

Volumen 25

COMPENDIO DE INVESTIGACIONES EN GEOFÍSICA

Investigaciones realizadas por
estudiantes y pasantes internacionales
durante el año 2025



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú



CRÉDITOS

Miguel Ángel Espichán Mariñas
Ministro del Ambiente

Hernando Tavera
Jefe institucional del IGP

Danny Scipión
Director del Radio Observatorio de Jicamarca

Compendio de investigaciones en geofísica: investigaciones realizadas por estudiantes y pasantes internacionales durante el año 2025 | Volumen 25
Título de documento

Hernando Tavera
Jorge Concha
Edición de contenido

Jorge Concha
Diseño y diagramación

Este informe ha sido elaborado por el Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169, Mayorazgo, Ate, Lima
Teléfono: +5113172300

Accede libremente al Repositorio Geofísico Nacional (REGEN) para descargar este producto:
<https://repositorio.igp.gob.pe/>



REGEN

Lima, diciembre de 2025

ÍNDICE

PRÓLOGO	4
PRÁCTICAS PREPROFESIONALES	5
Desarrollo de sistema IOT para el monitoreo y visualización de temperatura de los módulos de radiofrecuencia del sistema ABS Jeremy Hanks Reyes Huamán	6
Optimización del patrón de radiación de la antena principal haciendo uso del sistema de apunte automático Gerardo Ernesto Anguis Chachayma	12
Optimización de la aplicación web ATRAD para el monitoreo de los transmisores de media potencia Nehemías Guillermo Montes Trujillo	17
Implementación de módulos de simulación de variables ionosféricas para la base de datos MADRIGAL Luis Angel Rosales Casas	22
Identificación de posibles rayos cósmicos con el radar de Jicamarca Carlos Francisco García Hipólito	27
Automatización del programa de corrección predictiva de datos de magnetómetros usando RNNS Andres Yasuhiro Requejo Paredes	33
Cálculo de parámetros ionosféricos a partir de datos de receptores GPS/GNSS Jose Gabriel Huacachi Bazan	38
Diseño, implementación y pruebas de antenas cuadrifilares para la banda de UHF Johan Emilio Gonzales Paucar	44
Implementación del cálculo de variables polarimétricas en el dominio de la frecuencia para el radar SOPHy Mauricio Alonzo Rojas Morales	49
PROGRAMA INTERNACIONAL DE EXPERIENCIA EN INVESTIGACIÓN	54
<i>Algorithm for detecting plasma depletions in total electron content</i> Adeniran Gbadebo Seun	55
<i>Reconstruction of vertical electron density profiles and extraction of realistic topside parameters over the magnetic equator: insights from Jicamarca isr observations</i> Siba Kiran Guru Kotakota	59
<i>Analysis of spread F events over Jicamarca and Tucuman using ground-based measurements</i> Ana Paulina Aragón Rodríguez	70
<i>VTEC variations during cosmic rays events studied at magnetic equator using GNSS</i> Olaf Enríquez Lizama	78
<i>Estimating relation between $E \times B$ drifts and equatorial electrojet current (EEJ) over Jicamarca and Piura using ISR and magnetometer</i> Esteban Cortés Rojas	82

PRÓLOGO



Por Hernando Tavera

Jefe institucional
Instituto Geofísico del Perú

El Instituto Geofísico del Perú (IGP), como institución geocientífica, tiene como función principal realizar investigación en el campo de la geofísica, buscando generar valor público a través de los aportes que brinda a la sociedad. La información que resulta de estas investigaciones se plasma en informes y reportes técnicos, así como en publicaciones en revistas científicas indexadas. Es fundamental que este conocimiento llegue a los usuarios primarios, para completar la cadena de generación y transferencia del conocimiento.

Con el fin de cumplir su misión y visión, el IGP cuenta con un grupo de investigadores especializados en diferentes ramas de la geofísica. Cada año, además, asumen la responsabilidad de formar y guiar a jóvenes profesionales en el fascinante mundo de la investigación. Estos proyectos son de corta duración y sus resultados requieren ser publicados.

En este marco, el IGP publica el “Compendio de Investigaciones en Geofísica”, que desde su primera edición se ha consolidado como el principal instrumento institucional para difundir los aportes logrados por jóvenes profesionales, nacionales e internacionales, durante la realización de sus prácticas, la elaboración de tesis y pasantías desarrolladas en los diversos programas de investigación de la institución.

La última edición correspondió al Volumen 19, publicado en el año 2020, que reunió trabajos de investigación realizados entre los años 2018 y 2019. Tras un periodo de cinco años, en 2025 se retoma la edición y publicación del compendio con el Volumen 25, con el firme propósito de publicar los volúmenes anteriores durante el año 2026. Finalmente, cabe destacar que, más allá de la generación de conocimiento científico, la formación de nuevas generaciones de científicos constituye una función esencial de la institución.

Gracias a la asesoría de nuestros investigadores, estos profesionales logran obtener sus títulos o culminar sus informes de prácticas o pasantías. Tales logros constituyen una base sólida para el desarrollo científico en el país. En este compendio, usted encontrará investigaciones y desarrollos tecnológicos en el campo del geoespacio y los radares, elaborados por estudiantes (alumnos de los últimos años de universidades peruanas) y profesionales internacionales que realizan pasantías en nuestra institución.

Esperamos que los aportes de estos nuevos profesionales despierten su interés, pues representan claras evidencias del surgimiento de futuros investigadores científicos. Nosotros seguimos cumpliendo nuestro compromiso: **“ciencia para protegernos, ciencia para avanzar”**.



PRÁCTICAS PREPROFESIONALES

DESARROLLO DE SISTEMA IOT PARA EL MONITOREO Y VISUALIZACIÓN DE TEMPERATURA DE LOS MÓDULOS DE RADIOFRECUENCIA DEL SISTEMA ABS

**Development of an IoT system for monitoring and visualizing the temperature of the radio frequency modules in the ABS system*

Jeremy Hanks Reyes Huamán

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Facultad Ingeniería Electrónica y Eléctrica
jeremyhanksr@gmail.com

Asesor:

Williams Limonchi Sandoval
Dirección en Ciencias del Geoespacio

RESUMEN

El sistema ABS (Antenna Beam Switching) optimiza la configuración automática de la orientación del haz de la antena principal, reduciendo significativamente el tiempo necesario para su ajuste. Este proceso utiliza relés RF y opera con una potencia de hasta 20 kW, lo que permite conmutar entre diferentes longitudes de cables que definen la orientación precisa del haz. Sin embargo, debido a la alta potencia y temperatura generada por los cables, pueden surgir problemas que afecten el rendimiento y la durabilidad del equipo. Las altas temperaturas pueden causar sobrecalentamiento, degradación de componentes y fallos. Para abordar esta problemática, se desarrolló un sistema de monitoreo de temperatura basado en IoT para los módulos de radiofrecuencia. En este sistema, se programó un microcontrolador TM4C1294 junto con un sensor de temperatura SB70, que permitió la captura de datos en tiempo real. Para modelar el comportamiento del sensor, se utilizaron las ecuaciones de Steinhart-Hart en un entorno de programación. La transmisión de información se gestionó mediante un protocolo de mensajería. Finalmente, se implementaron herramientas para visualizar las variaciones de temperatura en tiempo real y actualizar los datos automáticamente a través de una página web, como parte del Sistema Integrado de Radar, utilizando Python.

Palabras clave: SIR, MQTT, Django, Ajax, Tiva TM4C, SB70

ABSTRACT

The ABS (Antenna Beam Switching) system optimizes the automatic configuration of the main antenna beam orientation, significantly reducing the time required for its adjustment. This process uses RF relays, operating with a power of up to 20 kW, allowing switching between different cable lengths that define the precise beam orientation. However, due to the high power and temperature generated by the cables, issues may arise that affect the performance and durability of the equipment. High temperatures can cause overheating, component degradation, and failures. To address this issue, an IoT-based temperature monitoring system was developed for the radiofrequency modules. In this system, a TM4C1294 microcontroller was programmed along with an SB70 temperature sensor, enabling real-time data capture. To model the sensor's behavior, Steinhart-Hart equations were used in a programming environment. Information transmission was managed through a messaging protocol. Finally, tools were implemented to visualize temperature variations in real-time and automatically update data via a web page, as part of the Integrated Radar System, using Python.

Keywords: SIR, MQTT, Django, Ajax, Tiva TM4C, SB70

1. INTRODUCCIÓN

El radar principal del Radio Observatorio de Jicamarca (IGP-ROJ), que opera a una frecuencia de 50 MHz, desempeña un papel fundamental en la investigación de la ionósfera. Su antena está conformada por dos arreglos de dipolos que permanecen mecánicamente estáticos. En numerosos experimentos realizados en el observatorio, se requiere ajustar la dirección del radar, un proceso que tradicionalmente se ha llevado a cabo de manera manual. Para optimizar esta tarea, se ha implementado el sistema ABS (Automatic Beam Switching), el cual permite modificar la orientación del radar de forma remota y automática, facilitando así la observación de fenómenos atmosféricos desde múltiples ángulos.

No obstante, debido a la velocidad con la que se realizan los ajustes y la alta potencia de los relés involucrados (20 kW), pueden presentarse errores durante el proceso de cambio de ángulo de observación. Para minimizar estos inconvenientes, se propone la integración de un sistema IoT (Internet de las Cosas) que permita supervisar en tiempo real los módulos RF del sistema ABS a través del Sistema Integrado de Radar (SIR). Esto facilitará la toma de decisiones rápidas ante posibles excesos de temperatura. Para llevar a cabo este monitoreo, se sugiere el uso del protocolo de comunicación MQTT, cuya arquitectura bidireccional permite un control más preciso y eficiente del sistema. Además, se empleará Mosquitto como *broker* MQTT, optimizando la comunicación entre los microcontroladores y el SIR.

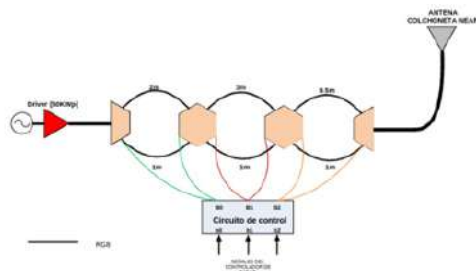


Figura 1. Configuración del apunte del radar en el sistema ABS.

2. DESARROLLO

2.1 Adquisición y procesamiento de datos

Para el proceso de adquisición de datos de temperatura utilizamos un sensor NTC SB70 en

virtud de su estabilidad y precisión en un rango de operación de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$.

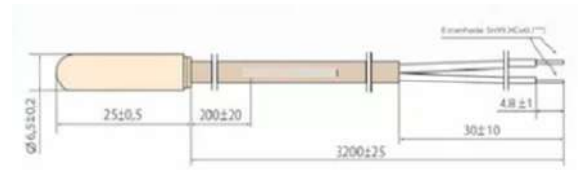


Figura 2. Sensor de temperatura SB70.

Los datos recopilados por el sensor fueron procesados en un microcontrolador Tiva TM4C, lo que garantizó un análisis eficiente y en tiempo real. Para la adquisición de señales se empleó un conversor A/D de 12 bits, logrando así una mayor precisión.

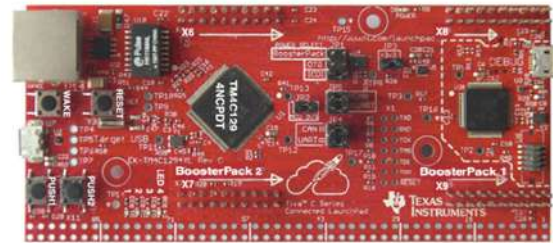


Figura 3. Microcontrolador Tiva TM4C.

2.1.1 Modelamiento del sensor de temperatura

Se propuso el algoritmo de Steinhart-Hart para modelar el sensor NTC SB70, ya que su principal ventaja es proporcionar un menor margen de error en la estimación de la temperatura. Esto se debe a la capacidad del algoritmo para adaptarse a las propiedades específicas de cada sensor de forma independiente, mejorando así la precisión en la medición.

- Ecuaciones Steinhart-Hart:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C (\ln R)^3$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \ln R_1 & \ln^3 R_1 \\ 1 & \ln R_2 & \ln^3 R_2 \\ 1 & \ln R_3 & \ln^3 R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} \\ \frac{1}{T_2} \\ \frac{1}{T_3} \end{bmatrix}$$

Donde A, B y C son los coeficientes que dependen de las características específicas del material semiconductor.

Desarrollo del algoritmo

Para el desarrollo del algoritmo de Steinhart-Hart se utilizó el *software* Matlab que nos permitió modelar el comportamiento del sensor.

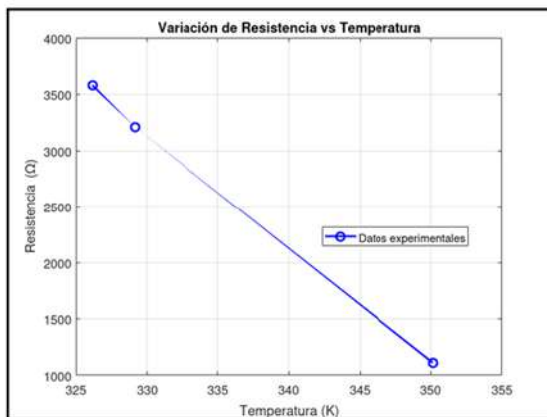


Figura 4. Gráfica de comportamiento: resistencia vs. temperatura.

Calibración del sensor SB70

Para calibrar el sensor se utilizó una cámara térmica junto con una pistola de calor que nos permitió hallar valores de temperatura y sus valores de resistencia respectivos para determinar los coeficientes de Steinhart-Hart.

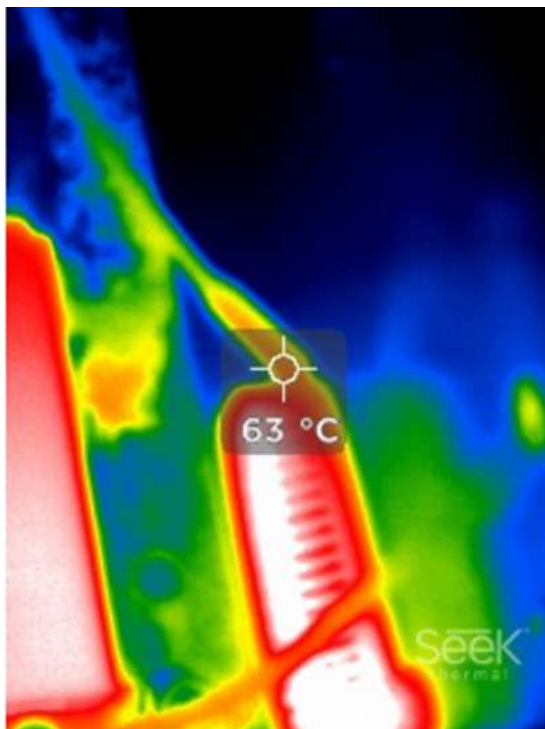


Figura 5. Cámara térmica captando la variación de temperatura en el sensor SB70.

2.1.2 Algoritmo del microcontrolador

Para el desarrollo del código interno en el microcontrolador Tiva TM4C se usaron las librerías vinculadas al protocolo MQTT mediante el *broker* Mosquitto. Este sistema de seguridad tiene dos formas de activarse: una actualización cada 60 segundos o una actualización cuando llega un cambio de apunte del radar. Una vez activado el código, el sistema procede a monitorear el estado del módulo y publicar uno de los siguientes mensajes:

- Exceso de temperatura.
- Cambio de apunte aplicado correctamente.
- Cambio de apunte aplicado incorrectamente.

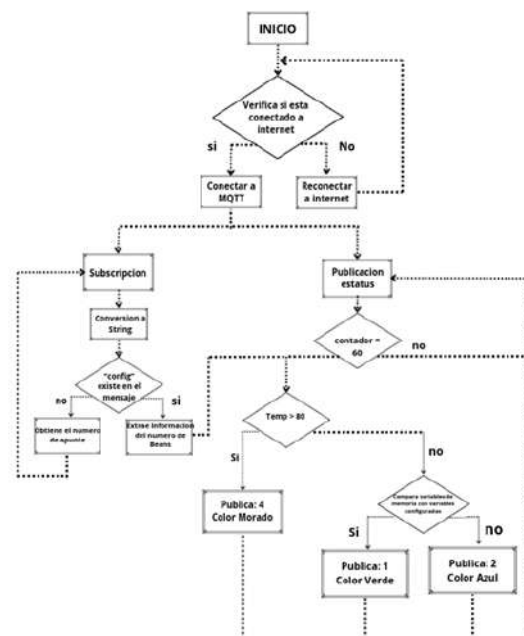


Figura 6. Diagrama de flujo del funcionamiento del microcontrolador Tiva TM4C.

2.2 Sistema IoT mediante el protocolo MQTT

El sistema IoT implementado consiste en una red de dispositivos conectados a la red que recopilan, procesan y transmiten datos para optimizar la automatización y el monitoreo en el sistema ABS. La comunicación entre los sensores y el SIR se establece mediante microcontroladores conectados a un módem a través de Ethernet, el cual interactúa con el *broker* MQTT. Se emplea el protocolo MQTT, basado en el modelo publicador-suscriptor, que resulta altamente eficiente en redes de bajo ancho de banda, ya que minimiza el consumo de datos y ofrece baja latencia.

En este sistema, el *broker* MQTT con Mosquitto ha sido implementado en un entorno Linux, lo cual garantiza una comunicación confiable y eficiente entre los dispositivos.

