



GUÍA DE RECOMENDACIONES **DE CLIMA ESPACIAL EN MÉXICO**

Juan Américo González-Esparza, Miroslava Barragán Robles, Constanza Anahi Elsa Rivera Pereira, Rosa María Ramírez de Arellano y Haro, Carlos Ramírez Pacheco, Amalia Nallely Castro Martínez, Cynthia Patricia Sánchez Esquinazi, Carlos Miguel Sainz Luna, María Sergeeva, Gilberto Castelán Pescina, Jesús Roberto Romero Ruiz, Pedro Corona Romero, Oscar Zepeda Ramos, Tania Patricia Ramírez Gutiérrez y Saraf Cruz Londoño.



geofísica
UNAM



LANCE
Laboratorio Nacional
de Clima Espacial

geofísica
UNAM

GUÍA DE RECOMENDACIONES DE CLIMA ESPACIAL EN MÉXICO



SEGURIDAD
SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CNPC
COORDINACIÓN NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL



CENAPRED
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN
DE DESASTRES



COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

AEM
AGENCIA ESPACIAL
MEXICANA



gob.mx/cenapred

SECRETARÍA DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN CIUDADANA

Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana

Lic. Rosa Icela Rodríguez Velázquez

Coordinadora Nacional de Protección Civil

Lic. Laura Velázquez Alzúa

Director General del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred)

Ing. Enrique Guevara Ortiz

Dirección General de Protección Civil

Ing. Oscar Zepeda Ramos

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

Secretario de Infraestructura Comunicaciones y Transportes

Lic. Jorge Nuño Lara

Director General de la Agencia Espacial Mexicana

Dr. Salvador Landeros Ayala

Director General Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano

Mtro. Javier Alonso Vega Dour

SECRETARÍA DE SALUD

Director General de Epidemiología

Dr. Gabriel García Rodríguez

SECRETARÍA DE MARINA

Secretario de Marina

Almirante José Rafael Ojeda Durán

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD

Director General

Lic. Manuel Bartlett Díaz

INSTITUTO FEDERAL DE TELECOMUNICACIONES

Comisionado Presidente

Ing. Javier Juárez Mojica

CENTRO NACIONAL DE CONTROL DE ENERGÍA

Director General del Centro Nacional de Control de Energía

Dr. Ricardo Octavio Arturo Mota Palomino

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Rector de la Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Leonardo Lomelí Vanegas

Coordinadora de la Investigación Científica

Dra. María Soledad Funes Argüello

Director del Instituto de Geofísica

Dr. José Luis Macías Vázquez

Responsable Técnico del Laboratorio Nacional de Clima Espacial

Dr. Juan Américo González Esparza

© SECRETARÍA DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN CIUDADANA

Avenida Constituyentes 947, Edificio B, Planta Alta

Colonia Belén de Las Flores

Álvaro Obregón, C. P. 01110, Ciudad de México

Teléfono: 55 1103 6000

www.gob.mx/sspc

© CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

Av. Delfín Madrigal núm. 665,

Col. Pedregal de Santo Domingo, Coyoacán,

C. P. 04360, Ciudad de México

Teléfono: 55 5424 6100

www.gob.mx/cenapred

Guía de recomendaciones de clima espacial en México

Autores:

Juan Américo González-Esparza, Miroslava Barragán Robles, Constanza Anahi Elsa Rivera Pereira, Rosa María Ramírez de Arellano y Haro, Carlos Ramírez Pacheco, Amalia Nallely Castro Martínez, Cynthia Patricia Sánchez Esquinazi, Carlos Miguel Sainz Luna, María Sergeeva, Gilberto Castelán Pescina, Jesús Roberto Romero Ruiz, Pedro Corona Romero, Oscar Zepeda Ramos, Tania Patricia Ramírez Gutiérrez y Saraí Cruz Londoño.

Autores:

J. A. González-Esparza, M. Barragán Robles, C. A. E. Rivera Pereira, R. M. Ramírez de Arellano y Haro, C. Ramírez Pacheco, A. N. Castro Martínez, C. P. Sánchez Esquinazi, C. M. Sainz Luna, M. Sergeeva, G. Castelán Pescina, J. R. Romero Ruiz, P. Corona Romero, O. Zepeda Ramos, T.P. Ramírez Gutiérrez y S. Cruz Londoño.

Revisores:

E. Franco Vargas, S.P. Jiménez Allende, G. Quintana Saucedo, J. Ortiz Ochoa, T. Villa Trápala, G. García Rodríguez, Y. F. López Santiago, D. Alaníz Cuevas, R.M. Flores Martínez, Jefe de la Sección de Comunicaciones Secretaría de Marina, J.C. Mejía Ambriz, L.X. González Méndez y E. Sánchez García.

Editora técnica

Andrea Rostan Robledo

Diseño editorial

Samantha Fernanda Pita Uraga

Corrección

Ana María Martínez Gómez

Primera edición: Junio, 2024.

Universidad Nacional Autónoma de México

Av. Universidad No. 3000, Col. Copilco, Alcaldía Coyoacán,
C.P. 04510, CDMX

Instituto de Geofísica

Circuito de la Investigación Científica s/n, C.U., Coyoacán,
C.P. 04150, CDMX

ISBN: 978-607-30-9665-2

Esta guía es un documento público oficial. La presente edición ha sido realizada por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Se permite la reproducción total o parcial de esta guía, siempre y cuando se cite la fuente.

Impreso y hecho en México.



GUÍA DE
RECOMENDACIONES
**DE CLIMA ESPACIAL
EN MÉXICO**

Instituto de Geofísica
UNAM

CONTENIDO

Prólogo	8
Introducción	9
Siglas y acrónimos	10
Lista de dependencias y entidades de la administración pública federal	11
Diagnóstico y análisis del estado actual	12
Objetivos estratégicos	16
• Objetivo estratégico 1. Promover el desarrollo de estudios científicos para mejorar el conocimiento y sistemas de alerta temprana de los riesgos asociados a eventos de CE.....	16
• Objetivo estratégico 2. Dar a conocer el funcionamiento del sistema de monitoreo y alerta temprana en materia de CE a los actores institucionales y sociales.....	20
• Objetivo estratégico 3. Fomentar el desarrollo de una cultura de prevención y atención respecto a los riesgos asociados a eventos de CE.....	23
Epílogo: hacia un futuro resiliente en la gestión integral del riesgo de desastres asociados a eventos de clima espacial	27
Referencias	28

PRÓLOGO

Vivimos en una era en la que nuestra dependencia de la tecnología y la interconexión global nos ha expuesto a nuevos desafíos, y el Clima Espacial (CE) emerge como un factor crítico que podría afectar la infraestructura y sistemas estratégicos. El 10 de mayo de 2024 ocurrió una tormenta geomagnética severa que afectó a todo el planeta, el evento más intenso desde 2003.

