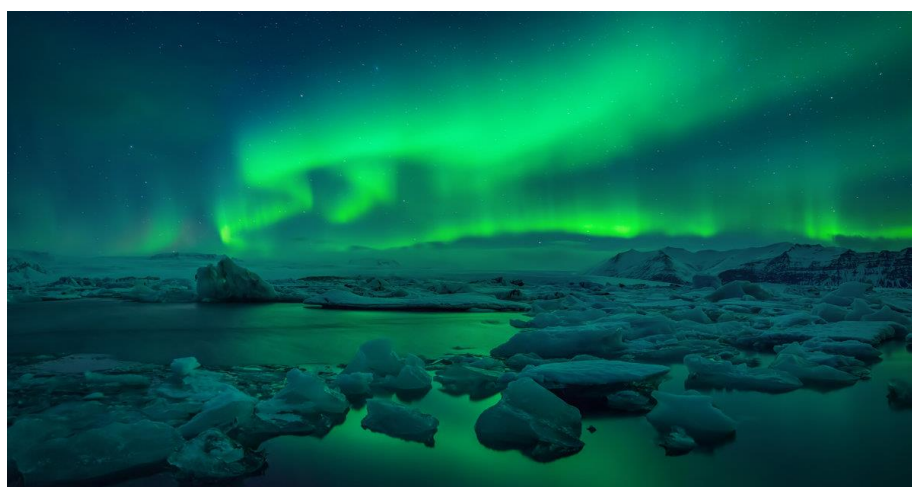
<sup>1</sup> Manchas solares: áreas de actividad magnética reducida que resultan en temperaturas más bajas y son visibles en la fotosfera del Sol.



**Figura 1-2 Excentricidad Milankovitch [3]**

Aunque el sol mantiene una emisión de radiación y plasma constante, que da lugar al conocido viento solar, dentro de su variabilidad natural, puede realizar emisiones súbitas e intensas; conocidas como eyecciones de masa coronal (EMC<sup>2</sup>). Si estas EMC alcanzan la tierra pueden tener graves consecuencias para la infraestructura tecnológica a nivel global, dado que dicha materia se encuentra fuertemente ionizada [4].

El primer evento de TSG formalmente documentado se remonta a 1859 con el “Evento Carrington”, en honor al conocido astrónomo que descubrió la relación entre el ciclo solar y las alteraciones geomagnéticas terrestres. Este evento consistió en una TSG que dejó su impronta en la tierra, afectando sistemas de comunicación y ofreciendo una perspectiva única a través de auroras boreales visibles incluso en lugares inusuales como Madrid o Hawái [5]. La ionización generada en la atmósfera durante esta tormenta fue tal que estaciones (instalaciones de comunicación, especialmente las telegráficas) no dañadas operaron sin necesidad de alimentación eléctrica [5]. Este suceso significó el punto de partida para el estudio sistemático de las TSG y su influencia en la tierra.



**Figura 1-3 Aurora boreal en la Laguna de Jökulsárlón (Islandia) [6]**

<sup>2</sup> EMC: eyecciones de masa coronal o llamarada solar.

La investigación contemporánea destaca la complejidad de la actividad solar. Un estudio, publicado en febrero de 2012 por el Dr. Peter Riley [7], sugiere una probabilidad del 12% de experimentar un evento similar al de Carrington en la década actual, subrayando la necesidad de una vigilancia continua. Además, la observación de patrones cíclicos, con tormentas severas cada 25 años y tormentas menos potentes cada tres años, resalta la naturaleza impredecible y variable del comportamiento solar.

La cantidad de manchas solares en la superficie del Sol varía en un ciclo solar de unos 11 años, coincidente con el ciclo de alta frecuencia solar. Durante el máximo solar, hay un aumento significativo en el número de manchas solares, mientras que, durante el mínimo solar, la cantidad de manchas solares disminuye. En otras palabras, la actividad magnética del Sol aumenta y disminuye con los máximos y mínimos del ciclo solar, respectivamente. Las manchas solares son regiones espaciales relativamente frías, pero en las que el campo magnético de la fotosfera tiende a desestabilizarse, incrementando las probabilidades de la emisión de una llamarada [8].

Por tanto, podemos cuantificar la probabilidad de que ocurran eventos solares como las ya mencionadas EMC, en proporción a la cantidad de manchas solares. Esta relación directamente proporcional es fundamental para prever la actividad solar futura y mejorar la capacidad de pronosticar tormentas solares que puedan afectar a nuestro entorno.

Se presupone de manera implícita que no es suficiente con ser capaces de anticipar una TSG; a ello debe ir asociado el desarrollo de medidas, procedimientos, planes y protocolos de actuación ante un fenómeno de estas características, que puede causar interrupciones críticas en toda la electrónica de las regiones afectadas.

La creciente dependencia tecnológica de la Armada Española y su exposición a sistemas satelitales plantean desafíos específicos ante un evento solar.

Aunque países como Canadá y Estados Unidos cuentan con una serie de medidas prácticas ampliamente desarrolladas; centradas en la prevención, la preparación y la coordinación de esfuerzos para mitigar los posibles impactos adversos en la infraestructura y la sociedad [9]; la carencia de programas concretos de las Fuerzas Armadas de España destaca la urgencia de establecer estrategias de resiliencia.

## 1.2 Objetivos y metodología

El presente trabajo de investigación pretende abordar una problemática crítica en el ámbito de la seguridad de las comunicaciones y sistemas electrónicos, en el contexto de la Armada española. La importancia de la resolución de este problema surge de la creciente dependencia de la tecnología en las operaciones navales y la necesidad imperante de comprender y mitigar los potenciales impactos de las tormentas solares geomagnéticas.

El objetivo principal es realizar un análisis exhaustivo de las vulnerabilidades existentes en las unidades de la Armada frente a estos sucesos.

Para ello plantean una serie de hitos específicos:

- Identificar y clasificar las tecnologías y sistemas electrónicos más susceptibles a los efectos de TSG.
- Evaluar el impacto de eventos geomagnéticos en la operatividad y seguridad de nuestras unidades.
- Proporcionar recomendaciones específicas para fortalecer la resiliencia de los sistemas.

- Desarrollar procedimientos de actuación y protocolos de emergencia para reducir los efectos adversos de las TSG en operaciones navales.

Los resultados y recomendaciones derivados de este estudio no solo procuran beneficiar a la Armada, sino que también podrían tener implicación en la seguridad marítima a nivel global. La aplicación de estos procedimientos puede servir como modelo para otras flotas y organismos que enfrentan desafíos similares.

### 1.3 Estructura

Este trabajo de investigación se ha organizado de manera sistemática para abordar de manera integral los diferentes aspectos relacionados con el fenómeno de Tormenta Solar Geomagnética y su impacto en las unidades de la Armada. A continuación, se describe la estructura del trabajo:

1. **Introducción y Objetivos:** En este primer apartado se establece el contexto del estudio y se definen los objetivos de la investigación. Se explica la relevancia de las TSG y se presenta la metodología utilizada para abordar el tema.
2. **Estado del Arte:** En esta sección se proporciona un marco teórico completo sobre las TSG, abordando su origen, naturaleza, historia, métodos de detección y pronóstico, así como los efectos potenciales en la Tierra. Se incluyen también revisiones de casos relevantes y la preparación y protocolos de actuación existentes.
3. **Desarrollo del Trabajo de Fin de Grado:** En este apartado se profundiza en el impacto específico de las TSG en las unidades de la Armada. Se identifican las tecnologías vulnerables, se analizan los efectos en sistemas específicos y se examinan las consecuencias para la dotación de personal.
4. **Resultados:** Aquí se presentan los procedimientos propuestos para actuar ante una TSG, detallando las acciones a seguir para las unidades que se encuentren atracadas en puerto, en la mar y las aeronaves.
5. **Conclusiones y Líneas Futuras:** En el último apartado del trabajo se resumen las principales conclusiones obtenidas a partir del estudio realizado. Además, se identifican los desafíos en la protección de las unidades de la Armada frente a las TSG y se sugieren posibles líneas de investigación futuras para abordar estos desafíos de manera más efectiva.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Origen y naturaleza de las TSG

#### 2.1.1 Descripción del viento solar y su impacto en la Tierra

A pesar de la percepción aparentemente sólida del sol, este se asemeja más a un océano extremadamente caliente, cuyos átomos se dividen en electrones y núcleos que flotan en un estado de plasma. Este plasma es influenciado por el campo magnético solar, que, a su vez, es generado por un proceso dinámico conocido como dínamo, manteniendo así una constante interacción con el entorno espacial [4].

El campo magnético solar almacena considerables cantidades de energía que se disipan a lo largo del Sistema Solar. Este proceso, acompañado por el constante flujo de plasma solar, se denomina viento solar, y genera fenómenos tan frecuentes como las auroras polares en los planetas de su entorno. Sin embargo, la aparente calma del sol puede ser interrumpida por su actividad magnética.

El viento solar es un flujo constante de partículas cargadas emitidas por el Sol, principalmente compuesto por electrones, protones, iones y partículas alfa (núcleos de helio). Este plasma solar se origina en la corona solar, la capa más externa del Sol. Su constante emisión se debe a la actividad nuclear en el núcleo solar, donde el hidrógeno se fusiona para formar helio [5].

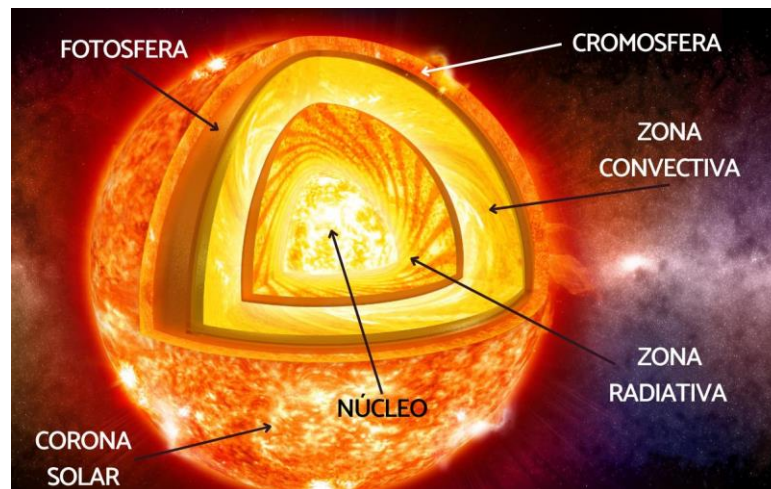
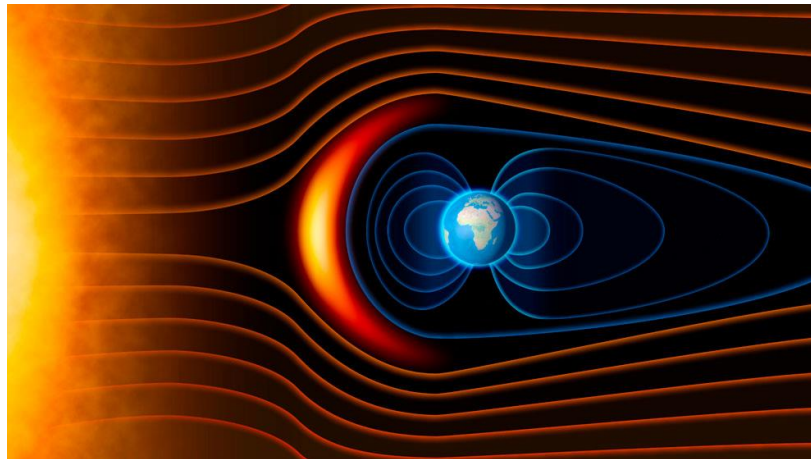


Figura 2-1 Capas del sol [5]

Cuando estas partículas cargadas llegan a la Tierra, interactúan con su campo magnético. La Tierra, al tener un campo magnético propio, actúa como un escudo protector ante la mayor parte de estas partículas, evitando que penetren directamente a la atmósfera y desviándolas hacia las regiones polares [5]. Este fenómeno es responsable de las auroras boreales y australes en nuestro planeta.



**Figura 2-2 Viento solar desviado por el campo magnético terrestre [5]**

En circunstancias normales, la intensidad del viento solar no es suficiente para causar problemas significativos en la Tierra debido a la capacidad del campo magnético para desviar la mayor parte de las partículas. Sin embargo, en ocasiones, el Sol experimenta explosiones violentas conocidas como llamaradas solares o EMC. Estos eventos pueden generar un viento solar más intenso y, en casos extremos, afectar la magnetosfera terrestre.

Sin embargo, no es suficiente que el plasma solar de la EMC llegue a la Tierra; también deben cumplirse condiciones específicas de orientación de los campos magnéticos para que la interacción entre la EMC y la magnetosfera sea efectiva y desencadene efectos significativos. Esto implica que los campos magnéticos de la Tierra y de la EMC deben estar alineados de cierta manera para que ocurran interacciones magnéticas relevantes. Si los campos magnéticos no están orientados de manera propicia, la EMC puede pasar desapercibida o tener efectos mínimos en la magnetosfera terrestre [10].

Al igual que existen categorías que se utilizan para clasificar los huracanes, también existen escalas meteorológicas espaciales para comunicar la gravedad de las tormentas solares (Tabla 1) [11]. Las escalas describen las perturbaciones ambientales tanto para eventos de tormentas solares, como para eyecciones de masa coronal. En la escala aportada por la Administración Nacional norteamericana del Océano y la Atmósfera (NOAA, por sus siglas en inglés), las escalas tienen cinco niveles numerados (desde menor a extrema, función de su magnitud), análogos a huracanes, tornados y terremotos, que indican la gravedad. Enumeran los posibles efectos en cada nivel. También muestran con qué frecuencia ocurren dichos eventos y proporcionan una medida de la intensidad de las causas físicas [12].

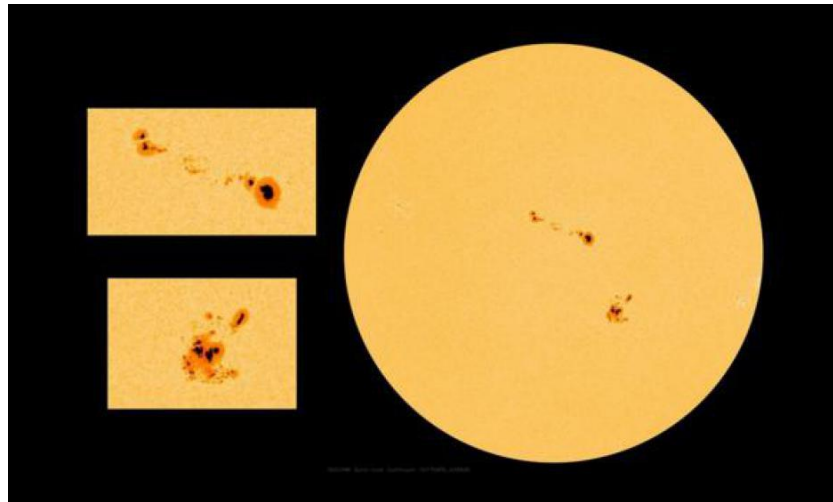
Categoría		Efecto
Escala	descripción	
G5	Extrema	<p>Sistemas de energía: Pueden ocurrir problemas generalizados de control de voltaje y problemas en sistemas de protección, algunos sistemas de red pueden experimentar colapsos completos o apagones. Los transformadores pueden sufrir daños.</p> <p>Otros sistemas: Las corrientes en las tuberías pueden alcanzar cientos de amperios, la propagación de radio de alta frecuencia (HF) puede ser imposible en muchas áreas durante uno o dos días, la navegación satelital puede degradarse durante días, la navegación de radio de baja frecuencia puede estar fuera de servicio durante horas, y se han observado auroras tan al sur como Florida y el sur de Texas (típicamente a 40° de latitud geomagnética).</p>
G4	Severa	<p>Sistemas de energía: Posibles problemas generalizados de control de voltaje y algunos sistemas de protección podrían activar erróneamente activos clave de la red eléctrica.</p> <p>Otros sistemas: Las corrientes inducidas en los conductos afectan las medidas preventivas, la propagación de radio HF es esporádica, la navegación por satélite se degrada durante horas, la navegación por radio de baja frecuencia se interrumpe, y se han observado auroras tan al sur como Alabama y el norte de California (normalmente a una latitud geomagnética de 45°).</p>
G3	Fuerte	<p>Sistemas de energía: Pueden ser necesarias correcciones de voltaje, y algunos dispositivos de protección pueden generar falsas alarmas.</p> <p>Otros sistemas: Pueden producirse problemas intermitentes en la navegación por satélite y en la navegación por radio de baja frecuencia, la radio HF puede ser intermitente, y se ha observado aurora tan al sur como Illinois y Oregón (normalmente a una latitud geomagnética de 50°).</p>
G2	Moderada	<p>Sistemas de energía: Los sistemas de energía en latitudes altas pueden experimentar alarmas de voltaje, y tormentas de larga duración pueden causar daños en los transformadores.</p> <p>Otros sistemas: La propagación de radio HF puede desvanecerse en latitudes más altas, y se ha observado aurora tan al sur como Nueva York e Idaho (normalmente a una latitud geomagnética de 55°).</p>
G1	Menor	<p>Sistemas de energía: Pueden ocurrir fluctuaciones débiles en la red eléctrica.</p> <p>Otros sistemas: Los animales migratorios se ven afectados a este y a niveles superiores; la aurora es comúnmente visible en latitudes altas (norte de Michigan y Maine).</p>

Tabla 2-1 Escala TSG por la NOAA (National Oceanic and Atmosphere Institution) [12]

### 2.1.2 Ciclo de actividad solar. Relación con las manchas solares

Nuestro sol, una estrella de tipo G2V [4], es una esfera de plasma en constante actividad. En su superficie, exhibe una temperatura de alrededor de 6000 K y, su núcleo, realiza la fusión nuclear convirtiendo el hidrógeno en helio [13]. No obstante, el Sol no es una esfera uniforme de plasma; está compuesto por distintas capas. El núcleo, la región más interna y densa, es donde tienen lugar las reacciones nucleares. Más externamente, la zona radiactiva, altamente ionizada, que transmite energía por radiación. Le sigue la zona convectiva, donde el gas se eleva y desciende en columnas, que precede a la fotosfera (ver Figura 2-1). Para comprender sus cambios y momentos críticos, observamos la fotosfera, la capa visible del sol que refleja alteraciones en su campo magnético.