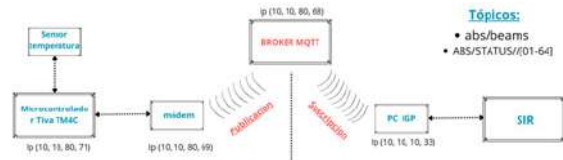


Figura 7. Diagrama de bloques del sistema IoT.

Dentro del *broker* MQTT, se emplearon dos tópicos especializados para la comunicación eficiente del sistema:

- Tópico *abs/beams*: Este tópico permitió la suscripción y recepción de la nueva configuración enviada por el SIR para cada uno de los 64 módulos de radiofrecuencia, asegurando una actualización eficiente.
- Tópico *ABS/STATUS/[01-64]*: A través de este tópico, se realizó la publicación del estado operativo de cada uno de los 64 módulos de control. Se verificó que la temperatura del módulo no excediera los 80 °C y que la nueva configuración se aplicará correctamente.

2.3 SIR (Sistema Integrado de Radar)

Entre las diversas funciones que ofrece el SIR, la más importante es su capacidad para publicar nuevas configuraciones del apunte del radar. Para ello, el SIR publica el *topic* *abs/beams*, al cual el microcontrolador se suscribe con el propósito de ajustar el ángulo de observación según lo establecido. Para gestionar esta comunicación, se desarrollaron *scripts* en Python y HTML, permitiendo la suscripción y procesamiento de la información proveniente del *broker* MQTT hacia la interfaz web del SIR del Radio Observatorio de Jicamarca. Dicha interfaz ha sido diseñada utilizando el *framework* Django en Python, lo que posibilita el monitoreo de temperatura en tiempo real de los 64 módulos de radiofrecuencia. Además, para garantizar la actualización automática de los datos y mejorar la interacción con el usuario, se implementó la tecnología Ajax. La estructura general del SIR es la siguiente:

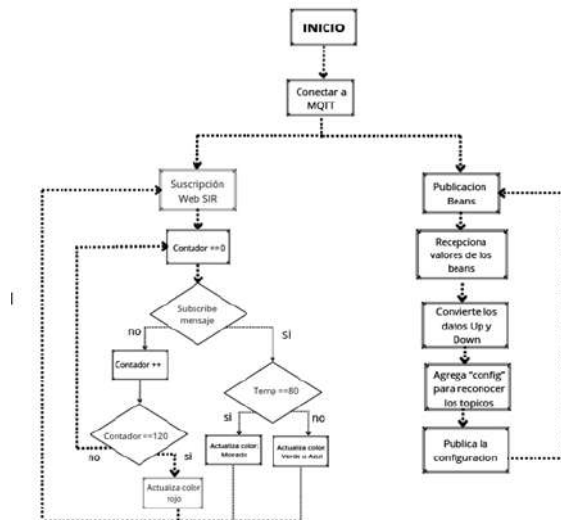


Figura 8. Diagrama de flujo del funcionamiento del SIR.

3. RESULTADOS

3.1 Módulos del sistema ABS

Se configuró el sensor de temperatura junto al Tiva TM4C dentro del módulo de radiofrecuencia, lo que permitió monitorear la temperatura en tiempo real en cada uno de los 64 módulos RF.



Figura 9. Sistema de monitoreo implementado en el módulo de radiofrecuencia.

3.2 Web del SIR (Sistema Integrado de Radares)

Durante las pruebas de la interfaz web del Sistema Integrado de Radar (SIR), se observó la actualización en tiempo real de los indicadores de color y la dirección de apunte del radar en la interfaz de cada uno de los 64 módulos RF, lo que permitió monitorear su comportamiento de manera continua. Además, se implementó una visualización dinámica utilizando Ajax, que mostró una leyenda de estado operativo, facilitando la interpretación de la condición de cada módulo de forma intuitiva y eficiente.



Figura 10. Interfaz gráfica del Sistema Integrado de Radares (SIR).



Figura 11. Leyenda utilizada en la interfaz del sistema.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en los módulos de radiofrecuencia evidencian que el sistema IoT implementado responde de manera eficiente, al enviar mensajes al tópico MQTT en un tiempo reducido, lo que permite la actualización automática del color de estado ante un incremento

en la temperatura y cambio en la configuración de los *beams*. Esta rápida respuesta del sistema proporciona una herramienta confiable para la toma de decisiones en tiempo real, asegurando una gestión efectiva de las condiciones operativas.

Asimismo, en las pruebas realizadas se comparó la temperatura real registrada por el sensor con la medición obtenida a través de una cámara térmica, obteniendo un margen de error de 1.1 °C. Este resultado valida la precisión del sistema en la detección y monitoreo térmico, asegurando su confiabilidad en aplicaciones donde la supervisión de temperatura es crítica.

5. CONCLUSIONES

Se finaliza la investigación manifestando las siguientes conclusiones y recomendaciones.

- Se logró establecer con éxito la transmisión de datos de los sensores a través del protocolo MQTT, garantizando una comunicación eficiente y estable dentro del sistema IoT.
- Se ajustó y calibró correctamente el sensor SB70, obteniendo un margen de error de +1.1 °C, lo que asegura mediciones confiables para el monitoreo térmico.
- Se fortaleció la capacidad del sistema para gestionar y supervisar los módulos de radiofrecuencia, mejorando su eficiencia y respuesta ante variaciones en las condiciones operativas.
- Las pruebas realizadas con los módulos en un entorno controlado confirmaron el correcto funcionamiento del sistema, validando su precisión y estabilidad en la recolección y transmisión de datos.

6. RECOMENDACIONES

Para la calibración mediante el método Steinhart-Hart, se emplearon tres mediciones específicas de temperatura utilizando una pistola de calor, obteniendo un margen de error tolerable. No obstante, este margen podría reducirse aún más si se incorporan más puntos de calibración, lo que permitirá mejorar la precisión del sistema.

Además, se recomienda evaluar individualmente cada módulo, ya que la ubicación del sensor puede verse afectada por la proximidad de disipadores térmicos, lo que podría alterar la

lectura y comprometer la precisión del monitoreo. Por ejemplo, si la temperatura real del módulo alcanza 81 °C, pero el sensor registra sólo 62 °C debido a la influencia de los disipadores cercanos, la medición será incorrecta. Como resultado, el sistema no enviará la alerta correspondiente al SIR, a pesar de que el módulo de radiofrecuencia (RF) haya superado un umbral crítico de temperatura. Para mitigar este problema, se recomienda realizar un análisis detallado de la distribución térmica, optimizar la ubicación de los sensores y ajustar el umbral mínimo de temperatura excedida, lo que asegurará una detección más precisa de las condiciones de sobrecalentamiento.

- [4] C. S. Shieh, J. Y. Yan, and H. X. Gu, "SDN-based management framework for IoT," *Int. J. Comput. Theory Eng.*, vol. 11, no. 1, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/2UAWsD>.
- [5] M. Jazayeri, S. Liang, and C. Y. Huang, "Implementation and evaluation of four interoperable open standards for the Internet of Things," *Sensors*, vol. 15, no. 9, pp. 24343–24373, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/2WDMd3C>.
- [6] Texas Instruments, Tiva C Series TM4C1294XL Datasheet, 2009. [Online]. Available: <http://www.ti.com/tool/ccstudio>.

7. AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi familia, especialmente a mi madre y a mi tía, por su apoyo incondicional. Gracias a ellas he podido alcanzar mis metas y crecer como persona cada día.

Asimismo, deseo extender mi gratitud a mi asesor, William Limonchi, por su paciencia y dedicación al explicarme cada tema y resolver mis dudas durante este programa de prácticas profesionales.

Finalmente, extendiendo mi gratitud al Instituto Geofísico del Perú (IGP) por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto y facilitar los recursos necesarios para esta investigación, la cual ha fortalecido mis conocimientos en el área que me apasiona.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Steinhart and S. R. Hart, "Calibration curves for thermistors," *Deep Sea Res.*, vol. 15, p. 497, 1968. [Online]. Available: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1968DSRA...15..497S/abstract>.
- [2] B. W. Mangum, "The triple point of succinonitrile and its use in the calibration of thermistor thermometers," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 54, no. 12, p. 1687, 1983. [Online]. Available: <https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-abstract/54/12/1687/311301>.
- [3] D. Serpanos and M. Wolf, *Internet-of-Things (IoT) Systems: Architectures, Algorithms, Methodologies*. Springer, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/2FbmJ7B>.

OPTIMIZACIÓN DEL PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA PRINCIPAL HACIENDO USO DEL SISTEMA DE APUNTE AUTOMÁTICO

**Optimization of the main antenna's radiation pattern using the automatic beam switching system*

Gerardo Ernesto Anguis Chachayma

Pontificia Universidad Católica del Perú
Facultad de Ciencias e Ingeniería
gerardo.anguis@pucp.edu.pe

Asesor:

Edwar Ivan Manay Salazar
Dirección en Ciencias del Geoespacio

RESUMEN

La determinación de la dirección de haz del radar principal se realiza empleando el sistema de apunte automático (ABS). Mediante la configuración de fases de los distintos módulos de la antena se determina el patrón de radiación. En este proyecto se presenta un método inverso para determinar la configuración de fases de la antena principal haciendo uso de las nuevas longitudes de cables brindadas por ABS para una dirección de apunte arbitraria indicada por el usuario (punto). El algoritmo utiliza un patrón de radiación base normalizado y técnicas numéricas implementadas en Python (Numpy, Scipy, Matplotlib y Tkinter) para resolver un sistema de ecuaciones reducido a 64 variables. La validación con el simulador original muestra que el error obtenido se sitúa entre 0 % y 10 %, medido en función de una unidad mínima de 0.02. Debido a la naturaleza discreta de las matrices de fases, no siempre es posible apuntar exactamente al punto deseado; sin embargo, se alcanza una aproximación muy precisa. Se destaca, además, que existen múltiples configuraciones de fases que generan el mismo patrón de radiación, lo que confiere flexibilidad al método. Finalmente, se desarrolló una interfaz gráfica y se elaboró un manual de uso e instalación, ofreciendo una herramienta práctica y validada para el ajuste de antenas.

Palabras clave: Método inverso, configuración de fases, patrón de radiación, antena, optimización numérica, simulación, Radio Observatorio de Jicamarca, Python

ABSTRACT

The determination of the main radar beam direction is done using the automatic aiming system (ABS). The radiation pattern is determined by the phase configuration of the individual antenna modules. This project presents an inverse method for determining the phase configuration of the main antenna using the new cable lengths provided by ABS for an arbitrary user-indicated pointing direction (point). The algorithm uses a standardized base radiation pattern and numerical techniques implemented in Python (Numpy, Scipy, Matplotlib and Tkinter) to solve a system of equations reduced to 64 variables. Validation with the original simulator shows that the error obtained is between 0 % and 10 %, measured on the basis of a minimum unit of 0.02. Because of the discrete nature of phase matrices, it is not always possible to aim exactly at the desired point; however, a very precise approximation is achieved. It should also be noted that there are multiple phase configurations generating the same radiation pattern, which gives flexibility to the method. Finally, a graphical interface was developed and an installation and use manual was produced, offering a practical and validated tool for antenna adjustment.

Keywords: Inverse method, phase configuration, radiation pattern, antenna, numerical optimization, simulation, Jicamarca Radio Observatory, Python

1. INTRODUCCIÓN

El Instituto Geofísico del Perú (IGP), mediante el Radio Observatorio de Jicamarca, está dedicado al estudio de la alta atmósfera. Para esa misión, cuenta con un arreglo de antenas (antena principal) cuyo patrón de radiación es configurable mediante longitudes de cables preestablecidas (arreglo de fases). Adicionalmente, cuenta con un simulador de patrones de antena de la antena principal, con el cual se pueden verificar los patrones de radiación para diferentes arreglos de fases y también verificar la orientación de estos patrones según la ubicación del campo magnético que también es proporcionado por el simulador. Esta última información es necesaria para el estudio de la alta atmósfera. Se cuentan con arreglos de fases preestablecidas y que están documentados en el manual de Ochs. Su empleo está sujeto a la ubicación del campo magnético y a los requerimientos de estudio de alta atmósfera en la fecha de uso.

En años recientes, se ha implementado en el IGP el sistema Automatic Beam Switching (ABS). Este se compone de un conjunto de cables instalados en campo, que son activados mediante relés RF y controlados desde la sala de operaciones a través de una interfaz web. Esta forma reemplazó a la configuración manual que consistía en la colocación de cables en campo realizada por personal de antena. Para el presente proyecto, se debe tener en cuenta que la configuración manual considera longitudes de cables de 2 m, 3 m, 4 m y 5 m, mientras que el ABS permite longitudes de cables de 2 m, 3 m, 4 m, 5m, 0.5 m, 1.5 m, 2.5 m y 3.5 m.

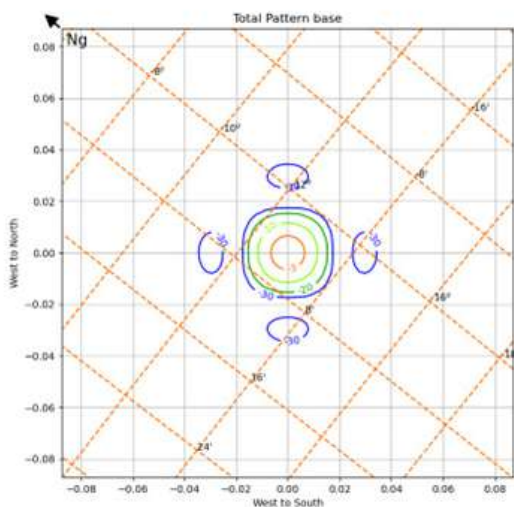


Figura 1. Patrón base.

La hipótesis del proyecto plantea que, a diferencia del método original que recibía como entrada la matriz de fases y las matrices de ganancia de transmisión y recepción, es posible implementar un método inverso para generar patrones de radiación estableciendo una coordenada de apuntamiento y un patrón base de radiación que reúne las características de simetría y conformación deseada (Figura 1).

El simulador y su interfaz gráfica fueron desarrollados en Python, utilizando Numpy, Scipy, Matplotlib y Tkinter. Para implementar el método, se resolvió el siguiente sistema de ecuaciones (reducción a 64 variables):

$$|m_{a,b}| = \left| \sum_{p,q=1}^8 \boxed{} e^{i \cdot k \cdot \Omega_{p,q}(a,b)} e^{i \cdot k \cdot X_{p,q}} \right|$$

$$= \frac{\sqrt{P_{a,b}}}{|d_{a,b}|}$$

Donde:

$P_{a,b}$: Patrón de radiación base con la antena encendida en modo recepción.

$d_{a,b}$: Patrón de radiación de un dipolo.

$m_{a,b}$: Patrón de radiación de un módulo.

$\Omega_{p,q}(a,b)$: Matriz de 8×8 que contiene la información de posición del patrón.

$X_{p,q}$: Matriz de fases de tamaño 8×8 que se desea calcular. Cada entrada corresponde a una de las 64 variables de la matriz.

i : Una unidad imaginaria

k : Número de onda. Es un parámetro fijo para esta antena.

Tras resolver el sistema, el resultado se optimiza para minimizar los lóbulos laterales del patrón de radiación, siendo adecuados valores de curva de nivel mayores a -30 dB. Finalmente, se grafica el campo magnético, la declinación vs. hora ángulo y el patrón de radiación (véase Figura 2).

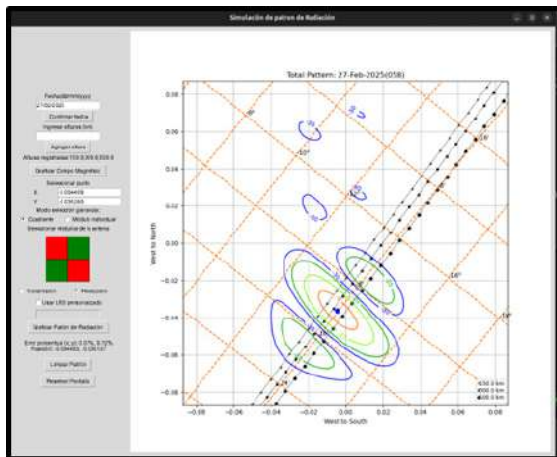


Figura 2. Ejemplo de resultado del simulador.

Adicionalmente, se presenta la ecuación completa que incorpora las matrices de ganancia de transmisión (G_{tx}) y recepción (G_{rx}), ambas de 8×8 , para complementar la información.

$$\left| \sum_{p,q,r,s=1}^8 G_{tx} G_{rx} e^{i \cdot k \cdot \Omega_{p,q}(a,b)} e^{i \cdot k \cdot X_{p,q}} e^{i \cdot k \cdot \Omega_{r,s}(a,b)} e^{i \cdot k \cdot X_{r,s}} \right| = \frac{\sqrt{P_{a,b}}}{|d_{a,b}|}$$

2. DESARROLLO

2.1 Obtención de fases

El sistema de ecuaciones mostrado es extenso, ya que la cantidad de ecuaciones que existen depende de 'a' y 'b'. Estos valores están definidos por defecto del 0 al 100 para cada uno. En suma, existen un total de 10 201 ecuaciones y 64 variables. Para evitar que el sistema sea indeterminado, no se presenta solución y se escogieron 64 ecuaciones para valores de 'a' y 'b'. En este caso es conveniente usar los mismos 8 valores para a y b: (0, 14, 28, 42, 57, 71, 85, 100), con los que se cubre la mayor cantidad de soluciones para el sistema. Luego, se utilizó el solver de Scipy (scipy.root) con el método específico Krylov para obtener las entradas de la matriz de fases.