La exploración del espacio nos ha otorgado conocimientos sobre la influencia del Sol en nuestro entorno terrestre. Sin embargo, con la creciente complejidad y expansión de nuestras redes eléctricas, sistemas de comunicación y satélites, se ha vuelto imperativo comprender y mitigar los riesgos asociados con las tormentas solares y otros eventos relacionados con el CE.

En un mundo cada vez más interconectado, la gestión eficaz del riesgo asociado a la meteorología del espacio se convierte en un imperativo para salvaguardar la infraestructura crítica y garantizar la continuidad de las operaciones cotidianas. Esperamos que esta Guía sirva como un recurso valioso y un llamado a tomar acciones, recordándonos la importancia de la preparación y la colaboración en un entorno donde la prevención es clave para asegurar un futuro resiliente.

La presente Guía de Recomendaciones de Clima Espacial en México tiene el objetivo de visibilizar el estudio y comprensión de los fenómenos solares en nuestro país y, con ello, contribuir al desarrollo de una serie de instrumentos meteorológicos cuyo fin es reducir el riesgo de desastre vinculado a eventos extremos ocasionados por el CE, contribuyendo al aumento de la resiliencia en México ante su posible ocurrencia.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los efectos de las tormentas solares han hecho evidente la importancia de realizar estudios sobre el CE.

En el contexto de esta Guía, el CE se entenderá como los efectos nocivos en sistemas tecnológicos modernos provocados por fenómenos que ocurren en el Sol, medio interplanetario, el campo geomagnético, la atmósfera y la ionósfera (Koskinen *et al.*, 2001; Cannon, 2013; Sergeeva, 2022).

Las perturbaciones de CE son condiciones irregulares que representan riesgo para sistemas tecnológicos tanto en el espacio como en la Tierra. Un evento extremo de CE puede tener impactos severos en la infraestructura tecnológica y servicios críticos de un país o región, afectando actividades y procesos que hoy en día resultan indispensables para la sociedad.

Por ello, los eventos de CE se han vuelto un tema de importancia internacional y al mismo tiempo de seguridad nacional, toda vez que pueden afectar satélites, sistemas de posicionamiento global y de navegación, comunicaciones, transporte, y redes de transmisión y distribución de energía eléctrica, etc.

El 3 de junio de 2014, como parte de una serie de reformas a la Ley General de Protección Civil se incluyó la definición de *fenómeno astronómico* entendido como “eventos, procesos o propiedades a los que están sometidos los objetos del espacio exterior incluidos estrellas, planetas, cometas y meteoros. Algunos de estos fenómenos interactúan con la Tierra, ocasionándole perturbaciones que pueden ser destructivas tanto en la atmósfera como en la superficie terrestre, entre ellas se cuentan las tormentas magnéticas y el impacto de meteoritos.”

En octubre de 2014 se creó el Servicio de Clima Espacial México (SCiESMEX) de la Universidad Nacional Autónoma de México con la principal encomienda de estudiar, monitorear y avisar de manera preventiva a las autoridades correspondientes sobre los efectos del CE en nuestra región. En 2016, con apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, se estableció el Laboratorio Nacional de Clima Espacial con el objetivo principal de desarrollar infraestructura científica para monitorear los efectos del CE en diferentes regiones del país.

En 2017, se reportaron los primeros estudios integrales basados en observaciones propias ante la ocurrencia de eventos de CE y las afectaciones en México. Por ejemplo, las tormentas solares de septiembre de 2017 provocaron problemas de radio y telecomunicaciones en la zona del Caribe. Estos estudios muestran que incluso los eventos moderados de CE afectan a México (González-Esparza *et al.*, 2018 y De la Luz *et al.*, 2018). Durante la tormenta geomagnética del 10 de mayo de 2024, los efectos en la región fueron medidos por las redes de instrumentos del LANCE, registrando variaciones en el flujo de rayos cósmicos, índices geomagnéticos regionales, perturbaciones ionosféricas y la respuesta del sistema eléctrico nacional (González-Esparza *et al.*, 2024).

Las acciones sugeridas en esta guía se enfocan en reducir los impactos sociales y económicos del CE sobre el territorio nacional teniendo como eje tres objetivos estratégicos en los cuales se propone la colaboración de diversos entes gubernamentales y la academia.

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

CE: Clima Espacial

CENAPRED: Centro Nacional de Prevención de Desastres

CNPC: Coordinación Nacional de Protección Civil

CONAHCYT: Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías

DOF: Diario Oficial de la Federación

GIR: Gestión Integral de Riesgos

GUÍA: Guía de Recomendaciones de Clima Espacial en México

IFT: Instituto Federal de Telecomunicaciones

LANCE: Laboratorio Nacional de Clima Espacial del Instituto de Geofísica Unidad Michoacán de la Universidad Nacional Autónoma de México y de la Universidad Autónoma de Nuevo León

OACI: Organización de Aviación Civil Internacional de las Naciones Unidas

SCiESMEX: Servicio de Clima Espacial México

SINAPROC: Sistema Nacional de Protección Civil

UIT-R: Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones

UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México

LISTA DE DEPENDENCIAS Y ENTIDADES DE LA ADMINISTRACIÓN PÚBLICA FEDERAL

Este documento fue elaborado por el Grupo de Clima Espacial (CE), que se conformó con las siguientes dependencias y entidades de la Administración Pública Federal:

AEM: Agencia Espacial Mexicana

AFAC: Agencia Federal de Aviación Civil

CENACE: Centro Nacional de Control de Energía

CENAPRED: Centro Nacional de Prevención de Desastres

CFE: Comisión Federal de Electricidad

CNPC: Coordinación Nacional de Protección Civil

IFT: Instituto Federal de Telecomunicaciones

IPN: Instituto Politécnico Nacional

LANCE: Laboratorio Nacional de Clima Espacial

SEDENA: Secretaría de la Defensa Nacional

SICT: Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes

SEMAR: Secretaría de Marina

SENEAM: Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano

SSA: Secretaría de Salud

UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México

DIAGNÓSTICO Y ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL

Las tormentas solares de gran magnitud tienen el potencial de generar perturbaciones significativas en el entorno espacial terrestre, afectando el campo geomagnético, la ionósfera y la termosfera. Estas perturbaciones impactan de manera directa la operación y confiabilidad de sistemas tecnológicos críticos, incluyendo satélites, telecomunicaciones, Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS), navegación aérea y marítima, radares y distribución de energía eléctrica. La magnitud de estos efectos resalta la importancia de considerar el CE como una cuestión de seguridad y soberanía nacional, haciendo imperativo su estudio en México.

