

Estudio de las llamaradas solares y su influencia en los canales de comunicación electrónica mediante la implementación de un sistema de monitoreo para la banda de frecuencia VLF

Study of solar flares and their influence on electronic communication channels through the implementation of a monitoring system for the VLF frequency band

Angie K. Márquez A.,
Universidad de Panamá, Panamá
angie.marquez01@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0007-4120-7242>,

Axel A. Márquez Z.
Universidad de Panamá, Panamá,
axel.marquez@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0003-7031-0637>

Fermín A. Póvaz J.,
Universidad de Panamá, Panamá,
fermin.povaz@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0001-7657-9408>,

Recibido: 31-1-2024, Aceptado: 8-5-2024

DOI <https://doi.org/10.48204/3072-9696.6360>

RESUMEN

Este trabajo de investigación analiza la no incidencia de las llamaradas solares en los sistemas de comunicación inalámbrica que operan en la banda de frecuencia de microondas, específicamente en la banda S (2.4 GHz), como las redes WiFi. El estudio se centra en la influencia de las llamaradas solares en la propagación de ondas electromagnéticas en la banda de Frecuencias Muy Bajas (Very Low Frequency, VLF). Se implementó un sistema de monitoreo que incluye antenas loop, receptores VLF especializados y microcontroladores para capturar datos en tiempo real. Este sistema permitió investigar la relación entre eventos solares y la variabilidad en la propagación de ondas VLF, con aplicaciones relevantes en comunicaciones submarinas y sistemas de navegación. El análisis abarca los antecedentes del problema, la metodología de investigación y la contribución al conocimiento del clima espacial. Además, se examinan los tipos de filtros, sistemas de recepción y antenas utilizados, destacando su importancia en la captura precisa de datos durante eventos solares. Los resultados de esta investigación avanzan en el entendimiento de los impactos de los fenómenos solares en las comunicaciones electrónicas en la banda VLF, proporcionando información valiosa para mitigar posibles efectos adversos.

PALABRAS CLAVES:

Llamaradas Solares, Banda de Frecuencia VLF, Sistema de Monitoreo, Comunicaciones Electrónicas, Antenas Loop, Propagación de Ondas, Microcontroladores, Clima Espacial, Comunicación Submarina, Navegación Electrónica.

ABSTRACT

This research work analyzes the non-incidence of solar flares on wireless communication systems operating in the microwave frequency band, specifically in the S band (2.4 GHz), such as WiFi networks. The study focuses on the influence of solar flares on the propagation of electromagnetic waves in the Very Low Frequency (VLF) band. A monitoring system was implemented that includes loop antennas, specialized VLF receivers, and microcontrollers to capture real-time data. This system allowed for the investigation of the relationship between solar events and the variability in VLF wave propagation, with relevant applications in submarine communications and navigation systems. The analysis covers the background of the problem, the research methodology, and the contribution to the knowledge of space weather. Additionally, the types of filters, reception systems, and antennas used are examined, highlighting their importance in accurately capturing data during solar events. The results of this research advance the understanding of the impacts of solar phenomena on electronic communications in the VLF band, providing valuable information to mitigate possible adverse effects.

KEYWORDS

Solar Flares, VLF Frequency Band, Monitoring System, Electronic Communications, Loop Antenna, Wave Propagation, Microcontrollers, Space Weather, Submarine Communication, Electronic Navigation.

INTRODUCCIÓN

El Sol, como fuente primaria de radiación electromagnética, desencadena eventos dinámicos, entre ellos, las llamaradas solares. Estas emisiones de energía pueden tener consecuencias significativas en la atmósfera terrestre, especialmente en la ionosfera, y afectar la propagación de ondas de radio en la banda VLF. La banda VLF, abarcando frecuencias entre 3 kHz y 30 kHz, es vital para aplicaciones como comunicaciones submarinas y sistemas de navegación (Isak, 2022).

La investigación sobre el impacto de las llamaradas solares en las comunicaciones electrónicas se remonta a los primeros estudios del siglo XX. A medida que avanzaba la tecnología de las comunicaciones, los científicos comenzaron a observar fenómenos inesperados en la propagación de las ondas

electromagnéticas durante eventos solares. Los primeros estudios buscaron comprender cómo la radiación solar afecta la ionosfera y la propagación de ondas de radio de baja frecuencia (Webb y Howard, 2012).

En la actualidad, la comunicación electrónica es esencial para la vida moderna y abarca desde las telecomunicaciones cotidianas hasta aplicaciones importantes como la navegación y el seguimiento del medio ambiente. La propagación eficiente de ondas electromagnéticas a través de la atmósfera terrestre es fundamental para garantizar la integridad y confiabilidad de estos sistemas (UIT-R, 2016). Sin embargo, los fenómenos naturales siempre obstaculizan esta propagación, y las llamaradas solares son uno de los más fascinantes y potencialmente perjudiciales.

Las llamaradas solares, que son explosiones súbitas de energía en la atmósfera solar, producen radiación electromagnética de una amplia gama de longitudes de onda. Al interactuar con la ionosfera de la Tierra, esta radiación puede tener un impacto significativo en la propagación de ondas electromagnéticas, lo que tiene un impacto directo en los sistemas de comunicación. Debido a su uso en áreas como las comunicaciones submarinas, los sistemas de navegación y el monitoreo ambiental, la banda de frecuencia muy baja (VLF) se ha vuelto cada vez más importante (Du et al., 2023).

La comprensión completa de cómo las llamaradas solares afectan específicamente la propagación de ondas en la banda VLF es esencial para contextualizar el problema. La falta de conocimiento detallado sobre los efectos de las llamaradas solares en la banda VLF presenta un desafío importante para la confiabilidad y la continuidad de estas aplicaciones debido a la creciente dependencia de sistemas tecnológicos en esta frecuencia, desde la comunicación entre submarinos hasta la transmisión de datos para investigaciones científicas.

Para abordar estas incertidumbres en este contexto, la investigación busca comprender mejor la relación entre las llamaradas solares y la propagación de ondas en la banda VLF. Este conocimiento no solo servirá como base teórica para la física solar y de la ionosfera, sino que también tendrá aplicaciones prácticas para el diseño y la operación de sistemas críticos que utilizan la banda VLF. De esta manera, ayudará a garantizar la seguridad y la eficacia de una variedad de aplicaciones de comunicación electrónica (Adlard, Tozer & Burr, 1999).

La confiabilidad y la eficiencia de las comunicaciones electrónicas pueden verse afectadas durante eventos solares por variabilidad en la ionosfera, cambios en la atenuación de señales y otros fenómenos relacionados. La falta de investigación exhaustiva en este campo deja numerosas preguntas importantes sin respuesta: ¿De qué manera se altera la propagación de las ondas VLF durante una llamarada solar? ¿Cómo afecta la comunicación electrónica en esta banda de frecuencia crítica?