2.2 Manejo de error

Debido a la propagación del error que existe de forma intrínseca, el resultado obtenido puede variar con respecto al esperado. Para cuantificar este error se realiza una comparación porcentual entre la diferencia de estos valores y la mínima unidad de la grilla (0.02).

2.3 Uso del simulador

Para un correcto funcionamiento del simulador se deben seguir los siguientes pasos:

- Ingresar la fecha deseada y registrarla con el botón "Confirmar fecha".
- Ingresar las alturas separadas por comas y registrarlas con el botón "Agregar altura".
- Presionar el botón "Graficar campo magnético".
- Seleccionar el lugar donde se desea apuntar: coordenadas.
- Configurar qué partes de la antena transmiten o reciben con la cuadrícula roja.
- Finalmente, presionar "Graficar el patrón de radiación".

3. RESULTADOS

Se realizaron pruebas del simulador en distintas coordenadas. Tras obtener los valores de la matriz de fases, se verificó mediante el simulador original que estos generan el patrón deseado. Además, se elaboró la documentación del nuevo simulador, acompañada de un manual de uso e instalación.

Por ejemplo, para la coordenada (0.009737; -0.005302), con la mitad de la antena configurada en transmisión y únicamente un cuadrante de la antena en recepción, se obtiene el resultado mostrado en la Figura 3.

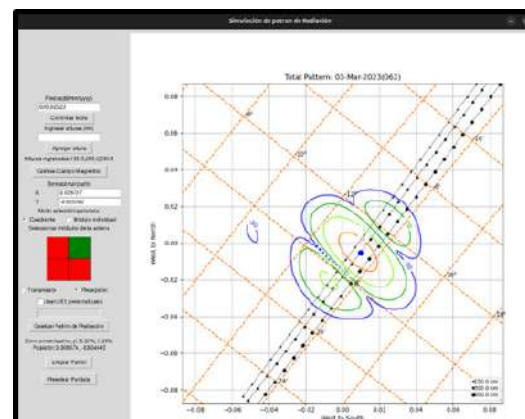


Figura 3. Resultado para el punto (0.009737; -0.005302).

```
Calculando patrón de radiación para el punto (0.009737,-0.005302)
array([[1.5, 2., 2., 2.5, 3., 3., 3., 3.5],
       [2., 2., 2.5, 2.5, 3., 3., 3.5, 3.5],
       [2., 2., 2.5, 2.5, 3., 3.5, 3.5, 3.5],
       [2., 2., 2.5, 3., 3., 3.5, 3.5, 4.],
       [2.5, 2.5, 2.5, 3., 3., 3.5, 4., 4.],
       [2.5, 2.5, 3., 3., 3.5, 3.5, 4., 4.],
       [2.5, 3., 3., 3., 3.5, 3.5, 4., 4.],
       [3.5, 3., 3., 4., 3.5, 4., 4., 4.5]])
El error porcentual del centro (x,y) es respectivamente: 5.316465 y 2.284650
Position: 0.008674 -0.004845
Altitude in degrees: 88.165498
Azimuth angle in degrees (Measured EAST from NORTH): 144.553882
Main beam position (RA(degrees), HA(min), DEC(degrees)): 82.553078 4.374969 -13.442399
```

Figura 4. Información sobre el patrón de radiación.

Matrices de Fases y Ganancias

Matriz de Fases

1.500	2.000	2.000	2.500	3.000	3.000	3.000	3.500
2.000	2.000	2.500	2.500	3.000	3.000	3.500	3.500
2.000	2.000	2.500	2.500	3.000	3.500	3.500	3.500
2.000	2.000	2.500	3.000	3.000	3.500	3.500	4.000
2.500	2.500	2.500	3.000	3.000	3.500	4.000	4.000
2.500	2.500	3.000	3.000	3.500	3.500	4.000	4.000
2.500	3.000	3.000	3.000	3.500	3.500	4.000	4.000
3.500	3.000	3.000	4.000	3.500	4.000	4.000	4.500

Matriz de Transmisión

0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Matriz de Recepción

0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Figura 5. Información proporcionada por el simulador.

4. DISCUSIÓN

La gestión del error en este simulador es un aspecto fundamental por analizar. En lugar de utilizar un análisis basado en el error porcentual relativo, se optó por medirlo en relación con una unidad mínima de medida, debido a las fluctuaciones observadas en el error relativo. Actualmente, el error se sitúa entre un 0 % y un 10 %. Aunque es posible optimizar el algoritmo mediante un manejo más sofisticado del error, esta mejora no se implementó por las limitaciones temporales del programa de prácticas.

Dado que no existe una formulación analítica para derivar el patrón de radiación a partir de su posición y la corriente de manera directa, la metodología propuesta recurre a métodos numéricos para lograr una aproximación adecuada. Es importante destacar que estos métodos ya han sido desarrollados y estudiados previamente; en este sentido, no se introdujo ningún método numérico innovador para resolver la ecuación, sino que se emplearon técnicas consolidadas en el campo.

Es importante destacar que los patrones de radiación se generan de forma discreta, ya que las matrices de fases emplean valores numéricos fijos. Con el nuevo ABS, estos valores son 0.5, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 y 5.0 metros. Esta discreción influye significativamente en las coordenadas a las que se puede apuntar con menor error, pues no siempre es posible alcanzar exactamente la coordenada deseada; la configuración de la antena puede

aproximarse, pero no replicar perfectamente el apuntamiento deseado. Sin embargo, el simulador permite obtener una aproximación muy buena del punto objetivo.

5. CONCLUSIONES

Luego de determinar que se cumplió la hipótesis y que se alcanzaron los objetivos propuestos, se finaliza la investigación manifestando las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- El método que se planteó para obtener la configuración de fases de la antena principal en el presente proyecto es correcto, puesto que fue validado con el simulador original y el error obtenido se encuentra dentro de los parámetros previstos; por otro lado, no fue necesario implementar y resolver la ecuación completa debido a las propiedades del radar y la generación de patrones de radiación.
- La ubicación y generación de los patrones de radiación no son continuas; en la grilla, estos se distribuyen de forma discreta y los puntos de generación permanecen fijos. Esto significa que las posiciones de los patrones están predeterminadas y no pueden ubicarse de manera arbitraria. Entonces, no siempre podremos realizar el apunte al lugar donde queramos; sin embargo, es posible encontrar una buena aproximación con el uso de este simulador.
- Existen al menos dos soluciones, es decir, dos configuraciones distintas de la matriz de fases que generan el mismo patrón de radiación. Esto se evidencia al analizar la ecuación derivada, donde la presencia del módulo y el valor absoluto permite obtener tanto una solución positiva como una negativa; esto fue comprobado haciendo la implementación en Python de ambas expresiones. Además, al sumar un mismo valor numérico a todas las entradas de la matriz de fases, el patrón de radiación permanece inalterado. Por lo tanto, se concluye que una misma solución puede expresarse de diversas formas debido a esta propiedad intrínseca.
- La implementación del sistema ABS mejora sustancialmente la obtención de patrones de radiación, ya que permite generarlos con mayor simetría y menos distorsión. Además, esta tecnología incrementa significativamente el número de coordenadas a las que el radar puede apuntar.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda a futuros usuarios y lectores implementar los algoritmos de corrección de error numérico para mejorar la precisión del simulador, así como resolver la ecuación completa para obtener más configuraciones de fases de la antena. En el manual de uso e instalación se presenta información detallada sobre cómo fue derivada la ecuación a partir del código original.

Se recomienda seguir el manual de uso para ingresar los valores tal como se indica, a fin de garantizar un desempeño óptimo del simulador. Asimismo, se aconseja revisar y validar los resultados con el simulador original Overjro.

7. AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer al Instituto Geofísico del Perú (IGP) por facilitar los recursos necesarios para la realización de la presente investigación. Con ello, completé el programa de prácticas preprofesionales que me permitió dar un gran paso de partida para mi carrera profesional como físico.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Ochs, G. R. (1965). *The Large 50 MC/s Dipole Array at Jicamarca Radar Observatory* (NBS Project 54050-11-5400156, NBS Report 8772). National Bureau of Standards.
- Jackson, J. D. (1999). *Classical Electrodynamics* (3rd ed.). New York: Wiley. [Chapter 9: Radiation by Accelerated Charges].
- Langtangen, H. P., & Mardal, K.-A. (2019). *Introduction to Numerical Methods for Variational Problems*. Springer.

OPTIMIZACIÓN DE LA APLICACIÓN WEB ATRAD PARA EL MONITOREO DE LOS TRANSMISORES DE MEDIA POTENCIA

**ATRAD web application optimisation for monitoring and medium power transmitters*

Nehemías Guillermo Montes Trujillo

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ciencias
nehemias.montes.t@uni.pe

Asesores:

Rommel Yaya
y Edson Ynilupu
Dirección en Ciencias del Geoespacio

RESUMEN

Para el estudio de la ionósfera, el Instituto Geofísico del Perú (IGP), mediante su Radio Observatorio de Jicamarca, cuenta con diversos modos de operación para los cuales emplea transmisores de baja, media y alta potencia, según sean los fenómenos e irregularidades por estudiar. El presente proyecto se enfoca en el monitoreo histórico de los parámetros de funcionamiento (potencia incidente, temperatura) de los transmisores de estado sólido de media potencia (marca ATRAD), que tienen una potencia final de 96 kW. Dichos parámetros se visualizan en tiempo real en una interfaz amigable y, gracias a las nuevas modificaciones realizadas en este proyecto, también se pueden revisar los datos históricos de los parámetros de estos equipos. Adicionalmente, se ha añadido la visualización de la potencia de retorno (en dB), que permite monitorear el comportamiento de los transmisores y determinar su correcto funcionamiento.

Palabras clave: Transmisor, ATRAD, potencia incidente, temperatura, pérdida de retorno, amplificador

ABSTRACT

For the study of the ionosphere, the Radio Observatory of Jicamarca has several modes of operation for which it uses transmitters of low, medium and high power, according to the phenomenology and irregularities to be studied. The present project focuses on the historical monitoring of operating parameters (incident power, temperature) of medium-power solid state transmitters (ATRAD brand), which have a final power of 96 kW. These parameters are displayed in real time in a friendly interface and thanks to the new modifications made in this project, it is also possible to review the historical data of the parameters of these equipment. Additionally, the display of return power (in dB) has been added, which allows to monitor the behavior of transmitters and determine their correct functioning.

Keywords: Transmitter, ATRAD, emission power, temperature, return loss, amplifier

1. INTRODUCCIÓN

En el Radio Observatorio de Jicamarca del Instituto Geofísico del Perú (IGP) se realizan estudios de la ionósfera ecuatorial en donde se emplea el radar principal. Este radar cuenta con varios modos de operación para los cuales se utilizan transmisores de baja (hasta los 20 kW), media (hasta los 100 kW) y alta potencia (1 MW). Los modos de operación de alta potencia tienen ventajas notables para ecos incoherentes, pero debido a su alto costo operativo no pueden realizarse a largo plazo, lo que impide detectar variabilidades de fenómenos en el tiempo. Por otro lado, con los transmisores de baja potencia se pueden operar por un tiempo prolongado, pero no son lo suficientemente potentes para la detección de parámetros tales como derivas o densidades de electrones (ecos incoherentes), ya que el estudio realizado con estos transmisores se enfoca en irregularidades ionosféricas (ecos coherentes).

La necesidad de otro modo de operación es evidente, por lo que se adquirieron transmisores de media potencia de estado sólido, de modo tal que se puedan medir parámetros tales como las derivas (ecos incoherentes) y, a su vez, irregularidades ionosféricas (ecos coherentes) en largos periodos de tiempo debido a su menor consumo eléctrico. Además, ofrecen la posibilidad de ser controlados de manera remota, a diferencia de los transmisores de alta potencia.

El punto de partida es una aplicación web que se encarga del monitoreo y control de los transmisores, desarrollada en Django y utilizando el protocolo de comunicación MQTT mosquito; sin embargo, carece de funcionalidades y datos relevantes, entre ellos: acceso directo al historial de datos por fecha y rango horario, visualización numérica en tiempo real y acceso a los datos de pérdida de retorno, este último fundamental para conocer la fiabilidad de las mediciones y el estado de los transmisores. Los objetivos del proyecto pueden sintetizarse en los siguientes:

- Envío y recepción de datos (temperatura, potencia incidente, pérdida de retorno).
- Añadir filtrado por fecha y rango horario de los parámetros.
- Adición de la variable de la pérdida de retorno.
- Documentación del proyecto.

2. DESARROLLO

2.1 Transmisores ATRAD

“La arquitectura de los transmisores ATRAD, estructuras modulares, se compone de cuatro robustos amplificadores ST-20, cada uno de ellos capaz de suministrar 24 kW de potencia. Tal capacidad es fruto de la integración de seis módulos de amplificación de potencia (PA), cada uno con una amplitud de generación de 4 kW. La energía emanada de cada amplificador se conjuga mediante combinadores, alcanzando así una potencia total de 96 kW” [1].

A fin de que los conceptos ulteriores no causen dificultades, se hace una breve mención de ellas.

• Potencia incidente:

Para el caso de una onda electromagnética plana que incide sobre la antena en el espacio libre [2], la densidad de potencia S , es decir, la potencia por unidad de área se puede escribir de la siguiente forma:

$$S = \frac{|E|^2}{2\eta}$$

Ecuación 1: densidad de potencia

Donde se tiene:

- $|E|$: campo eléctrico de la onda (V/m).
- η : impedancia intrínseca del espacio libre.

La relación anterior proviene de la definición del vector de Poynting y asume que la onda es de polarización lineal, además que la propagación ocurre en condiciones de campo lejano.

Ahora bien, la capacidad de una antena para captar la energía incidente se cuantifica mediante el, así llamado, área efectiva A_e , la misma que se relaciona con la ganancia G y la longitud de onda λ por la siguiente ecuación:

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi}$$

Ecuación 2: área efectiva

Es así como la potencia incidente P_{inc} en la antena es la cantidad de energía electromagnética captada por ella, que matemáticamente se obtiene al multiplicar la densidad de potencia S por el área efectiva A_e , es decir:

$$P_{inc} = A_e S$$

Ecuación 3: potencia incidente

Que, si se cita en función de los parámetros de líneas arriba, se tiene:

$$P_{inc} = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{|E|^2}{2\eta}$$

Ecuación 4: potencia incidente en función del campo eléctrico

• Pérdida de retorno

La trascendencia de la pérdida de retorno radica en que esta es un parámetro que cuantifica la cantidad de potencia que se refleja en un sistema de transmisión debido a un desajuste de impedancias entre la línea de transmisión y la carga [3], siendo la más relevante la antena. La cantidad en cuestión se expresa en decibelios (dB).

Con el objeto de determinar la pérdida de retorno, se define el coeficiente de reflexión (Γ), ya que se relaciona con las amplitudes de la onda incidente y la reflejada:

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i}$$

Ecuación 4: coeficiente de reflexión

Teniendo en cuenta una carga con impedancia Z_L que está conectada a una línea de transmisión, cuya impedancia característica es Z_0 , se expresa del siguiente modo:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Ecuación 6: coeficiente de reflexión en función de impedancias

Un desajuste en las impedancias significa que $|\Gamma|$ será distinto de cero, lo que dice que parte de la potencia se refleja en lugar de ser absorbida o transmitida a la carga. Es en función de esta cantidad que se define la pérdida de retorno (RL):

$$RL = -20 \log_{10} |\Gamma| \\ = -20 \log_{10} \left| \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right|$$

Ecuación 7: pérdida de retorno

Esta última fórmula indica la calidad de la adaptación de impedancias en sistemas de transmisión, lo que permite cuantificar cuánta potencia se refleja y, en consecuencia, mejorar el cuidado de los transmisores y la fiabilidad de las mediciones.

2.2 Aplicación web ATRAD

Es una aplicación desarrollada dentro de una estructura más amplia, el Sistema Integrado de Radar (SIR), por lo que se ha usado la misma lógica en la programación.

La comunicación se realiza por *websockets* y protocolo *mqtt* mosquito, adicionando funciones para hacer persistir datos previos.

2.2.1 Optimización

Los datos que envían los transmisores se hallan en bytes, por lo que amerita su conversión a formato *string*, no embargante. La función que realiza solo está pensada para pocos datos, por lo que se amplió el funcionamiento de manera que se puedan extraer datos de potencia incidente y pérdida de retorno.

También ha sido necesario añadir funcionalidades que permitan el acceso a datos tomados previamente y, de esta manera, tener en la interfaz una visualización de datos de dichas mediciones.

3. RESULTADOS

Como consecuencia de las modificaciones y añadiduras citadas, se llegó a la visualización más detallada de los datos de potencia incidente y pérdida de retorno, y acceso a los datos históricos de temperatura.

En el caso de la potencia incidente se implementó una nueva ventana, concretamente una ventana para cada transmisor, en donde se visualiza el estado de cada amplificador y, por tanto, de cada módulo individual, como se advierte en la Figura 1.

Ahora bien, ejemplo de las nuevas ventanas se muestra en la Figura 2, donde se tiene una actualización en tiempo real de los valores individuales de cada amplificador.

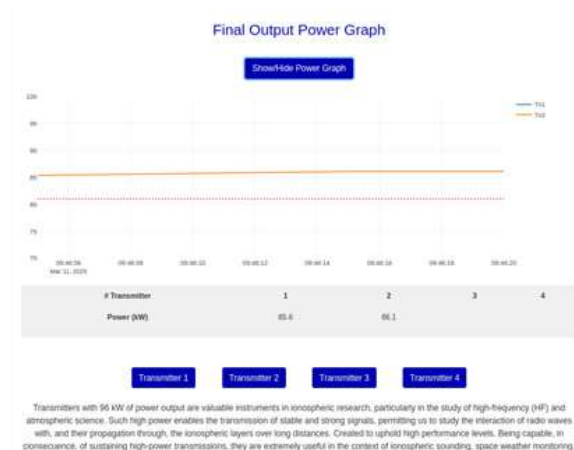


Figura 1. Gráfica de la potencia incidente, junto con una tabla que muestra los datos individuales de cada transmisor.