Para abordar esta necesidad, se han identificado acciones claves como la necesidad de que México desarrolle su propia red de instrumentación para registrar los efectos del CE en diversas regiones del país de manera continua. Esto no solo facilitaría el monitoreo en tiempo real, sino que también contribuiría a la creación de un archivo histórico de datos, esencial para la toma de decisiones estratégicas ante eventos severos y/o extremos.

Desde 2017, con el apoyo de proyectos del CONAHCYT, se ha comenzado a adquirir y desarrollar redes de instrumentos destinadas a monitorear condiciones geomagnéticas, ionosféricas, estallidos de radio solares, flujos de rayos cósmicos, y corrientes inducidas geomagnéticamente, especialmente en lo que respecta al sistema eléctrico nacional. Sin embargo, aún existe una notable ausencia de estudios socioeconómicos que cuantifiquen los daños potenciales de un evento de CE en México.

La vulnerabilidad de tecnologías esenciales como los satélites, las comunicaciones por radio y los diferentes sistemas de GNSS (GPS, GLONASS, GALILEO, BDS-II sistemas de aumentación) subraya el riesgo que una tormenta solar severa representa para todo el territorio mexicano, poniendo en peligro la seguridad nacional. México ya cuenta con la Ley General de Protección Civil, que contempla los riesgos asociados al CE, destacando la necesidad de una gestión proactiva y bien informada de estos fenómenos.

Es imperativo que los sectores estratégicos, incluidos telecomunicaciones, transporte, energía, sector financiero, salud y suministro de agua, estén bien informados sobre las medidas de mitigación aplicables ante un evento extremo de CE. Además, se hace eco de la necesidad de mejorar la difusión de información a todos los niveles de la sociedad, especialmente ante la proliferación de noticias falsas en redes sociales. La capacitación de medios de comunicación para manejar adecuadamente esta información es también crucial.

A nivel regulatorio, se han dado pasos importantes, como la publicación por parte del IFT de los Lineamientos que establecen el Protocolo de Alerta Común y el anuncio en 2023 sobre la preparación técnica de la CNPC para implementar mensajes de alerta a través del servicio móvil.

En las últimas décadas, varios países han documentado afectaciones por eventos de CE, por ejemplo, en marzo de 1989, la red eléctrica de la empresa *Hydro-Quebec* en Canadá registró la falla total de algunas instalaciones eléctricas que provocó un apagón de 9 horas, afectando al menos a 6 millones de personas con un costo neto aproximado a los \$2,000

millones de dólares. En octubre de 2003, Sudáfrica informó del daño permanente en 15 transformadores de potencia eléctrica ocasionado por los efectos de una tormenta geomagnética. El 10 de mayo de 2024 ocurrió una tormenta geomagnética severa que produjo afectaciones en muchos países e inclusive se observaron auroras boreales en México, pese a que esta tormenta tuvo una intensidad menor a las mencionadas arriba (González-Esparza *et al.*, 2024).

Por otro lado, se ha estimado que el impacto económico global de un evento extremo de CE sería aproximadamente de \$2.4 a 3.4 mil millones de dólares, pérdidas equiparables a una crisis financiera extrema (Schulte in den Bäumen *et al.*, 2014).

Ante este panorama, es claro que México debe tomar medidas concretas y proactivas para fortalecer su capacidad de respuesta frente al CE, reconociendo su impacto potencial sobre la seguridad, la economía y el bienestar de la población e implementando la Gestión Integral de Riesgos en las acciones.