Se plantea la siguiente hipótesis debido a la falta de investigación específica sobre la interacción entre llamaradas solares y bandas de frecuencia muy bajas (VLF) en las comunicaciones electrónicas.

La propagación de ondas electromagnéticas en la banda VLF se verá muy alterada durante llamaradas solares. La validación de estas hipótesis ayudará a comprender mejor la compleja interacción entre las llamaradas solares y la propagación de ondas en la banda VLF. Esto permitirá desarrollar medidas prácticas para mejorar la confiabilidad y la eficiencia de los sistemas que utilizan esta frecuencia crucial en las comunicaciones electrónicas.

La estructura metodológica se basa en los objetivos de la tesis y se centra en comprender cómo las llamaradas solares y las bandas de frecuencia muy bajas (VLF) interactúan en las comunicaciones electrónicas.

El enfoque de la investigación es cuantitativo y experimental. Se diseñó y construyó un sistema de monitoreo para capturar datos VLF durante eventos de llamaradas solares, con el objetivo de analizar la variabilidad en la propagación de ondas VLF en respuesta a la actividad solar.

Se seleccionaron eventos solares de diferente intensidad y duración para garantizar una comprensión exhaustiva de la interacción entre llamaradas solares y la banda VLF. El sistema de monitoreo VLF incluye antenas, amplificadores y dispositivos de registro de datos.

Los datos se recopilaban durante eventos solares y las variaciones en la propagación de las ondas VLF se registraron continuamente. Estos datos se correlacionarán con la actividad solar observada para encontrar patrones y tendencias.

Se utilizaron técnicas de procesamiento de señales y análisis estadístico para investigar las correlaciones entre la variabilidad en la propagación de ondas VLF y la intensidad y duración de las llamaradas solares. Además, se examinó cómo los cambios en la ionosfera y la atenuación de señales VLF se relacionan durante eventos solares.

El término "clima espacial" se refiere a las condiciones en la atmósfera solar y el espacio interplanetario que afectan las actividades humanas y los sistemas tecnológicos. La actividad solar, especialmente las llamaradas solares, es clave en el clima espacial, liberando energía en forma de radiación electromagnética. "El clima espacial afecta a las actividades en la Tierra, como las telecomunicaciones (satélites que controlan los teléfonos, el Internet y la televisión), la red eléctrica y las plantas petroquímicas, la navegación aérea y los sistemas de posicionamiento, el clima terrestre, e incluso la salud de los seres vivos" (Ruiz, Cruz y Díaz, 2017).

Las llamaradas solares son fenómenos explosivos en la atmósfera solar que liberan rápidamente grandes cantidades de energía debido a la reconfiguración de los campos magnéticos en la superficie del Sol. Esta energía se manifiesta

en radiación electromagnética y viento solar (Schrijver & Siscoe, 2010). La potencia de la radiación de rayos X determina esta clasificación. Clasificación de llamaradas solares:

Clase X: Más intensa.

Clase M: Menor intensidad.

Clase C: Aún menor.

Las eyecciones de masa coronal (Coronal Mass Ejection) o CME son eventos en los que grandes cantidades de material solar, como plasma y campos magnéticos, se expulsan al espacio interplanetario. A diferencia de las llamaradas solares, las CME tienen un impacto significativo en la magnetosfera terrestre (Kilpua et al., 2017).

Cuando una CME alcanza la magnetosfera, puede provocar auroras y tormentas geomagnéticas que afectan las operaciones de comunicación y navegación.

El concepto de bandas de frecuencia es fundamental para entender cómo las llamaradas solares y eventos solares pueden afectar la propagación de ondas electromagnéticas, especialmente en la banda de frecuencia VLF (Group, 2013). Aquí se explora la relevancia de las bandas de frecuencia en el marco de la investigación.

Las ondas electromagnéticas se clasifican en función de su frecuencia. Esta clasificación es crucial para comprender cómo diferentes fenómenos solares afectan las comunicaciones electrónicas en diversas aplicaciones. Las principales bandas incluyen:

Baja Frecuencia (LF): 30 kHz a 300 kHz.

Very Low Frequency (VLF): 3 kHz a 30 kHz.

Ultra Low Frequency (ULF): 300 Hz a 3 kHz.

Para la investigación sobre cómo las llamaradas solares influyen en la propagación de ondas VLF, la implementación de filtros es crucial para seleccionar y analizar las señales de interés en la banda de baja frecuencia (VLF). Los filtros de banda VLF son esenciales para asegurar que solo las señales relevantes dentro de la gama de frecuencias VLF sean procesadas. La selectividad de frecuencia de un sistema de filtrado se encuentra directamente ligada al orden de dicho sistema. (Jaramillo Alvarado et al., 2017).

En el contexto de una tesis sobre llamaradas solares y su impacto en las ondas VLF, los sistemas de recepción son cruciales. Los receptores VLF especializados son ideales para la banda VLF, con una arquitectura optimizada para capturar señales eficientemente. Los receptores de onda completa permiten analizar múltiples frecuencias, clave para estudiar cambios en la propagación de ondas durante eventos solares. Los receptores de alta sensibilidad son esenciales dada

la baja intensidad de las señales VLF, facilitando la captura de variaciones sutiles durante eventos solares.

Las antenas son fundamentales en la recepción de señales VLF, especialmente al estudiar la influencia de las llamaradas solares (Gu et al., 2023). Las antenas de bucle magnético son efectivas para capturar componentes magnéticas de ondas VLF, siendo ideales en investigaciones solares.

MATERIALES Y MÉTODOS

El enfoque de la investigación se circunscribe al área de estudio que limitará los lugares de implementación del sistema de monitoreo. Aunque la selección de estos sitios será estratégica, no se garantiza una cobertura global. Por lo tanto, los resultados obtenidos pueden no reflejar completamente la variabilidad geográfica en la interacción entre las llamaradas solares y las frecuencias muy bajas (VLF). Es importante mencionar que la ubicación geográfica específica cuenta con las siguientes coordenadas: 8°59'58.0"N 79°29'50.0"W.

Se diseñó e implementó la unidad receptora de VLF, la capturadora de datos y la antena loop correspondiente. La antena VLF, primer componente crucial, se eligió por su capacidad de capturar eficientemente ondas electromagnéticas de baja frecuencia. Estas antenas se ubicaron estratégicamente para maximizar la recepción de señales VLF y minimizar la interferencia externa. La antena se diseñó utilizando un cable AWG 20 con una longitud diagonal de 1 metro en cada lado. Los valores de la antena se obtuvieron mediante las siguientes fórmulas utilizadas en su diseño.

$$w = \frac{\sqrt{2}}{2} L$$

$$p = 4 * w$$

$$A = w^2$$

$$Lc = p * T$$

$$Lh = N^2 \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} \left[-2(w + h) + 2\sqrt{h^2 + w^2} - h \left(L_N \left[\frac{h + \sqrt{h^2 + w^2}}{w} \right] \right) - w \left(L_N \left[\frac{w + \sqrt{h^2 + w^2}}{h} \right] \right) + h \left(L_N \left[\frac{2h}{a} \right] \right) + w \left(L_N \left[\frac{2w}{a} \right] \right) \right]$$

$$C = \frac{1}{L} \left(\frac{1}{2\pi f_o} \right)^2$$

En donde cada parámetro es representado de la siguiente forma:

w = Ancho de la antena.