Amplifiers Output Power (kW)

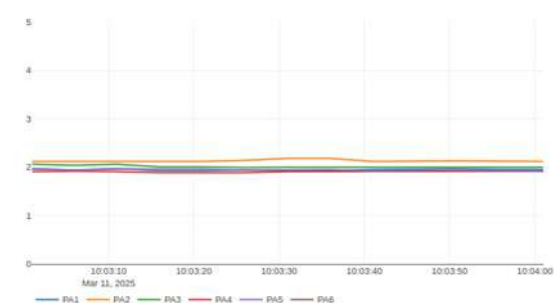


Figura 2. Gráfica de la potencia incidente de un módulo. Cada línea corresponde a un amplificador.

Además, se tiene un filtro por fechas para visualizar la evolución temporal de las mediciones, y una tabla que se actualiza con los datos actuales, donde se muestran los datos históricos. Véase la Figura 3.

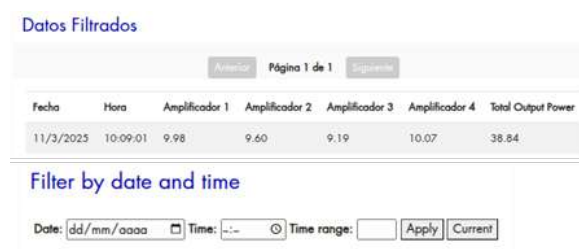


Figura 3. Filtro que muestra datos numéricos en tiempo real y las mediciones anteriores seleccionadas.

La misma arquitectura se ha repetido para las mediciones de pérdida de retorno con el objeto de lograr una uniformidad en la aplicación en cuestión.

4. DISCUSIÓN

Aun cuando ya se tenía una interfaz para las mediciones de temperatura y potencia incidente, la necesidad patente de contar con una interfaz para los datos numéricos e históricos ha impulsado la concretización de este proyecto. Esto será útil para ver el estado de cada amplificador en particular, ya que, si se tiene un fallo, se puede ir a este directamente haciendo el trabajo más eficiente.

Los cambios desarrollados logran optimizar la operación con transmisores. La persistencia de los datos históricos sirve no solo para ver el estado de los transmisores, sino también para notar la fiabilidad de las medidas.

Trabajos posteriores podrían enfocarse a una mejor distribución de los códigos en el *backend* y en la creación de códigos generales en el *frontend*, evitando así la repetición de comandos en los códigos individuales.

5. CONCLUSIONES

Al finalizar este proyecto, se tomó como muestra una medición de los datos y se elaboró un *script* que hacía las veces de publicador. Al tomar datos reales para estas pruebas, se pudo comprobar la fiabilidad de las mediciones.

Se pudo advertir la actualización de datos en tiempo real y su visualización en datos históricos, que supuso una de las principales metas del trabajo.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda la adaptación de un *bot* que se encargue de vigilar los máximos y mínimos de cada parámetro y envíe estas alertas a los operadores. Asimismo, este *bot* debería encargarse del reinicio del programa cuando sea necesario.

7. AGRADECIMIENTOS

No puedo sino expresar sincera gratitud a mis asesores, Rommel Yaya y Edson Ynilupu, cuya guía y paciencia fungieron como pilares

fundamentales en la concepción y desarrollo de esta investigación. Su inspiración perdurará más allá de estas páginas. Igualmente, mi reconocimiento a los integrantes del IGP, cuyas reflexiones y discusiones han contribuido a que este estudio llegara a buen puerto.

Finalmente, agradecer al IGP por su respaldo y provisión de los recursos necesarios, sin la cual la materialización del proyecto no habría sido posible.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Fernandez Arbieto, Web application for the control and monitoring of 96 kW ATRAD Transmitters. Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Facultad de Ingeniería y Ciencias, Área de Operación del Radar - Radio Observatorio de Jicamarca, 2023.
- [2] J. A. Richards, Radio Wave Propagation: Principles and Techniques. Berlin, Germany: Springer, 2008.
- [3] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2016.
- [4] Django Software Foundation, "Django documentation," Django Project, 2023. [Online]. Available: <https://docs.djangoproject.com/en/4.1/>.

IMPLEMENTACIÓN DE MÓDULOS DE SIMULACIÓN DE VARIABLES IONOSFÉRICAS PARA LA BASE DE DATOS MADRIGAL

**Implementation of ionospheric variable simulation modules for the MADRIGAL database*

Luis Angel Rosales Casas

Pontificia Universidad Católica del Perú
Facultad de Ciencias e Ingeniería
a20196549@pucp.edu.pe

Asesor:

Juan Carlos Espinoza
Dirección en Ciencias del Geoespacio

RESUMEN

El modelo de radar de dispersión incoherente (ISRIM) es un modelo ionosférico empírico desarrollado por el Observatorio Haystack del MIT, que utiliza observaciones de largo plazo de este tipo de radares. Estos modelos proporcionan parámetros climatológicos de la ionósfera, como la densidad de electrones y las temperaturas de electrones y iones. El presente proyecto tiene como objetivo implementar el modelo con los datos de radar del Radio Observatorio de Jicamarca. En un inicio se identificó que la principal limitación para su implementación era la poca disponibilidad de datos, ya que el radar de Jicamarca, en su modo de dispersión incoherente, solo opera durante algunos días del año. Sin embargo, en la actualidad se cuenta con aproximadamente 209 experimentos históricos realizados entre los años 1966 y 2025, los cuales han sido descargados y organizados en un único *dataset*. A este *dataset* se le añadieron los valores correspondientes de los índices Ap (índice planetario de actividad geomagnética) y F10.7 (índice de flujo solar), necesarios para el modelo. Los resultados obtenidos sugieren que aún es necesario evaluar si la disponibilidad de datos es suficiente, sobre todo durante los meses de junio y julio, meses donde se cuenta con un menor número de datos; además, se sugiere profundizar en realizar un mejor agrupamiento de los datos que permita obtener los coeficientes adecuados para correr el modelo.

Palabras clave: Ionósfera, densidad de electrones, temperatura de electrones, temperatura de iones

ABSTRACT

The incoherent scattering radar model (ISRIM) is an empirical ionospheric model developed by the MIT Haystack Observatory, which uses long-term observations of this type of radar. These models provide climatological parameters of the ionosphere, such as electron density and electron and ion temperatures. This project aims to implement the model with radar data from the Radio Observatory of Jicamarca. Initially, it was identified that the main limitation for its implementation was the limited availability of data since the Jicamarca radar, in its mode of incoherent dispersion, only operates during some days of the year. However, there are currently approximately 209 historical experiments carried out between 1966 and 2025 which have been downloaded and organized into a single *dataset*. To this *dataset* the corresponding values of the Ap (planetary index of geomagnetic activity) and F10.7 (solar flux index), necessary for the model, were added. The results suggest that there is still a need to assess whether sufficient data are available, especially during the months of June and July, when fewer data are available. It is also suggested that a better grouping of the data should be carried out in order to obtain the appropriate coefficients for running the model.

Keywords: Ionosphere, electron density, electron temperature, ion temperature

1. INTRODUCCIÓN

La ionósfera es una región crítica de la atmósfera terrestre, cuya compleja variabilidad y dinámica resultan fundamentales para comprender la interacción entre la actividad solar y los sistemas geofísicos. Su estudio es esencial, ya que influye en la propagación de las ondas de radio a largas distancias y en la transmisión de señales entre satélites y la Tierra. Por ello, contar con modelos precisos de la ionósfera es vital, tanto para la gestión de las tecnologías basadas en la propagación de ondas electromagnéticas como para la predicción de los efectos del clima espacial. Existen diversos modelos, por ejemplo: IRI (International Reference Ionosphere) [1], y NeQuick [2].

En esta investigación, el modelo de interés es el modelo ionosférico ISR (ISIRIM), desarrollado por el Observatorio Haystack del MIT. Este modelo permite describir parámetros esenciales, como la densidad de electrones, las temperaturas de electrones e iones, y en ciertos casos, la deriva de iones y el campo eléctrico. El presente estudio se orienta a adaptar el modelo ISIRIM a los datos del Radio Observatorio de Jicamarca para obtener perfiles de la densidad electrónica y las temperaturas, tanto de electrones como de iones. Se procederá a reproducir los coeficientes de un modelo lineal aplicado a los *bins* resultantes del agrupamiento de datos históricos de Jicamarca, los cuales se descargaron de la base de datos Madrigal. Estos datos, combinados con índices geofísicos como Ap y F10.7 (obtenidos de GFZ Potsdam [5]), representan la base del modelo ISIRIM.

Este trabajo tiene como objetivo ampliar la aplicabilidad del modelo ISIRIM a la localidad de Jicamarca y, al mismo tiempo, contribuir a la comprensión de la dinámica ionosférica mediante los parámetros densidad de electrones, temperatura de electrones e iones, asumiendo que los datos siguen un modelo lineal que depende de los índices de actividad geomagnética y solar: Ap y F10.7, respectivamente.

1.1 Índices de actividad geomagnética y solar

A nivel interpretativo, los valores de Ap cuantifican qué tan fuerte es la interacción con el viento solar y el campo magnético interplanetario, lo que puede desencadenar tormentas geomagnéticas con posibles efectos en las comunicaciones y sistemas eléctricos [3].

Por otro lado, el índice F10.7 mide el flujo de radio que emana del Sol a una longitud de onda de 10.7 cm (2800 MHz). Se expresa en unidades de flujo solar (SFU) y actúa como un proxy robusto de la actividad solar. Esto significa que, a medida que aumenta la actividad solar, también lo hace el valor de F10.7 [4].

2. DESARROLLO

2.1 Implementación en el software ISIRIM

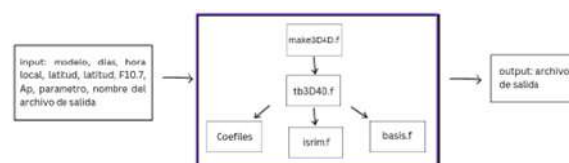


Figura 1. Estructura del software ISIRIM.

La hipótesis central es que el modelo ISIRIM, al ser recalibrado con coeficientes específicos para Jicamarca, reproducirá la ionósfera local. Los coeficientes se almacenan en archivos .txt, ubicados en el directorio "Coefiles" del software ISIRIM. Cada archivo, correspondiente a un parámetro, sigue un formato estricto (definido en las dos primeras líneas) que garantiza su correcta interpretación por el software.

Adicionalmente, se actualizó el código en Fortran para facilitar la lectura de estos archivos, permitiendo verificar si los coeficientes modelan adecuadamente la ionósfera en Jicamarca.

2.2 Modelado lineal y estimación de coeficientes

Siguiendo la metodología de Zhang, S.-R., & Holt, J. M. (2007) [3], se asumió que la variabilidad de cada parámetro (Ne, Te o Ti) en cada *bin* se puede describir mediante un modelo lineal:

$$P = \beta_0 + \beta_1 \cdot (f) + \beta_2 \cdot (a) + \beta_3 \cdot (f \times a)$$

Donde P es Ne, Te o Ti, los β son coeficientes de ajuste, y $f = (F107-135)/135$ y $a = (Ap-15)/15$ son los índices F107 y Ap normalizados. F107 es el índice de flujo solar a 10.7 cm del día anterior,

y A_p es el índice equivalente de rango cada 3 horas para las 3 horas previas. Aquí, β_{03} en el último término, que representa los efectos de los términos cruzados entre las actividades solar y magnética, resulta ser muy pequeño en la mayoría de los casos y, por lo tanto, este término se omite en nuestros estudios posteriores. [6,7]

2.3 Descarga de datos

Se generó un comando en la web de Madrigal escogiendo la categoría del instrumento: "Incoherent Scatter Radars". Con el instrumento Jicamarca IS Radar, que opera desde 1966, también se escogió el tipo de datos: "Faraday rotation with alternating code Long Pulse". Dicho comando se procedió a ejecutar en la terminal de una computadora con hardware Linux y se obtuvieron 209 experimentos que contienen los parámetros de nuestro interés que caracterizan la ionósfera: densidad de electrones, temperatura de electrones e iones.

A la vez se descargaron los valores de los índices de actividad geomagnética K_p , A_p (el índice equivalente de rango cada 3 horas para las 3 horas previas) y solar F10.7 (observable) de GFZ Potsdam [5], desde 1966 hasta 2025.

2.4 Procesamiento y filtrado

Se filtraron las mediciones de interés de los 209 experimentos y se concatenaron con los índices de actividad geomagnética (K_p y A_p) y el índice solar F10.7, correspondientes a cada medición. Se consideró eliminar aquellos experimentos en los que K_p fuera mayor a 4, a fin de reducir la influencia de las tormentas geomagnéticas. Posteriormente, se procedió a agrupar los datos de la siguiente manera:

- 12 *bins* mensuales.
- 24 *bins* horarios.
- 8 *bins* altitudinales (de 200 a 600 km, en intervalos de 50 km).

Esto genera un total de 2304 *bins*, y en cada uno se normalizaron los índices A_p y F10.7 según el modelo lineal que se asume para cada *bin*.

2.5 Visualización y validación histórica

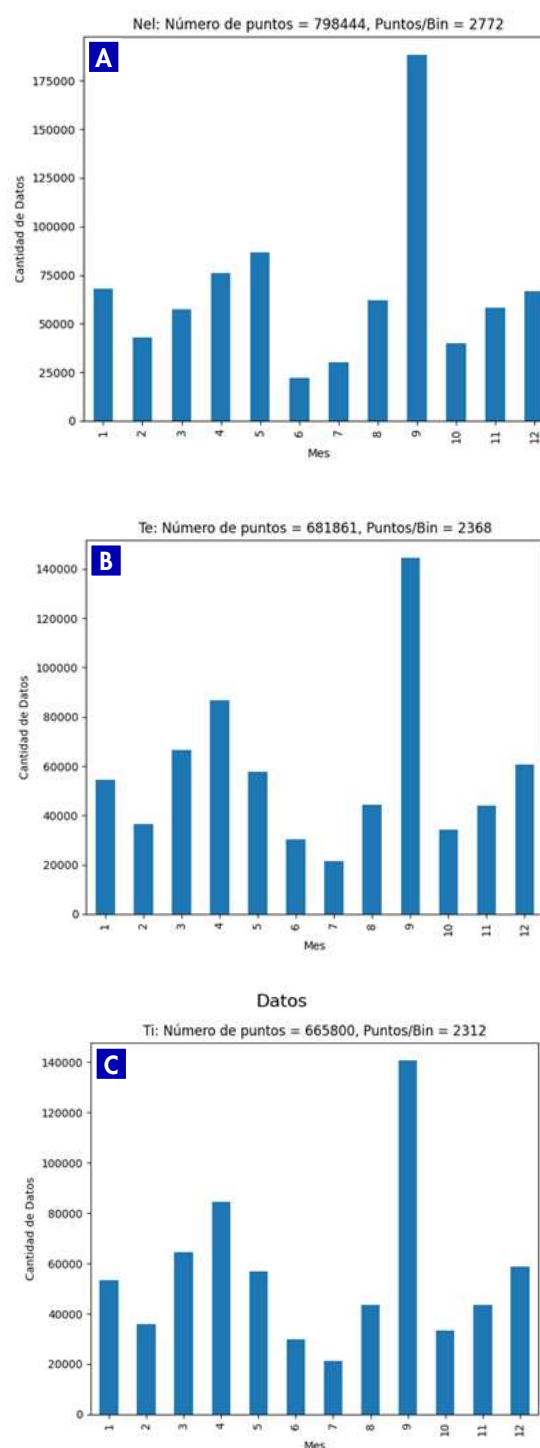


Figura 2. Histogramas de la cantidad de datos que se tiene de cada parámetro agrupados por meses: (a) densidad de electrones, (b) temperatura de electrones y (c) temperatura de iones.

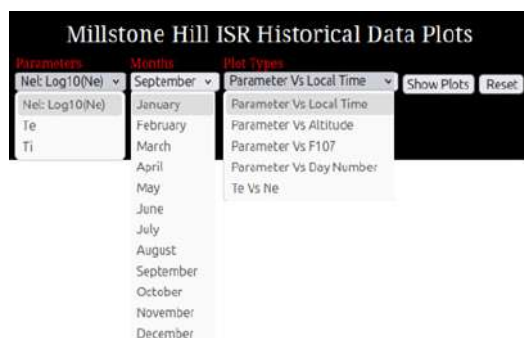


Figura 3. En la imagen se muestran todos los gráficos que se han producido de los datos históricos para la localidad de Millstone Hill [9].