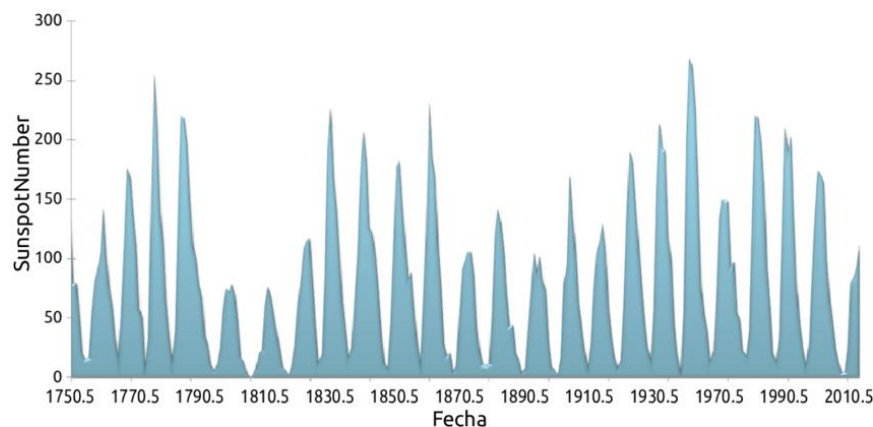
En el núcleo, las reacciones nucleares transforman hidrógeno en helio, generando un campo magnético en las capas más profundas. Este campo magnético, no uniforme debido a la rotación diferencial del sol, produce líneas magnéticas (líneas que representan la dirección y magnitud del campo magnético en una región determinada) enredadas que dan origen a las manchas solares [13].



**Figura 2-3 manchas solares [13]**

Las manchas solares son áreas oscuras que aparecen en la fotosfera por el intenso flujo magnético que emerge desde el interior. Estas áreas, también conocidas como regiones activas, se forman cuando el flujo magnético calienta la fotosfera y la cromosfera superiores (ver Figura 2-1), manifestándose como fáculas<sup>3</sup>. Esto crea áreas más frías y menos densas en el corazón de estos campos magnéticos, visibles como manchas solares. Las regiones activas asociadas con grupos de manchas solares son fuente probable de eventos climáticos espaciales significativos, como llamaradas solares, EMC y tormentas radiativas [8].

Las manchas solares pueden variar en forma y tamaño, desde pequeñas manchas individuales hasta grandes grupos complejos que pueden ser muchas veces más grandes que la Tierra. Se les asigna un número de región de 4 dígitos por la NOAA/SWPC (El Centro de Predicción del Clima Espacial) para rastrear su movimiento a medida que rotan en el disco solar visible [8]. Estas manchas solares se analizan diariamente utilizando escalas de clasificación.



**Figura 2-4 Ciclo de actividad solar a partir de los registros de manchas solares desde 1750 hasta la actualidad [14].**

<sup>3</sup> Fáculas: zonas brillantes que se forman en los cañones situados entre los gránulos solares, células de convección de varios millares de kilómetros de tamaño que se forman y se disipan constantemente cada varios minutos. Son producidas por las concentraciones de líneas de campo magnético.

La actividad de las manchas solares sigue un ciclo solar de aproximadamente 11 años, con periodos de máxima y mínima actividad conocidos como máximo y mínimo solares, respectivamente. Estos son ciclos de alta frecuencia, pero también existen ciclos solares de baja frecuencia, que se extienden a lo largo de períodos más largos. También influyen en el clima terrestre junto con los ciclos de Milankovitch [3], que son variaciones orbitales, desempeñan un papel clave en la variabilidad climática a lo largo del tiempo (ver Figura 1-2). Por ejemplo, la Pequeña Edad de Hielo entre 1640 y 1715 coincidió con un mínimo solar prolongado [15], el Mínimo de Maunder.

El Mínimo de Maunder es un período de baja actividad solar que ocurrió durante el siglo XVII, aproximadamente entre 1645 y 1715. Durante este tiempo, se registró una disminución significativa en el número de manchas solares observadas en la superficie del Sol. El nombre proviene del astrónomo británico Edward Walter Maunder, quien lo estudió y popularizó a finales del siglo XIX [16].

Este período de baja actividad solar ha sido asociado con un fenómeno climático conocido como la Pequeña Edad de Hielo. Durante la Pequeña Edad de Hielo, que abarcó desde alrededor del siglo XIV hasta el siglo XIX, se observaron condiciones climáticas más frías de lo habitual en diversas partes del mundo, con inviernos más severos y glaciaciones locales extendidas [16].

Aunque la relación exacta entre el Mínimo de Maunder y la Pequeña Edad de Hielo aún es objeto de debate entre los científicos, muchos estudios sugieren que la disminución en la actividad solar durante este período pudo haber contribuido al enfriamiento global al reducir la cantidad de radiación solar que alcanzaba la Tierra [16]. Sin embargo, otros factores, como las variaciones orbitales y otros fenómenos climáticos, también pueden haber desempeñado un papel en la Pequeña Edad de Hielo [17].



**Figura 2-5 La Pequeña Edad de Hielo [18]**

La numeración de los ciclos solares comenzó en 1755. Actualmente nos encontramos dentro del ciclo solar número 25 (iniciado en diciembre de 2019) [19], en una etapa de alta actividad, es decir, un máximo solar que, según los astrónomos, alcanzará su pico en 2025 [20]. Se considera que un nuevo ciclo solar comienza cuando las manchas solares emergen en latitudes más altas con polaridades magnéticas opuestas al ciclo anterior.

## 2.2 Historia y casos relevantes

La actividad del sol afecta a todo el sistema solar y, en ocasiones la Tierra siente las consecuencias de las tormentas solares. Desde la antigüedad hasta la era moderna, hemos sido testigos de la interacción entre el Sol y la Tierra, con episodios notables que han influenciado diversas etapas de la historia. Analizando estos eventos pasados y sus repercusiones, podemos comprender mejor la importancia de estudiar y monitorear la actividad solar para proteger nuestra tecnología y prepararnos para posibles contingencias en el futuro.

### 2.2.1 Evento Carrington

El 1 de septiembre de 1859, una intensa tormenta solar geomagnética impactaba en la Tierra procedente del Sol [5]. Este fenómeno, bautizado así en honor al astrónomo británico Richard Carrington, marcó un hito en la comprensión de las tormentas solares y sus efectos en la Tierra.

En aquel momento, nuestra sociedad era muy diferente, no dependía de la tecnología como hoy en día, pero sus consecuencias nos permiten imaginar cómo sería en la actualidad y cómo tendríamos que enfrentarnos al peligro que supone una tormenta solar para nuestra sociedad.

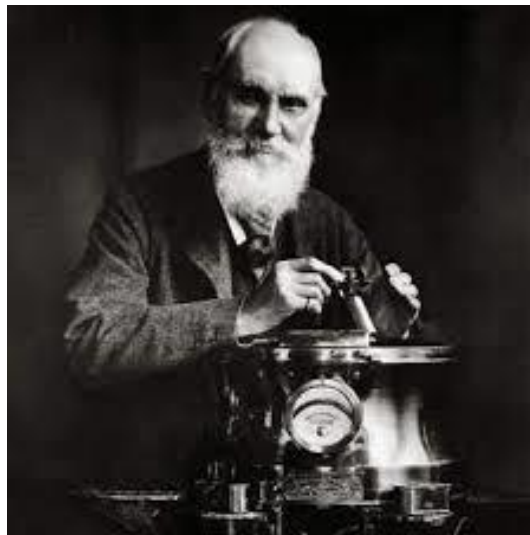


Figura 2-6 Richard Carrington [21]

En agosto de 1859, astrónomos de todo el mundo observaron con fascinación cómo aumentaba el número de manchas solares en el disco solar. Entre ellos se encontraba Richard Carrington, un aficionado observador del cielo de un pequeño pueblo llamado Redhill, cerca de Londres.

El 1 de septiembre, mientras Carrington estaba dibujando las manchas solares, fue cegado por un repentino destello de luz. Carrington lo describió como una "llamarada de luz blanca" [22].

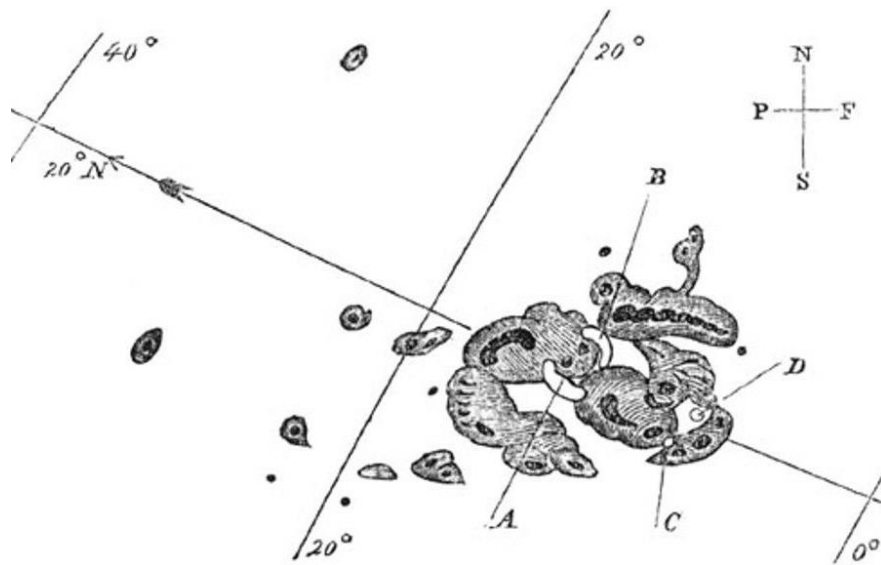


Figura 2-7 Dibujos de Richard Carrington durante el apogeo del evento Carrington en 1859 [21]

Se trataba de la EMC más violenta hasta la fecha que, en poco más de 17 horas, recorrió más de 150 millones de kilómetros entre el Sol y la Tierra, desatando su fuerza en nuestro planeta. Cabe destacar que, según la NASA, normalmente las EMC tardan varios días en alcanzar nuestro planeta [23].

Al día siguiente de que Carrington observara el impresionante destello, la Tierra experimentó una tormenta geomagnética sin precedentes, con sistemas de telegrafía descontrolados y exhibiciones aurorales, generalmente confinadas a latitudes polares, visibles en los trópicos [24]. Carrington fue el primero en darse cuenta de que el destello solar que había visto era casi con seguridad la causa de esta enorme perturbación geomagnética [14].

El Evento Carrington desató una enorme TSG que causó estragos en la tecnología. La Tierra quedó en silencio mientras las comunicaciones telegráficas alrededor del mundo fallaban [25].

Si bien las tormentas solares rara vez representan una amenaza directa para la vida humana, sin lugar a dudas pueden afectar a los sistemas críticos de seguridad debido a sus efectos electromagnéticos, desde comunicaciones espaciales, servicios de navegación y agencias de meteorología, hasta la distribución de energía eléctrica en la superficie terrestre [26].

Se cree que, si una tormenta del tamaño del evento Carrington ocurriera hoy en día, podría provocar estragos en el internet de medio mundo. Por esta razón, gobiernos como el de Reino Unido describen el clima espacial adverso como uno de los peligros naturales más graves [27], y algunas empresas cuentan con planes de contingencia para enfrentar eventos de este calibre, siempre y cuando se les advierta con la suficiente antelación [21].

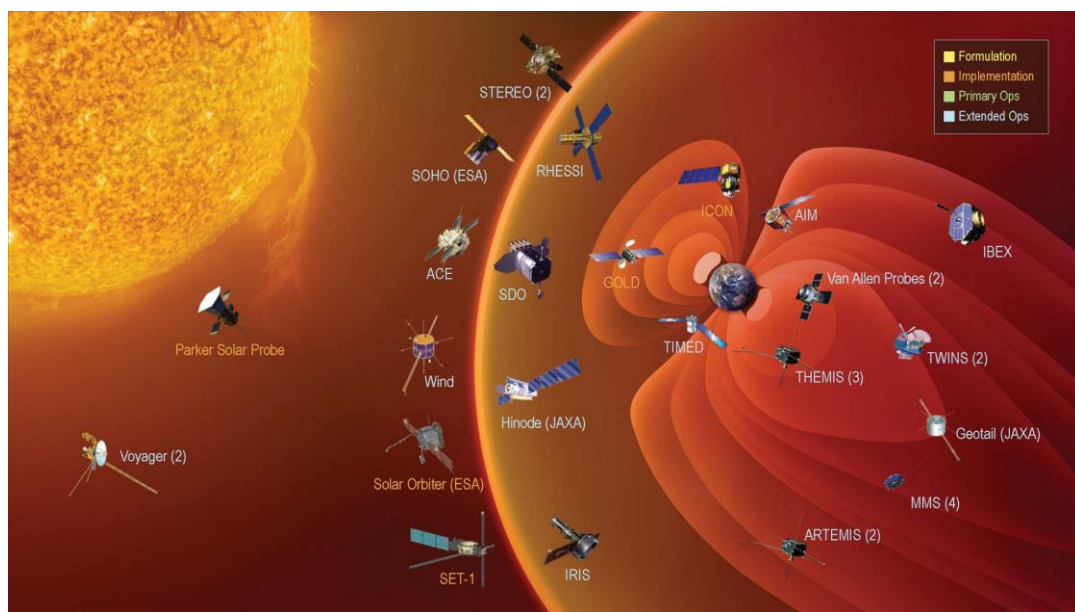
Investigadores de la Agencia de Investigación Atmosférica y Ambiental en Estados Unidos han estimado que un evento de clase Carrington resultaría en daños entre 0,6 y 2,6 billones de dólares solo en los Estados Unidos [22].

La probabilidad de experimentar una tormenta solar de magnitud similar puede parecer baja cuando se expresa en términos estadísticos, con un período de retorno estimado de aproximadamente 200 años [28]. Sin embargo, al considerar un horizonte de vida humano de alrededor de 100 años, esta probabilidad adquiere una relevancia mucho mayor. De hecho, la posibilidad de encontrarse con al menos un evento de este tipo durante la vida de una persona se aproxima al 50%. Este análisis destaca

la importancia de reconocer que, aunque estadísticamente infrecuente, la ocurrencia de tales eventos no debe ser subestimada dada su significativa repercusión potencial.

Fenómenos la mitad de intensos que el de Carrington son mucho más frecuentes, pudiendo ocurrir con bastante más frecuencia. Además, el clima espacial es notablemente difícil de predecir, por lo que resulta imposible saber cuándo será el próximo Evento Carrington.

Los científicos del Centro de Predicción del Clima Espacial de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) analizan diariamente las regiones de manchas solares a para evaluar posibles amenazas [21]. Monitorean y registran los cambios en el tamaño, número y posición de las manchas solares para evaluar la probabilidad de una llamarada solar y/o una eyección de masa coronal dirigida hacia la Tierra desde una región activa. Además, la NASA cuenta con una flota de satélites, conocida como el Observatorio de Sistemas Heliosféricos (HSO), diseñada para estudiar el sol y su influencia en el sistema solar [24].



**Figura 2-8 Observatorio de Sistemas Heliosféricos (HSO) [24]**

La Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) tiene previsto para esta década el lanzamiento de su satélite ESA Vigil. Se trata de una misión espacial pionera diseñada para monitorear de cerca las actividades solares y proporcionar una vigilancia constante para proteger a la Tierra de los efectos dañinos del clima espacial [29].

Situado en una posición gravitacionalmente estable a 150 millones de kilómetros detrás de la Tierra, ESA Vigil observará el Sol y el espacio circundante para detectar fenómenos solares peligrosos, como llamaradas solares y eyecciones de masa coronal, antes de que puedan afectar a nuestro planeta [29]. Su misión es identificar y rastrear estos eventos solares potencialmente disruptivos y transmitir datos en tiempo real a la red de servicios de clima espacial de la ESA para su análisis y difusión. A través de esta vigilancia continua, ESA Vigil ayudará a proteger nuestra infraestructura tecnológica y la salud de los astronautas al prevenir y mitigar los impactos de las tormentas solares en la Tierra y el espacio cercano [30].