L = longitud diagonal en metros = 1 m.

p = perímetro de la antena.

A = área de la antena.

L_c = Longitud del cable.

T = número de vueltas del cable = 15.

L_h = Inductancia de la antena.

$N = T$ = Número de vueltas = 15.

$h = w$ = Ancho de la antena.

a = diámetro del cable = 0.008128m.

$\mu_0 = 12.5636 \times 10^{-7}$ Henrios/m permeabilidad magnética del vacío.

μ_r = permeabilidad relativa del aire = 1.

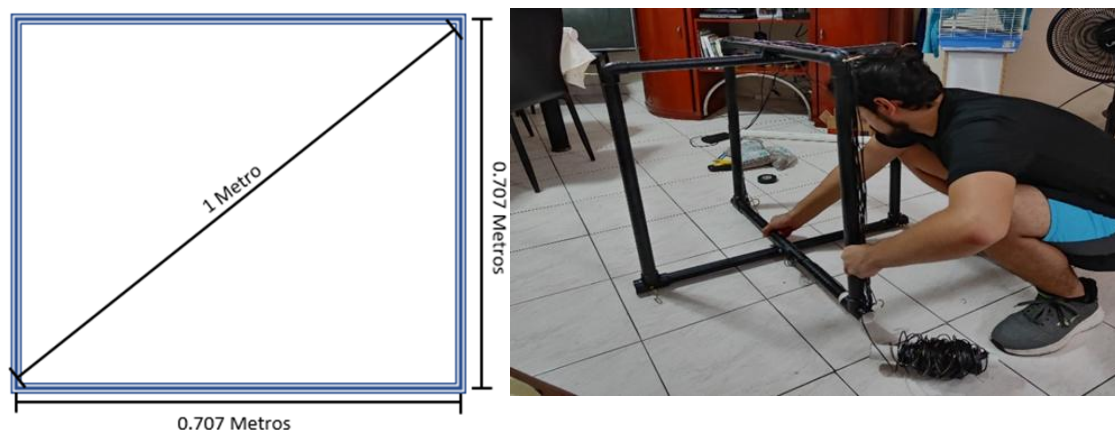
$f_0 = 30$ KHz.

C = capacitor de acoplamiento.

Con base en estos valores, se procedió al diseño de la antena utilizando las fórmulas previamente mencionadas. Cada uno de estos valores debe ajustarse según las necesidades del estudio; por ejemplo, el número de vueltas (15) fue una estimación que dependerá del tipo de cable que se desee utilizar, ya que a menor calibre se recomienda una mayor cantidad de vueltas. Asimismo, la longitud diagonal de la antena fue una estimación, la cual debe adaptarse al estudio. Por esta razón, se optó por utilizar una antena de tamaño mediano para este proyecto. Teniendo en cuenta estos aspectos, se obtuvo una inductancia de 1.22 nH y un capacitor de 23069.48 μ F como resultado final.

Figura 1:

Diseño e implementación de antena de cuadro basados en dos loops.



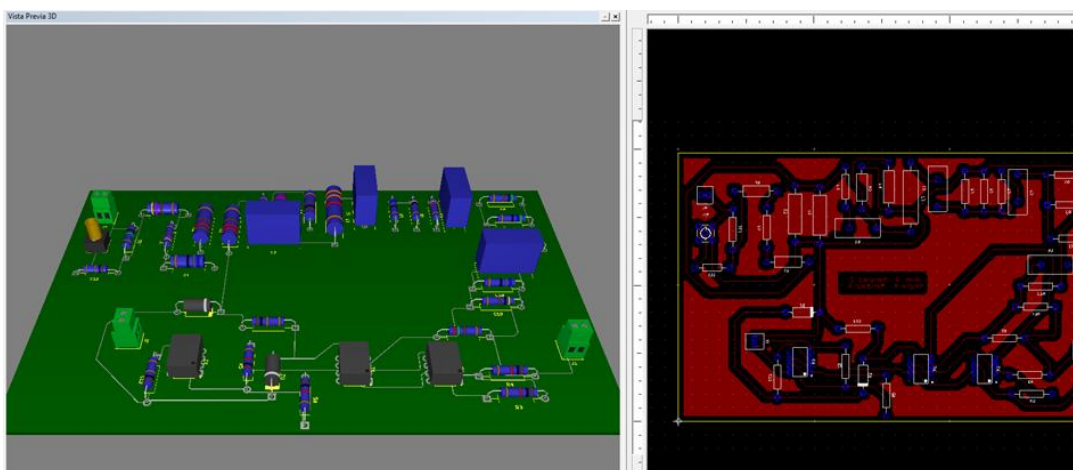
Se implementaron dos antenas colocadas a 90 grados entre sí para captar las señales de llamadas solares provenientes de múltiples direcciones, como se

muestra en la figura 1. Para asegurar la sensibilidad del sistema, se aplicó amplificación a las señales débiles de las antenas VLF. Se optó por amplificadores de bajo ruido (Putera et al., 2014), para minimizar la adición de ruido a las señales, lo cual es crucial para registrar con precisión incluso las señales más débiles, especialmente durante eventos solares. Además, se implementaron filtros de frecuencia para seleccionar específicamente el segmento de la banda de interés, ya que la banda VLF cubre un amplio rango de frecuencias. Estos filtros mejoran la selectividad del sistema y reducen la interferencia de frecuencias no deseadas al procesar únicamente las señales en la banda VLF.

En la figura 2 aparece el diseño de la placa PCB donde se instalarán los diversos componentes del receptor VLF.

Figura 2:

Diseño de la placa PCB del receptor VLF.