Enfoque

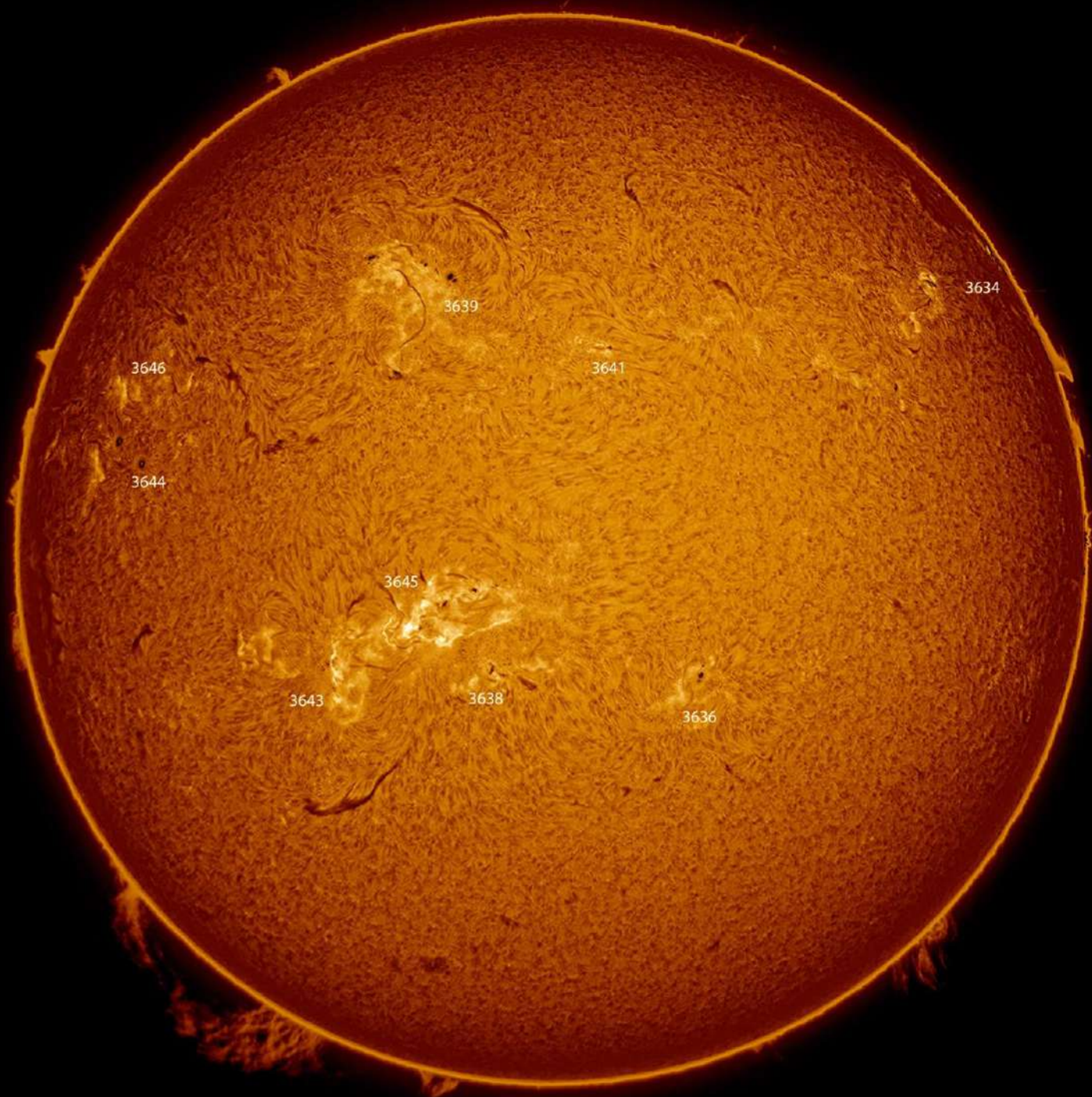
La Gestión Integral de Riesgos (GIR) en México se concibe como una estrategia diseñada para abordar los riesgos desde su origen, incorporando un enfoque permanente y colaborativo que une a los distintos niveles de gobierno y sectores de la sociedad. Este enfoque se centra en el desarrollo sostenible y en la reducción de las causas estructurales de los desastres, fomentando la resiliencia de la comunidad ante situaciones adversas. Dentro de este marco, la gestión del CE se integra armoniosamente, alineando sus objetivos estratégicos con las etapas clave de la GIR, desde la identificación y análisis de los riesgos hasta la reconstrucción post-desastre. Este enfoque se relaciona con los objetivos estratégicos propuestos en esta Guía.

El primer objetivo estratégico, promover el desarrollo de estudios científicos y sistemas de alerta temprana, se enfoca en la etapa inicial de identificación de los riesgos asociados a eventos de CE. Al mejorar nuestro conocimiento y capacidad de alerta, fortalecemos las bases para una previsión y prevención efectivas, permitiendo una respuesta más informada y anticipada ante estos eventos. Este enfoque científico y proactivo es fundamental para entender la formación de riesgos y minimizar su impacto potencial en la sociedad.

El segundo objetivo estratégico, relacionado con la operación del sistema de monitoreo y alerta temprana, junto con el fomento de una cultura de prevención y atención, se inscribe en las fases de previsión, prevención y preparación. Informar adecuadamente a todos los actores institucionales y sociales no solo aumenta la transparencia y participación en la gestión de riesgos, sino que también promueve prácticas de prevención y preparación en toda la sociedad. Estas etapas son cruciales para establecer las medidas necesarias que permitan a la población y a los sectores críticos responder de manera efectiva ante la materialización de estos riesgos.

Por último, se encuentra el tercer objetivo estratégico que se vincula con el desarrollo de una cultura de prevención. Dentro de este objetivo se contempla la difusión de información sobre los fenómenos de CE, lo que contribuye a las etapas de mitigación,

auxilio, recuperación y reconstrucción. Al crear conciencia sobre estos fenómenos y sus posibles efectos, se potencia la capacidad de actores institucionales y sociales para mitigar los riesgos mediante acciones informadas. Además, esta conciencia colectiva y conocimiento específico son indispensables para una recuperación y reconstrucción más rápidas y eficientes tras un evento adverso, asegurando que las políticas públicas y estrategias implementadas sean efectivas y sostenibles en el tiempo.



Título. Imagen de la cromosfera solar en H-alfa.

Créditos. Fotografía del Laboratorio de Geociencias Espaciales, Escuela Nacional de Estudios Superiores-Morelia, UNAM.

OBJETIVOS ESTRATÉGICOS

OBJETIVO ESTRATÉGICO 1. Promover el desarrollo de estudios científicos para mejorar el conocimiento y sistemas de alerta temprana de los riesgos asociados a eventos de Clima Espacial.

El estudio regional del CE es un pilar clave en la gestión de riesgos relacionados con estos eventos, permitiendo una comprensión más profunda de sus impactos específicos y la implementación de estrategias de mitigación y sistemas de alerta temprana más efectivos y adaptados a las realidades locales. En dicho contexto, al promover la investigación y el desarrollo científico con un enfoque local y regional, se busca fortalecer la capacidad de los sectores industriales, económicos y gobiernos para anticipar, responder y adaptarse a los desafíos únicos presentados por el CE.

El territorio mexicano, igual que muchas otras regiones del mundo, enfrenta una creciente vulnerabilidad a los efectos adversos del CE, lo que hace indispensable la realización de estudios científicos específicos. Estos estudios no solo buscan identificar las vulnerabilidades actuales y futuras del país ante los fenómenos del CE, sino también comprender las interdependencias de nuestra sociedad con tecnologías susceptibles a estos eventos. Esta vulnerabilidad se manifiesta en la posible degradación o interrupción de servicios esenciales para emergencia y el bienestar general de la población, subrayando la importancia de un enfoque proactivo en el estudio del CE. En este contexto, la vigilancia y diagnóstico de las condiciones del CE, la generación de alertas tempranas y el desarrollo de pautas para la protección de sistemas tanto espaciales como terrestres son esenciales para mitigar los impactos y salvaguardar la infraestructura crítica a nivel nacional.