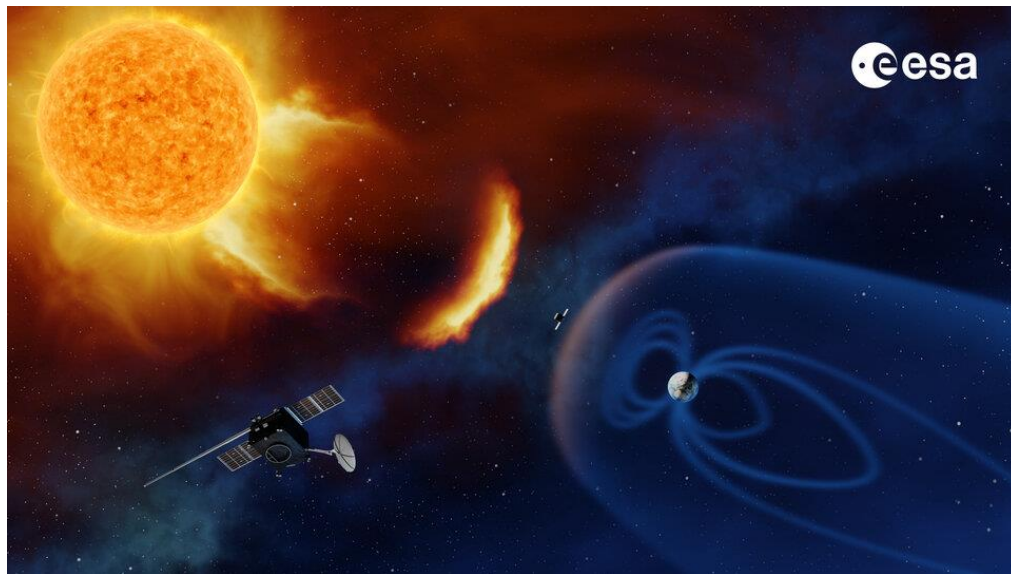


Figura 2-9 Presentación de la misión Vigil de la ESA [29]

### 2.2.2 Otros eventos significativos

El evento Carrington es un caso particular de tormenta solar, ya que es la única de tal magnitud que ha quedado registrada [5]. No obstante, estudios recientes sugieren que tales fenómenos se llevan sucediendo desde tiempos inmemoriales.

Un estudio reportado en enero de 2022 reveló que una poderosa tormenta solar, que golpeó la Tierra hace 9,200 años, dejó partículas radiactivas en el hielo debajo de Groenlandia que aún permanecen allí hasta el día de hoy [31]. Anterior a este último, en 2020, otro estudio sugirió que una tormenta de similares características a la de Carrington impactó la tierra alrededor del año 774 d.C. [25].

No es necesario remontar tantos años atrás para analizar su recurrencia. Ya en el siglo XX, en 1989, una TSG aparentemente débil dejó sin luz a la ciudad de Quebec, Canadá, durante nueve largas horas [32]. El fuerte flujo de corriente eléctrica inducida por la tormenta causó la sobrecarga y el fallo de los transformadores de energía en la red eléctrica de la provincia, lo que resultó en un apagón masivo. Más de seis millones de personas quedaron sin electricidad durante aproximadamente nueve horas [33].

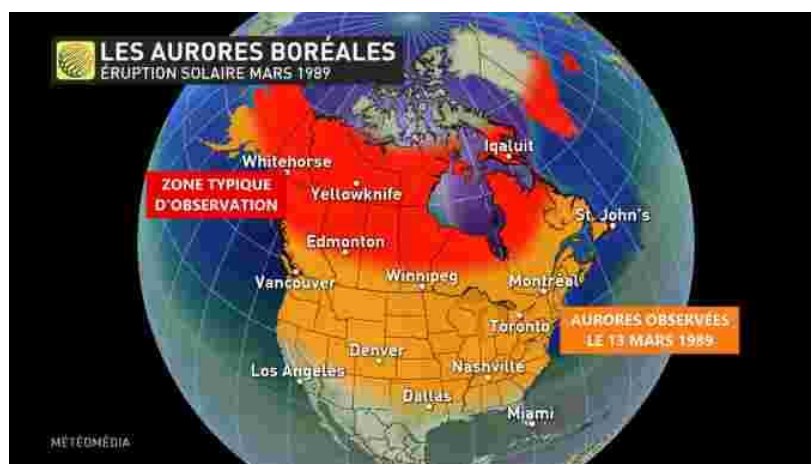


Figura 2-10 Auroras boreales visibles el 13 de marzo de 1989 [33]

Todos estos eventos históricos nos dan una idea de la persistencia de las tormentas solares a lo largo de la historia. Además, ilustran como tales fenómenos pueden tener efectos duraderos y significativos, especialmente para una sociedad moderna tecnológicamente dependiente. Es previsible que un evento de similares características al de Carrington pueda ocurrir pronto; pero lo que verdaderamente hay que preguntarse es el cuándo, y si estamos preparados para ello [4]. No hay duda de que seguirán siendo una parte relevante de la dinámica espacial a lo largo del tiempo.

## 2.3 Detección y pronóstico

### 2.3.1 Importancia de la predicción. Mecanismos físicos detrás de la interacción entre plasma solar y electrónica humana

Una tormenta solar puede provocar interrupciones significativas en las comunicaciones y sistemas electrónicos debido a la interacción entre el plasma solar y la electrónica humana. Este fenómeno se basa en una serie de complejos mecanismos físicos que ocurren tanto en el espacio como en la atmósfera terrestre [34].

En primer lugar, las tormentas solares son eventos explosivos en el Sol que liberan enormes cantidades de energía en forma de radiación electromagnética y partículas cargadas. Estas erupciones ocurren principalmente en las regiones activas del Sol, como las manchas solares, donde el campo magnético solar es particularmente intenso y propenso a la formación de bucles magnéticos inestables.

Cuando una erupción solar ocurre, se produce una liberación repentina de energía en forma de radiación electromagnética, incluidos rayos X y luz visible [35]. Además, se expulsan grandes cantidades de plasma solar, compuesto principalmente por electrones, protones e iones, en lo que se conoce como eyección de masa coronal. Esta eyección viaja a través del espacio interplanetario a velocidades que pueden alcanzar varios millones de kilómetros por hora.

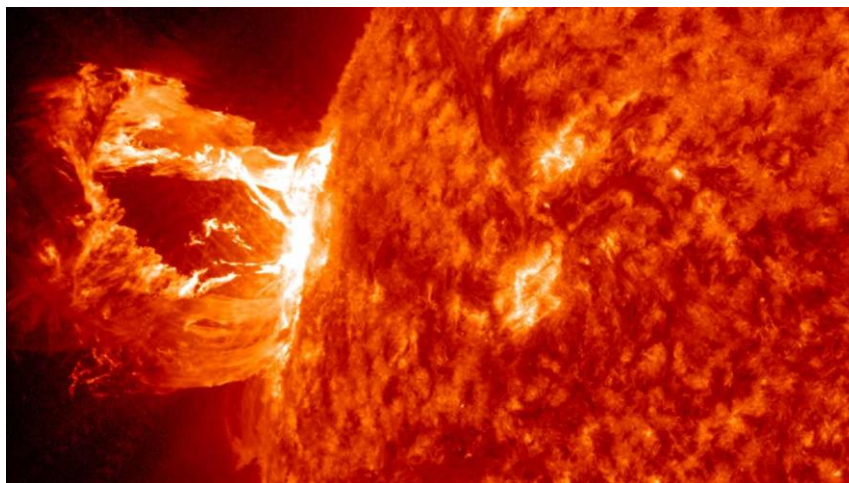


Figura 2-11 Eyección de masa coronal (EMC) [36]

Al llegar a la Tierra, la EMC interactúa con el campo magnético terrestre y la magnetosfera, una región en forma de burbuja creada por el campo magnético de la Tierra que protege al planeta de la radiación solar nociva [37]. La interacción entre la EMC y el campo magnético terrestre puede deformar y comprimir la magnetosfera, creando condiciones propicias para la generación de corrientes eléctricas inducidas.

Estas corrientes eléctricas inducidas pueden tener efectos perjudiciales en la infraestructura tecnológica de la Tierra. Por ejemplo, cuando una eyección de masa coronal llega a la Tierra, puede inducir corrientes eléctricas en las redes eléctricas de alta tensión, causando sobrecargas en transformadores y dispositivos electrónicos [37]. Se estima que una fuerte tormenta solar podría provocar el fallo de alrededor del diez por ciento de todos los satélites, lo que podría ocasionar problemas en áreas donde se requiere posicionamiento preciso, como la navegación marítima y el tráfico aéreo [38]. Las corrientes inducidas durante las tormentas geomagnéticas pueden causar aumentos repentinos en los voltajes de los transformadores y daños en los cables submarinos, lo que lleva a cortes generalizados de electricidad e Internet. Además, la interacción entre la EMC y la atmósfera superior de la Tierra puede provocar la ionización de la atmósfera y disturbios en las capas ionosféricas, lo que afecta la propagación de las señales de radio y las comunicaciones satelitales [38].

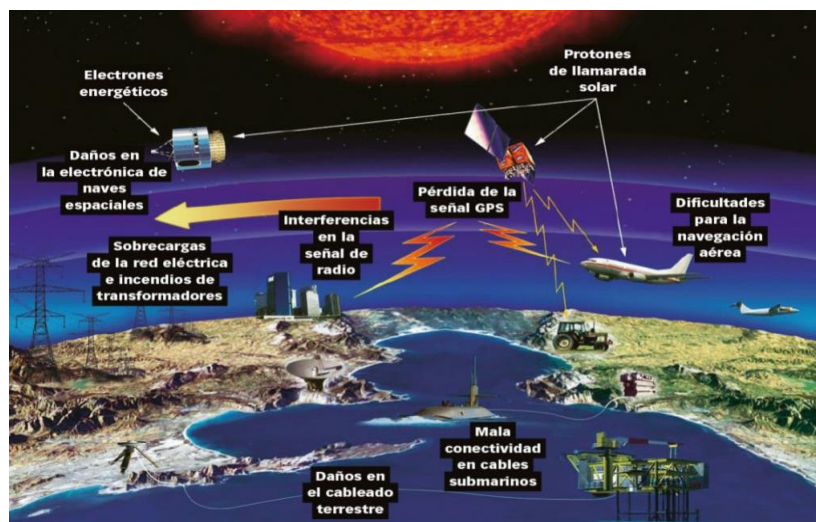


Figura 2-12 Esquema de los posibles efectos de una TSG en las tecnologías e infraestructuras [38]

La capacidad de predecir las tormentas solares es crucial para salvaguardar la infraestructura tecnológica, la seguridad en la aviación y el transporte, la salud humana y la precisión en la navegación GPS. Al anticipar estos eventos, se pueden implementar medidas preventivas y protocolos de seguridad que mitiguen los posibles daños y reduzcan el impacto negativo en la sociedad y la economía. Un pronóstico preciso de las tormentas solares es fundamental para garantizar la continuidad de los servicios vitales y mantener la seguridad y el bienestar de la población en un mundo cada vez más dependiente de la tecnología y la conectividad global.

### 2.3.2 Métodos para la detección de EMC y pronóstico de TSG.

Existen diferentes métodos de detección y pronóstico empleados por científicos para mejorar la precisión de las predicciones de tormentas solares y ayudar a minimizar su impacto en la Tierra y en la tecnología humana.

El primero y quizás más evidente consiste en la observación solar. Los telescopios terrestres y espaciales especializados pueden monitorear continuamente la actividad en la superficie del Sol. Estas observaciones proporcionan información en tiempo real sobre la actividad solar y ayudan a prever la ocurrencia de EMC. Con técnicas mejoradas de observación y predicción, como combinar la

inteligencia artificial (IA) con nuestros satélites, podemos incrementar el tiempo del que disponemos para prepararnos para los impactos de una tormenta solar [39].

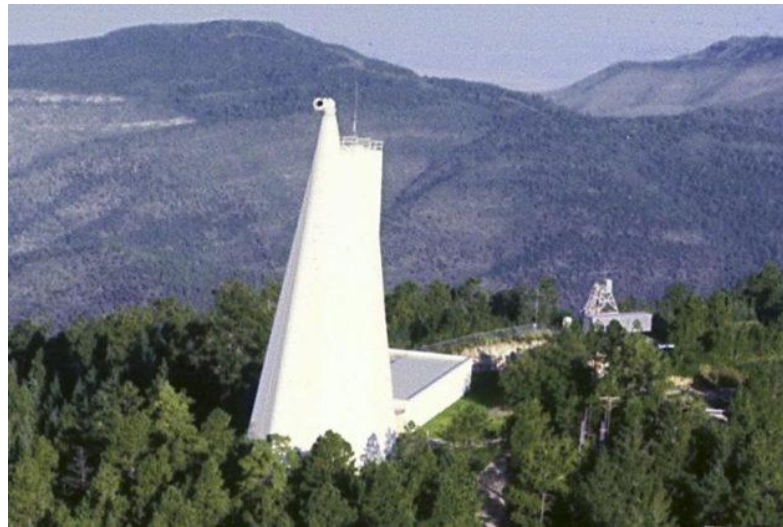


Figura 2-13 Observatorio de manchas solares, Nuevo Méjico, EE. UU. [39]

Por otro lado, existen varias redes de satélites en órbita alrededor de la Tierra que monitorean constantemente el entorno espacial y la actividad solar. Los puntos de Lagrange son posiciones en el espacio donde los objetos enviados tienden a permanecer inmóviles. En los puntos de Lagrange, la atracción gravitacional de dos masas grandes iguala precisamente la fuerza centrípeta requerida para que un objeto pequeño se mueva con ellas. Estos puntos en el espacio pueden ser utilizados por las naves espaciales para reducir el consumo de combustible necesario para mantenerse en posición [40]. A través de satélites situados en los puntos de Lagrange de la órbita de la Tierra alrededor del Sol pueden detectarse EMC peligrosas para la Tierra [1].

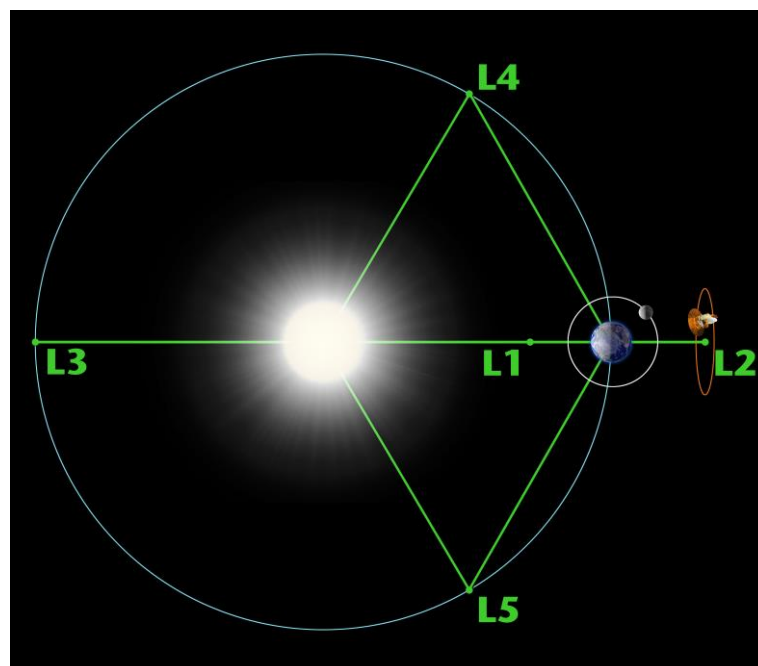


Figura 2-14 Puntos de Lagrange [41]

También se utilizan modelos computacionales avanzados para simular la evolución del viento solar y predecir la llegada y la intensidad de las EMC a la Tierra. Estos modelos combinan datos observacionales con ecuaciones físicas que describen el comportamiento del plasma solar y la interacción con el campo magnético terrestre. Nos proporcionan una estimación del tiempo que tardará la TSG en alcanzar nuestro planeta, en caso de que vaya dirigida a la Tierra.

Algunos ejemplos de estos métodos se describen a continuación:

1. **Monitor de flujo de protones:** Funciona detectando la llegada de protones provenientes de las EMC a la Tierra y registrando su flujo energético a lo largo del tiempo. Este instrumento proporciona datos en tiempo real sobre la intensidad y duración de las tormentas solares, lo que proporciona alerta temprana a sectores como agencias espaciales, aerolíneas y operadores de satélites que podrían verse afectados. Además, ayuda a monitorear la evolución del evento, facilitando la evaluación de sus posibles consecuencias [36].

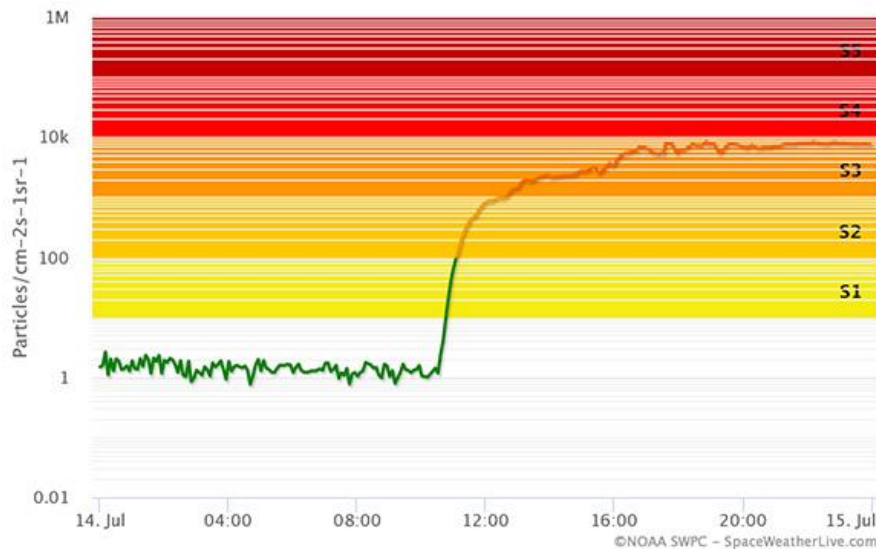



Figura 2-15 Ejemplo de diagrama de protones solares [36]

2. **Imágenes del cronógrafo SOHO/LASCO:** El cronógrafo SOHO/LASCO, a bordo del Observatorio Solar y Heliosférico (SOHO) de la NASA y la ESA, captura imágenes de la corona solar, la capa exterior del Sol, bloqueando la intensa luz solar directa para revelar las estructuras coronales. Estas imágenes permiten detectar la presencia de eyecciones de masa coronal. Al monitorear la forma, tamaño y velocidad de las EMC se puede prever la posible llegada y la intensidad de una TSG a la Tierra [36].