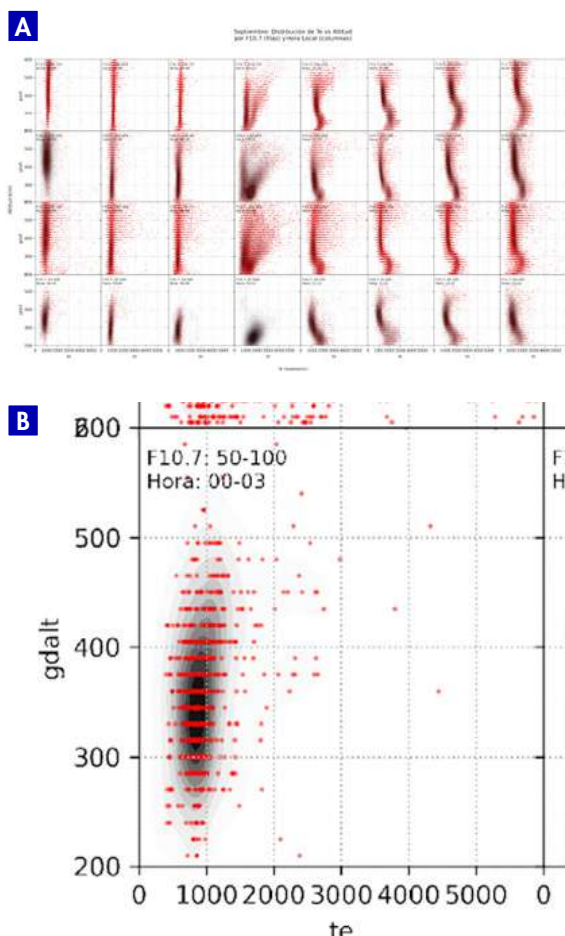


Figura 4. (a) Se presenta uno de los más de 100 gráficos elaborados a partir del bagaje de datos históricos. En este caso, se muestra la relación entre la temperatura de electrones y la altitud, agrupados según los valores del índice F10.7 y la hora local. (b) Se exhibe uno de los subgráficos, en el que los ejes corresponden a la temperatura de electrones y la altitud, para datos con valores de F10.7 entre 50 y 100 (en unidades de flujo solar) y registrados entre las 00:00 y las 03:00 horas locales.

Al identificar que se debe de tomar criterios estadísticos para la obtención correcta de los coeficientes del modelo lineal que se asume, se procedió también a reproducir el bagaje gráfico de los datos históricos de Millstone Hill adaptado

a Jicamarca. Con los 209 experimentos tratados y almacenados en la nube, se generaron más de 100 gráficos que permiten visualizar diversos aspectos de la variabilidad ionosférica. Estos gráficos facilitan la comparación y validación de los coeficientes estimados, evidenciando la consistencia del comportamiento de los parámetros en función de las variables temporales, altitudinales, Ap y F10.7 sin ser normalizadas.

3. RESULTADOS

- Se consolidó un *dataset* a partir de aproximadamente 209 experimentos históricos del radar de Jicamarca y se filtró para tener solo los datos que conciernen a la investigación.
- Se integraron los valores correspondientes a los índices Ap y F10.7, obtenidos de GFZ Potsdam, al *dataset* consolidado.
- Se generaron más de 100 gráficos basados en los datos históricos, lo que facilitó la visualización de la información y la evaluación preliminar para el ajuste de un modelo lineal.
- Se realizaron modificaciones en el programa ISRIM, actualizando funciones e incorporando nuevas líneas de código que permiten y permitirán la correcta lectura de los archivos de coeficientes generados.

4. DISCUSIÓN

Cuando se estimaron los coeficientes del modelo lineal, que se asume ajustarse a los datos de cada *bin*, se generó un mayor número de coeficientes en comparación con otras localidades. Se observó que para los modelos locales se obtiene un número fijo de 693 coeficientes (exceptuando Millstone Hill, que presenta datos en el rango de 100 km a 1000 km). Esto indica que, luego del proceso de agrupación descrito en secciones anteriores, es necesario realizar un paso adicional para reducir la cantidad de coeficientes y, al mismo tiempo, interpretar correctamente los encabezados de cada archivo .txt en el directorio "Coefiles".

También tomar en consideración que para hacer los gráficos de los datos históricos se tomó en cuenta el F107 observable, pero para generar los coeficientes se sugiere tomar un F10.7 de promedio móvil de 81 días calculado para el día actual en el centro.

5. CONCLUSIONES

- Se logró adaptar el modelo ionosférico ISRIM para la correcta lectura de la correcta generación de los coeficientes.
- La extracción, el filtrado y la estructuración de aproximadamente 209 experimentos históricos, junto con la concatenación de los índices geomagnéticos Kp, Ap y solar F10.7, han permitido generar un *dataset*.
- Se comprobó que, para los modelos locales, se genera un número fijo de 693 coeficientes (con excepción de Millstone Hill), lo cual sugiere la necesidad de un proceso adicional para reducir y optimizar la información contenida en los archivos de coeficientes.
- La generación de más de 100 gráficos basados en datos históricos evidencia la necesidad de aplicar métodos estadísticos para suplir la falta de datos en algunos *bins*.

6. RECOMENDACIONES

Se expone un listado de recomendaciones y aspectos aún por clarificar en esta investigación:

- Revisión de los encabezados de los archivos "Coefiles". Es importante examinar detenidamente las líneas de código del *software* ISRIM para determinar la correspondencia entre cada número en los encabezados de los archivos .txt y las variables asignadas. Se recomienda, además, establecer comunicación con el líder del proyecto, Zhang, para obtener aclaraciones adicionales.
- Análisis del proceso de estimación del modelo lineal. Se aconseja investigar en detalle el procedimiento que, tras asumir un modelo lineal y aplicar mínimos cuadrados, genera un número fijo de coeficientes. Revisar la literatura sobre el filtrado basado en una ventana de 3 meses por 3 horas podría ayudar a comprender la razón por la cual se requiere dicho número específico de coeficientes.
- Continuación del análisis comparativo de datos históricos. Es recomendable ampliar el análisis comparativo entre los datos históricos de Jicamarca y los de Millstone Hill, profundizando en los criterios de agrupación necesarios para optimizar el ajuste del modelo lineal.

7. AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer al Instituto Geofísico del Perú (IGP) por facilitar los recursos necesarios para la realización de la presente investigación y a mi asesor del proyecto, quien me apoyó constantemente en su elaboración.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Bilitza, D. Altadill, Y. Zhang, C. Mertens, V. Truhlik, P. Richards, L. McKinnell, and B. Reinisch, "International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions," *Space Weather*, vol. 15, pp. 418–429, 2017.
- [2] S. M. Radicella, "The NeQuick model genesis, uses and evolution," *Ann. Geophys.*, vol. 52, n°. 3–4, pp. 417–423, 2009.
- [3] M. C. Kelley, *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*, 2nd ed. Academic Press, 2009.
- [4] D. E. Gary, *Solar and Space Weather Radiophysics*. Springer, 2006.
- [5] GFZ Potsdam, "Data," 2025. [Online]. Available: <https://kp.gfz-potsdam.de/en/data>
- [6] S.-R. Zhang and J. M. Holt, "Ionospheric climatology and variability from long-term and multiple incoherent scatter radar observations: Climatology in eastern American sector," *J. Geophys. Res.*, vol. 112, A06328, 2007. doi:10.1029/2006JA012206.
- [7] J. M. Holt, S.-R. Zhang, and M. J. Buonsanto, "Regional and local ionospheric models based on Millstone Hill incoherent scatter radar data," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 29, n°. 8, pp. 1207–1210, 2002. doi:10.1029/2002GL014678.
- [8] S.-R. Zhang and J. M. Holt, "Climatology and variability of the ionosphere: Incoherent scatter radar observations," *AIP Conf. Proc.*, vol. 974, p. 71, 2008. doi:10.1063/1.2885035.
- [9] MIT Haystack Observatory, "Models. Madrigal." [Online]. Available: <http://madrigal.haystack.mit.edu/models/>

IDENTIFICACIÓN DE POSIBLES RAYOS CÓSMICOS CON EL RADAR DE JICAMARCA

**Identification of possible cosmic rays using the Jicamarca Radar*

Carlos Francisco García Hipólito

Pontificia Universidad Católica del Perú

Facultad de Ciencias e Ingeniería

cfgarcia1903@gmail.com

Asesores:

Danny Scipion, Karim Kuyeng
y David Wahl

Dirección en Ciencias del Geoespacio

RESUMEN

La detección de rayos cósmicos por radar consiste en la identificación de rastros de ionización producidos por cascadas atmosféricas. Estos eventos podrían generar frecuencias de plasma del mismo orden que la frecuencia de operación del radar principal (50 MHz) del Radio Observatorio de Jicamarca, sede del Instituto Geofísico del Perú, sugiriendo su posible detectabilidad. Investigaciones previas reportaron eventos anómalos en los RTI de experimentos de meteoros realizados en 2007, que podrían estar asociados a rayos cósmicos. En este trabajo, se analizó la data sin procesar de mayo y septiembre de 2007, así como de junio de 2023 y 2024, aplicando filtros basados en una significancia superior a 5 sigmas, coincidencia en tres canales y una duración un IPP por al menos tres muestreos consecutivos. El nuevo análisis confirmó la presencia de los eventos anómalos en los datos de 2007, respaldando el estudio previo, y permitió su caracterización, sugiriendo que no corresponden a ruido de la electrónica del radar. Sin embargo, no se identificaron señales similares en los datos de 2023 y 2024. Los resultados obtenidos podrían usarse para justificar la continuación del estudio de los eventos anómalos identificados y la evaluación de su posible detección en otras configuraciones de experimentos.

Palabras clave: Rayos cósmicos, detección por radar, eventos anómalos

ABSTRACT

The detection of cosmic rays by radar relies on identifying ionization trails produced by atmospheric cascades. These events could generate a plasma frequency of the same order as the operating frequency of the main radar (50 MHz) at the Jicamarca Radio Observatory, part of the Geophysical Institute of Peru, suggesting their possible detectability. Previous studies reported anomalous events in the RTI of meteor experiments conducted in 2007, which could be associated with cosmic rays. In this work, we analyzed raw data from May and September 2007, as well as June 2023 and 2024, applying filters based on a significance threshold above 5 sigmas, coincidence in three channels, and a duration of one IPP for at least three consecutive samplings. The new analysis confirmed the presence of anomalous events in the 2007 data, supporting the previous study, and allowed their characterization, suggesting that they do not correspond to noise from the radar's electronics. However, no similar signals were identified in the 2023 and 2024 data. The obtained results could be used to justify the continuation of the study of the identified anomalous events and the evaluation of their possible detection in other experimental configurations.

Keywords: Cosmic rays, Radar detection, Anomalous events

1. INTRODUCCIÓN

Cuando un rayo cósmico de ultra alta energía (UHECR) interactúa con la atmósfera, se produce una serie de interacciones conocida como cascada atmosférica extensa (EAS). El método tradicional de detección de rayos cósmicos implica registrar las partículas producidas en la EAS que llegan a detectores a nivel del suelo. Sin embargo, la detección de UHECR por radar es una técnica que ha ganado popularidad en las dos últimas décadas. Esta técnica consiste en medir los ecos producidos por los rastros de ionización de las cascadas atmosféricas [3].

Para las densidades de electrones típicas producidas por UHECRs, con energías superiores a 1 EeV, la detección es factible para frecuencias entre 30 MHz y 100 MHz [4]. Debido a esto, el radar del IGP-ROJ (50 MHz) es ideal para este propósito.

En el pasado se ha estudiado la posibilidad de detectar rayos cósmicos con la antena principal de Jicamarca [5,6], encontrando eventos anómalos en datos de 2007 (Figura 1) que podrían corresponder a rastros de ionización de EAS. Sin embargo, la investigación no fue continuada debido a falta de confirmación en experimentos posteriores.

El presente proyecto consistió en analizar nuevamente los datos de 2007 con el objetivo de implementar un algoritmo para identificar eventos anómalos, almacenar dichos eventos y caracterizarlos. Además, se buscó repetir el análisis con experimentos de meteoros más recientes.

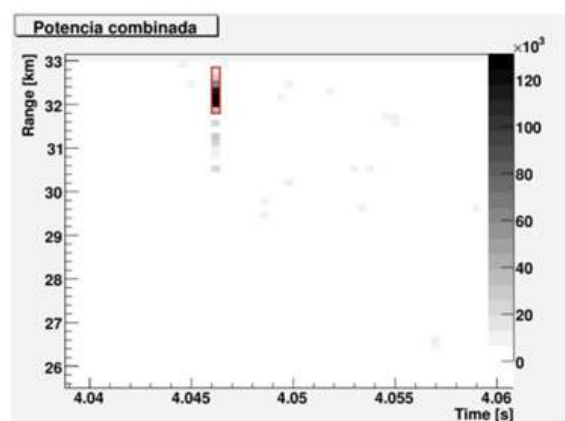


Figura 1. Gráfico Range-Time Intensity (RTI) de un evento anómalo típico encontrado por el estudio previo.

2. DESARROLLO

2.1 Datos

Para el año 2007, se cuenta con datos de dos fechas: el 6 de mayo y el 1 de septiembre.

- En el experimento de mayo, se realizaron mediciones en tres canales, con un IPP de 400 ms. El pulso de transmisión estuvo modulado con un código Barker 13. Las altitudes registradas abarcan desde 25.05 km hasta 63.30 km.
- En el experimento de septiembre, también se tomaron mediciones en tres canales, con un IPP de 1200 ms. En este caso, el pulso de transmisión no estaba codificado. Las altitudes medidas van de 16.05 km a 109.95 km.

También se analizaron los datos del 5 de junio de 2023 y del 10 de junio de 2024.

- En el experimento de 2023, se registraron mediciones en cuatro canales, con un IPP de 400 ms. El pulso de transmisión estuvo codificado con un código Barker 13 con 26 baudios. Las altitudes observadas se encuentran entre -0.60 km y 57.82 km.
- En el experimento de 2024, se realizaron mediciones en ocho canales, con un IPP de 1200 ms. En este caso, el pulso de transmisión no fue codificado. Las altitudes registradas van desde -0.30 km hasta 142.05 km.

2.2 Procesamiento

2.2.1 Lectura

La data se encontraba almacenada en archivos de extensión .r (raw data), que pueden ser leídos utilizando la librería Signal Chain [7] para Python. Sin embargo, esta librería no permite extraer la información necesaria para el análisis de eventos anómalos. Es por ello que fue necesario importar una unidad de lectura de voltaje de Signal Chain e iterar sobre cada perfil para recolectar las potencias medidas. Las potencias son almacenadas en escala lineal, por lo que además se realiza una conversión a decibeles.

Debido al gran volumen de datos que se tiene, por razones de eficiencia computacional, se optó por procesar un archivo a la vez en lugar de todo el experimento al mismo tiempo.

El proceso de lectura de datos culmina con la construcción de una matriz de potencias por cada canal, donde cada columna corresponde a un perfil (ordenados en tiempo) y cada fila corresponde a las muestras tomadas a una altitud determinada. Además, se registra un vector de marcas de tiempo y un vector de altitudes.

2.2.2 Decodificación

Durante la lectura de datos, se realiza la decodificación de señal (en caso sea necesario). El proceso de decodificación se realiza correlacionando la señal recibida con el código enviado. Esto se implementó con la función *correlate* de librería *numpy*.

2.2.3 Interpolado y extrapolado de marcas de tiempo

Debido a que, por defecto, cada bloque mantiene una única marca de tiempo para todos sus perfiles, fue necesario calcular esta información de manera individual para cada perfil. Para ello, se utilizaron las marcas de tiempo de los bloques para construir un interpolador lineal. Además, en el último tramo, se conservó la pendiente del penúltimo segmento para poder extrapolar las marcas de tiempo.

2.2.4 Filtro de significancia

El primer criterio que deben satisfacer los eventos anómalos consiste en estar 5 sigma por encima del ruido de fondo. Para filtrar las señales que cumplen esto, se consideró que el ruido podría variar con la altitud, por lo cual se consideró que una muestra es significativa si está 5 desviaciones estándar por encima del promedio de potencias de la altitud a la que se encuentra; es decir, el promedio de su fila en la matriz de potencias de su canal. Con este filtro se obtienen matrices booleanas con la misma forma que las matrices de potencias, en la que cada elemento de matriz es verdadero o falso según si está por encima o por debajo del umbral de significancia a de su fila (altitud), respectivamente.

2.2.5 Filtro de coincidencia

Con el objetivo de no considerar errores en los datos, se admitieron solamente los eventos que estaban presentes en al menos tres canales. Con

este filtro obtendríamos una sola matriz booleana donde figuran como verdaderas las muestras significantes y coincidentes.

2.2.6 Filtro de duración y cantidad de muestreos

Para descartar en su mayoría a los ecos de meteoros, electrochorro u otros fenómenos de alta potencia respecto al ruido, se buscaron eventos con una duración de exactamente 1 IPP (la mínima duración posible medible en cada experimento) y al menos tres muestreos consecutivos (el evento debe ser medido a lo largo de al menos tres altitudes consecutivas).

2.3 Selección de eventos de interés

Tras aplicar estos filtros, se obtienen los tiempos y altitudes de los eventos que los satisfacen, lo cual permite graficar los RTI con zoom en una región cercana a estos. Estos RTI se usaron para descartar manualmente los que corresponden a electrochorro o ecos de meteoros. La data específica de los eventos anómalos encontrados (potencias, hora y altitudes) fue almacenada para su posterior caracterización estadística.

3. RESULTADOS

3.1 RTI de evento anómalo típico

Un ejemplo de evento anómalo es el que se observa en la Figura 2.

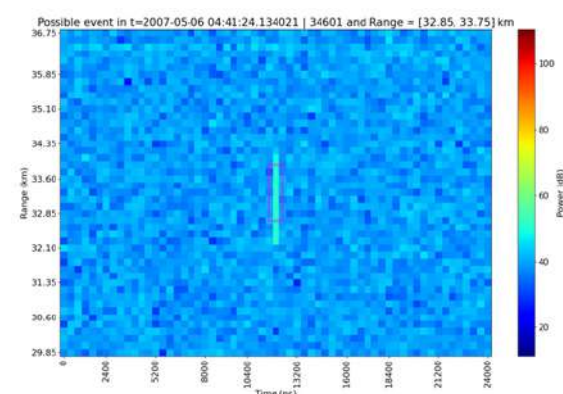


Figura 2. Gráfico RTI de un evento anómalo encontrado en data del 6 de mayo de 2007.