A nivel internacional, la relevancia de estos esfuerzos ha sido reconocida y refrendada por el sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R), en foros como la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2019 (CMR-19), que resaltó la importancia de proteger los sensores de CE de las interferencias de otros servicios de radiocomunicaciones. Las acciones recomendadas por la CMR-19, dirigidas a asegurar la protección de estos sensores mediante regulaciones adecuadas, demuestran un consenso global sobre la necesidad de preservar y fortalecer las capacidades de monitoreo del CE. Así, el trabajo continuo del subgrupo de trabajo 7C de la UIT-R preparó el terreno para que en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2023 (CMR-23), se incluyera la definición de Clima Espacial en el Reglamento de Radiocomunicaciones con la finalidad de reconocer la importancia de la utilización del espectro por las aplicaciones de la meteorología del espacio para monitorear los fenómenos y eventos de CE que afectan a los servicios esenciales para la economía, la seguridad y la protección de las administraciones y la población de sus países, esto ejemplifica un esfuerzo colaborativo internacional para mejorar la comprensión y la gestión del CE.

La participación activa de México en estos esfuerzos globales, mediante el desarrollo y la contribución de estudios científicos regionales sobre el CE, no sólo resalta su compromiso con la seguridad y soberanía nacional también su papel como actor responsable en la comunidad internacional. Es imperativo, entonces, el desarrollo de infraestructuras nacionales dedicadas al monitoreo y análisis de condiciones del CE, como las que se están implementando a través del LANCE. Este enfoque no solo busca garantizar la resiliencia de México frente a los desafíos del CE sino también fortalecer su capacidad para contribuir a la soberanía nacional frente a este tipo de riesgos. En resumen, la adopción de una postura proactiva en el estudio y gestión del CE es crucial para anticipar, mitigar y responder eficazmente a sus posibles impactos, asegurando así el bienestar y la seguridad de la sociedad mexicana en el presente y futuro.

Considerando lo expuesto, en el marco de este **Objetivo Estratégico 1** se proponen las acciones siguientes:

Acciones puntuales	Requerimiento	Actores
Identificar los efectos regionales de eventos de CE en el territorio nacional para establecer escalas de eventos severos y extremos.	Establecer redes de instrumentos que cubran el territorio nacional y que midan diferentes variables físicas del CE así como que generen registros históricos que abarquen al menos dos ciclos solares de 11 años.	CONAHCYT, AEM, IFT, CFE, SICT, LANCE e Instituciones Académicas.
Identificar la respuesta geomagnética de diferentes regiones del país ante la ocurrencia de eventos de CE.	Establecer una red de magnetómetros para registrar perturbaciones magnéticas en tiempo real desde diferentes sitios del territorio nacional. Análisis de datos del LANCE.	CONAHCYT, LANCE e Instituciones Académicas.
Identificar la respuesta ionosférica de diferentes regiones del país ante la ocurrencia de eventos de CE.	Establecer una red de estaciones ionosféricas para realizar el diagnóstico del estado de la ionósfera sobre el territorio nacional. Análisis de datos en el LANCE.	CONAHCYT, LANCE, IFT, SICT, SENEAM e Instituciones Académicas.
Identificar y medir los flujos de partículas energéticas solares que llegan al territorio nacional cuando ocurren tormentas solares.	Establecer una red de detectores de partículas energéticas para registrar perturbaciones solares en tiempo real desde diferentes sitios del territorio nacional. Análisis de datos en el LANCE.	CONAHCYT, LANCE, SICT, SENEAM e Instituciones Académicas.
Identificar la ocurrencia de tormentas solares a través de mediciones de estallidos de radio.	Establecer una red de detectores de radio espectrógrafos para registrar tormentas solares en tiempo real desde diferentes sitios del territorio nacional. Análisis de datos en el LANCE.	CONAHCYT, LANCE e Instituciones Académicas.

Acciones puntuales	Requerimiento	Actores
Identificar las corrientes inducidas geomagnéticamente que se registran en transformadores prioritarios de 400 KV de la CFE ante la ocurrencia de tormentas geomagnéticas.	Establecer una red de medidores de corrientes inducidas geomagnéticamente para registrar en tiempo real perturbaciones en el sistema eléctrico nacional desde diferentes transformadores prioritarios de 400 KV de la CFE. Análisis de datos en el LANCE.	CONAHCYT, CFE, LANCE e Instituciones Académicas.
Identificar en tiempo real perturbaciones en el medio interplanetario que pueden impactar a la Tierra y provocar perturbaciones de CE.	Operar, mantener y actualizar el radiotelescopio MEXART para detectar perturbaciones en el medio interplanetario empleando la técnica del Centelleo interplanetario. Análisis de datos en el LANCE.	CONAHCYT, LANCE e Instituciones Académicas.
Desarrollar escenarios de peligros y riesgos por eventos severos y extremos de CE y su afectación en diferentes regiones del país.	Analizar las características de las diferentes regiones del país basados en los datos proporcionados por las redes de instrumentos propios. Financiamiento para desarrollar las investigaciones. Financiamiento para becas de estudiantes. Contratación de investigadores.	CONAHCYT, LANCE, AEM, CNPC, CENAPRED e Instituciones Académicas.
Desarrollar indicadores de CE que permitan comunicar de forma eficaz y eficiente a la población el estado del CE y el nivel de riesgo de un evento de CE.	Implementar un semáforo o desarrollar un producto equivalente relacionado con los diferentes dominios del CE: actividad solar, campo geomagnético, ionósfera terrestre y partículas energéticas solares.	LANCE, SCiESMEX y CENAPRED e Instituciones Académicas.



Título. Imagen de una aurora boreal.
Créditos. Fotografía de Cesar Cantú.

OBJETIVO ESTRATÉGICO 2. Dar a conocer el funcionamiento del sistema de monitoreo y alerta temprana en materia de Clima Espacial a los actores institucionales y sociales.

Un evento severo o extremo de CE no solo representa una amenaza directa e indirecta para sectores tecnológicos y por consecuencia para toda la población, sino que también podría poner en riesgo la seguridad nacional, la economía y el bienestar de la población. En el contexto de la GIR es fundamental que, tanto actores institucionales como sociales, comprendan cómo utilizar eficaz y eficientemente la información proporcionada por los sistemas de monitoreo y alerta temprana para generar respuestas oportunas, mitigando así la posibilidad de degradación en la respuesta y operación de diversos sistemas tecnológicos y/o daños significativos.