Figura 2-16 Imagen del cronógrafo SOHO/LASCO [36]

3. **Software SIDC Cactus:** Denominado CACTUS (seguimiento de EMC asistido por ordenador, por sus siglas en inglés). Este programa escanea automáticamente las imágenes del cronógrafo SOHO/LASCO para determinar la probabilidad de que una EMC impacte en la Tierra [36].



# CACTUS

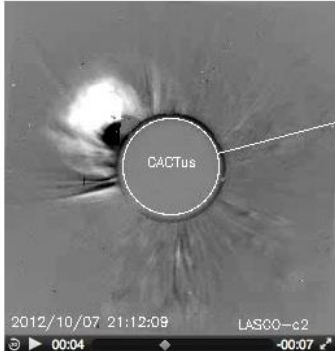
A software package for 'Computer Aided CME Tracking'

---

**Details and graphs for CME0016**

#	CME	t0	dt0	pa	da	v	dv	minv	maxv	halo?
0016		2012/10/07 15:48	14	105	360	0563	0282	0122	1388	IV

**CME Movie :: [Download](#) ::**



**Sample Image**

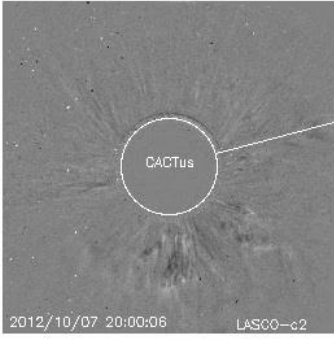


Figura 2-17 Software SIDC Cactus [36]

4. **Diagrama EPAM:** EPAM (Electron, Proton and Alpha Monitor, por sus siglas en inglés) monitorea la presencia de protones y electrones transportados por el viento solar. Este programa es fundamental para determinar si una EMC está dirigida hacia la Tierra y cuándo se espera que llegue. Inmediatamente después de la EMC, el diagrama EPAM mostrará un aumento en la concentración de electrones y protones [36].

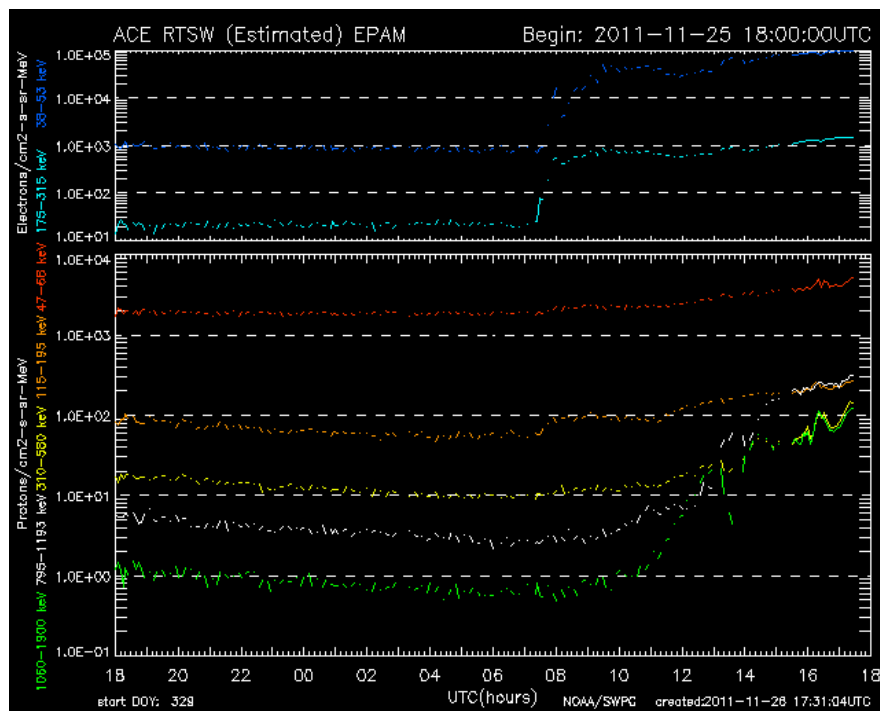


Figura 2-18 Diagrama EPAM justo después de una llamarada solar [36]

Finalmente, Algunos organismos biológicos, como los corales y los anillos de árboles, pueden registrar evidencia de eventos solares pasados en sus estructuras. El análisis de estos indicadores biológicos puede proporcionar información sobre la frecuencia y la intensidad histórica de las TSG [42].

Todos estos métodos nos proporcionan información crucial sobre una TSG como, por ejemplo, el momento en que nos alcanzará. Una vez que conocida la velocidad de la EMC, podemos determinar cuándo puede impactarnos [36]. Aunque su velocidad depende de diversos factores, las TSG viajan por el espacio relativamente lentas [1]. La siguiente tabla es una estimación del tiempo que tardaría la EMC en viajar del Sol a la Tierra, en el caso de estar dirigida hacia ella. No es extraño que lleguen antes o después del tiempo previsto con un margen de hasta 6 horas.

EMC velocidad (km/s)	Tiempo de viaje (horas)	Días	Horas
300	138,88	5	18.88
400	104,16	4	8,16
500	83.33	3	11.33
600	69.44	2	21.44
700	59.52	2	11.52
800	52.08	2	4.08
900	46.30	1	22.30
1000	41.67	1	17.67

<b>EMC velocidad (km/s)</b>	<b>Tiempo de viaje (horas)</b>	<b>Días</b>	<b>Horas</b>
1100	37.88	1	13.88
1200	34.72	1	10.72
1300	32.05	1	8.05
1400	29.76	1	5.76
1500	27.78	1	3.78
1600	26.04	1	2.04
1700	24.51	1	0.51
1800	23.15	0	23.15
1900	21.93	0	21.93
2000	20.83	0	20.83
2100	19.84	0	19.84
2200	18.94	0	18.94

**Tabla 2-2 Tiempo de viaje de las EMC [36]**

Afortunadamente, a través de estos métodos de detección y pronóstico se puede obtener información valiosa que nos ayudará a saber cuándo hay más probabilidades de que se produzca un evento de estas características [43].

Sin embargo, en la actualidad, la precisión en la predicción de tormentas solares sigue estando limitada por la falta de datos suficientes. A diferencia de la predicción meteorológica, que ha avanzado considerablemente, el pronóstico de tormentas solares aún se encuentra en una etapa menos desarrollada. Además, el tiempo de anticipación para prepararse ante una tormenta solar es relativamente corto, con un promedio de alrededor de media hora [44]. La dificultad radica en la falta de información y conocimiento que nos permita determinar cuándo ocurrirá una tormenta solar capaz de afectar a la Tierra [43].

## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Efectos potenciales de una TSG en la Tierra

En el pasado, las tormentas solares han demostrado su capacidad para afectar diferentes regiones de la Tierra. Sin embargo, la amenaza actual que representa el clima espacial ha aumentado debido a una combinación de factores de riesgo, tanto físicos, como tecnológicos [45].

#### 3.1.1 Factores de riesgo físicos

El riesgo de fuertes fluctuaciones en el campo magnético terrestre depende en gran medida de la latitud geomagnética [44]. Esta medida de la posición relativa de un lugar en la Tierra con respecto al campo magnético del planeta determina en gran medida la vulnerabilidad de una región a los efectos de las tormentas solares.

En general, las regiones ubicadas en latitudes geomagnéticas más altas, es decir, más cercanas a los polos magnéticos de la Tierra, están más expuestas a los efectos de las tormentas solares. Estas áreas suelen experimentar mayores niveles de actividad geomagnética durante eventos solares, lo que se manifiesta en la aparición de auroras boreales y australes más intensas y visibles [45].

Durante una tormenta solar de gran intensidad, los efectos pueden extenderse más allá de las regiones polares y afectar a latitudes más bajas. Esto puede observarse en eventos pasados, como el ocurrido en Sudáfrica en 2003, donde se registraron impactos significativos a pesar de la ubicación relativamente baja del país en términos de latitud geomagnética [47]. Por lo tanto, la latitud geomagnética es un factor crucial a tener en cuenta al evaluar el riesgo de una tormenta solar para la Tierra y sus sistemas tecnológicos y de comunicación.

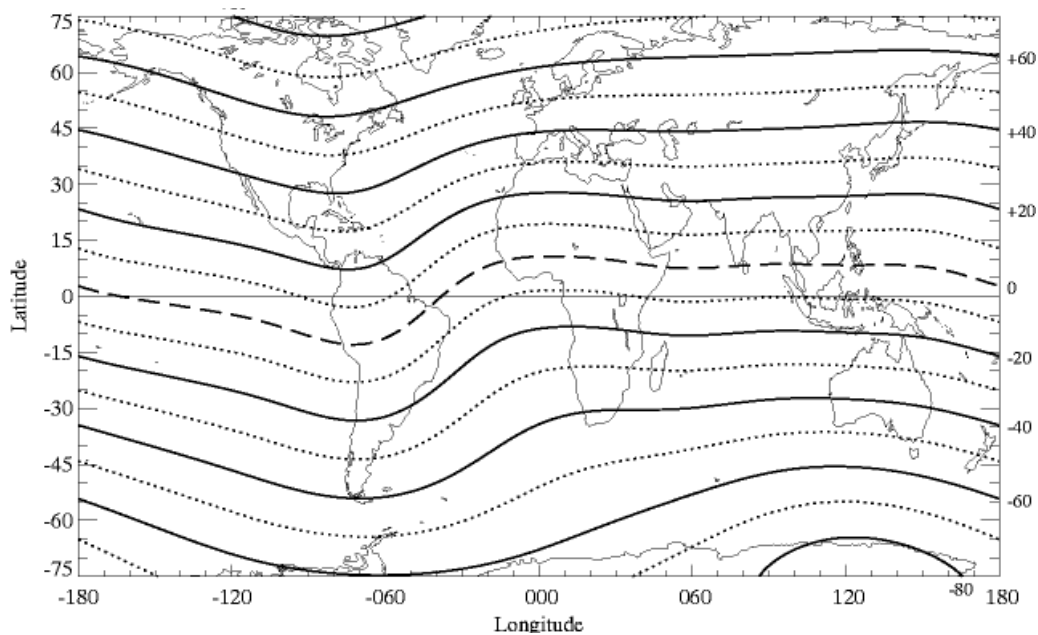


Figura 3-1 Mapa de latitud geomagnética [48]

Por otro lado, la conductividad del terreno es un factor de riesgo importante en el contexto de las tormentas solares y el clima espacial. Esta conductividad se refiere a la capacidad del suelo para transportar corriente eléctrica, y puede influir significativamente en la intensidad y el impacto de las tormentas solares en la Tierra. Cuando una tormenta solar golpea la Tierra terrestre, puede inducir corrientes eléctricas en el suelo a través de la interacción con el campo magnético de la Tierra. La conductividad del terreno determina en gran medida la facilidad con la que estas corrientes pueden propagarse a través del suelo [45].

En áreas donde dicha conductividad es alta, como en regiones con suelos húmedos o con alto contenido de sales minerales, las corrientes inducidas pueden fluir más fácilmente, lo que resulta en una mayor intensidad de las perturbaciones geomagnéticas. Por otro lado, en áreas con baja conductividad del suelo, como zonas con suelos secos o rocosos, las corrientes pueden encontrar más resistencia para propagarse, lo que puede mitigar en cierta medida los efectos de la tormenta solar en esa región específica [49].

Un ejemplo destacado de cómo la conductividad del terreno puede afectar el impacto de una tormenta solar es el apagón de Quebec en 1989. En este evento, una tormenta solar masiva indujo corrientes geomagnéticas que afectaron los sistemas de energía eléctrica en la región de Quebec, Canadá. La conductividad del suelo en este área, junto con la geología local, contribuyó a la propagación y amplificación de las corrientes inducidas, lo que resultó en un apagón generalizado que afectó a millones de personas durante varias horas [31].



Figura 3-2 Esquema conductividad eléctrica por tipo de suelo [50]

De la misma forma, las regiones costeras constituyen otro factor de riesgo determinante debido a la alta conductividad del agua del mar. Esta alta conductividad aumenta el campo eléctrico superficial en estas áreas. La presencia de agua salada facilita la conducción de la corriente eléctrica, lo que puede afectar significativamente a los transformadores y otros equipos eléctricos ubicados en la costa. Estos transformadores son parte de la infraestructura eléctrica terrestre y están diseñados para distribuir la electricidad a través de líneas de transmisión a diversas áreas, incluidas las regiones costeras. Ayudan a regular y suministrar electricidad a hogares, negocios e industrias en esas áreas. Si estos transformadores se ven comprometidos, podría provocar daños o interrupciones en el suministro eléctrico y aumentar la vulnerabilidad de la infraestructura eléctrica costera [45].

### 3.1.2 Factores de riesgo tecnológicos

El riesgo asociado a las tormentas solares también está vinculado a ciertos aspectos tecnológicos que se detallan a continuación.

La infraestructura eléctrica, incluidas las líneas de transmisión de energía, es vulnerable durante las tormentas solares. Las líneas de transmisión largas, como las utilizadas en redes submarinas o de larga distancia [45], son especialmente susceptibles debido al aumento de la corriente eléctrica inducida

durante una TSG. Este aumento puede dañar transformadores y equipos de conmutación, lo que lleva a interrupciones masivas en el suministro de energía.

Por otro lado, los satélites en órbita terrestre baja (LEO) están expuestos directamente a partículas cargadas durante las eyecciones de masa coronal. Estas partículas pueden dañar los componentes electrónicos de los satélites, interrumpiendo las comunicaciones globales, la navegación por satélite y otros servicios esenciales [51].

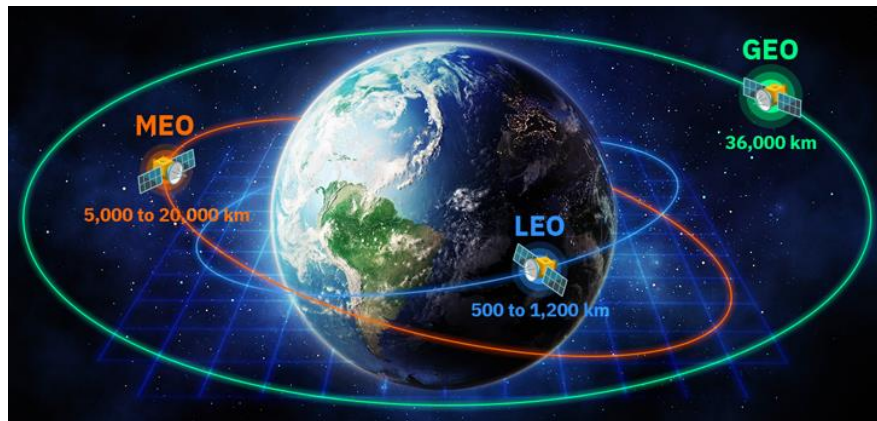


Figura 3-3 Radio de las órbitas de las diferentes constelaciones de satélites [51]

Las redes de comunicación terrestre, como las de telefonía móvil o internet, también son susceptibles a interferencias. Las corrientes inducidas por las tormentas solares pueden dañar los cables de fibra óptica y los equipos de conmutación, lo que lleva a la pérdida de conectividad y a interrupciones en los servicios de comunicación [52].

En cuanto a los sistemas de navegación por satélite, como el GPS, resultan críticos para una amplia gama de aplicaciones, incluida la navegación marítima, la aviación y la navegación terrestre. La precisión y la disponibilidad del GPS pueden deteriorarse significativamente debido a la interferencia causada por las partículas solares [45].

Otros sistemas de infraestructura crítica, como las redes eléctricas de emergencia, los sistemas de agua potable y alcantarillado, o los sistemas de transporte, también pueden verse afectados por una TSG. Interrupciones en estos sistemas pueden tener repercusiones significativas en la vida cotidiana y la seguridad pública [45].

### 3.1.3 Consecuencias inmediatas de una TSG extrema

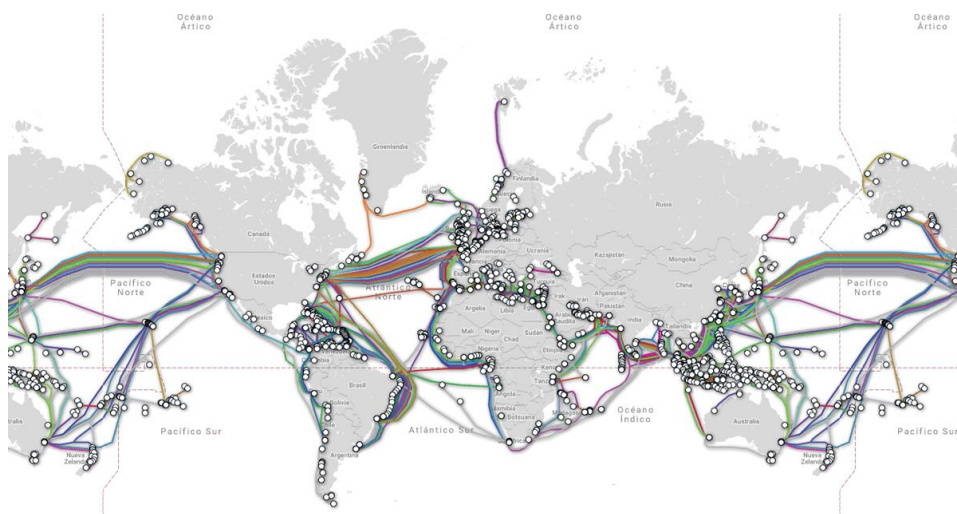
Un evento de escala similar al de Carrington hoy tendría graves consecuencias para nuestra sociedad. Se estima que, solo en Europa, entre 20 y 40 millones de personas podrían quedarse sin electricidad durante un período de unos 16 días pero, dependiendo de la intensidad, estas dos semana podrían convertirse en un año entero [52]. Algunos estudios realizados en Reino Unido han estimado que podría llevar semanas, e incluso meses, reparar los daños en el sistema de la red eléctrica del Reino Unido causados por una TSG extrema. Las pérdidas mundiales debido a una tormenta magnética extrema oscilarían entre siete y 42 billones por día [53].