Los píxeles encerrados por el cuadrado magenta son los únicos que satisfacen los tres criterios

mencionados en la sección de procesamiento. Cabe resaltar que, si bien el rastro abarca más píxeles, solo se consideran aquellos que satisfacen los criterios mencionados en la sección de procesamiento.

3.2 Cantidad de eventos

En la data de mayo de 2007 se encontraron 3832 eventos anómalos que cumplen las características buscadas. En el caso de septiembre de 2007 solo fueron encontrados 189 eventos. No se encontró ningún evento anómalo en los experimentos de 2023 y 2024.

Los gráficos de las siguientes subsecciones corresponden a la data de mayo de 2007, ya que la de septiembre no es suficiente como para observar tendencias.

3.3 Potencia media por eventos

Para la data de mayo (Figura 3) se encontró que la potencia media (el promedio de potencias en cada muestreo de un evento) sigue una distribución similar a una gaussiana centrada en 55.93 dB, con una desviación estándar de 4.66 dB.

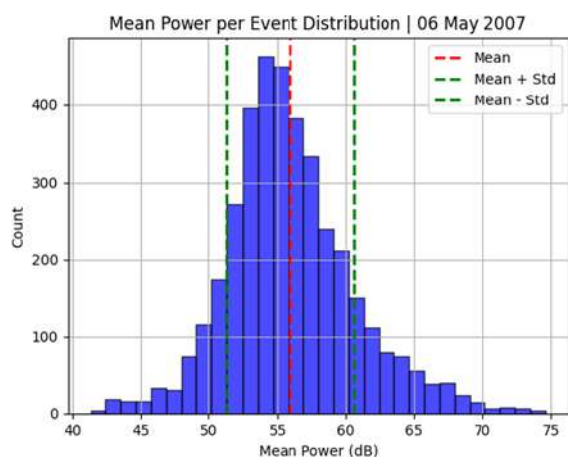


Figura 3. Distribución de potencia medias en los eventos de mayo de 2007.

3.4 Altitud media por evento

La Figura 4 muestra que la cantidad de eventos anómalos disminuye con la altitud. Además, es posible observar que, pasados los 50 km, el conteo de eventos vuelve a aumentar. Esto se

asemeja a la distribución esperada de eventos por altura [6], pero con el mínimo aproximadamente 15 km por debajo del valor teórico.

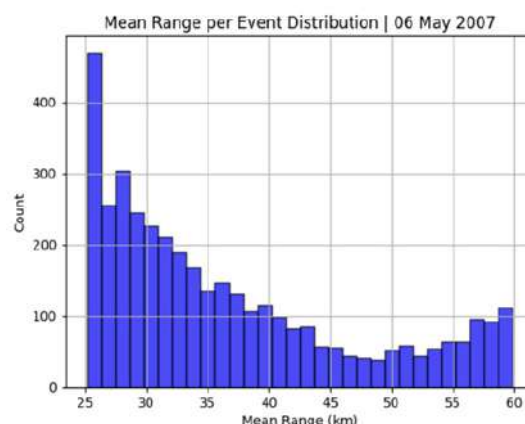


Figura 4. Distribución de altitudes promedio en los eventos de mayo de 2007.

3.5 Longitud de rastro

En la Figura 5 se muestra que la gran mayoría de eventos tienen rastros de entre 300 m y 600 m de extensión. Realmente, esta longitud es mayor si consideramos también los muestreos que conforman el rastro, pero no son significantes o coincidentes. Además, es posible notar que hay un evento con un rastro de 4.95 km.

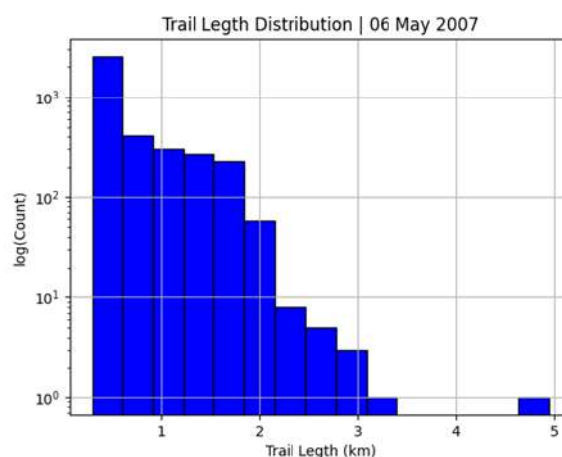


Figura 5. Distribución de las longitudes de rastro de los eventos de mayo de 2007. El eje vertical se encuentra en escala logarítmica.

3.6 Distribución temporal

Las horas en que se registraron los eventos anómalos pueden observarse en la Figura 6. Se

puede notar que la distribución presenta picos aproximadamente a las 04:15, 05:30 y 06:15 a. m. Además, se observa que la cantidad de eventos durante el pico de las 04:15 a. m. es bastante menor que en los otros dos.

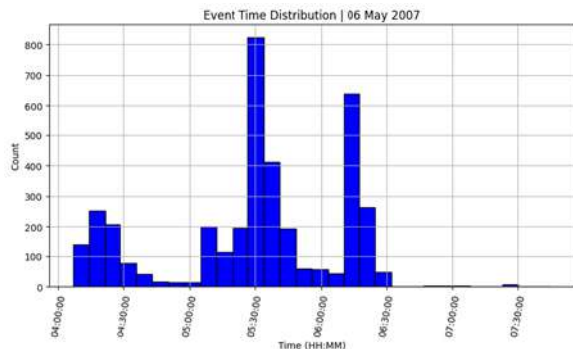


Figura 6. Distribución temporal de los eventos anómalos en la data de mayo de 2007.

3.7 Potencia media vs. longitud del rastro

La Figura 7 muestra que existe una correlación de 0.52 entre la potencia media del evento y la longitud de su rastro. Es posible observar que los eventos de mayor potencia tienden a tener rastros más largos. Además, el evento de mayor potencia es también el que presenta el rastro más largo.

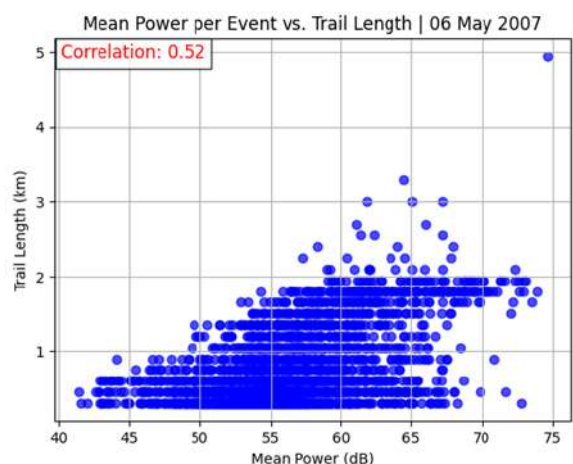


Figura 7. Gráfico de dispersión de la longitud del rastro según la potencia media del evento para la data de mayo de 2007.

4. DISCUSIÓN

La falta de eventos anómalos en los experimentos de 2023 y 2024 es algo bastante notable. Por el momento, se desconoce la razón, pero podría

estar relacionado al ciclo solar, configuración del experimento, sistema de adquisición, etc.

Las distribuciones mostradas para la potencia media, altura media, longitud de rastro y distribución temporal podrían sugerir que estos eventos no son ruido de la electrónica del radar. Las características de este tipo de ruido dificultan explicar la relación entre la cantidad de eventos y la altitud o la hora del evento.

El mínimo de cantidad de eventos en torno a los 50 km resulta bastante interesante, ya que hace que la distribución de eventos por altura se acerque a la esperada para rayos cósmicos, aunque sin coincidir por completo.

Por otro lado, la menor cantidad de eventos a las 04:15 a. m. podría explicarse por un mayor ruido debido al paso de la Vía Láctea en torno a esa hora (Figura 8).

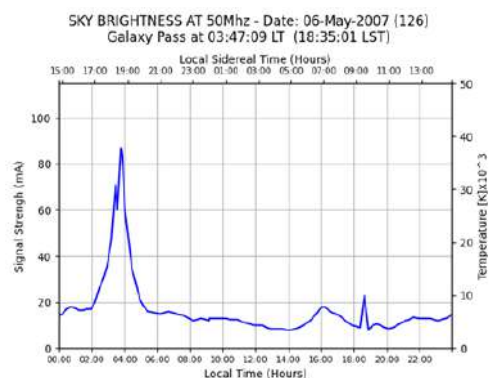


Figura 8. Ruido sobre el cielo de Jicamarca para el día 6 de mayo de 2007.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo confirma la existencia de eventos anómalos en los experimentos del 6 de mayo y 1 de septiembre de 2007. Estos eventos siguen distribuciones de potencia, altitud y tiempo definidas, lo que hace pensar que no es un ruido aleatorio de la electrónica del radar; sin embargo, por el momento, esto no es algo confirmado.

Por otro lado, los experimentos más actuales carecen de eventos de este tipo, lo cual es algo en lo que se debería profundizar.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda analizar más experimentos buscando eventos anómalos.

- Se recomienda buscar experimentos con configuraciones similares a la de mayo de 2007, o realizar un nuevo experimento replicando esta configuración.
- Se recomienda implementar un clasificador basado en redes neuronales para distinguir los eventos anómalos y los otros tipos de eventos (electrochorro o meteoros), para facilitar la recolección de datos.
- [8] S.-R. Zhang and J. M. Holt, "Climatology and variability of the ionosphere: Incoherent scatter radar observations," *AIP Conf. Proc.*, vol. 974, p. 71, 2008. doi:10.1063/1.2885035.
- [9] MIT Haystack Observatory, "Models. Madrigal." [Online]. Available: <http://madrigal.haystack.mit.edu/models/>

7. AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer al Instituto Geofísico del Perú (IGP) por facilitar los recursos necesarios para la realización de la presente investigación. Además, quisiera expresar mi gratitud a mis asesores por su guía y apoyo a lo largo del proyecto, así como a Alexander Valdez por instruirme en el uso de Signal Chain.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Bilitza, D. Altadill, Y. Zhang, C. Mertens, V. Truhlik, P. Richards, L. McKinnell, and B. Reinisch, "International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions," *Space Weather*, vol. 15, pp. 418–429, 2017.
- [2] S. M. Radicella, "The NeQuick model genesis, uses and evolution," *Ann. Geophys.*, vol. 52, n°. 3–4, pp. 417–423, 2009.
- [3] M. C. Kelley, *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*, 2nd ed. Academic Press, 2009.
- [4] D. E. Gary, *Solar and Space Weather Radiophysics*. Springer, 2006.
- [5] GFZ Potsdam, "Data," 2025. [Online]. Available: <https://kp.gfz-potsdam.de/en/data>.
- [6] S.-R. Zhang and J. M. Holt, "Ionospheric climatology and variability from long-term and multiple incoherent scatter radar observations: Climatology in eastern American sector," *J. Geophys. Res.*, vol. 112, A06328, 2007. doi:10.1029/2006JA012206.
- [7] J. M. Holt, S.-R. Zhang, and M. J. Buonsanto, "Regional and local ionospheric models based on Millstone Hill incoherent scatter radar data," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 29, no. 8, pp. 1207–1210, 2002. doi:10.1029/2002GL014678.

AUTOMATIZACIÓN DEL PROGRAMA DE CORRECCIÓN PREDICTIVA DE DATOS DE MAGNETÓMETROS USANDO RNNs

**Automation of the predictive data correction program for magnetometers using RNNs*

Andres Yasuhiro Requejo Paredes

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ciencias

andres.requejo.p@uni.pe

Asesor:

César De la Jara Sánchez

Dirección en Ciencias del Geoespacio

RESUMEN

La medición del campo magnético terrestre es fundamental para estudios geofísicos, monitoreo de la actividad solar y aplicaciones en navegación. Los magnetómetros fluxgate registran variaciones en la intensidad y dirección del campo magnético en el tiempo, generando magnetogramas que reflejan la dinámica geomagnética con alta precisión. Sin embargo, estos registros pueden contener errores debido a diversos factores. Este proyecto aborda la automatización de un programa de corrección predictiva de datos de magnetómetros mediante el uso de redes neuronales recurrentes (RNNs). La metodología empleada consistió en la recopilación y preprocesamiento de magnetogramas, la implementación de una arquitectura LSTM entrenada con datos históricos, y la evaluación de su desempeño en la corrección y predicción de valores atípicos o ausentes simulando la estructura del servidor, considerando la actualización de los datos minuto a minuto.

Palabras clave: Campo magnético, magnetogramas, redes neuronales recurrentes

ABSTRACT

The measurement of the Earth's magnetic field is essential for geophysical studies, solar activity monitoring, and navigation applications. Fluxgate magnetometers record variations in the intensity and direction of the magnetic field over time, generating magnetograms that accurately reflect geomagnetic dynamics. However, these records may contain errors due to various factors. This project focuses on the automation of a predictive correction program for magnetometer data using recurrent neural networks (RNNs). The methodology involved the collection and preprocessing of magnetograms, the implementation of an LSTM architecture trained with historical data, and the evaluation of its performance in correcting and predicting anomalous or missing values while simulating the server structure, considering the minute-by-minute data update.

Keywords: Magnetic field, magnetograms, recurrent neural networks

1. INTRODUCCIÓN

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) investiga y monitorea fenómenos geofísicos en el país, incluyendo sismos, volcanes, la atmósfera y el campo magnético terrestre. Específicamente, existe una red de magnetómetros distribuidos por América del Sur que conforman la Low Latitude Ionospheric Sensor Network (LISN), dedicada al monitoreo de la variación espacial y temporal del campo magnético terrestre. [1]

El monitoreo de este campo magnético es clave para la navegación, la exploración de recursos y el estudio del clima espacial. Por tanto, su precisión es fundamental para estudios geofísicos, pero su funcionamiento puede generar anomalías en la medición debido a factores como el ruido térmico, interferencias electrónicas, calibración inadecuada o sensibilidad a campos cercanos. Estas anomalías pueden distorsionar la interpretación del campo magnético terrestre y dificultar la identificación de variaciones naturales. Para corregir estas anomalías, se emplea la arquitectura LSTM (Long Short-Term Memory), una red neuronal recurrente capaz de modelar dependencias temporales en los datos. Las LSTM pueden aprender patrones en la evolución de las mediciones al filtrar ruido y compensar desviaciones en tiempo real.

2. DESARROLLO

2.1 Tratamiento de datos

2.1.1 Procesamiento de datos

Los archivos que contienen la medición de los magnetómetros se descargan directamente desde la página web del servidor de la red LISN. Estos archivos se presentan en formato texto ('.min') que muestran los datos tabulados. El contenido comienza por el encabezado que identifica a la estación perteneciente, seguido por el nombre de cada parámetro temporal o físico medido de la columna correspondiente. En primer lugar, tenemos el instante de medición: fecha, hora y minuto. Por otro lado, un magnetómetro mide la intensidad (horizontal H y vertical Z) y la declinación magnética utilizando el efecto Hall. Estos parámetros son los que se utilizan para el cálculo de las variables inclinación magnética e intensidad total del campo magnético F, que son mostrados tabuladamente en el archivo descargado. En la Figura 2 se presenta como ejemplo el registro de medición de la fecha

03/07/2004 realizada por la estación de Jicamarca.

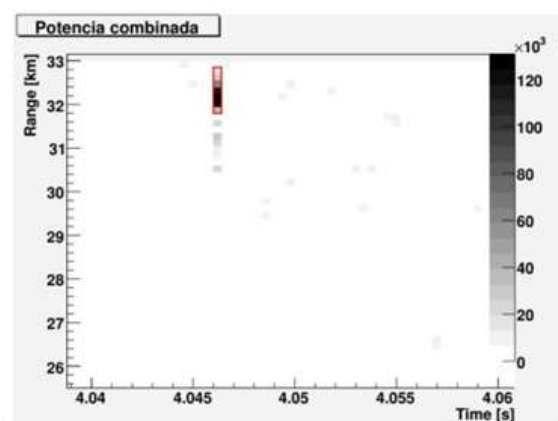


Figura 1. Archivos descargados del servidor LISN mostrados minuto a minuto.

2.1.2 Clasificación de anomalías en magnetogramas

Las anomalías en los magnetogramas pueden originarse por diversos factores técnicos y ambientales. Un error puntual suele deberse a fallos en los sensores o interferencias electromagnéticas que generan valores atípicos en el registro. La falta de datos puede ser causada por interrupciones en la adquisición, fallos en la alimentación del instrumento o problemas en la comunicación, lo que deja brechas en la serie temporal. El salto de línea ocurre cuando hay desajustes en la sincronización del registro, cambios abruptos en la calibración del equipo o errores en la codificación, lo que genera discontinuidades que afectan la coherencia del magnetograma.

2.2 Implementación del modelo LSTM

El uso de redes neuronales LSTM para la corrección de magnetogramas se justifica por su capacidad para modelar relaciones temporales de largo alcance en datos secuenciales, como los registros magnéticos. Dado que los magnetogramas pueden contener ruidos, anomalías o variaciones sistemáticas debido a condiciones instrumentales o ambientales, una LSTM puede aprender patrones históricos y corregir desviaciones basándose en la dinámica del campo magnético. Además, este método ofrece una adaptación dinámica respecto de la variación de la longitud de secuencia.