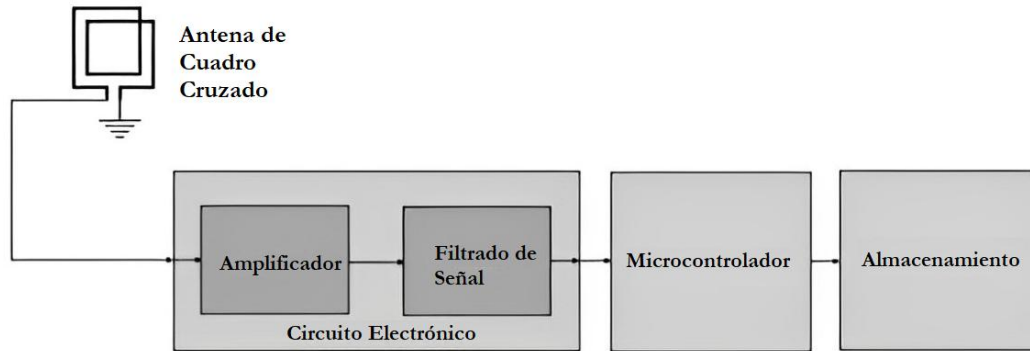
Antes de su implementación en el campo, el sistema de monitoreo se someterá a una exhaustiva verificación y calibración. Se llevarán a cabo pruebas de respuesta en frecuencia, análisis de ruido y calibración de amplificadores para asegurar la precisión y confiabilidad de los datos capturados. Además, se tomarán medidas de seguridad para proteger el sistema de interferencias externas y garantizar la confiabilidad de los datos recopilados. Estas medidas incluirán estrategias para reducir la interferencia electromagnética (Chaluvadi & Thomas, 2018), y humana en el área de despliegue, así como la implementación de sistemas de protección contra sobrecargas eléctricas.

Por otro lado, estos equipos de registro de datos recibirán la información amplificada y filtrada, como se observa en la figura 3. La variabilidad en la propagación de ondas VLF durante eventos solares se capturará utilizando mediante el desarrollo de una unidad capturadora de datos basadas en la utilización de una tarjeta Arduino Mega, el receptor VLF implementado con la antena Loop, y la unidad convertidora analógica-digital integrada en la tarjeta Arduino, el software Arduino IDE, al igual se trabajó con una laptop para la el

análisis de los datos. La correlación temporal necesaria para el análisis se garantizará mediante la sincronización precisa de estos equipos con los eventos solares registrados por observatorios espaciales.

Figura 3:

Diagrama bloque simplificador de la unidad captadora de datos de las llamadas solares.

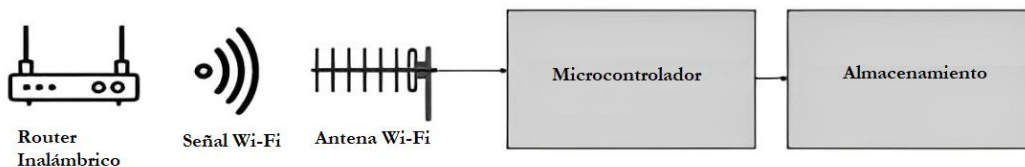


La correlación temporal entre los eventos solares y las variaciones en la propagación de ondas VLF será crucial para la interpretación correcta de los datos. Por lo tanto, se establecerá una conexión sincronizada con observatorios espaciales, como el Observatorio Solar y Heliosférico (SOHO) (NASA Solar and Heliospheric Observatory, 2020), para obtener datos precisos sobre la actividad solar durante el período de estudio.

Por otro lado, se registrarán señales de WiFi 2.4GHz utilizando un microcontrolador y una laptop, utilizando el esquema básico de conexión demostrado en la figura 4. La laptop será el encargado de registrar los datos. La distancia de separación entre la fuente y el receptor fue de aproximadamente de 10 metros.

Figura 4:

Diagrama de bloque simplificado del sistema de recolección de las señales provenientes de un sistema de WiFi.



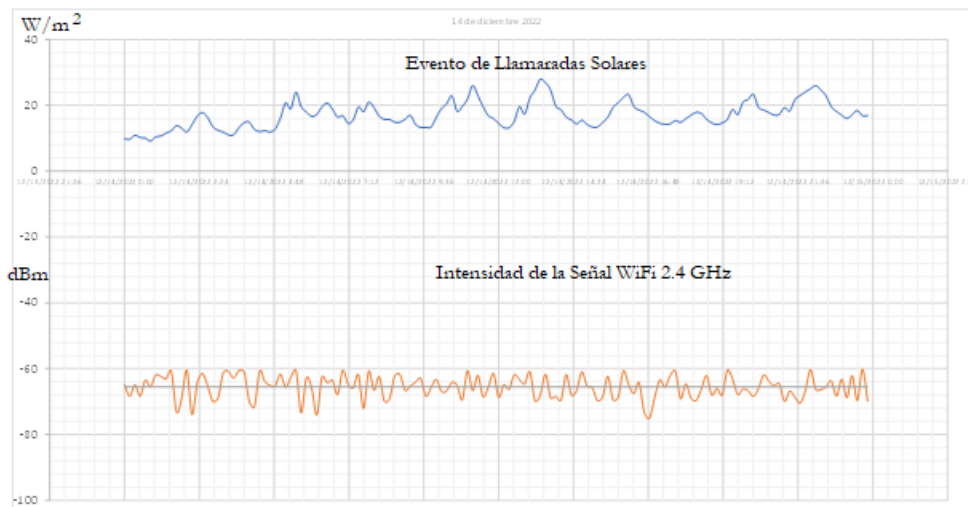
RESULTADOS

Durante el período de estudio que abarcó desde el 12 de diciembre de 2022 hasta el 21 de febrero de 2023, se recolectaron datos con un intervalo de captura de 10 minutos. Estos datos ofrecen una visión detallada del comportamiento de las llamaradas solares y de los niveles de ruido que pueden afectar un canal de comunicaciones de una red WiFi, lo que permite realizar un análisis exhaustivo de los patrones y tendencias observados durante este lapso de tiempo.

En la figura 5 se muestra el comportamiento de las llamaradas solares (línea de color azul), las señales de un enlace de WiFi de 2.4 GHz (línea de color naranja) y la intensidad promedio de la señal de WiFi (línea de color gris). Es importante destacar que, aunque estas líneas están representadas en una misma gráfica, la línea de color azul está expresada en potencia W/m^2 , mientras que las líneas de color naranja y gris están representadas en dBm.

Figura 5:

Gráfica de las señales captadas de las llamaradas solares, enlace de WiFi y señal promedio del enlace de WiFi, del día 14 de diciembre del año 2022.



Para realizar un análisis estadístico de los datos se tomaron en cuenta los 5 días con más actividad solar de cada uno de los meses estudiados (diciembre, enero, febrero). Dando como resultado los siguientes valores obtenidos.

A continuación se presenta en la figura 6, los eventos ocurridos de mayor actividad comparados con los niveles de las llamaradas solares y la información capturada por la unidad de recepción de VLF desarrollada para el estudio, este evento corresponde al de los días 16 de diciembre de 2022, 9 de enero de 2023, 9 de febrero de 2023 y 11 de febrero de 2023.

Figura 6a:

Eventos de Llamadas Solares proporcionado por el sitio SoHo (Izquierda) y los capturados por la unidad de recepción VLF desarrollada (derecha) del 16 de diciembre de 2022 y 9 de enero de 2023.



Figura 6b:

Eventos de Llamadas Solares proporcionado por el sitio SoHo (Izquierda) y los capturados por la unidad de recepción VLF desarrollada (derecha) del 9 y 11 de febrero de 2023 respectivamente.