Si bien es difícil evaluar el impacto de tal evento basado en tormentas que ocurrieron cuando la infraestructura eléctrica estaba mucho menos desarrollada, algunos estudios han intentado identificar las principales disrupciones críticas para la infraestructura, a efecto inmediato [54].

En primer lugar, en el espacio, estas tormentas pueden dañar directamente los satélites al impactar sus componentes electrónicos o influir en su posición. Esto puede provocar fallos en los mismos, corrupción de datos y daños permanentes, incluida la pérdida de los satélites, lo que tendría graves consecuencias para sistemas satelitales, como el GPS, las redes de comunicación por satélite y ciertas operaciones bancarias [52].

En el sector energético, las tormentas solares pueden interrumpir la red eléctrica de alta tensión, lo que provocaría apagones generalizados, así como problemas en los sistemas de distribución de combustible [52].

A nivel digital, las perturbaciones geomagnéticas pueden interferir con las redes de comunicación, lo que afectaría a teléfonos móviles, líneas terrestres y la conectividad a internet. Los cables submarinos corren un alto riesgo de corrientes inducidas durante estos eventos, ya que el 99% de los datos de internet fluyen a través de cables colocados en el lecho marino [55].



**Figura 3-4 Red global de cables submarinos [56]**

En cuanto al transporte, la clausura del espacio aéreo cancelaría los vuelos, mientras que la seguridad marítima se vería comprometida por la falta de ayudas a la navegación como GPS y AIS (Sistema de identificación automática, por sus siglas en inglés) [52]. Esto podría obligar a las agencias encargadas del tráfico marítimo a cerrar el acceso a los puertos. Además, la congestión del tráfico también se daría en las carreteras a medida que los semáforos dejen de funcionar. Una fuerte tormenta solar también afectaría a los vehículos eléctricos, así como a la infraestructura ferroviaria [57].

En términos de salud, las tormentas solares podrían interrumpir el almacenamiento de medicamentos que requieren refrigeración. Los dispositivos y equipos médicos que dependen de la energía eléctrica también podrían enfrentar desafíos. Además, una TSG intensa expondría a los seres humanos, especialmente a aquellos en altitudes elevadas, a altos niveles de radiación, lo que representaría riesgos para la salud [57].

Los fallos en los sistemas de refrigeración romperían la cadena de suministro de alimentos y agua, desde la producción y el procesamiento hasta la distribución y la venta al por menor. Los sistemas de suministro de agua dependen de componentes esenciales como bombas, válvulas y sensores, así como los sistemas de tratamiento de aguas residuales que dependen de la electricidad para su correcto funcionamiento [57].

### 3.1.4 Consecuencias a corto-medio plazo

Las consecuencias de un evento solar de gran intensidad que afecte directamente a la Tierra van mucho más allá de la perturbación más obvia e inmediata [52]. Podría desencadenar una compleja reacción en cadena con consecuencias a corto-medio plazo para nuestra vida cotidiana.

A diferencia de los terremotos o las erupciones volcánicas, que suelen tener efectos localizados, una tormenta solar podría afectar a varias regiones del mundo. Además, las tormentas solares no se pueden comparar con eventos climáticos extremos convencionales, cuyos efectos tienden a seguir patrones más predecibles. Tampoco se asemejan a emergencias globales como la pandemia de COVID-19, que afectó al mundo de manera uniforme. Lo que hace única a una tormenta solar es su capacidad para disrumpir en múltiples niveles, desde los satélites más alejados hasta las profundas redes submarinas. Además, la falta de registros históricos extensos dificulta la comprensión y preparación ante estos eventos [57].

A corto y medio plazo, las repercusiones económicas de una tormenta solar de magnitud Carrington se sentirían primero cuando aquellas tecnologías integradas en nuestra vida diaria comiencen a fallar [58]. Por ejemplo, los sistemas de pago financiero podrían bloquearse, con la inutilización de tarjetas de crédito, ya que las transacciones dependen de los sistemas satelitales. El cese de actividad en las transacciones financieras, creando importantes desafíos para la integridad del sistema bancario [47]. Simultáneamente, los mercados de valores podrían sufrir turbulencias, con cierres temporales que conducen a la inestabilidad del mercado.

En general, todos estos factores unidos a los descritos en el apartado anterior (ver apartado 3.1.3) podrían provocar una interrupción económica sustancial, afectando al crecimiento y poniendo contra las cuerdas a los sistemas financieros a medida que los países luchan por reparar los sistemas dañados [60].

Después de una tormenta solar, es probable que nos enfrentemos a una serie de desafíos sociales significativos. Las interrupciones prolongadas en los servicios básicos podrían llevar a que las personas se vean obligadas a abandonar temporalmente las áreas más afectadas [61]. Entre los grupos más vulnerables se encuentra la tercera edad, quienes podrían enfrentar dificultades adicionales debido a la falta de sistemas de calefacción y refrigeración [52]. Esto podría derivar en un aumento en los problemas de salud relacionados con las condiciones climáticas extremas, como el frío o el calor excesivos. Además, la falta de acceso a la atención médica debido a la interrupción de los servicios tecnológicos podría agravar aún más la situación, ya que los recursos médicos podrían estar limitados o inaccesibles.

Para hacer frente algunos de estos desafíos derivados, es posible que las autoridades deban implementar medidas específicas. Una de estas medidas podría ser el establecimiento de centros de distribución para garantizar el acceso a suministros esenciales, como alimentos, agua y medicamentos, especialmente en áreas afectadas por interrupciones en la infraestructura [61].



Figura 3-5 Centros de distribución de suministros esenciales [62]

Además, podrían ser necesarias acciones para prevenir actividades ilegales, como el mercado negro, que podría surgir debido a la escasez de recursos y la demanda creciente. En este sentido, las fuerzas policiales y, en situaciones extremas, incluso el ejército, podrían ser desplegados para mantener el orden público, prevenir saqueos y controlar el aumento de la delincuencia [61]. La combinación de estos desafíos socioeconómicos y las medidas necesarias para abordarlos aumentaría el riesgo de disturbios sociales, ya que las tensiones podrían intensificarse entre la población afectada por la crisis [52].

Tras una TSG surgirán preocupaciones significativas en términos de seguridad, especialmente en lo que respecta a la infraestructura crítica y la defensa nacional. Por ejemplo, sería crucial tomar medidas inmediatas para prevenir incidentes en plantas nucleares, ya que la interrupción en los sistemas de energía y comunicaciones podría comprometer su funcionamiento seguro [63].

Además, las implicaciones en materia de seguridad se extienden más allá de las fronteras nacionales, afectando a sistemas de armas y comunicaciones estratégicas militares [64]. Esto podría debilitar la capacidad de respuesta del ejército ante acciones hostiles por parte de actores estatales o no estatales, lo que aumentaría la vulnerabilidad del país. Los grupos extremistas podrían aprovechar las debilidades expuestas por la tormenta solar para perpetrar actos violentos y desestabilizar aún más la situación [64].

En definitiva, la magnitud de la crisis desafiará la capacidad de los gobiernos para gestionarla de manera efectiva, especialmente debido a los recursos limitados disponibles [65]. Priorizar la asignación de recursos, especialmente para la restauración de los suministros de energía, supone un desafío crucial.

Es importante tener en cuenta que las tormentas solares pueden prolongarse en el tiempo, ocurriendo en sucesivas oleadas [66]. Esto significa que, aunque inicialmente puedan afectar a regiones ubicadas a miles de kilómetros de distancia, podrían tener un impacto más directo en días posteriores. Por lo tanto, las autoridades nacionales podrían mostrarse reticentes a compartir recursos críticos, como transformadores de repuesto, por temor a necesitarlos para su propio uso en el futuro cercano [52].

Las disputas que podrían surgir sobre quién debe asumir los costos de los daños causados a nivel internacional podrían intensificar las tensiones entre países que tienen diferentes niveles de recursos financieros disponibles [52].

La crisis desencadenada por la tormenta solar podría tener un efecto temporal negativo en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles, con el riesgo de volver a los combustibles fósiles como un remedio a corto plazo para restablecer el suministro energético [64]. Sin embargo, a largo plazo, tanto individuos como organizaciones podrían decidir invertir en tecnologías independientes, como paneles solares, para reducir su dependencia de la red eléctrica general y hacer frente a futuros eventos similares [52].



Figura 3-6 Energías sostenibles [67]

No todas las consecuencias que se han mencionado anteriormente son necesariamente probables de ocurrir en el caso de una tormenta solar de gran magnitud. La probabilidad de que se materialicen dependerá en gran medida de la escala y la intensidad de dicho evento [60]. Sin embargo, independientemente de la magnitud de la tormenta, responder de manera efectiva a sus posibles impactos requiere una acción política coordinada tanto a nivel nacional como internacional.

Para abordar este desafío de manera efectiva y mitigar sus efectos, es fundamental adoptar un enfoque integral que abarque tres fases principales:

1. **Comprender y predecir el evento:** Esto implica una investigación científica así como una recopilación de datos para comprender mejor la naturaleza y el comportamiento de las tormentas solares, así como desarrollar modelos de predicción que puedan anticipar su ocurrencia con mayor precisión [52].
2. **Prepararse y prevenir sus posibles consecuencias:** tomar medidas preventivas y de preparación antes de que ocurra la tormenta solar. Esto puede incluir el fortalecimiento de la infraestructura crítica, el desarrollo de protocolos de emergencia y la implementación de medidas de prevención de riesgos para reducir el impacto potencial en sectores clave como el energético, comunicaciones y el sector salud [52]. Es fundamental considerar la duplicidad de equipos en estas infraestructuras críticas, asegurando que exista un sistema redundante con uno de los equipos siempre apagado para mitigar los efectos de los campos electromagnéticos inducidos. Este enfoque de duplicidad proporciona una capa adicional de protección, minimizando la vulnerabilidad de los sistemas activos durante una tormenta solar.
3. **Responder y recuperarse del impacto en la infraestructura crítica:** En caso de que una tormenta solar cause daños significativos, es vital tener planes de respuesta y recuperación. Esto puede significar la movilización de recursos de emergencia, la restauración de servicios básicos y la implementación de medidas de recuperación a largo plazo para restaurar la infraestructura afectada y afrontar cualquier impacto en la sociedad y la economía [60].

### 3.2 Preparación y protocolos de actuación

La preparación y el establecimiento de una serie de medidas a tomar frente a eventos de clima espacial, como las tormentas solares geomagnéticas, son aspectos críticos para garantizar la seguridad y la resiliencia de una nación frente a tales amenazas. Mientras que países como Estados Unidos, Reino Unido o Canadá han desarrollado estrategias nacionales bien definidas para hacer frente a estos eventos, en España la situación es diferente. A pesar de la creciente conciencia sobre los riesgos asociados al clima espacial, no existe un protocolo de actuación específico establecido para abordar las posibles consecuencias de una TSG severa.

En este contexto, es crucial examinar las estrategias implementadas en otros países y considerar la necesidad de desarrollar medidas de preparación adecuadas para proteger la infraestructura crítica y promover la resiliencia nacional ante eventos de clima espacial en España.

#### 3.2.1 Revisión de planes de acción en algunas naciones

La Estrategia Nacional de Clima Espacial de los Estados Unidos establece un plan integral para abordar las amenazas y riesgos asociados con los fenómenos del clima espacial, especialmente las tormentas solares geomagnéticas. Está diseñada para proteger la infraestructura crítica, los activos comerciales y las operaciones nacionales de los efectos adversos del clima espacial, al tiempo que promueve la resiliencia y el liderazgo estadounidense en el espacio. Se basa en tres principales objetivos:

**Objetivo I: Mejorar la Protección de la Seguridad Nacional, la Seguridad Interior y los Activos y Operaciones Comerciales contra los Efectos del Clima Espacial [68].**

- Evaluar y reducir las vulnerabilidades de la infraestructura crítica y los activos de seguridad nacional ante eventos de clima espacial.
- Desarrollar modelos de pronóstico y compartir datos de radiación espacial para mejorar la capacidad de previsión operativa.
- Implementar medidas de mitigación y protección para minimizar los riesgos del clima espacial.

**Objetivo II: Desarrollar y Diseminar Caracterizaciones y Pronósticos Precisos y Oportunos del Clima Espacial [68].**

- Identificar y garantizar capacidades de observación operativas para caracterizar el clima espacial.
- Mejorar las capacidades de modelado y previsión del clima espacial para proporcionar pronósticos más precisos y oportunos.
- Facilitar el acceso y el intercambio de datos observacionales para mejorar la comprensión y la predicción del clima espacial.

**Objetivo III: Establecer Planes y Procedimientos para Responder y Recuperarse de Eventos de Clima Espacial [68].**

- Desarrollar y actualizar planes y procedimientos federales de respuesta ante eventos de clima espacial.
- Facilitar el intercambio de información para mejorar la operación y la restauración de infraestructuras críticas afectadas por el clima espacial.
- Realizar ejercicios y pruebas periódicas de los planes y procedimientos de respuesta y recuperación para mejorar la preparación y la capacidad de recuperación.

La Estrategia Nacional de Clima Espacial de EE. UU. reconoce la necesidad de una coordinación efectiva entre agencias federales, el sector privado, la academia y socios internacionales para implementar estas medidas y garantizar la protección y la resiliencia frente a los eventos de clima espacial.

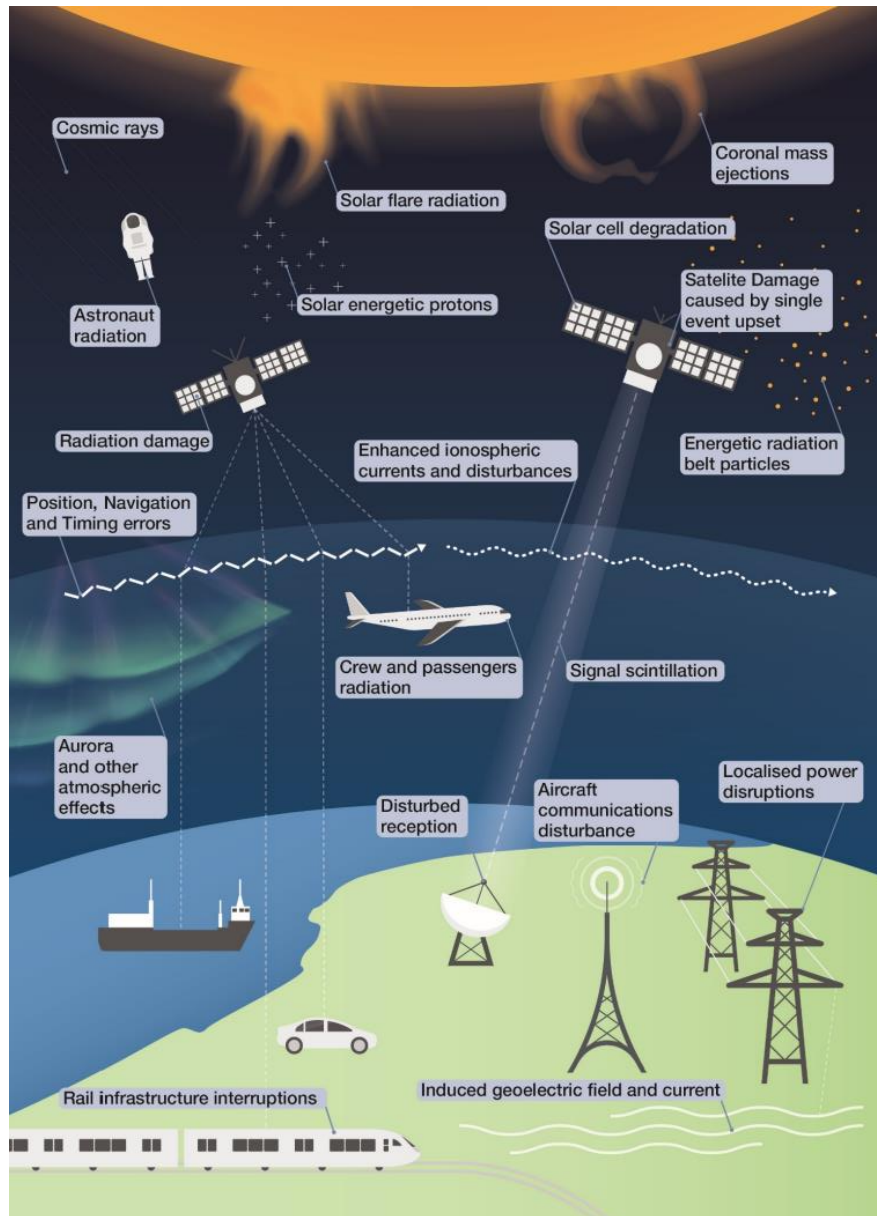


Figura 3-7 Portada de la estrategia nacional de clima espacial de EE. UU. [68]

Por otro lado, Reino Unido también cuenta con su propia estrategia en la que se detallan los avances realizados hasta la fecha, las políticas implementadas y los compromisos futuros del gobierno y otras partes interesadas con respecto al clima espacial. Se destacan estudios de caso y se delinean acciones específicas para mejorar la comprensión, la preparación y la respuesta ante eventos de clima espacial severo potencialmente devastador.

Al igual que la de EE. UU., la Estrategia de Preparación para Condiciones Climáticas Espaciales Severas del Reino Unido ("UK Severe Space Weather Preparedness Strategy") es un documento que aborda tres pilares fundamentales a través de los cuales el gobierno y las partes interesadas relevantes trabajan en conjunto para comprender, mitigar, prepararse y responder eficazmente a los eventos de clima espacial severo.