2.2.1 Entrenamiento del modelo y funcionamiento del programa

El entrenamiento del modelo es un paso fundamental que garantizará la buena corrección de los magnetogramas. En primer lugar, se preparó el conjunto de datos registrados por la estación de Ancón en el intervalo de 2000 a 2019, previniendo las anomalías antes mencionadas. Además, se utiliza la función de pérdida de error cuadrático medio (MSE) para el proceso comparativo entre los valores predichos y los valores reales.

El algoritmo del programa considera secuencias de 10 valores consecutivos para cada una de las componentes D, H y Z, en simultáneo, como entrada para producir el siguiente valor correspondiente. Así, pasados los primeros 10 minutos de la lectura del magnetómetro, se puede comenzar con la predicción de los valores correspondiente al minuto 11.

El lenguaje de programación utilizado fue Python 3.9.18. Las principales librerías utilizadas fueron las siguientes:

- Numpy: Para realizar cálculos complejos entre arreglos.
- Pandas: Para el manejo de datos tabulados.
- Matplotlib: Para la representación gráfica de los datos.
- Tensorflow y Scikit-learn: Para el entrenamiento del modelo.

La Figura 2 muestra los parámetros del modelo entrenado LSTM2.

Model: "functional"

Layer (type)	Output Shape	Param #
input_layer (InputLayer)	(None, 10, 3)	0
lstm (LSTM)	[(None, 64), (None, 64), (None, 64)]	17,408
repeat_vector (RepeatVector)	(None, 1, 64)	0
lstm_1 (LSTM)	(None, 1, 64)	33,024
time_distributed (TimeDistributed)	(None, 1, 3)	195

Total params: 50,627 (197.76 KB)

Trainable params: 50,627 (197.76 KB)

Non-trainable params: 0 (0.00 B)

Figura 2. Parámetros del entrenamiento del modelo LSTM2.

2.3 Automatización del programa

2.3.1 Simulación de entorno LISN

Se simula la recopilación de datos en tiempo

real por el servidor de LISN, registrando minuto a minuto los datos de un día específico en un archivo nuevo, imitando así el funcionamiento de un magnetómetro real. Para agilizar el proceso, este registro se ejecuta a una velocidad acelerada, donde 30 minutos de datos se generan cada 3 segundos, permitiendo una simulación más eficiente sin comprometer la estructura temporal del magnetograma.

2.3.2 Automatización del programa

Ahora, la ejecución del programa de corrección se automatiza para operar de manera continua y eficiente. Primero, se registra el tiempo actual y luego el programa se ejecuta cada 3 minutos, verificando la adición de nuevos datos y activándose únicamente cuando haya información nueva. Este proceso se mantiene en funcionamiento hasta completar el registro del día, asegurando una corrección constante y coherente a lo largo del tiempo.

3. RESULTADOS

Se realizaron diversas pruebas en registros de distintas estaciones y diversos días del año. En esta sección, se presenta el registro de dos días de la estación de Jicamarca.

3.1 Simulación de recopilación de datos en tiempo real

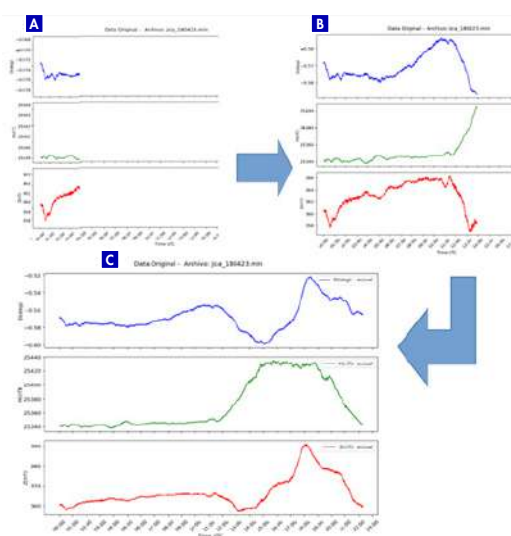


Figura 3. La imagen muestra la evolución de datos en el tiempo a través de tres etapas de procesamiento. (a) Los datos originales registrados hasta las 04:00 UTC. (b) Se extiende la información hasta las 14:00 UTC. Finalmente, (c), se completa el registro de datos.

Con el fin de probar la eficiencia de la automatización del programa correctivo, se implementó un programa simple de simulación de la recopilación de datos. Ver Figura 3.

3.2 Automatización del proceso

3.2.1 Corrección de error puntual

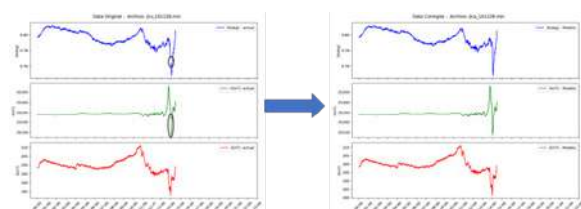


Figura 4. Corrección automática para un magnetograma con error puntual.

3.2.2 Corrección de falta de datos



Figura 5. Corrección automática para un magnetograma con falta de datos.

4. DISCUSIÓN

- La Figura 3 muestra que, a medida que avanza la simulación, los datos se estabilizan y adoptan una estructura más coherente con la evolución esperada del campo magnético.
- El proceso de corrección de magnetogramas, como se observa en las Figuras 4 y 5, abarca tanto la eliminación de errores puntuales como la reconstrucción de datos faltantes, mejorando la calidad y continuidad de los registros magnéticos. En el caso del error puntual, los gráficos originales muestran caídas abruptas en las componentes del campo magnético (D, H y Z). Tras aplicar la corrección, se observa en las imágenes que esta anomalía ha sido eliminada, restituyendo una evolución más coherente de los datos. Por otro lado, en la corrección de falta de datos, los gráficos originales presentan interrupciones evidentes, marcadas en los círculos, debido

a fallos en la adquisición o almacenamiento de información. Luego de la corrección, las imágenes muestran que estas brechas han sido rellenadas mediante el modelo predictivo, asegurando la continuidad de las series temporales sin distorsionar la dinámica real del campo magnético. La comparación entre los datos originales y corregidos confirma la efectividad de los métodos aplicados, permitiendo obtener magnetogramas más precisos y confiables para el análisis de variaciones geomagnéticas y su aplicación en estudios científicos y operacionales.

- Se presentaron escenarios en los que se observaron magnetogramas con más de una anomalía tipo error puntual, la cual se logró corregir adecuadamente.

5. CONCLUSIONES

- La aplicación de LSTM en la corrección de magnetogramas ha demostrado ser efectiva para eliminar errores puntuales y reconstruir datos faltantes, mejorando la continuidad y coherencia de los registros.
- La simulación de la recopilación de datos del servidor LISN en tiempo real permitió validar la funcionalidad del programa en condiciones controladas, imitando el flujo de datos de un magnetómetro real. Esto aseguró que el algoritmo pudiera adaptarse a la llegada progresiva de información y realizar correcciones dinámicas sin intervención manual.
- La implementación del programa correctivo automatizado permite la detección y mitigación de anomalías en tiempo real, garantizando la generación de magnetogramas más precisos y confiables.

6. RECOMENDACIONES

Para futuros trabajos, se recomienda optimizar el proceso de entrenamiento del modelo LSTM utilizando la mayor cantidad posible de archivos adecuados, es decir, registros de magnetogramas sin anomalías que hayan sido revisados manualmente. Esto permitirá mejorar la precisión del modelo al minimizar la influencia de datos erróneos en su aprendizaje. Además, dado que existen días con diferentes niveles de oscilación en los registros magnéticos, se sugiere considerar únicamente aquellos clasificados como

“calmados”, ya que estos proporcionan una referencia más estable para el entrenamiento y la posterior corrección de los datos. Finalmente, sería interesante explorar un enfoque en el que el entrenamiento del modelo incorpore la variable de estación del año, permitiendo así una corrección más específica y adaptada a las variaciones geomagnéticas estacionales. Esto contribuiría a mejorar aún más la precisión del modelo y su aplicabilidad en distintas condiciones geofísicas.

7. AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer al Instituto Geofísico del Perú (IGP) por facilitar los recursos necesarios para la realización de la presente investigación, la cual sirvió para optar por el título de físico. De esta manera, logré uno de los objetivos profesionales más importantes hasta el momento. Asimismo, expreso mi profundo agradecimiento a mi asesor, César De la Jara, por su guía y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Radio Observatorio de Jicamarca, IGP, Low Altitude Ionospheric Sensor Network (LISN), 2017.
- [2] W. Sullivan, Deep Learning with Python: Illustrated Guide for Beginners and Intermediates. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Warsaw, 1996.
- [3] I. Hrvoic and L. Newitt, “Instruments and methodologies for measurements of the Earth’s magnetic field,” 2011.

CÁLCULO DE PARÁMETROS IONOSFÉRICOS A PARTIR DE DATOS DE RECEPTORES GPS/GNSS

**Ionospheric parameter calculation from GPS/GNSS receiver data*

Jose Gabriel Huacachi Bazan

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ciencias

jose.huacachi.b@uni.pe

Asesores:

César De la Jara

y Giorgio Picanco

Dirección en Ciencias del Geoespacio

RESUMEN

En este trabajo se procesaron datos RINEX de redes GNSS para caracterizar la variabilidad ionosférica mediante índices como ROTI, SIDX y dTEC. Se empleó el *software* OASIS para automatizar la conversión de datos y generar mapas regionales que muestran la evolución de estos parámetros, permitiendo identificar patrones y perturbaciones en la ionósfera. Este estudio optimiza el análisis de datos GNSS y mejora la visualización de índices ionosféricos para futuras investigaciones.

Palabras clave: GNSS, ionósfera, RINEX, TEC, ROTI, SIDX, dTEC, OASIS.

ABSTRACT

This study processed RINEX data from GNSS networks to characterize ionospheric variability using indices such as ROTI, SIDX, and dTEC. The OASIS software was used to automate data conversion and generate regional maps showing the evolution of these parameters, allowing for the identification of patterns and disturbances. This work optimizes GNSS data analysis and enhances ionospheric index visualization for future research.

Keywords: GNSS, ionosphere, RINEX, TEC, ROTI, SIDX, dTEC, OASIS.

1. INTRODUCCIÓN

La ionósfera es una de las capas más importantes de la atmósfera para las telecomunicaciones, ya que su alta concentración de electrones libres influye en la propagación de ondas de radio y señales satelitales. Se extiende aproximadamente entre los 60 km y 800 km de altitud y se divide en distintas regiones (D, E y F), cada una con efectos específicos sobre las señales electromagnéticas [1].

Uno de los parámetros clave para su estudio es el Contenido Total de Electrones (TEC), que mide la densidad electrónica a lo largo de la ionósfera. Su variabilidad afecta la precisión de sistemas de posicionamiento como el GPS y otros sistemas GNSS, por lo que su monitoreo es fundamental.

El TEC puede calcularse a partir de datos registrados por receptores GNSS en formato RINEX, permitiendo obtener otros parámetros bajo ciertos modelos simplificados. Su análisis ayuda a mejorar la precisión de la navegación satelital y a comprender mejor la dinámica ionosférica.

Este trabajo se centra en la implementación de parámetros ionosféricos basados en datos GNSS, además de obtener mapas regionales continuos para una mejor visualización.

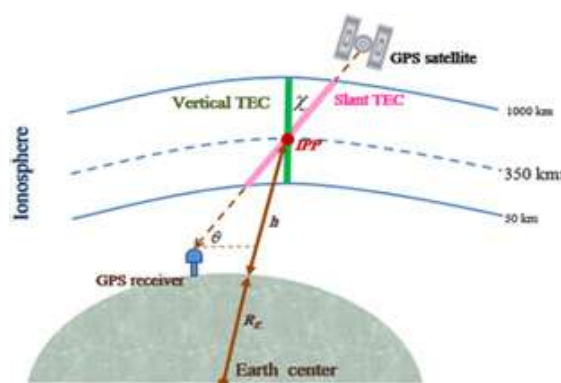


Figura 1. Esquema de la geometría empleada para la medición del TEC empleando señales satelitales.

2. DESARROLLO

2.1 Diseño e implementación

Para la obtención de variables ionosféricas, se empleó el programa OASIS (Open-Access System for Ionospheric Studies), una herramienta que automatiza el procesamiento de datos GNSS. Los datos utilizados corresponden al formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format),

que almacena observaciones satelitales como pseudodistancias y fases de onda. Mediante OASIS, se obtuvieron parámetros ionosféricos clave derivados del TEC, como el dTEC (disturbance Total Electron Content), el ROTI (Rate of TEC Index) y el SIDX (Scintillation Index), este último utilizado para medir la intensidad de las cintilaciones ionosféricas, fluctuaciones en la señal GNSS causadas por irregularidades en la ionósfera. Para un procesamiento preciso, además de los datos RINEX, OASIS requiere información sobre las órbitas satelitales [2].

1	2.11	OBSERVATION DATA	M (MIXED)	RINEX VERSION / TYPE
2	teqc	2019Feb25	20241010 03:36:19UTC000 / RUN BY / DATE	
3	SALU			MARKER NAME
4	416400001			MARKER NUMBER
5	RBMC	IBGE		OBSERVER / AGENCY
6	5750R51599	TRIMBLE NETR9	5.60	REC # / TYPE / VERS
7	1551129671	TRM115000.00	NONE	ANT # / TYPE
8	0.0000	0.0000	0.0000	ANTENNA: DELTA H/E/N
9	4566947.9069	-4443898.4971	-286674.8112	APPROX POSITION XYZ
10	17	C1 C2 C5 C7 C8	L1 L2 L5	L7# / TYPES OF OBSERV
11		LB P1 P2 S1 S2 S5 S7 S8		# / TYPES OF OBSERV
12	15.0000			INTERVAL
13	10			LEAP SECONDS
14	COORD: 93950	Estacao: Sao Luis		COMMENT
15	2024	10	9 0 0	0.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
16				END OF HEADER

Figura 2. Estructura de los datos RINEX.

Los archivos RINEX incluyen un encabezado que especifica el programa utilizado para su preprocesamiento y generación (Figura 2). OASIS fue diseñado para trabajar específicamente con datos procesados mediante *teqc* y requiere que los intervalos de medición sean de 15 o 30 segundos.

Además, la versión de RINEX utilizada debe garantizar la consistencia en la denominación de los pseudorngos y las fases entre las redes GPS y GLONASS, evitando discrepancias en la interpretación de los datos. Para ello, se recomienda el uso de RINEX 2.x (como la versión 2.11 o 2.12), ya que versiones más avanzadas, como RINEX 3.x [3], introducen una nomenclatura específica para cada sistema GNSS, lo que puede generar incompatibilidades con OASIS.

2.1.1 Estructura de OASIS

El programa OASIS está organizado en diversas carpetas y *scripts* diseñados para la gestión y procesamiento de datos GNSS. Su estructura principal incluye tres directorios clave: GNSS, INPUT y OUTPUT, además de varios *scripts* esenciales para la automatización de tareas.

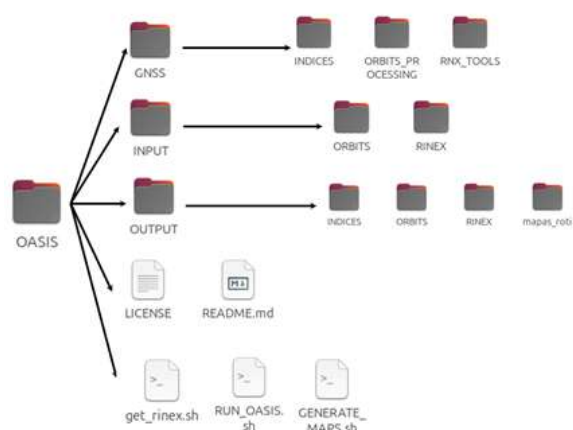


Figura 3. Organización de OASIS en carpetas. GNSS, INPUT y OUTPUT.

• GNSS

Contiene herramientas y *scripts* específicos para el procesamiento de datos GNSS, cada uno diseñado para una tarea particular, como la conversión y ajuste de archivos RINEX.

• INPUT

Almacena los datos de entrada necesarios para el análisis ionosférico. Aquí se encuentran dos carpetas principales:

- » ORBITS: Contiene los datos de las órbitas satelitales, organizados en subcarpetas por año y día del año.
- » RINEX: Guarda los archivos RINEX, también estructurados por fecha.

• OUTPUT

Es el directorio donde se almacenan los resultados del procesamiento. Incluye:

- » INDICES: Contiene los índices ionosféricos obtenidos.
- » ORBITS: Almacena las órbitas concatenadas para su uso en el procesamiento.
- » RINEX: Guarda los archivos RINEX procesados, los cuales son convertidos a la versión RINEX 1 para garantizar compatibilidad.

- » Mapas_roti: Contiene los mapas generados de ROTI.

2.1.2 Automatización de datos RINEX e índices

Para facilitar el procesamiento, OASIS incluye varios *scripts* que ejecutan tareas automatizadas:

- `get_rinex.sh`: Descarga automáticamente los datos RINEX y de órbitas desde fuentes externas y los almacena en INPUT dentro de las carpetas ORBITS y RINEX, respectivamente.
- `RUN_OASIS.sh`: Ejecuta el procesamiento principal de OASIS, permitiendo obtener los índices ionosféricos para un día específico y guardarlos en la carpeta OUTPUT/INDICES.
- `GENERATE_MAPS.sh`: Genera mapas basados en los datos procesados, como los mapas de ROTI.

Además, los datos de las órbitas se concatenan para ser utilizados en un único *script*, optimizando el procesamiento.

Toda la conversión y ejecución de *scripts* se encuentra dentro de la carpeta GNSS, donde cada subcarpeta y herramienta está diseñada para una función específica dentro del flujo de trabajo de OASIS.