Contar con un sistema de alerta temprana es crucial en este contexto, funcionando como un conjunto integrado de componentes que proveen información vital para que las autoridades puedan actuar de manera coordinada. Para que un sistema de alerta temprana sea efectivo, requiere de la colaboración entre el sector científico, que identifica y evalúa fuentes potenciales de riesgos; el técnico, que se encarga del monitoreo y la emisión de alertas basadas en datos científicos; y el sector de difusión, que asegura la comunicación clara y eficaz de las alertas a los tomadores de decisión del SINAPROC. En México, el SCiESMEX/LANCE realiza las labores de monitoreo del CE, proporcionando datos y productos esenciales para informar al SINAPROC del riesgo de eventos significativos.

Los sistemas tecnológicos esenciales para la sociedad, incluyendo aquellos que sustentan servicios críticos, muestran una notable vulnerabilidad a las tormentas solares extremas. En respuesta, el artículo 24 de la Ley General de Protección Civil designa al Centro Nacional de Comunicación y Operación de Protección Civil (CENACOM) como el eje operativo para la comunicación y coordinación dentro del Sistema Nacional de Protección Civil, enfocado en las fases de preparación, auxilio y recuperación. Operado por la Dirección General de Protección Civil, bajo la Coordinación Nacional de Protección Civil, el CENACOM integra y gestiona los recursos necesarios para una toma de decisiones oportuna y adecuada. Conformemente, el SCiESMEX/LANCE genera boletines de CE certificados bajo la Norma ISO 9001, asegurando la entrega de información confiable a la Coordinación Nacional de Protección Civil en casos de eventos de CE que puedan producir efectos significativos en nuestra región.

La implementación efectiva y la operatividad del SAT en el contexto del CE amplifican la capacidad de anticipación y respuesta a la vez que fortalecen los esfuerzos nacionales e internacionales para asegurar la resiliencia frente a estos fenómenos naturales. Por ello, la difusión y comprensión de cómo funciona este sistema entre todos los sectores involucrados son esenciales para la seguridad y protección civil a todos los niveles.

Considerando lo expuesto, se proponen las acciones siguientes:

Acciones Puntuales	Requerimiento	Actores
<p>Informar al Sistema Nacional de Protección Civil la ocurrencia de algún evento que pudiera tener efectos significativos sobre el territorio nacional.</p>	<p>Operar y mantener el monitoreo y alertamiento del Servicio de Clima Espacial México de la UNAM.</p>	<p>UNAM.</p>
<p>Trabajar en la identificación de las necesidades de los sectores que operan sistemas basados en señales de radio que se reflejan en o atraviesan la ionósfera. Proporcionar información a estos sectores sobre los efectos del CE mediante la emisión de boletines de CE.</p>	<p>Compartir información entre los actores sobre los sistemas que actualmente operan y los que se planifiquen poner en funcionamiento en el corto, mediano y largo plazo.</p>	<p>CNPC, CENAPRED, AEM, LANCE-UNAM, IFT, SICT e Instituciones Académicas.</p>
<p>Realizar talleres, ferias y/o conferencias dirigidas a tomadores de decisión de diversos sectores tecnológicos vulnerables a eventos de CE, donde se presenten los productos y servicios orientados a atender los riesgos del CE y temas relacionados.</p>	<p>Gestión de los tres niveles de gobierno para difusión y vinculación con los actores potencialmente interesados.</p>	<p>CNPC, CENAPRED, LANCE-UNAM e instituciones académicas</p>



Título. Imagen artística del Sol.

Créditos. Imagen de Catalina Armendáriz.

OBJETIVO ESTRATÉGICO 3. Fomentar el desarrollo de una cultura de prevención y atención respecto a los riesgos asociados a eventos de Clima Espacial.

La relevancia de este objetivo radica en su potencial para transformar nuestra comprensión y respuesta a fenómenos complejos de CE, en acciones concretas y medidas preventivas eficaces que protejan nuestras sociedades y sistemas críticos de posibles desastres.

El CE, con sus tormentas solares y eventos geomagnéticos, representa un riesgo emergente que, a pesar de su origen extraterrestre, tiene impactos tangibles y potencialmente devastadores en nuestras tecnologías, economías y bienestar general. Frente a esta realidad, es imperativo cultivar una cultura de prevención y atención que empodere a operadores, instituciones y gobiernos con el conocimiento y las herramientas necesarias para mitigar estos riesgos. Tal cultura se construye sobre la base de la educación y la concienciación, promoviendo una comprensión profunda de los fenómenos del CE, sus mecanismos y efectos, así como las estrategias de adaptación y mitigación más efectivas.

Fomentar esta cultura de prevención implica no solo diseminar información sobre los sistemas de alerta temprana y monitoreo existentes sino también sobre cómo los tomadores de decisiones pueden interpretar y actuar ante sus señales. Esto abarca la implementación de protocolos de emergencia en infraestructuras críticas. La participación activa y la colaboración entre diferentes sectores son esenciales para garantizar que las medidas preventivas se integren en la planificación y operación, creando así comunidades más seguras y resilientes.

Cabe destacar que, el **Objetivo Estratégico 3** se alinea con la visión de un desarrollo sostenible que no sólo busca prevenir los efectos adversos de eventos de CE sino también asegurar que nuestras sociedades puedan adaptarse y prosperar frente a estos desafíos. En última instancia, el desarrollo de una cultura de prevención y atención fortalece los cimientos de nuestra resiliencia colectiva, asegurando que estemos mejor preparados para enfrentar y superar los riesgos del CE, protegiendo así el legado y el futuro de nuestras comunidades y naciones.

Durante un evento severo o extremo de CE afectando a México se pueden esperar algunas o todas de las siguientes afectaciones: fallas o degradación en radiocomunicaciones especialmente en HF (3-30 MHz) y/o LF (30-300 kHz); problemas de comunicación con aviones, embarcaciones y vehículos que usen las bandas HF y LF; problemas en satélites artificiales (orientación-navegación y de rastreo-rastreo, carga superficial y/o radiación que afecten los dispositivos de memoria, de cómputo y eficiencia de paneles solares; así como ruido en sistemas de imágenes); errores o fallas en los sistemas de geoposicionamiento y navegación por satélite (GNSS); y perturbaciones en los transformadores de potencia y equipo de regulación de voltaje del sistema eléctrico nacional.