Tabla 1:

Valores de la intensidad de la señal de WiFi el 14 de diciembre del año 2022.

HORA	VALOR (dBm)	HORA	VALOR (dBm)	HORA	VALOR (dBm)	HORA	VALOR (dBm)	HORA	VALOR (dBm)	HORA	VALOR (dBm)
12/14/2022 0:00	-64.93	12/14/2022 4:00	-69.9	12/14/2022 8:00	-66.61	12/14/2022 12:00	-68.73	12/14/2022 16:00	-60.65	12/14/2022 20:00	-66.68
12/14/2022 0:10	-68.37	12/14/2022 4:10	-71.65	12/14/2022 8:10	-62.4	12/14/2022 12:10	-64.92	12/14/2022 16:10	-64.86	12/14/2022 20:10	-68.41
12/14/2022 0:20	-64.87	12/14/2022 4:20	-60.74	12/14/2022 8:20	-69.88	12/14/2022 12:20	-66.26	12/14/2022 16:20	-67.59	12/14/2022 20:20	-65.95
12/14/2022 0:30	-68.37	12/14/2022 4:30	-63.93	12/14/2022 8:30	-69.17	12/14/2022 12:30	-61.88	12/14/2022 16:30	-64.19	12/14/2022 20:30	-61.88
12/14/2022 0:40	-63.54	12/14/2022 4:40	-65.05	12/14/2022 8:40	-62.21	12/14/2022 12:40	-63.28	12/14/2022 16:40	-73.26	12/14/2022 20:40	-63.86
12/14/2022 0:50	-65.51	12/14/2022 4:50	-65.23	12/14/2022 8:50	-61.78	12/14/2022 12:50	-64.62	12/14/2022 16:50	-75.14	12/14/2022 20:50	-65.21
12/14/2022 1:00	-61.92	12/14/2022 5:00	-61.64	12/14/2022 9:00	-66.63	12/14/2022 13:00	-60.92	12/14/2022 17:00	-68.87	12/14/2022 21:00	-64.57
12/14/2022 1:10	-62.38	12/14/2022 5:10	-65.63	12/14/2022 9:10	-65.23	12/14/2022 13:10	-69.8	12/14/2022 17:10	-63.38	12/14/2022 21:10	-69.95
12/14/2022 1:20	-63.14	12/14/2022 5:20	-62.72	12/14/2022 9:20	-64.13	12/14/2022 13:20	-68.03	12/14/2022 17:20	-65.61	12/14/2022 21:20	-66.8
12/14/2022 1:30	-60.75	12/14/2022 5:30	-60.56	12/14/2022 9:30	-62.95	12/14/2022 13:30	-61.69	12/14/2022 17:30	-62.12	12/14/2022 21:30	-68.66
12/14/2022 1:40	-73.16	12/14/2022 5:40	-73.44	12/14/2022 9:40	-68.36	12/14/2022 13:40	-68.87	12/14/2022 17:40	-60.73	12/14/2022 21:40	-70.48
12/14/2022 1:50	-68.93	12/14/2022 5:50	-62.78	12/14/2022 9:50	-65.75	12/14/2022 13:50	-68.38	12/14/2022 17:50	-69.15	12/14/2022 21:50	-66.79
12/14/2022 2:00	-60.47	12/14/2022 6:00	-65.82	12/14/2022 10:00	-63.26	12/14/2022 14:00	-69.61	12/14/2022 18:00	-64.58	12/14/2022 22:00	-60.27
12/14/2022 2:10	-73.98	12/14/2022 6:10	-74.08	12/14/2022 10:10	-66.89	12/14/2022 14:10	-61.81	12/14/2022 18:10	-68.94	12/14/2022 22:10	-66.34
12/14/2022 2:20	-64.17	12/14/2022 6:20	-62.54	12/14/2022 10:20	-66.72	12/14/2022 14:20	-68.09	12/14/2022 18:20	-69.7	12/14/2022 22:20	-66.39
12/14/2022 2:30	-61.44	12/14/2022 6:30	-64.3	12/14/2022 10:30	-64.21	12/14/2022 14:30	-66.58	12/14/2022 18:30	-66.21	12/14/2022 22:30	-65.55
12/14/2022 2:40	-65.21	12/14/2022 6:40	-63.53	12/14/2022 10:40	-65.06	12/14/2022 14:40	-60.93	12/14/2022 18:40	-62.12	12/14/2022 22:40	-63.68
12/14/2022 2:50	-69.98	12/14/2022 6:50	-67.84	12/14/2022 10:50	-69.5	12/14/2022 14:50	-65.33	12/14/2022 18:50	-68.02	12/14/2022 22:50	-68.39
12/14/2022 3:00	-68.95	12/14/2022 7:00	-60.53	12/14/2022 11:00	-60.56	12/14/2022 15:00	-65.8	12/14/2022 19:00	-65.96	12/14/2022 23:00	-63.18
12/14/2022 3:10	-61.21	12/14/2022 7:10	-64.72	12/14/2022 11:10	-66.72	12/14/2022 15:10	-69.72	12/14/2022 19:10	-68.05	12/14/2022 23:10	-68.85
12/14/2022 3:20	-60.8	12/14/2022 7:20	-65.84	12/14/2022 11:20	-62.01	12/14/2022 15:20	-68.62	12/14/2022 19:20	-60.49	12/14/2022 23:20	-62.11
12/14/2022 3:30	-62.87	12/14/2022 7:30	-61.82	12/14/2022 11:30	-68.52	12/14/2022 15:30	-62.36	12/14/2022 19:30	-63.13	12/14/2022 23:30	-69.65
12/14/2022 3:40	-60.57	12/14/2022 7:40	-72.12	12/14/2022 11:40	-65.7	12/14/2022 15:40	-69.48	12/14/2022 19:40	-67.84	12/14/2022 23:40	-60.19
12/14/2022 3:50	-60.83	12/14/2022 7:50	-60.75	12/14/2022 11:50	-61.44	12/14/2022 15:50	-68.67	12/14/2022 19:50	-66.18	12/14/2022 23:50	-69.92

Para utilizar como referencia el primer análisis se realizó con la información obtenida el día 14 de diciembre del año 2022 (Figura 5). Como primer paso se calculó la intensidad promedio de la señal de Wifi en dicho día con los valores de la tabla 2, obteniendo un valor de -65.584 dBm.

A partir de este punto solo se consideraron los valores que sean menores que la intensidad promedio para obtener un porcentaje promedio de variación, el cual fue de 4.53%, en otras palabras, de los 144 valores, el propósito de esta exclusión de datos es obtener una medición más precisa y representativa de la variabilidad de la señal de WiFi al eliminar valores que podrían ser considerados ruido o atípicos.