1. "**Assess**" [64] (**Evaluar**): Este pilar se centra en comprender la amenaza del clima espacial severo y evaluar su impacto potencial en infraestructuras críticas y servicios. Se incluyen aspectos como la observación del sol, la predicción de eventos solares y la evaluación de los riesgos para la infraestructura terrestre y espacial.
2. "**Prepare**" [64] (**Preparar**): Aquí se desarrollan medidas para aumentar la resiliencia de la infraestructura esencial y los servicios frente a eventos de clima espacial severo. Esto implica colaboración entre el gobierno, la industria y los Foros de Resiliencia Local (LRFs), y se enfoca en la mejora de la infraestructura crítica y la coordinación de la respuesta a través de estructuras de gobierno existentes.
3. "**Respond & recover**" [64] (**Responder y Recuperarse**): Este pilar se centra en garantizar que el Reino Unido pueda responder de manera efectiva y recuperarse rápidamente de los eventos de clima espacial severo. Esto implica la creación de sistemas de intercambio de información en tiempo real y la colaboración internacional para mejorar la capacidad de respuesta y recuperación.



**Figura 3-8 Esquema de los efectos potenciales de una TSG incluido en la "UK Severe Space Weather Preparedness Strategy" [64]**

La necesidad de prepararse para eventos de clima espacial severo es cada vez más evidente en el panorama global. Mientras que países como Estados Unidos y el Reino Unido, entre otros, han establecido estrategias nacionales exhaustivas para abordar estos desafíos, en España aún falta un protocolo específico para enfrentar estas amenazas emergentes.

Es fundamental que España examine de cerca las estrategias implementadas en otros países y adapte las lecciones aprendidas a su propio contexto. Esto implica no solo la evaluación de riesgos y la preparación de infraestructuras críticas, sino también la colaboración entre diferentes sectores para garantizar una respuesta coordinada y efectiva.

La creación de un plan de acción específico para eventos de clima espacial y la promoción de la colaboración entre gobierno, industria y academia son pasos cruciales hacia la construcción de una nación más resiliente frente a estas amenazas. Solo a través de una preparación adecuada y una respuesta rápida podremos mitigar el impacto potencialmente devastador de las tormentas solares geomagnéticas en nuestra infraestructura y sociedad.

### 3.3 Impacto de las TSG en las Unidades de la Armada

La Armada española, como institución encargada de proteger y asegurar los intereses marítimos nacionales, se enfrenta a una variedad de desafíos y amenazas, tanto naturales como artificiales, en el cumplimiento de su misión. Entre estas amenazas, las tormentas solares geomagnéticas representan un fenómeno natural de particular relevancia debido a su capacidad para afectar de manera significativa a las unidades y las operaciones marítimas.

Para desarrollar un protocolo de actuación adecuado ante una TSG, es imperativo comprender de manera exhaustiva cómo estos eventos pueden impactar directamente en nuestras unidades. Este entendimiento detallado permitirá a la Armada anticipar, mitigar y responder de manera efectiva a los efectos potencialmente adversos derivados de las tormentas solares, garantizando así la seguridad de las dotaciones y la integridad de los activos navales.

En este apartado, se explorará en profundidad la influencia de las TSG en las unidades de la Armada, analizando los diversos efectos que estas pueden desencadenar y examinando los mecanismos físicos subyacentes que dan lugar a dichos impactos. Mediante este análisis detallado, se sentará la base para la formulación de un protocolo de actuación efectivo y adaptado a las necesidades específicas de la Armada frente a dicho fenómeno.

#### 3.3.1 Tecnología vulnerable

Los buques, especialmente aquellos altamente tecnológicos como el LHD "Juan Carlos I", son especialmente vulnerables a los efectos de una tormenta solar debido a su dependencia de la tecnología [1]. Durante una TSG, la radiación y las partículas energéticas emitidas por el Sol interactúan con los sistemas electrónicos de los buques y unidades, incluidos los de comunicación, navegación, radar y armamento.



Figura 3-9 LHD "Juan Carlos I" [69]

La radiación solar puede inducir corrientes eléctricas en la atmósfera terrestre, generando campos magnéticos variables que, a su vez, inducen corrientes en conductores largos como los cables de energía y las estructuras metálicas de los buques [70]. Estas corrientes pueden provocar sobretensiones en los sistemas eléctricos y electrónicos, causando daños significativos e incluso la pérdida de funcionalidad. Además, las partículas energéticas emitidas durante una TSG pueden interferir con los componentes

electrónicos sensibles, como los sistemas de navegación por satélite (GNSS), los sistemas informáticos y los equipos de comunicación [70].

Las unidades de la Flota pueden experimentar impactos directos si se encuentran dentro del área afectada por la TSG, lo que puede resultar en daños generalizados a todos los equipos eléctricos o electrónicos si no se toman medidas de protección adecuadas [1]. Por otro lado, la interferencia con los satélites de posicionamiento global o las estaciones de comunicaciones puede afectar a los sistemas dependientes de estos servicios, como el sistema de combate o las comunicaciones, comprometiendo la capacidad operativa de las unidades de manera indirecta [1].

### 3.3.2 *Impacto en sistemas específicos*

Durante una TSG, los buques y unidades militares pueden experimentar una variedad de impactos en sus sistemas críticos:

#### 1. **Sistemas de Comunicación:**

Los sistemas de comunicación a bordo de las unidades desempeñan un papel fundamental en la coordinación de operaciones, la seguridad y la transmisión de información vital entre el buque y otras unidades navales o centros de mando en tierra. Estos sistemas incluyen una variedad de equipos, como radios de comunicación interna y externa, así como sistemas de satélite para comunicaciones de largo alcance [71].

Durante una tormenta solar, el Sol emite partículas energéticas que pueden interferir con las señales de radio utilizadas por estos sistemas de comunicación. Estas partículas, como los protones y electrones, interactúan con la atmósfera terrestre y generan fenómenos electromagnéticos que afectan la propagación de las ondas de radio [34]. Como resultado de esta interferencia, las señales de radio pueden experimentar distorsiones, atenuación o pérdida de intensidad mientras viajan a través de la atmósfera. Esto puede dificultar la transmisión y recepción de mensajes cruciales entre el buque o aeronave, y otras unidades navales o centros de mando en tierra [72].

Las distorsiones en las comunicaciones pueden manifestarse de varias formas, como la aparición de ruidos estáticos en las transmisiones, la pérdida de claridad en las señales de voz o la interrupción completa de la comunicación. Estas interferencias pueden comprometer la capacidad de las unidades para recibir órdenes, informes de situación u otra información crítica, lo que afecta negativamente la capacidad de respuesta y la seguridad durante la operación [72].

#### 2. **Sistemas de Navegación:**

Los sistemas de navegación de los buques, incluidos el GPS y otros sistemas de posicionamiento por satélite, enfrentan desafíos significativos debido a la interacción entre las radiaciones solares y las corrientes eléctricas inducidas en la atmósfera terrestre.

El funcionamiento del GPS y otros sistemas de posicionamiento por satélite se basa en la recepción de señales de varios satélites en órbita alrededor de la Tierra. Estas señales son utilizadas por los receptores a bordo de las unidades para determinar su posición precisa en el océano o en cualquier otro entorno marítimo [73]. Durante una TSG, las partículas energéticas emitidas por el Sol pueden perturbar las señales de los satélites de navegación al interactuar con la atmósfera terrestre. Estas partículas generan fenómenos electromagnéticos que afectan la propagación de las señales de radio utilizadas por los sistemas de navegación. Además, las corrientes eléctricas inducidas en la atmósfera pueden alterar los campos magnéticos, lo que también influye en la precisión de las mediciones de posicionamiento.

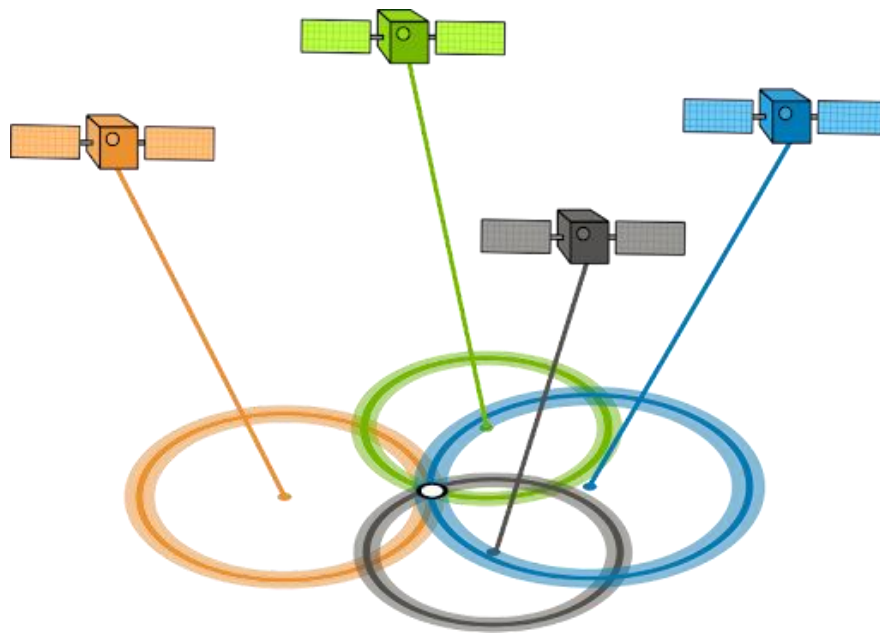


Figura 3-10 Esquema del posicionamiento por satélite (GPS) [73]

Como resultado de estas perturbaciones, los receptores de GPS pueden experimentar errores en la determinación de la posición, lo que aumenta el riesgo de navegación incorrecta. Los errores en la navegación pueden llevar a situaciones peligrosas, como la aproximación incorrecta a puertos o aeropuertos, la navegación hacia aguas poco profundas o la posibilidad de colisiones con otros buques, estructuras o incluso accidentes costeros.

### 3. Sistemas de Radar:

Los sistemas de radar son componentes críticos para garantizar la seguridad y la eficacia de las operaciones marítimas. Estos sistemas permiten la detección temprana de posibles amenazas, el seguimiento del entorno marítimo y la navegación segura, entre otras funciones vitales [74].



Figura 3-11 Operadores de sistemas de radar a bordo de una fragata clase "Álvaro de Bazán" [69]

Durante una TSG, las interferencias electromagnéticas generadas por las radiaciones solares pueden tener un impacto significativo en la operación de los sistemas de radar. Estas interferencias pueden afectar la precisión y la fiabilidad de los datos recopilados por los radares, lo que resulta en dificultades para detectar objetos en el entorno marítimo.

Estas interferencias electromagnéticas pueden manifestarse de varias formas. Por ejemplo, las partículas energéticas emitidas por el Sol pueden generar perturbaciones en la atmósfera terrestre, lo que afecta la propagación de las ondas de radar. Esto puede resultar en la disminución de la capacidad del radar para detectar objetos distantes o pequeños, lo que representa un riesgo para la seguridad de la navegación [47].

Además, las corrientes eléctricas inducidas durante una TSG pueden causar interferencias directas en los sistemas electrónicos a bordo del buque, incluidos los sistemas de radar. Estas interferencias pueden provocar la aparición de ruido o señales falsas en las pantallas de radar, lo que dificulta la interpretación precisa de los datos y puede llevar a la omisión de objetos reales o la identificación errónea de amenazas.

#### 4. **Sistemas de Armamento:**

Los sistemas de armamento, como los misiles guiados y los cañones automáticos, desempeñan un papel fundamental en la defensa y el ataque de la embarcación. Estos sistemas dependen en gran medida de la electrónica para llevar a cabo funciones clave, como la adquisición de objetivos y el guiado preciso de las municiones hacia esos objetivos [75].

Durante una TSG, las perturbaciones electromagnéticas generadas por las radiaciones solares pueden interferir con el funcionamiento adecuado de los sistemas de armamento. Estas interferencias pueden afectar los circuitos electrónicos y los componentes críticos de los sistemas, comprometiendo su capacidad para adquirir y seguir objetivos con precisión.

Una de las formas en que las perturbaciones electromagnéticas pueden afectar los sistemas de armamento es mediante la introducción de ruido o interferencias en los circuitos electrónicos encargados de la adquisición y seguimiento de objetivos [75]. Esto puede dificultar la detección precisa de los objetivos y la determinación de su ubicación y trayectoria, lo que afecta la efectividad de los sistemas de armas.



**Figura 3-12 Misil Harpoon con guiado semiactivo [76]**

## 5. Sistemas de Propulsión:

En buques modernos como el LHD "Juan Carlos I", la propulsión eléctrica es una característica común y fundamental para su funcionamiento. Este sistema de propulsión eléctrica utiliza motores eléctricos alimentados por generadores para impulsar al buque [1]. Durante una Tormenta Solar Geomagnética, las corrientes eléctricas inducidas por las perturbaciones electromagnéticas pueden afectar negativamente estos sistemas de propulsión eléctrica.

Como resultado, la capacidad de maniobra y la velocidad del buque pueden disminuir durante una TSG debido a los efectos adversos en los sistemas de propulsión eléctrica. La capacidad de respuesta y la agilidad del buque se ven comprometidas, lo que puede dificultar la navegación segura y efectiva en condiciones adversas [1].

### 3.3.3 Consecuencias para la dotación

La dotación de los buques de la Flota se enfrenta a una serie de desafíos que pueden poner en peligro su seguridad y eficacia operativa. Uno de los principales riesgos para la dotación durante una TSG es la pérdida de comunicaciones y navegación, junto con los posibles daños a los sistemas críticos del buque.

En primer lugar, la pérdida de comunicaciones puede dificultar significativamente la capacidad de la dotación para coordinar operaciones, recibir órdenes y mantenerse informada sobre la situación táctica. La comunicación efectiva es esencial para la seguridad y el éxito de las operaciones militares, y la incapacidad para transmitir información vital puede llevar a malentendidos, errores y situaciones peligrosas. Además, la falta de comunicación puede dificultar la solicitud de ayuda en caso de emergencia, lo que aumenta el riesgo para la dotación en situaciones críticas [71].

En segundo lugar, la pérdida de sistemas de navegación precisos puede aumentar aún más el riesgo para la dotación durante una TSG. La navegación precisa es fundamental para evitar colisiones con otros buques, evitar obstáculos y mantener el curso planificado. Sin acceso a sistemas de navegación confiables, la dotación puede enfrentarse a dificultades para mantener el rumbo, lo que aumenta el riesgo de accidentes y daños a la embarcación [77].

Por otro lado, los posibles daños a los sistemas críticos de la embarcación, como la propulsión, el sistema de energía y los sistemas de control, pueden comprometer seriamente la capacidad de la dotación para mantener el funcionamiento seguro y eficiente del buque, dejándolo vulnerable a los elementos, incapaz de evitar peligros potenciales o de responder efectivamente a situaciones de emergencia.

En escenarios hipotéticos de situaciones de emergencia, la falta de acceso a estos sistemas vitales puede dificultar enormemente la respuesta rápida y efectiva del personal a bordo. Por ejemplo, en caso de un ataque enemigo, un incendio a bordo o una avería crítica, la capacidad de la dotación para comunicarse, navegar y mantener el control del buque puede ser fundamental para la supervivencia y el éxito de la misión. Sin embargo, una TSG puede comprometer estas capacidades, lo que aumenta el riesgo para la seguridad general del buque.



## 4 RESULTADOS

### 4.1 Procedimiento a seguir una vez que una unidad se ve afectada por una TSG

Ante la amenaza inminente de una Tormenta Solar Geomagnética, las unidades de la Flota enfrentan el desafío de proteger sus sistemas críticos y asegurar la seguridad de su dotación en condiciones adversas.

En el apartado anterior se expuso cómo el impacto potencial de una TSG podía poner en riesgo las operaciones navales, ya que la radiación solar y las partículas energéticas pueden generar disturbios electromagnéticos que afectan a los equipos eléctricos y electrónicos a bordo de las unidades. Ante esta realidad, es vital contar con un procedimiento claro y efectivo que guíe las acciones a seguir una vez que una unidad naval se encuentra afectada por una TSG.

En situaciones donde se plantea posible detectar la llegada de una tormenta solar a un área donde se encuentran unidades de la Armada, la principal medida de protección que se puede adoptar actualmente es la prevención [1]. El objetivo fundamental es evitar la exposición de estas unidades al pulso electromagnético asociado a la TSG. En caso de ser alcanzadas, se plantea implementar una estrategia destinada a reducir al mínimo la actividad eléctrica de los sistemas y equipos a bordo, especialmente aquellos que son sensibles a las fluctuaciones electromagnéticas.

La adopción de medidas preventivas es crucial dada la naturaleza impredecible de las TSG y los potenciales riesgos que representan para ciertos equipos. El pulso electromagnético generado puede inducir corrientes eléctricas en los sistemas eléctricos y electrónicos, lo que podría resultar en daños significativos o incluso la inutilización de los equipos afectados.

Por lo tanto, en caso de que una unidad se vea afectada por una TSG, debería priorizar apagar la totalidad o la mayor parte de estos equipos. La reducción de la actividad eléctrica puede ayudar a minimizar los posibles daños causados por el pulso electromagnético. Es importante destacar que incluso si los equipos están apagados, existe el riesgo de que queden inoperativos en caso de una tormenta solar de intensidad considerable [1].