Considerando lo anterior, se plantean las siguientes recomendaciones:

Acciones Puntuales	Requerimiento	Actores
Establecer el Comité Científico Asesor de Clima Espacial en México (CCACEM).	Gestión de los tres niveles de gobierno para difusión y vinculación con los actores potencialmente interesados.	CNPC, CENAPRED, AEM, LANCE y UNAM.
Promover una estrategia de comunicación social ante la ocurrencia eventos de CE que puedan tener efectos significativos que podría incluir medios como: Boletines de prensa, contenidos en redes sociales, entrevistas en medios de comunicación.	Desarrollo de materiales y contenidos que puedan aparecer de manera oportuna en medios de comunicación y eviten la desinformación y miedo en la población.	LANCE, AEM, UNAM, CENAPRED y CNPC.
Promover la creación de guías para la elaboración de programas y de planes que incluyan previsiones ante eventos de CE.	Gestión con los tres niveles de gobierno para la inclusión de protocolos de respuesta que consideren eventos de CE.	CENAPRED, CNPC y LANCE.
Promover la generación de estudios especializados en materia de vulnerabilidad del sistema eléctrico nacional.	Generar un estudio detallado de vulnerabilidad que determine las acciones necesarias para prevenir afectaciones al sistema eléctrico nacional debido a corrientes inducidas geomagnéticamente y así evitar apagones de corto y largo plazo. Este estudio proporcionará información esencial sobre las subestaciones vulnerables y, por ende, cuáles podrían estar en mayor riesgo de sufrir una desconexión total durante una tormenta solar.	CFE, CENACE, CNPC, CENAPRED, AEM, LANCE y UNAM.

Acciones Puntuales	Requerimiento	Actores
Promover la implementación de un programa emergente de medidas preventivas en el Sistema Eléctrico Nacional.	El programa estará orientado a buscar la confiabilidad y continuidad del servicio eléctrico a la población y sectores estratégicos que incluyen acciones en los equipos primarios, generadores, líneas de transmisión y distribución en coordinación con CENACE, CFE, generadores públicos y privados, la central núcleo eléctrica Laguna Verde, así como clientes, para evitar daños a la infraestructura eléctrica y apagones extensos.	CFE, CENACE, CNPC, CENAPRED, AEM, LANCE y UNAM.
Generar un estudio para valorar la instalación de dispositivos de protección en puntos estratégicos de la infraestructura eléctrica.	Estudiar la posibilidad de instalar dispositivos de protección, como limitadores de corriente geomagnéticamente inducidas, en ciertos puntos críticos de la infraestructura eléctrica, así como acciones en la red eléctrica para reducir el efecto de un evento solar extremo.	CFE y CENACE.
En caso de un evento de CE seguir las recomendaciones de OACI para resguardar la seguridad de pasajeros y tripulación de navegación aérea.	Mantener informado al personal técnico / operativo aeronáutico y generar planes para prever contingencias.	SICT, AFAC, SENEAM.
En caso de un evento del CE que afecte a los sistemas de radiocomunicaciones, notificar a usuarios y operadores para que implementen medidas de reacción y mitigación.	Desarrollar un sistema de alertamiento para usuarios y operadores de los sistemas de radiocomunicaciones afectados.	SICT, IFT, AEM, CENAPRED y CNPC.
Apoyar a las instituciones que lo soliciten a elaborar un plan de acción. Se recomienda que cada usuario desarrolle sus propios planes de acción, ya que depende del tipo de sistemas y equipos en uso	Gestión con los tres niveles de gobierno y apoyo de Instituciones Académicas.	AEM, LANCE-UNAM, CNPC, IFT, Instituciones Académicas.

Acciones Puntuales	Requerimiento	Actores
(características técnicas), modo de operación, etc. Por ejemplo, sistemas de comunicación satelital y sistemas HF necesitan diferentes acciones.		
Informar y sensibilizar a la población sobre los riesgos asociados con eventos de CE extremo.	Contar con material para difusión con un enfoque orientado a la población.	AEM, CNPC, CENAPRED, LANCE-UNAM, UNAM, instituciones de protección civil estatales y municipales.
Divulgación de los fenómenos de CE a la sociedad en general para crear conciencia sobre este tipo de fenómenos y las acciones preventivas y de preparación que pueden implementar.	Gestión con los tres niveles de gobierno y apoyo de Instituciones Académicas.	AEM, CNPC, CENAPRED, LANCE-UNAM, UNAM, instituciones de protección civil estatales y municipales.

EPÍLOGO: hacia un futuro resiliente en la gestión integral del riesgo de desastres asociados a eventos de CE.

Como hemos explorado a lo largo de esta guía, la gestión de los riesgos asociados a eventos de CE no es solo una necesidad urgente, sino una oportunidad estratégica para fortalecer nuestra sociedad frente a desafíos tanto conocidos como emergentes. Los eventos de CE, con su potencial para impactar de manera significativa nuestra infraestructura tecnológica y, por extensión, nuestra seguridad nacional, economía y bienestar social, nos exigen adoptar un enfoque proactivo y bien informado. Las entidades que participamos en la elaboración de esta Guía consideramos que es crucial mirar hacia el futuro con un compromiso renovado hacia la Gestión Integral de Riesgos en materia de CE.

El futuro de la gestión del CE, enmarcado por los objetivos estratégicos delineados, requerirá de un esfuerzo colaborativo sin precedentes. La promoción de estudios científicos y el perfeccionamiento de nuestros sistemas de alerta temprana deben continuar siendo prioritarios para ampliar nuestro entendimiento y capacidad de respuesta ante estos fenómenos. Al mismo tiempo, es esencial que todos los sectores de la sociedad, desde el gubernamental hasta el privado, se involucren activamente en estos esfuerzos. La educación y la difusión efectiva de información son fundamentales para cultivar una cultura de prevención y preparación que pueda mitigar los efectos adversos de futuros eventos.