Tabla 2:

Valores filtrados menores a el valor promedio -65.584 dBm de la intensidad de la señal de WiFi

HORA	VALOR (dBm)	HORA	VALOR (dBm)	HORA	VALOR (dBm)	HORA	VALOR (dBm)	HORA	VALOR (dBm)	HORA	VALOR (dBm)
12/14/2022 0:10	-68.37	12/14/2022 6:50	-67.84	12/14/2022 11:30	-68.52	12/14/2022 15:20	-68.62	12/14/2022 19:00	-65.96	12/14/2022 22:20	-66.39
12/14/2022 0:30	-68.37	12/14/2022 7:20	-65.84	12/14/2022 11:40	-65.7	12/14/2022 15:40	-69.48	12/14/2022 19:10	-68.05	12/14/2022 22:50	-68.39
12/14/2022 1:40	-73.16	12/14/2022 7:40	-72.12	12/14/2022 12:00	-68.73	12/14/2022 15:50	-68.67	12/14/2022 19:40	-67.84	12/14/2022 23:10	-68.85
12/14/2022 1:50	-68.93	12/14/2022 8:00	-66.61	12/14/2022 12:20	-66.26	12/14/2022 16:20	-67.59	12/14/2022 19:50	-66.18	12/14/2022 23:30	-69.65
12/14/2022 2:10	-73.98	12/14/2022 8:20	-69.88	12/14/2022 13:10	-69.8	12/14/2022 16:40	-73.26	12/14/2022 20:00	-66.68	12/14/2022 23:50	-69.92
12/14/2022 2:50	-69.98	12/14/2022 8:30	-69.17	12/14/2022 13:20	-68.03	12/14/2022 16:50	-75.14	12/14/2022 20:10	-68.41		
12/14/2022 3:00	-68.95	12/14/2022 9:00	-66.63	12/14/2022 13:40	-68.87	12/14/2022 17:00	-68.87	12/14/2022 20:20	-65.95		
12/14/2022 4:00	-69.9	12/14/2022 9:40	-68.36	12/14/2022 13:50	-68.38	12/14/2022 17:20	-65.61	12/14/2022 21:10	-69.95		
12/14/2022 4:10	-71.65	12/14/2022 9:50	-65.75	12/14/2022 14:00	-69.61	12/14/2022 17:50	-69.15	12/14/2022 21:20	-66.8		
12/14/2022 5:10	-65.63	12/14/2022 10:10	-66.89	12/14/2022 14:20	-68.09	12/14/2022 18:10	-68.94	12/14/2022 21:30	-68.66		
12/14/2022 5:40	-73.44	12/14/2022 10:20	-66.72	12/14/2022 14:30	-66.58	12/14/2022 18:20	-69.7	12/14/2022 21:40	-70.48		
12/14/2022 6:00	-65.82	12/14/2022 10:50	-69.5	12/14/2022 15:00	-65.8	12/14/2022 18:30	-66.21	12/14/2022 21:50	-66.79		
12/14/2022 6:10	-74.08	12/14/2022 11:10	-66.72	12/14/2022 15:10	-69.72	12/14/2022 18:50	-68.02	12/14/2022 22:10	-66.34		

No obstante, para poder obtener el valor real de afectación de la señal con referencia a las llamadas solares, solo se tomarán en cuenta aquellos valores ubicados en la clase M o superior, o, en otras palabras, aquellos valores que sean superiores a los $10 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$, ya que a partir de esta intensidad es donde se conoce que se comienzan a afectar las señales de telecomunicación.

Considerando estos filtros, se obtienen nuevos valores que serán comparados con el valor promedio de la señal (observar tabla 3).

Tabla 3:

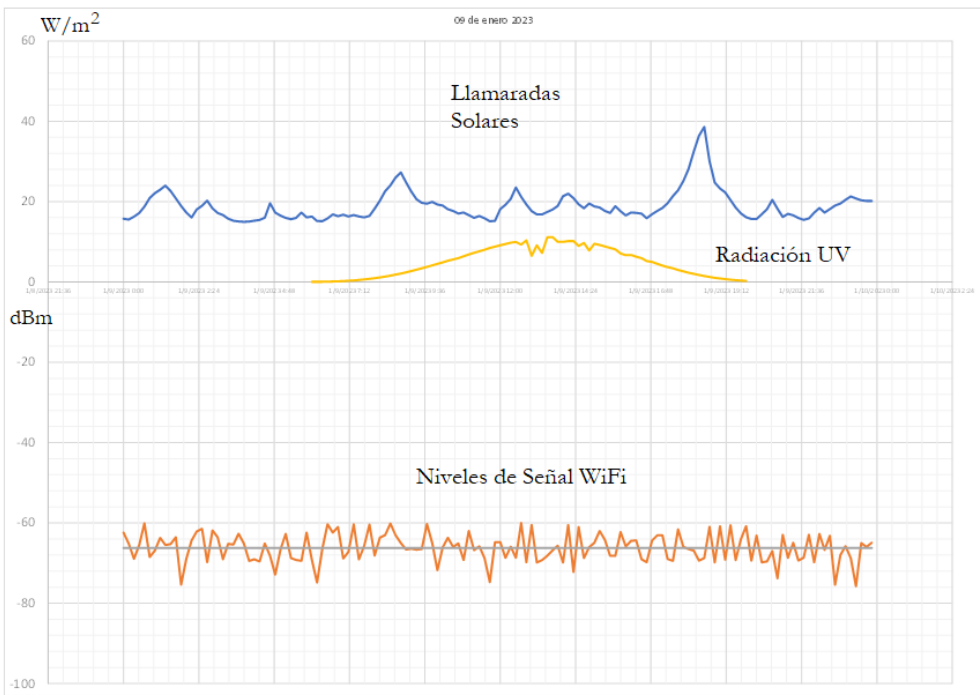
Valores finales representados en base al nivel de ruido y la irradiancia solar del 14 de enero 2022.