Por este motivo, otra medida esencial de protección es introducir elementos sensibles, como discos duros y equipos de comunicaciones, en jaulas de Faraday (ver Anexo II: Implementación de jaulas de Faraday como medida de protección). Estas jaulas metálicas actúan como barreras efectivas contra los campos eléctricos, proporcionando un nivel adicional de aislamiento y protección contra los efectos electromagnéticos inducidos por la tormenta solar. Asimismo, esta medida puede combinarse con el enfoque de duplicidad, asegurando que exista un sistema redundante de equipos resguardados en estas jaulas, con uno de ellos siempre apagado para mitigar aún más los riesgos durante el evento solar. Por lo tanto, además de apagar equipos y sistemas eléctricos y electrónicos, la introducción de elementos sensibles en jaulas de Faraday se convierte en una estrategia clave para preservar la integridad de los sistemas críticos

En este apartado, se explorarán las medidas y procedimientos a considerar para reducir todo lo posible los efectos de una TSG en las unidades navales, proteger sus sistemas críticos y garantizar la seguridad de la dotación en todo momento. Se hará una distinción en función de la situación operativa de cada unidad, teniendo en cuenta la actividad que esté desarrollando o dónde se encuentre en ese momento [1].

#### 4.1.1 *Buques que se encuentren atracados en puerto*

Cuando se enfrentan a la amenaza de una TSG, los buques que se encuentren atracados en puerto deberán implementar medidas específicas para proteger sus sistemas y equipos. Entre las medidas más importantes se encuentran:

4. **Apagar equipos y sistemas tanto eléctricos como electrónicos** [1]: La primera medida consiste en apagar todos los equipos y sistemas eléctricos y electrónicos a bordo. Esto incluye sistemas de comunicación, navegación, radar o sistemas de propulsión eléctricos. Al desconectar la alimentación eléctrica de estos equipos, se reduce la exposición al pulso electromagnético generado y minimiza, aunque no elimina, el riesgo de sufrir daños por sobretensiones inducidas.
5. **Desconectar todo el cableado posible para evitar la propagación de sobretensiones** [1]: Una segunda medida crucial implica desconectar todo el cableado posible a bordo, especialmente aquel asociado con equipos vitales y sistemas críticos. Al desconectar los cables, se evita que las sobretensiones se propaguen a través de los circuitos eléctricos y se minimiza el riesgo de daños a los equipos conectados. Esto incluye desconectar tanto los cables de energía como los de comunicación que puedan actuar como conductores.
6. **Refugio en Instalaciones Protegidas**: Trasladar la dotación a áreas protegidas dentro del puerto si se prevé una exposición prolongada a los efectos de la tormenta. Entre estos efectos se encuentran el estrés y la fatiga, interferencia con equipos médicos o la exposición a radiación ionizante, que puede aumentar el riesgo de enfermedades relacionadas con la radiación, como el cáncer y los trastornos genéticos.

#### 4.1.2 *Buques que se encuentren en la mar*

Para los buques que se encuentren en la mar durante una TSG, es crucial implementar medidas para minimizar los riesgos y proteger tanto a dotación como al buque. A continuación, se detallan las medidas propuestas:

1. **Buscar refugio en puerto seguro** [1]: Si el buque se encuentra cerca de puerto nacional o seguro, la mejor opción es poner rumbo hacia allí y aplicar las mismas medidas de prevención que se implementarían en puerto. En puerto seguro, se puede desplegar el equipo de protección necesario y apagar todos los sistemas eléctricos y electrónicos para minimizar el impacto de la TSG.
2. **Buscar fondeadero próximo** [1]: Si no es posible llegar a un puerto nacional o seguro, el buque debe buscar un fondeadero cercano donde pueda resguardarse. Una vez fondeados, se deben apagar todos los equipos y dispositivos eléctricos y electrónicos que no sean esenciales para la seguridad de la nave.
3. **Navegar hacia aguas abiertas** [1]: Si el buque se encuentra en alta mar y no hay puertos ni fondeaderos cercanos, la mejor estrategia es navegar hacia aguas lo más abiertas posible, lejos del área que se espera que sea afectada por la TSG. Se debe mantener la máxima velocidad y buscar rutas que minimicen el tráfico marítimo y el riesgo de colisión con otras embarcaciones.
4. **Realizar un blackout controlado**: Se debe considerar la posibilidad de realizar un blackout controlado, apagando todos los equipos y dispositivos eléctricos y electrónicos que no sean críticos para la navegación y la seguridad de la embarcación [1]. Esta medida puede ayudar a reducir el riesgo de daños causados por sobretensiones inducidas. Es importante tener en cuenta que, si se decide hacer un apagado selectivo de equipos, aquellos que se consideran esenciales estarán mucho más expuestos a sufrir daños y podrían resultar inutilizados más fácilmente. Por lo tanto, se debe evaluar cuales de estos equipos y sistemas son verdaderamente indispensables

en una situación tan crítica, y valorar el empleo de otros métodos más rudimentarios como la navegación astronómica<sup>4</sup>.



Figura 4-1 Sextante náutico empleado para observaciones astronómicas [78]

5. **Mantener comunicación con centros de control:** Es importante mantener comunicación constante con centros de control marítimo y meteorológico para recibir actualizaciones sobre la TSG y coordinar las acciones necesarias para proteger al buque y la dotación.
6. **Activar protocolos de emergencia:** Se deben activar los protocolos de emergencia a bordo, incluyendo la asignación de roles y responsabilidades específicas para cada miembro de la dotación en caso de que la situación empeore durante la TSG.

Estas medidas combinadas pueden ayudar a minimizar los riesgos y proteger la integridad del buque y su dotación durante una TSG en alta mar. Es fundamental evaluar constantemente la situación y tomar decisiones informadas para garantizar la seguridad de todo el personal a bordo.

#### 4.1.3 Aeronaves

Para las aeronaves que se encuentren en el aire durante una TSG, es crucial implementar medidas para proteger tanto la aeronave como sus ocupantes. A continuación, se detallan las medidas propuestas:

1. **Regresar al aeródromo o a buque madre [1]:** En caso de detectar una TSG mientras están en el aire, las aeronaves deben tomar inmediatamente en el aeródromo de origen o aeródromo alternativo más próximo. Si la aeronave forma parte de una operación desde un buque madre, también se puede considerar regresar a él como una opción para resguardarse.
2. **Apagar equipos vulnerables y desconectar cableado:** Una vez en el aeródromo o en el buque madre, se deben apagar todos los equipos vulnerables a los efectos de la TSG, incluyendo sistemas electrónicos y eléctricos que puedan resultar afectados por sobretensiones. Además, se debe desconectar todo el cableado posible para evitar que las sobretensiones se propaguen a través de los sistemas eléctricos de la aeronave.

---

<sup>4</sup> La navegación astronómica es el arte y la ciencia de encontrar una posición geográfica por medio de observaciones astronómicas, especialmente por medición de las alturas de los cuerpos celestes (el Sol, la Luna, los planetas o las estrellas) sobre el horizonte del observador.

3. **Buscar refugio en hangares o instalaciones protegidas:** Si es posible, se debe resguardar la aeronave en hangares o instalaciones protegidas para minimizar su exposición a las corrientes inducidas. Estos lugares ofrecen una capa adicional de protección contra los efectos de la TSG y pueden ayudar a preservar la integridad de los sistemas electrónicos de la aeronave.
4. **Mantener comunicación con control de tráfico aéreo:** Durante el regreso al aeródromo o al buque madre, así como durante las operaciones en tierra, es importante mantener comunicación constante con el control de tráfico aéreo para coordinar el aterrizaje seguro y recibir actualizaciones sobre la situación meteorológica y las condiciones de la TSG. No obstante, cabe la posibilidad de que se produzcan interferencias o no sea posible establecer comunicación debido a los efectos del evento solar.
5. **Evaluar condiciones antes de despegar:** Antes de despegar, es fundamental evaluar las condiciones meteorológicas y de clima espacial para determinar si es seguro realizar el vuelo, especialmente durante períodos de actividad solar intensa. Se deben tener en cuenta los pronósticos y advertencias emitidas por agencias meteorológicas y espaciales para tomar decisiones informadas sobre la operación de la aeronave.

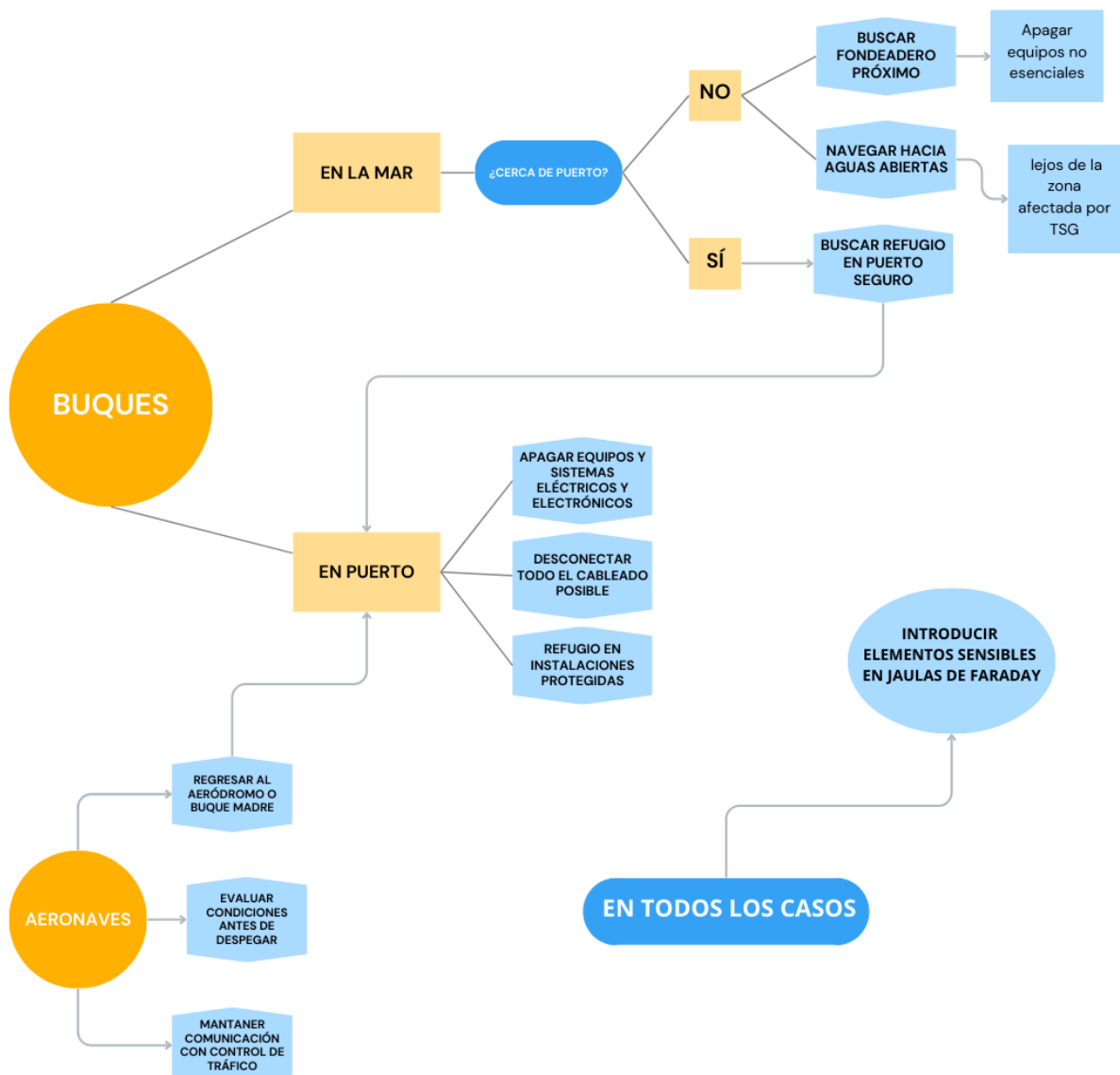


Figura 4-2 Procedimiento de actuación propuesto ante una alerta temprana por TSG

## 5 CONCLUSIONES

### 5.1 Conclusiones

El presente estudio ha proporcionado una visión integral sobre las vulnerabilidades de las unidades de la flota de la Armada frente a los eventos de Tormenta Solar Geomagnética, así como ha propuesto procedimientos de actuación para mitigar sus efectos.

La confirmación de la hipótesis inicial de este estudio es crucial, ya que subraya una preocupación fundamental: la falta de protección adecuada en las unidades de la Armada frente a los efectos potencialmente devastadores de las Tormentas Solares Geomagnéticas. Esta ausencia de medidas de protección específicas deja a las unidades navales expuestas a riesgos considerables durante estos eventos, lo que podría tener consecuencias graves para su capacidad operativa y la seguridad del personal a bordo.

Las TSG representan una amenaza única y desafiante debido a su capacidad para afectar los sistemas electrónicos y eléctricos tanto en tierra como en la mar. La naturaleza altamente tecnológica de las unidades de la Armada las hace particularmente vulnerables a los efectos de estas tormentas solares. Sin embargo, la falta de medidas preventivas y protocolos de actuación específicos deja a estas unidades en una posición precaria durante eventos de este tipo. Este hecho destaca la urgente necesidad de abordar esta vulnerabilidad y desarrollar estrategias efectivas para proteger a las unidades de la Armada contra los efectos de las TSG.

Ante la inexistencia de protección frente a las TSG, se ha demostrado la necesidad de contar con procedimientos de actuación efectivos para prevenir o paliar los efectos de esta amenaza. Los procedimientos propuestos en este trabajo de investigación buscan minimizar el impacto operativo de las TSG y preservar la seguridad de las unidades de la Armada y su dotación.

### 5.2 Desafíos en la Protección de las Unidades de la Armada

La protección efectiva de las unidades de la Armada frente a las Tormentas Solares Geomagnéticas se ve obstaculizada por una serie de desafíos identificados en este estudio. Entre estas dificultades, destaca el estilo de trabajo altamente operativo de la Armada, el cual se caracteriza por una intensa dependencia de tecnología avanzada. Esta dependencia tecnológica, si bien es fundamental para el cumplimiento de las misiones navales, también aumenta la vulnerabilidad de las unidades ante los efectos de las TSG, ya que los sistemas electrónicos y eléctricos son particularmente susceptibles a las perturbaciones electromagnéticas inducidas por estas tormentas solares.

Además, se enfrenta a una complicación económica y logística significativa para mantener un remanente adecuado de repuestos para todos los equipos y sistemas a bordo de las unidades de la Armada. Este desafío radica en la necesidad de disponer de una amplia variedad de componentes de repuesto para garantizar la operatividad continua de los sistemas críticos, lo cual implica costos financieros adicionales y la gestión eficiente de inventarios en un entorno operativo dinámico y a menudo desafiante.

El marco económico y presupuestario juega un papel crucial en la capacidad de la Armada para protegerse de manera adecuada ante las TSG. La asignación de recursos financieros limitados puede imponer restricciones significativas en la implementación de medidas de protección y en la adquisición de equipos y sistemas que sean resistentes a los efectos adversos de las TSG.

En primer lugar, los recursos financieros limitados pueden dificultar la realización de inversiones en tecnologías y equipos que puedan mitigar los impactos de estos eventos. Estas inversiones pueden incluir la actualización de sistemas existentes para hacerlos más robustos frente a las perturbaciones electromagnéticas, así como la adquisición de equipos de respaldo y sistemas de protección específicos diseñados para contrarrestar los efectos de las TSG. Sin embargo, la disponibilidad de fondos puede verse comprometida debido a prioridades presupuestarias y limitaciones de financiamiento.

Por otro lado, la asignación limitada de recursos financieros puede dificultar la capacitación del personal y la implementación de procedimientos de actuación frente a las TSG. El adiestramiento adecuado del personal es fundamental para garantizar que estén preparados para responder de manera efectiva ante eventos geomagnéticos adversos y para minimizar el impacto operativo de las TSG en las unidades de la Armada.