En este sentido, el papel de las políticas públicas es irremplazable. Como funcionarios encargados de la creación y gestión de políticas para la reducción del riesgo de desastres, debemos asegurar que las estrategias implementadas no solo sean efectivas, sino también inclusivas y adaptativas. Esto implica integrar la gestión del CE en los planes nacionales de desarrollo y protección civil, asegurando que las políticas públicas reflejen un compromiso con la seguridad, la educación y la innovación tecnológica.

El compromiso con la resiliencia debe extenderse más allá de las respuestas inmediatas a desastres, mediante un enfoque que promueva la adaptación a largo plazo y la sostenibilidad. Esto requerirá una evaluación continua de nuestros métodos y una disposición para adaptar nuestras prácticas a medida que nuestra comprensión del CE y sus impactos evolucione. Asimismo, la colaboración internacional seguirá siendo crucial, dado que el CE no conoce fronteras y su gestión efectiva es, por naturaleza, una empresa global. Al mismo tiempo, es importante destacar la necesidad de desarrollar los estudios científicos y el monitoreo desde el territorio nacional, ya que los efectos nocivos de CE son distintos en diferentes regiones y países.

Al mirar hacia el futuro, nos enfrentamos a la tarea de no solo anticipar y responder a los desafíos presentados por el CE, sino también de aprovechar estas experiencias para fomentar un desarrollo más resiliente y sostenible. A través de la educación, la cooperación y la innovación, podemos aspirar a un futuro donde la sociedad no solo sobreviva a los desafíos del CE, sino que también prospere, asegurando un legado de seguridad y bienestar para las generaciones venideras. En esta empresa, cada acción que tomamos hoy es un paso hacia la construcción de ese futuro resiliente y sostenible.

REFERENCIAS

- Cannon, P., Angling, M., Barclay, L., Curry, C., Dyer, C., Edwards, R., ... & Underwood, C. (2013). Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure.
- Caraballo, R., González-Esparza, J. A., Sergeeva, M., & Pacheco, C. R. (2020). First GIC estimates for the Mexican power grid. *Space Weather*, 18(2), e2019SW002260.
- Corona-Romero, P., González-Esparza, J. A., Villanueva-Hernandez, P., Andrade-Mascote, E., Castellanos-Velazco, C. I., Espinosa-Jimenez, A. R., & Sergeeva, M. A. (2024). The Geomagnetic Stations Network of Mexico (REGMEX): The initial steps towards a real-time monitoring of geomagnetic activity in Mexico. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 256, 106204.
- De la Luz, V., González-Esparza, J. A., Sergeeva, M. A., Corona-Romero, P., González, L. X., Mejía-Ambriz, J. C., ... & Monstein, C. (2018, October). First joint observations of space weather events over Mexico. In *Annales geophysicae* (Vol. 36, No. 5, pp. 1347-1360). Copernicus GmbH.
- EXECUTIVE OFFICE OF THE PRESIDENT WASHINGTON DC. (2019). National Space Weather Strategy and Action Plan.
- González-Esparza, J. A., (2022), *La tormenta solar perfecta*, Universidad Nacional Autónoma de México, ISBN 978-607-30-6560-3. (<https://librosoa.unam.mx/handle/123456789/3607>).
- González-Esparza, J. A., De la Luz, V., Corona-Romero, P., Mejía-Ambriz, J. C., González, L. X., Sergeeva, M. A., ... & Aguilar-Rodriguez, E. (2017). Mexican space weather service (SCiESMEX). *Space Weather*, 15(1), 3-11.
- González-Esparza, J. A., Sanchez-Garcia, E., Sergeeva, M. A: *et al.* The Mother's Day geomagnetic storm on May 10, 2024: Aurora Observations and Low Latitude Space Weather Effects in Mexico. *ESS Open Archive* . August 19, 2024.
- González-Esparza, J. A., Sergeeva, M. A., Corona-Romero, P., Mejía-Ambriz, J. C., González, L. X., De la Luz, V., ... & Romero-Hernández, E. (2018). Space weather events, hurricanes, and earthquakes in Mexico in September 2017. *Space Weather*, 16(12), 2038-2051.
- Hapgood, M., Angling, M. J., Attrill, G., Bisi, M., Cannon, P. S., Dyer, C., ... & Willis, M. (2021). Development of space weather reasonable worst-case scenarios for the UK national risk assessment.
- ICAO. (2019). ICAO manual on space weather information in support of international air navigation (1st ed.). ICAO Doc 10100. ISBN 978-92-9258-662-1.
- Koskinen, H., Tanskanen, E., Pirjola, R., Pulkkinen, A., Dyer, C., Rodgers, D., ... & Hilgers, A. (2001). Space weather effects catalogue. *ESA Space Weather Study (ESWS)*, 2, 11-21.
- Hazard definition and classification review: Technical report, United Nations Office for Disaster Risk Reduction International Science Council (ISC). (2020). (<https://www.undrr.org/publication/hazard-definition-and-classification-review-technical-report>).

- Hazard Information Profiles (HIPs), United Nations Office for Disaster Risk Reduction International Science Council (ISC) (2021) (<https://www.undrr.org/publication/hazard-information-profiles-hips>)
- Mann, I. R., Di Pippo, S., Opgenoorth, H. J., Kuznetsova, M., & Kendall, D. J. (2018). International collaboration within the United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space: Framework for international space weather services (2018–2030). *Space Weather*, 16(5), 428-433.
- Report ITU-R RS.2456-1 (09/2023) Space weather sensor systems using radio spectrum. (https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-RS.2456-1-2023-PDF-E.pdf).
- Schulte in den Bäumen, H., Moran, D., Lenzen, M., Cairns, I., & Steenge, A. (2014). How severe space weather can disrupt global supply chains. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(10), 2749-2759.
- Sergeeva, M. A. (2022). Space Weather General Concepts. In *Space Weather Impact on GNSS Performance* (pp. 89-150). Cham: Springer International Publishing.
- Sergeeva, M. A., Maltseva, O. A., González-Esparza, J. A., Mejía-Ambriz, J. C., De la Luz, V., Corona-Romero, P., González, L. X., Gatica-Acevedo, V. J., Romero-Hernandez, E., Rodríguez-Martínez, M. and Aguilar-Rodríguez, E. (2018). "TEC behavior over the Mexican region", *Annals of Geophysics*, 61(1), p. GM104. doi: 10.4401/ag-7465.