HORA	VALOR (dBm)	Llamada Solar (W/m ²)	HORA	VALOR (dBm)	Llamada Solar (W/m ²)	HORA	VALOR (dBm)	Llamada Solar (W/m ²)
12/14/2022 0:30	-68.37	10.22	12/14/2022 11:40	-65.7	16.88	12/14/2022 19:10	-68.05	14.67
12/14/2022 1:40	-73.16	13.83	12/14/2022 12:00	-68.73	14.48	12/14/2022 19:40	-67.84	17.2
12/14/2022 1:50	-68.93	13.04	12/14/2022 12:20	-66.26	13.14	12/14/2022 19:50	-66.18	20.92
12/14/2022 2:10	-73.98	14.15	12/14/2022 13:10	-69.8	24.68	12/14/2022 20:00	-66.68	21.82
12/14/2022 2:50	-69.98	13.52	12/14/2022 13:20	-68.03	27.93	12/14/2022 20:10	-68.41	23.38
12/14/2022 3:00	-68.95	12.42	12/14/2022 13:40	-68.87	24.63	12/14/2022 20:20	-65.95	19.38
12/14/2022 4:00	-69.9	14.89	12/14/2022 13:50	-68.38	19.71	12/14/2022 21:10	-69.95	19.33
12/14/2022 4:10	-71.65	12.71	12/14/2022 14:00	-69.61	18.65	12/14/2022 21:20	-66.8	18.25
12/14/2022 5:10	-65.63	20.74	12/14/2022 14:20	-68.09	15.56	12/14/2022 21:30	-68.66	21.71
12/14/2022 5:40	-73.44	19.6	12/14/2022 14:30	-66.58	14.38	12/14/2022 21:40	-70.48	22.96
12/14/2022 6:00	-65.82	16.66	12/14/2022 15:00	-65.8	13.42	12/14/2022 21:50	-66.79	24.09
12/14/2022 6:10	-74.08	17.27	12/14/2022 15:10	-69.72	13.4	12/14/2022 22:10	-66.34	25.95
12/14/2022 6:50	-67.84	16.38	12/14/2022 15:20	-68.62	14.81	12/14/2022 22:20	-66.39	24.64
12/14/2022 7:20	-65.84	15.55	12/14/2022 15:40	-69.48	19.39	12/14/2022 22:50	-68.39	18.14
12/14/2022 7:40	-72.12	18.06	12/14/2022 15:50	-68.67	20.8	12/14/2022 23:10	-68.85	16.02
12/14/2022 8:00	-66.61	19.3	12/14/2022 16:20	-67.59	19.65	12/14/2022 23:30	-69.65	18.42
12/14/2022 8:20	-69.88	15.75	12/14/2022 16:40	-73.26	17.89	12/14/2022 23:50	-69.92	16.92
12/14/2022 8:30	-69.17	15.74	12/14/2022 16:50	-75.14	16.6			
12/14/2022 9:00	-66.63	15.77	12/14/2022 17:00	-68.87	15.34			
12/14/2022 9:40	-68.36	13.3	12/14/2022 17:20	-65.61	14.28			
12/14/2022 9:50	-65.75	13.4	12/14/2022 17:50	-69.15	14.82			
12/14/2022 10:10	-66.89	19	12/14/2022 18:10	-68.94	17.03			
12/14/2022 10:20	-66.72	20.5	12/14/2022 18:20	-69.7	17.87			
12/14/2022 10:50	-69.5	19.72	12/14/2022 18:30	-66.21	17.53			
12/14/2022 11:10	-66.72	25.99	12/14/2022 18:50	-68.02	14.67			
12/14/2022 11:30	-68.52	19.59	12/14/2022 19:00	-65.96	14.17			

Para el mes de enero del 2023 se realiza otra captura de datos de las llamadas solares, el comportamiento del ruido dentro de un canal de comunicaciones WiFi y adicionalmente los niveles de radiación ultravioleta (UV), el resultado se observa en la figura 7.

Figura 7:

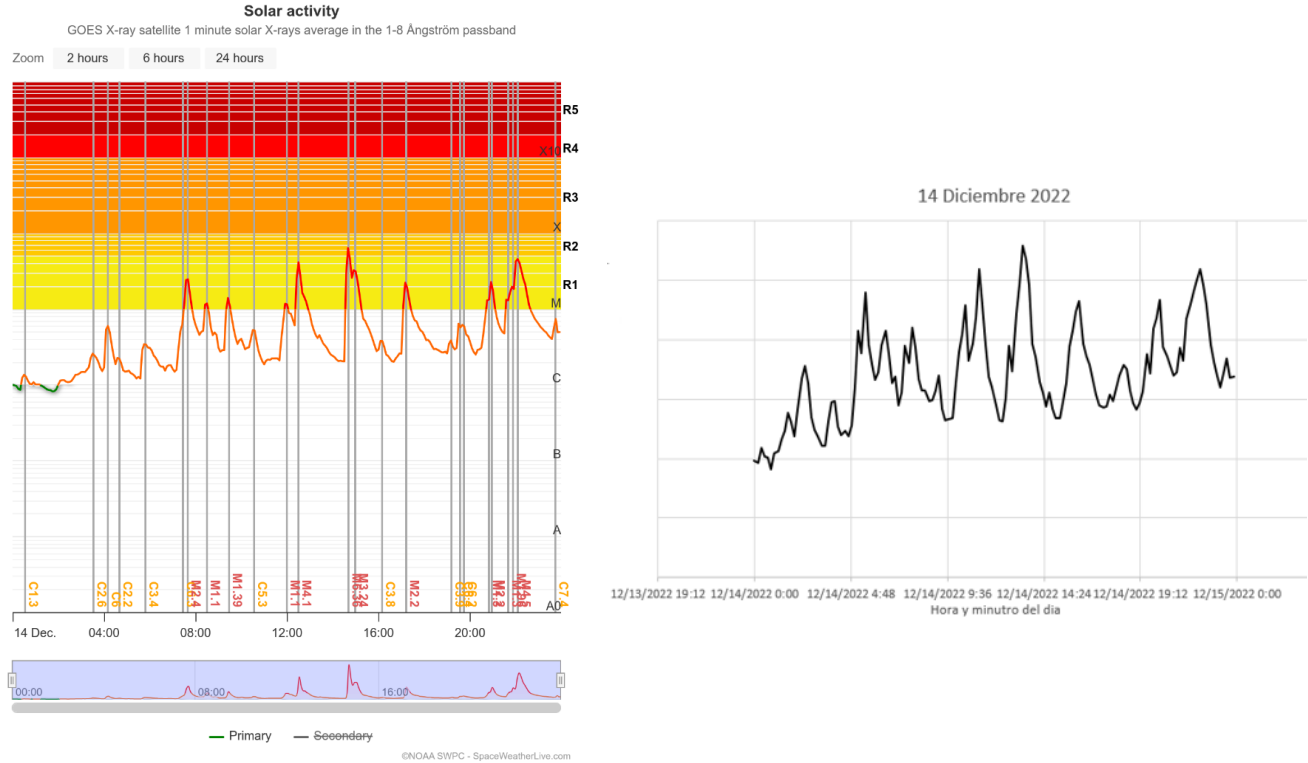
Gráfica de las señales captadas de las llamaradas solares, enlace de WiFi y señal promedio del enlace de WiFi, del día 09 de enero del año 2023. La línea de color amarillo representa los rayos UV captados por Arpansa



Se efectúa una comparación de la efectividad del sistema de medición implementado en donde se compara la señal de los días con mayor porcentaje de variación, ya que serían los días en los que hubo una actividad solar más alta del Observatorio Solar y Heliosférico, SOHO para los siguientes días: 14 de diciembre del 2022 (Figura 8, 16 de diciembre del 2022, 09 de enero del 2023, 09 de febrero del 2023 y 11 de febrero del 2023.