El estudio detallado sobre las vulnerabilidades y los procedimientos de actuación ante las Tormentas Solares Geomagnéticas en las unidades de la flota de la Armada ha revelado la urgente necesidad de abordar las deficiencias existentes en la protección contra este tipo de eventos. La implementación de medidas de prevención y procedimientos operativos adecuados se presenta como una prioridad para salvaguardar la operatividad de las unidades navales y la seguridad de su dotación. Sin embargo, la protección efectiva contra las TSG se ve obstaculizada por los desafíos mencionados; pero con un enfoque colaborativo y proactivo, es posible fortalecer la resiliencia de la Armada y mantener su capacidad operativa en condiciones adversas, contribuyendo así a la seguridad nacional y al cumplimiento de sus misiones estratégicas.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «2023.05.04\_TI\_Monografia Space Weather\_TN Amaya Mosquera.pdf».
- [2] «La tormenta que puede acabar con la civilización», Tiempo.com | Meteored. Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tiempo.com/noticias/ciencia/tormenta-solar-que-puede-acabar-con-la-civilizacion.html>
- [3] «Ciclos de Milankovitch | Blog Meteoclim». Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blog.meteoclim.com/ciclos-de-milankovitch>
- [4] *¿Las tormentas solares pueden destruir la civilización?*, (11 de mayo de 2022). Accedido: 30 de enero de 2024. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=R89xJYeXPc>
- [5] J. Eiras Barca, «Tormentas solares geomagnéticas: la amenaza de una sociedad hipertecnológica», *Bie3 Bol. IEEE*, n.º 11, pp. 762-771, 2018.
- [6] «La Guía Completa de la Laguna Glaciar de Jokulsarlon en Islandia», Guide to Iceland. Accedido: 19 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://guidetoiceland.is/es/naturaleza-en-islandia/laguna-glaciar-jokulsarlon-la-joya-de-la-corona-de-islandia>
- [7] P. Riley, «On the probability of occurrence of extreme space weather events», *Space Weather*, vol. 10, n.º 2, 2012, doi: 10.1029/2011SW000734.
- [8] F. Clette, L. Svalgaard, J. M. Vaquero, y E. W. Cliver, «Revisiting the Sunspot Number: A 400-Year Perspective on the Solar Cycle», *Space Sci. Rev.*, vol. 186, n.º 1-4, pp. 35-103, dic. 2014, doi: 10.1007/s11214-014-0074-2.
- [9] Nuevatribuna, «La administración Obama refuerza su protocolo ante tormentas solares», Nuevatribuna. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.nuevatribuna.es/articulo/ciencia/administracion-obama-refuerza-protocolo-tormentas-solares/20151102133647121913.html>
- [10] «Meteorología Espacial: Los Efectos de las Tormentas Solares a la Tierra – cienciaprop®». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://cienciaprop.fundacioaixavinaros.com/conferencias/meteorologia-espacial-los-efectos-de-las-tormentas-solares-a-la-tierra/>
- [11] «Una Guía sobre el Ciclo Solar y El Clima Espacial», National Environmental Satellite, Data, and Information Service. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.nesdis.noaa.gov/una-guia-sobre-el-ciclo-solar-y-el-clima-espacial>
- [12] «NOAA Space Weather Scales | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>
- [13] *¿QUÉ SON LOS CICLOS SOLARES?*, (3 de mayo de 2020). Accedido: 30 de enero de 2024. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=sPi7ivA14bk>
- [14] «Figura 1. Ciclo de actividad solar a partir de los registros de manchas...», ResearchGate. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Ciclo-de-actividad-solar-a-partir-de-los-registros-de-manchas-solares-desde\\_fig8\\_344237054](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Ciclo-de-actividad-solar-a-partir-de-los-registros-de-manchas-solares-desde_fig8_344237054)
- [15] E. Vega y E. Polar, «Ciclo de Precesión (21.000 años)».
- [16] A. Riveiro, «El Mínimo de Maunder y la Pequeña Edad de Hielo», Astrobitácora. Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.astrobitacora.com/minimo-de-maunder-pequena-edad-hielo/>
- [17] «Hacia el Gran Mínimo Solar Moderno y el enfriamiento terrestre». Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tiempo.com/ram/hacia-el-gran-minimo-solar-moderno-y-el-enfriamiento-terrestre.html>
- [18] «Descubren la sorprendente causa de la Pequeña Edad de Hielo (siglos XIV-XIX) - Información». Accedido: 19 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en:

- <https://www.informacion.es/medio-ambiente/2022/01/01/descubren-sorprendente-causa-pequena-edad-pequena-edad-de-hielo-61184338.html>
- [19] «El Sol sorprende con los niveles de actividad más altos de los últimos 20 años». Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/ciencia/20230920/9239825/sol-sorprende-niveles-actividad-mas-altos-ultimos-20-anos.html>
- [20] J. C. López, «La actividad solar es inusualmente alta: esto es lo que está sucediendo ahora mismo en el interior del Sol», Xataka. Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.xataka.com/espacio/actividad-solar-inusualmente-alta-esto-que-esta-sucediendo-ahora-interior-sol>
- [21] A. May y D. D. last updated, «The Carrington Event: History’s greatest solar storm», Space.com. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.space.com/the-carrington-event>
- [22] C. Gebhardt, «Carrington Event still provides warning of Sun’s potential 161 years later», NASASpaceFlight.com. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.nasaspaceflight.com/2020/08/carrington-event-warning/>
- [23] «What is a Solar Flare? - NASA Science». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://science.nasa.gov/science-research/heliophysics/space-weather/solar-flares/what-is-a-solar-flare/>
- [24] «What is a Solar Flare? - NASA Science». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://science.nasa.gov/science-research/heliophysics/space-weather/solar-flares/what-is-a-solar-flare/>
- [25] «A Perfect Solar Superstorm: The 1859 Carrington Event», HISTORY. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.history.com/news/a-perfect-solar-superstorm-the-1859-carrington-event>
- [26] «What is Space Weather? - Space Weather». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://swe.ssa.esa.int/what-is-space-weather>
- [27] «Space weather impacts», Met Office. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/space-weather/impacts>
- [28] «What was the Carrington Event? | NOAA SciJinks – All About Weather». Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://scijinks.gov/what-was-the-carrington-event/>
- [29] «Vigil». Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.esa.int/Space\\_Safety/Vigil](https://www.esa.int/Space_Safety/Vigil)
- [30] *Introducing: ESA Vigil*, (28 de marzo de 2022). Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=byFsmqC2UHE>
- [31] B. S. published, «Ancient solar storm smashed Earth at the wrong part of the sun’s cycle — and scientists are concerned», livescience.com. Accedido: 7 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.livescience.com/ancient-solar-storm-solar-minimum>
- [32] B. J. Starmans, «Carrington Solar Flare of 1859», The Social Historian. Accedido: 6 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.thesocialhistorian.com/carrington-solar-flare-of-1859/>
- [33] «El Evento Carrington, la devastadora tormenta solar de 1859», historia.nationalgeographic.com.es. Accedido: 7 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://historia.nationalgeographic.com.es/a/el-evento-carrington\\_18748](https://historia.nationalgeographic.com.es/a/el-evento-carrington_18748)
- [34] «Una tormenta solar afecta a las comunicaciones y a los sistemas de navegación de la Tierra | Sociedad | EL PAÍS». Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://elpais.com/sociedad/2003/10/25/actualidad/1067032801\\_850215.html#](https://elpais.com/sociedad/2003/10/25/actualidad/1067032801_850215.html#)
- [35] «Tormenta Solar: El poderoso fenómeno que afecta a nuestro planeta - Energyvan - Vehículos Eléctricos». Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://energyvan.es/tormenta-solar/>

- [36] «¿Cómo sabemos si una CME está dirigida a la tierra y cuándo va a llegar? | Ayuda», SpaceWeatherLive.com. Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://spaceweatherlive.com/es/ayuda/como-sabemos-si-una-cme-esta-dirigida-a-la-tierra-y-cuando-va-a-llegar.html>
- [37] «Columnas de plasma ayudan a la Tierra a formar un escudo contra las tormentas solares», La Vanguardia. Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/natural/20140306/54402861289/columnas-plasma-tierra-formar-escudo-tormentas-solares.html>
- [38] «Using AI to Predict the Danger of Solar Storms for Earth – Europlanet Society». Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.europlanet-society.org/europlanet-magazine/issue-3/using-ai-to-predict-the-danger-of-solar-storms-for-earth/>
- [39] «Predicting Space Weather | Center for Science Education». Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://scied.ucar.edu/learning-zone/sun-space-weather/predicting-space-weather>
- [40] «What is a Lagrange Point? - NASA Science». Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://science.nasa.gov/resource/what-is-a-lagrange-point/>
- [41] «DSCOVR Makes it to the L1 Lagrange Point! | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center». Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.swpc.noaa.gov/news/dscovr-makes-it-l1-lagrange-point>
- [42] «REMER - Riesgos derivados del clima espacial v2.pdf». Accedido: 11 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.proteccioncivil.es/catalogo/naturales/climaespacial/jt\\_clima%20espacial%201/info/REMER%20-%20Riesgos%20derivados%20del%20clima%20espacial%20v2.pdf](https://www.proteccioncivil.es/catalogo/naturales/climaespacial/jt_clima%20espacial%201/info/REMER%20-%20Riesgos%20derivados%20del%20clima%20espacial%20v2.pdf)
- [43] O. Gutierrez, «¿Cuándo se puede producir una tormenta solar?», Newtral. Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.newtral.es/cuando-tormenta-solar/20231206/>
- [44] Newtral, «Gabinete de crisis, el nuevo programa de la Sexta producido por Newtral», Newtral. Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.newtral.es/gabinete-crisis-nuevo-programa-la-sex/20231106/>
- [45] «solar-storms\_a-new-challenge-on-the-horizon-21-nov-2023\_web.pdf». Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.consilium.europa.eu/media/68182/solar-storms\\_a-new-challenge-on-the-horizon-21-nov-2023\\_web.pdf](https://www.consilium.europa.eu/media/68182/solar-storms_a-new-challenge-on-the-horizon-21-nov-2023_web.pdf)
- [46] «¿Cuál es mi Latitud Geomagnética?» Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://spaceweather.com/glossary/magneticlatitude\\_spanish.html](https://spaceweather.com/glossary/magneticlatitude_spanish.html)
- [47] D. B. Navascués, «El poder disruptivo de las tormentas solares y su impacto económico», OpenMind. Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/investigacion/el-poder-disruptivo-de-las-tormentas-solares-y-su-impacto-economico/>
- [48] «SPACE WEATHER: Maps of Geomagnetic Latitude». Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://spawx.nwra.com/spawx/maps/maplats.html>
- [49] R. Tozzi, P. De Michelis, I. Coco, y F. Giannattasio, «A Preliminary Risk Assessment of Geomagnetically Induced Currents over the Italian Territory», *Space Weather*, vol. 17, n.º 1, pp. 46-58, 2019, doi: 10.1029/2018SW002065.
- [50] R. B. Alcaraz, «Conductividad Eléctrica», Tloom. Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tloom.com/conductividad-electrica>
- [51] D. York, «¿Qué es un sistema de satélite LEO y cómo puede ayudar a que Internet sea más grande?», Internet Society. Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.internetsociety.org/es/blog/2022/02/que-es-un-sistema-de-satelite-leo-y-como-puede-ayudar-a-que-internet-sea-mas-grande/>

- [52] «solar-storms\_a-new-challenge-on-the-horizon-21-nov-2023\_web.pdf». Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.consilium.europa.eu/media/68182/solar-storms\\_a-new-challenge-on-the-horizon-21-nov-2023\\_web.pdf](https://www.consilium.europa.eu/media/68182/solar-storms_a-new-challenge-on-the-horizon-21-nov-2023_web.pdf)
- [53] N. Buzulukova y B. Tsurutani, «Space Weather: From solar origins to risks and hazards evolving in time», *Front. Astron. Space Sci.*, vol. 9, 2022, Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspas.2022.1017103>
- [54] «National Space Weather Strategy and Action Plan».
- [55] D. Brake, «Submarine Cables: Critical Infrastructure for Global Communications», *Inf. Technol.*, 2019.
- [56] «Internet, una red de cientos de cables submarinos». Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/internet-red-miles-cables-submarinos\\_13997](https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/internet-red-miles-cables-submarinos_13997)
- [57] E. Krausmann, C. Felton, W. Murtagh, N. Mitchison, y S. Lechner, «Space Weather and Financial Systems: Findings and Outlook. An event co-organised by the European Commission’s Joint Research Centre, the UK Civil Contingencies Secretariat and the NOAA Space Weather Prediction Centre 27 June, 2014, London, UK», JRC Publications Repository. Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC92297>
- [58] #author.fullName}, «Solar storms halt stock market as computers crash», *New Scientist*. Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.newscientist.com/article/mg12316812-400-solar-storms-halt-stock-market-as-computers-crash/>
- [59] «Tormenta solar: Qué es, tipos de tormentas solares y consecuencias», *ZS España*. Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.zschimmer-schwarz.es/noticias/tormenta-solar-que-es-tipos-de-tormentas-solares-y-consecuencias/>
- [60] «UK Severe Space Weather Preparedness Strategy.pdf». Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/1020551/uk-severe-space-weather-preparedness-strategy.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1020551/uk-severe-space-weather-preparedness-strategy.pdf)
- [61] «Cruz Roja reparte más de 17,7 millones de kilos de alimentos a casi 730.000 personas». Accedido: 19 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www2.cruzroja.es/es/-/cruz-roja-reparte-mas-de-17-millones-de-kilos-de-alimentos-a-casi-730000-personas>
- [62] «Nuclear power plants and solar flares». Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/resources/fact-sheets/nuclear-power-plants-solar-flares/>
- [63] «UK Severe Space Weather Preparedness Strategy».
- [64] «Cómo actuar si se produce una tormenta solar». Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.newtral.es/que-hacer-tormenta-solar/20231206/>
- [65] «Solar Radiation Storm | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center». Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/solar-radiation-storm>
- [66] «Energía renovable alternativa: opciones sostenibles». Accedido: 19 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.holaluz.com/blog/energia-renovable-alternativa/>
- [67] «National Space Weather Strategy and Action Plan».
- [68] «Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». Accedido: 19 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/iniciohome/prefLang-es/>
- [69] «Space Technology 5». Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.jpl.nasa.gov/nmp/st5/SCIENCE/effects2.html>

- [70] «Equipos de radiocomunicaciones». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.salvamentomaritimo.es/mejora-tu-seguridad/navegacion-de-recreo/antes-de-zarpar/equipos-de-radiocomunicaciones>
- [71] «Una tormenta solar afecta a las comunicaciones y a los sistemas de navegación de la Tierra | Sociedad | EL PAÍS». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://elpais.com/sociedad/2003/10/25/actualidad/1067032801\\_850215.html](https://elpais.com/sociedad/2003/10/25/actualidad/1067032801_850215.html)
- [72] J. A. M. Casanovas y J. A. Satorra, «2.23. Sensores de conductividad eléctrica aparente para el análisis de la variabilidad del suelo en Agricultura de Precisión», n.º 2.
- [73] «Radar Marino: cómo funcionan y cuál elegir», Electrónica Edimar. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://edimar.com/radar-marino-funcionamiento/>
- [74] «Sistemas - SCOMBA - Sistemas - Navantia». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.navantia.es/es/lineas-de-negocio/sistemas/scomba/>
- [75] «Misiles Antibuque de la Armada – BlogNaval». Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blognaval.es/misiles-antibuque-de-la-armada/>
- [76] «Adding Predictability to Fleet Communications During Solar Flares», United States Navy. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.navy.mil/Press-Office/Press-Releases/display-pressreleases/Article/2658140/adding-predictability-to-fleet-communications-during-solar-flares/https%3A%2F%2Fwww.navy.mil%2FPress-Office%2FPress-Releases%2Fdisplay-pressreleases%2FArticle%2F2658140%2Fadding-predictability-to-fleet-communications-during-solar-flares%2F>
- [77] «Qué es un sextante marino y cómo debemos utilizarlo | Náutica Profesional», Nautica profesional. Accedido: 19 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://nauticaprofesional.com/como-funciona-un-sextante-marino/>
- [78] «Jaula de Faraday». Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n10/r3.html>



## **ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS, Y AMBIENTALES**

En cumplimiento del Sello Internacional de Calidad EUR-ACE y con el objetivo de abordar el sub-resultado de aprendizaje 3.1, referente a la capacidad para proyectar, diseñar y desarrollar productos complejos, procesos y sistemas, teniendo en cuenta aspectos sociales, de salud y seguridad, ambientales, económicos e industriales, se presentan a continuación las consideraciones pertinentes:

Durante el desarrollo del presente trabajo (estudio de vulnerabilidades y propuesta de procedimientos de actuación ante eventos de Tormenta Solar Geomagnética para las unidades de la flota de la Armada) se ha puesto especial atención en aspectos sociales, económicos y ambientales. En primer lugar, se ha examinado el impacto social de las TSG, evidenciando la importancia de la concienciación pública sobre estos eventos y la necesidad de educación y preparación para afrontarlos. Se ha destacado la interrupción potencial de servicios críticos y la seguridad de la población como áreas de preocupación.

En cuanto a la salud y seguridad, se han evaluado los riesgos para la salud humana durante eventos extremos de TSG, especialmente la exposición a radiación solar intensa. Se han propuesto medidas de seguridad, tanto para la población en general como para el personal de las unidades de la Armada, incluyendo protocolos de emergencia y el uso de equipos de protección adecuados.

En el ámbito ambiental, se ha analizado el impacto de las TSG en las redes de energía eléctrica, los sistemas de navegación y la ionosfera terrestre. Se han considerado medidas de mitigación y adaptación para proteger el medio ambiente durante y después de estos eventos, con el fin de minimizar su impacto negativo.

Finalmente, se ha abordado el aspecto económico, evaluando el costo de los daños causados por las TSG, como la pérdida de productividad, los gastos de reparación de infraestructuras y los impactos en los servicios. Se ha subrayado la importancia de la inversión en tecnologías y medidas de protección para reducir el impacto económico de las TSG en la sociedad y en las operaciones de la Armada



## **ANEXO II: IMPLEMENTACIÓN DE JAULAS DE FARADAY COMO MEDIDA DE PROTECCIÓN**

Las jaulas de Faraday son estructuras metálicas diseñadas para proteger los objetos en su interior de los campos eléctricos externos. El principio detrás de su funcionamiento es el de la protección contra los campos eléctricos externos mediante la creación de una superficie conductora que desvía la corriente alrededor del interior de la estructura. Esto se logra gracias a que los campos eléctricos externos generan corrientes eléctricas en la superficie conductora de la jaula, que a su vez generan campos magnéticos que cancelan los campos eléctricos externos dentro de la jaula [78]. Como resultado, los objetos en el interior de la jaula quedan protegidos de las interferencias electromagnéticas externas, como las generadas por una TSG.

Para implementar una jaula de Faraday de manera improvisada, se pueden utilizar diversos materiales y métodos. Una opción es utilizar cajas de munición metálicas, que son naturalmente conductoras y ofrecen una protección eficaz contra los campos electromagnéticos. Otra alternativa es recubrir una caja común con papel de aluminio, asegurándose de que todas las superficies estén completamente cubiertas y no haya espacios donde los campos eléctricos puedan penetrar.

Es importante recordar que una jaula de Faraday debe ser una estructura completamente cerrada y continua para ser efectiva. Cualquier brecha o espacio abierto podría permitir que los campos electromagnéticos penetren en el interior y afecten los dispositivos protegidos. Además, es fundamental que los objetos sensibles estén completamente rodeados por el material conductor para garantizar una protección adecuada.

La implementación de jaulas de Faraday como medida de protección durante una TSG puede ser una solución efectiva y de bajo costo para proteger equipos críticos y sensibles. Al utilizar materiales fácilmente disponibles y técnicas sencillas, las unidades navales pueden mejorar su resiliencia ante los efectos adversos de estos eventos solares.