Figura 8:

Comparativa entre la gráfica captada por SOHO (Gráfica ubicada en la zona izquierda) y el sistema construido (Gráfica ubicada en la zona derecha).



CONCLUSIÓN

La investigación sobre la influencia de las llamaradas solares en la propagación de ondas electromagnéticas en la banda de Frecuencias Muy Bajas (VLF) ha proporcionado información crucial para comprender mejor los efectos del clima espacial en las comunicaciones electrónicas. A través de la implementación de un sistema de monitoreo especializado, que incluye antenas loop y receptores VLF, se capturaron datos en tiempo real que permitieron analizar la relación entre los eventos solares y la variabilidad en la propagación de ondas VLF.

Los resultados obtenidos demuestran que las llamaradas solares tienen un impacto significativo en la propagación de ondas VLF. Este impacto se manifiesta a través de variaciones en la intensidad y estabilidad de las señales capturadas, especialmente durante eventos solares de alta intensidad. La comprensión de estos efectos es vital para aplicaciones críticas como las comunicaciones submarinas y los sistemas de navegación, que dependen en gran medida de la

integridad y confiabilidad de las señales VLF. Además, el estudio destaca la importancia de utilizar sistemas de recepción y filtros adecuados para capturar con precisión las señales de interés durante eventos solares. La implementación de antenas de bucle magnético y amplificadores de bajo ruido se mostró efectiva para minimizar las interferencias y garantizar la calidad de los datos recolectados.

En conclusión, esta investigación avanza el conocimiento sobre los impactos de los fenómenos solares en las comunicaciones electrónicas en la banda VLF, proporcionando una base teórica y práctica para mitigar los posibles efectos adversos. Los hallazgos obtenidos no solo enriquecen la física solar y de la ionosfera, sino que también tienen aplicaciones directas en el diseño y operación de sistemas de comunicación crítica. Este trabajo subraya la necesidad continua de monitoreo y análisis del clima espacial para garantizar la seguridad y eficacia de las comunicaciones electrónicas en un entorno cada vez más dependiente de la tecnología.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adlard, J. E., Tozer, T. C., & Burr, A. G. (1999). Interference rejection in impulsive noise for VLF communications. En MILCOM 1999. IEEE Military Communications. Conference Proceedings (pp. 296-300, vol. 1). Atlantic City, NJ, USA. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.1999.822691>

Beneitez, B. (3 de febrero de 2022). ¿Sabes qué efectos producen sobre la Tierra las llamaradas solares como la del 20 de enero? Obtenido de La Vanguardia: <https://www.lavanguardia.com/natural/20220203/8020643/espacio-llamaradas-solares-nasa-nbs.html>

Carracedo, G., & Montes, D. (20 de julio de 2022). Llamadas solares: ¿qué impacto tienen estos fenómenos en nuestro planeta? Obtenido de BBC: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-62245749>

Chaluvadi, M., & Thomas, K. G. (2018). An Equivalent Transmission Line Model for Predicting the Electromagnetic Interference Suppression Characteristics of Ferrite cores. En 2018 15th International Conference on ElectroMagnetic Interference & Compatibility (INCEMIC) (pp. 1-4). Bengaluru, India. <https://doi.org/10.1109/INCEMIC.2018.8704609>

Comunicaciones DFI - U. de Chile. (13 de enero de 2022). Académico del DFI lidera investigación que descubrió pistas claves sobre llamaradas

solares. Obtenido de Diario U Chile:

<https://radio.uchile.cl/2022/01/13/academico-del-dfi-lidera-investigacion-que-descubrio-pistas-claves-sobre-llamaradas-solares/>

Du, Y., et al. (2023). Very-Low-Frequency Magnetolectric Antennas for Portable Underwater Communication: Theory and Experiment. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(3), 2167-2181.

<https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3233665>

Group, S. V. (2013). Stanford VLF Group. Obtenido de Stanford VLF Group:

https://vlfstanford.ku.edu.tr/research_topic_inlin/introduction-vlf/

Gu, X., Yi, J., Wang, S., Hu, Z., Xu, W., Ni, B., Li, B., & He, F. (2023). Comparison of VLF Signal Responses to Solar Flares along Daytime and Nighttime Propagation Paths. *Remote Sensing*, 15(4), 1018. Publicado 12 de febrero de 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15041018>

Guevara, D., & Sanchez, D. (2017). Implementación de un sistema de monitoreo y protección de datos en la red de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial. Ambato.

Isak, C. (2022, January 24). ¿Qué es una llamarada solar y cómo podría afectarnos en la Tierra? *TechAcute*. https://techacute.com/what-is-a-solar-flare/#google_vignette.

Jaramillo Alvarado, A. F., Galvis Rodríguez, H. D., & Quintero, E. A. (2017). Monitoreo del Clima Espacial desde Colombia Mediante Radio Receptores Butterworth de Orden Superior. *Ingeniería*, 22(1). <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2017.1.a08>.

Journal of Geophysical research: Space Physics. (2004). Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields. *Journal of Geophysical research: Space Physics*.

Kilpua, E. K. J., Koskinen, H. E. J., & Pulkkinen, T. I. (2017). Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space. *Living Reviews in Solar Physics*, 14(1), 5.

NASA Solar and Heliospheric Observatory. (2020). SOHO: NASA Solar and Heliospheric Observatory. Recuperado de <https://soho.nascom.nasa.gov/>

National Geographic. (22 de noviembre de 2022). Llamadas solares, el peligro que podría golpear la Tierra. Obtenido de National Geographic: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/que-son-llamadas-o-fulguraciones-solares_19110

Oldrich Burger, M. D. (2015). Magnetic Loop Antenna Slightly Different Each Time. Ostrava: EDUCA TV o.p.s.

Putera, R., Kusnandar, Najmurokhman, A., Sunubroto, Chairunnisa, & Munir, A. (2014). High gain RF amplifier for very low frequency receiver application. En *2014 6th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)* (pp. 1-4). Yogyakarta, Indonesia. <https://doi.org/10.1109/ICITEED.2014.7007925>

Ruiz Vanoye, J. A., Ambrocio Cruz, P., & Díaz Parra, O. (2017). ¿Cómo nos afecta el clima solar?

Revista Ciencia, 68(4), Recuperado de

https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/68_4/PDF/68_4_como_afecta_climasolar.pdf

Schrijver, C. J., & Siscoe, G. L. (2010). Helyospheric Physics. Cambridge University Press.

Tandberg-Hanssen, E. (2009). The Physics of Solar Flares (1st ed.). Cambridge Astrophysics, Series Number 14.

UIT-R. (2016). Recomendación UIT-R P. 684-7: Predicción de la Intensidad de Campo por Debajo de los 150 kHz. Serie P Propagación de las Ondas Radioeléctricas. Geneva, Switzerland: UIT-R.

Webb, D., & Howard, T. (2012). Living Reviews in Solar Physics.