2.1.3 Interpolación y generación de mapas regionales

Los datos de los índices ionosféricos procesados por OASIS se almacenan en la carpeta OUTPUT/year/doy/station, donde se generan dos archivos .txt. Estos archivos contienen los valores de los índices calculados a partir de los satélites de la red GPS (G) y GNSS (R), registrando la variabilidad ionosférica en función del tiempo y la posición geográfica (latitud y longitud). El tiempo se encuentra expresado en días julianos y se analizan los datos de todas las estaciones descargadas.

Para la visualización de los resultados, los índices y sus respectivas posiciones se grafican en ventanas de 15 minutos (Figura 4). Posteriormente, se aplica el procedimiento de interpolación propuesto por César Valladares, el cual sigue los siguientes pasos:

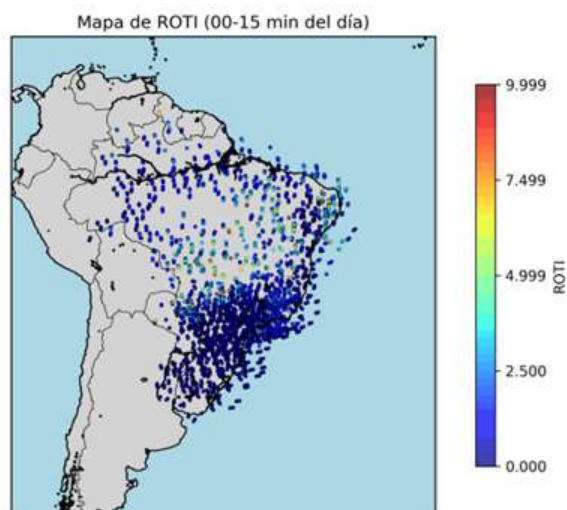


Figura 4. Mapa regional ROTI de los datos procesados por OASIS.

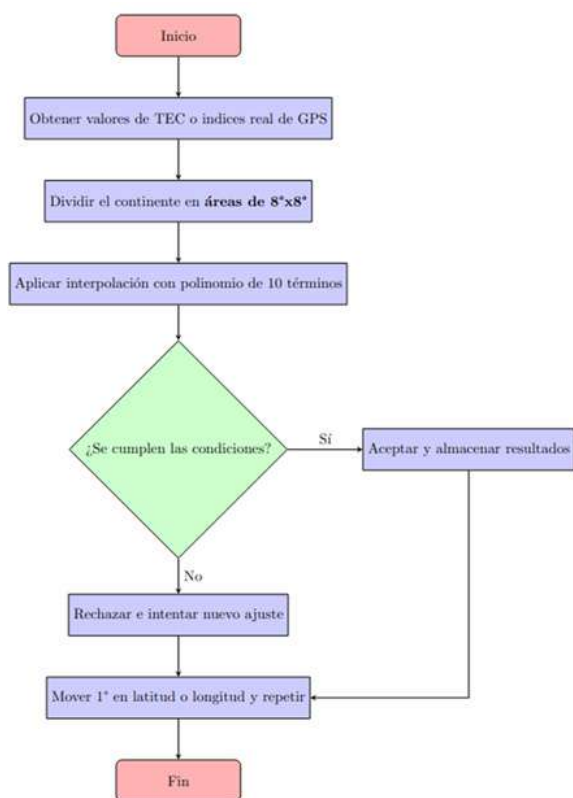


Figura 5. Diagrama de flujo de aplicación de algoritmo de interpolación.

1. Selección de un punto en el mapa y definición de una vecindad de 9×9 grados.
2. Interpolación polinomial en la vecindad, siempre que se cumplan ciertas condiciones:
 - Al menos tres cuadrantes deben contener puntos de datos.

- Se debe contar con un mínimo de 50 puntos en la vecindad.

3. Generación de una imagen continua en una vecindad de 1×1 grado, alrededor del punto seleccionado, utilizando los coeficientes obtenidos de la interpolación.

4. Desplazamiento en incrementos de 1 grado, repitiendo el proceso de interpolación para generar un mapeo continuo.

Un diagrama de flujo detallando este cálculo se muestra en la Figura 5.

3. RESULTADOS

Como primer paso, se procesaron los datos de la red RMBC [4]. En dicho caso, se analizaron todas sus estaciones para el 26 de enero de 2025. En particular, se presentan los resultados de la estación GOJA a lo largo del día en horario universal (UT).

Las Figuras 6, 7 y 8 muestran los valores de ROTI, dTEC y SIDX, respectivamente. Se observa una alta actividad al inicio y al final del horario UT, mientras que en los intervalos intermedios aparecen valores anómalos y elevados.

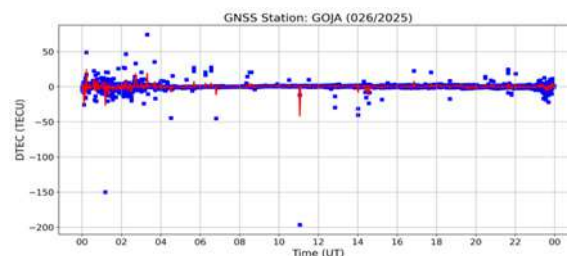


Figura 6. Valores del ROTI para el día 26 de enero de 2025, medidos en la estación de GOJA de la red RMBC.

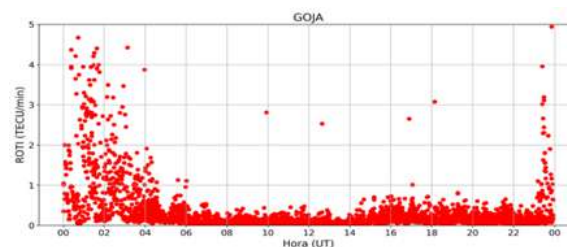


Figura 7. Valores del DTEC para el día 26 de enero de 2025, medidos en la estación de GOJA de la red RMBC.

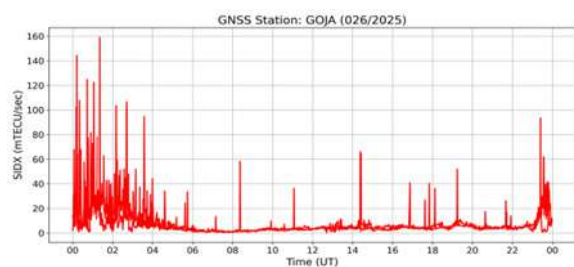


Figura 8. Valores del SIDX para el día 26 de enero de 2025, medidos en la estación de GOJA de la red RMBC.

3.1 Mapas regionales

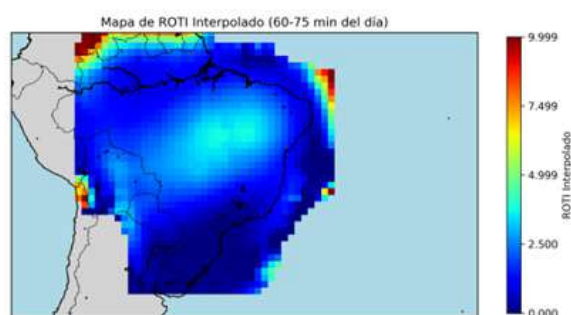


Figura 9. Mapa regional ROTI para el día 26 de enero de 2025, correspondiente a la red RMBC.

En la Figura 9 se presenta un mapa regional generado a partir de la interpolación previamente mencionada [5]. El mapa muestra un continuo de valores, simulando una alta densidad de datos. Sin embargo, en los bordes se observan valores anómalos, los cuales se deben principalmente a la falta de datos en regiones cercanas, lo que genera errores en el proceso de interpolación.

4. DISCUSIÓN

El primer aspecto relevante es la existencia de patrones recurrentes al inicio y final del día en horario UT, donde se observan grandes valores en los parámetros analizados. Estos patrones pueden atribuirse a la recombinación electrónica y a la formación de burbujas ecuatoriales [1], las cuales generan fluctuaciones en el TEC y afectan los valores de ROTI y dTEC. Además, la transición día-noche favorece el desarrollo de burbujas de plasma, lo que altera la propagación de las señales GNSS y contribuye a la variabilidad ionosférica observada. Esto también podría explicar la presencia de valores altos a lo largo del día, aunque no se puede afirmar con total certeza.

En cuanto a los mapas regionales, se observa un

fallo en los bordes debido a la falta de un umbral de error durante la interpolación. La inclusión de dicho umbral generaba huecos en el mapa, por lo que se optó por omitir. Una posible solución sería utilizar una interpolación de mayor orden, aunque esto implicaría un mayor costo computacional. Además, la incorporación de datos de otras redes, como LISN, podría ayudar a mitigar este problema al aumentar la cobertura de estaciones disponibles.

5. CONCLUSIONES

- Se identificaron aumentos en la actividad ionosférica al inicio y al final del día en horario UT, posiblemente debido a procesos de recombinación electrónica y formación de burbujas ecuatoriales. Estos efectos generan fluctuaciones en el TEC y afectan la propagación de señales GNSS.
- La implementación de OASIS permitió la automatización del procesamiento de datos GNSS, optimizando la obtención de índices ionosféricos. Se logró procesar datos de la red RMBC de manera eficiente, asegurando la compatibilidad con el formato RINEX adecuado.
- Los mapas regionales de ROTI mostraron valores anómalos en los bordes debido a la falta de datos en ciertas regiones. La ausencia de un umbral de error permitió una representación continua, pero con posibles inexactitudes. La integración de redes adicionales como LISN podría mejorar la cobertura espacial y la precisión de la interpolación.

6. RECOMENDACIONES

La versión actual de OASIS está diseñada para procesar archivos RINEX versión 2. Para versiones más recientes, es necesario desarrollar *scripts* específicos para cada red satelital.

La descarga automática de datos orbitales debe verificarse para evitar archivos corruptos que afecten el procesamiento.

OASIS está desarrollado en Python, y la generación de un mapa regional, incluyendo el procesamiento de datos RINEX, toma aproximadamente 20 minutos. Para mejorar la eficiencia, se recomienda migrar a C++ o Fortran.

7. AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Instituto Geofísico del Perú (IGP) por los recursos y el apoyo brindado durante esta investigación. A César De La Jara, por su asesoría y disposición en todo momento para responder mis consultas; a Giorgio Picanco, por su ayuda en el entendimiento del proyecto; y a César Valladares, por sus valiosos aportes.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Chunk and A. Nagy, Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009.
- [2] NASA CINDI, "RED CIDIS." [Online]. Available: <https://urs.earthdata.nasa.gov/home>. [Accessed: Mar. 5, 2025].
- [3] LISN – Low Latitude Ionospheric Sensor Network, "LISN Website." [Online]. Available: <http://lisn.igp.gob.pe/>. [Accessed: Mar. 10, 2025].
- [4] RMBC, "Red de Monitoreo de la Baja Capa de la Ionosfera." [Online]. Available: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rbmc. [Accessed: Mar. 5, 2025].
- [5] C. E. Valladares, The Tropical Total Electron Content Enhancement. W. B. Hanson Center for Space Sciences, University of Texas at Dallas, Richardson, TX, USA, 2023.

DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE ANTENAS CUADRIFILARES PARA LA BANDA DE UHF

**Design, implementation and testing of quadrifilar antennas for the UHF band*

Johan Emilio Gonzales Paucar

Pontificia Universidad Católica del Perú

Facultad de Ciencias e Ingeniería

j.gonzales@pucp.edu.pe

Asesores:

Edgardo Pacheco

y Frahan Justo

Dirección en Ciencias del Geoespacio

RESUMEN

En este trabajo se describe el diseño, simulación y construcción de una antena cuadrifilar helicoidal (QHA) para la recepción de señales satelitales en la banda UHF, particularmente de la constelación COSMIC-2. Se realizaron simulaciones con el *software* FEKO para optimizar la geometría de las antenas, evaluando parámetros como ganancia, impedancia y VSWR. Posteriormente, se implementó un prototipo que opera a 400 MHz, cuya medición de VSWR mostró un valor de 1.85, confirmando la eficiencia del diseño. Finalmente, la recepción de señales se verificó mediante un receptor SDR ADALM-Pluto, validando el desempeño de las antenas en la detección de centelleo ionosférico.

Palabras clave: Centelleo ionosférico, antena cuadrifilar, FEKO, VSWR, COSMIC-2

ABSTRACT

This paper describes the design, simulation, and construction of a quadrifilar helical antenna (QHA) for receiving satellite signals in the UHF band, specifically those of the COSMIC-2 constellation. Simulations were performed using FEKO software to optimize the antenna geometry, evaluating parameters such as gain, impedance, and VSWR. A prototype was subsequently implemented operating at 400 MHz, with a VSWR measurement of 1.85, confirming the design efficiency. Finally, signal reception was verified using an ADALM-Pluto SDR receiver, validating the antennas' performance in detecting ionospheric scintillation.

Keywords: Ionospheric scintillation, quadrifilar antenna, FEKO, VSWR, COSMIC-2

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las irregularidades ionosféricas es crucial para comprender su impacto en la propagación de señales satelitales. Fenómenos como burbujas de plasma y F dispersa pueden generar perturbaciones significativas, afectando las telecomunicaciones y sistemas GNSS. Estas irregularidades ionosféricas pueden alterar la fase y amplitud de las ondas de radio, causando pérdida de datos y errores en la determinación de posicionamiento, lo que subraya la importancia de desarrollar tecnologías que mitiguen estos efectos.

Para caracterizar estos efectos, se requiere la implementación de antenas especializadas capaces de captar señales en la banda UHF. Estas señales en banda UHF son comúnmente utilizadas por satélites para transmitir radio beacons, lo que permite su aprovechamiento en investigaciones de la ionósfera. En este contexto, se diseñaron, fabricaron y probaron unas antenas cuadrifilar helicoidal (QHA) optimizadas para la recepción de señales de la constelación de satélites COSMIC-2, la cual orbita a una altura entre 520 km a 550 km, con una inclinación de 24°, transmite en las frecuencias de 400 MHz, 965 MHz y 2200 MHz; sin embargo, para este proyecto nos enfocaremos en las señales de 400 MHz.

La implementación de estas antenas contribuye al monitoreo y análisis de la ionósfera, facilitando el desarrollo de estrategias de mitigación para optimizar la confiabilidad de las telecomunicaciones y los sistemas de navegación.

2. DESARROLLO

2.1 Diseño e implementación

2.1.1 Antena cuadrifilar helicoidal

Las antenas cuadrifilares helicoidales se utilizan en sistemas de recepción de señales satelitales debido a sus ventajas en términos de polarización circular y cobertura hemisférica. Estas características las hacen ideales para detectar variaciones rápidas en la intensidad de la señal causadas por centelleo ionosférico.

Para la construcción de la antena, primero se calculó la longitud de onda de la frecuencia escogida, en este caso 400 MHz.

$$\lambda = \frac{300 \times 10^6}{400 \times 10^6} = 0.75 \text{ m} = 750 \text{ mm}$$

A esta longitud se aplica un valor de corrección, llamado "porcentaje de elongación" del 7.2 %. Esta nueva longitud es la longitud de onda compensada.

$$\lambda' = 750 + \frac{7.2}{100} \times 750 = 804 \text{ mm}$$

Para hallar la longitud de las espiras, se usa un valor llamado "desviación media", el cual es igual al 2.5 % de la longitud compensada.

$$\frac{2.5}{100} \times 804 = 20.1 \text{ mm}$$

Obteniendo de esta manera la longitud de las espiras que constituyen la antena QHA.

$$L_G = 804 + 20.1 = 824.1 \text{ mm}$$

$$L_P = 804 - 20.1 = 783.9 \text{ mm}$$

A partir de estas longitudes, y usando una relación de $0.3/0.7=0.429$ entre el diámetro y la altura de la antena, se consiguieron las dimensiones mostradas en la Tabla 1. Estas dimensiones son similares a las dimensiones generadas en la página <https://jcoppens.com/ant/qfh/calc.php>, la cual usa las mismas ecuaciones, además de otros valores como el diámetro del conductor y radio de doblado.

Tabla 1. Dimensiones de la antena QHA obtenidas de las fórmulas.

	Altura (en cm)	Diámetro (en cm)
Espira 1	25.8	11.1
Espira 2	24.6	10.6

Con estas dimensiones, se procedió a realizar las simulaciones en el software FEKO, obteniéndose los valores de ganancia y VSWR mostrados en las Figuras 1 y 2.

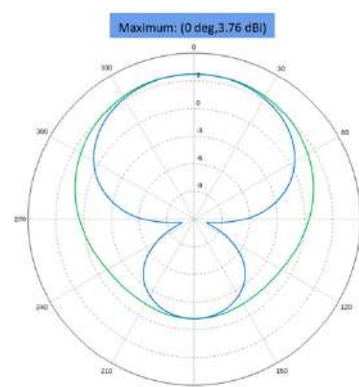


Figura 1. Patrón de radiación de antena QHA de 400 MHz con las dimensiones iniciales.

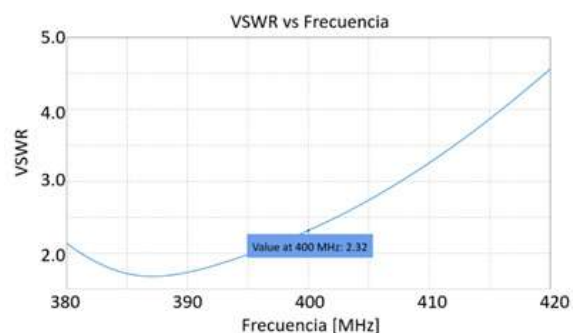


Figura 2. VSWR de antena QHA de 400 MHz con las dimensiones iniciales.

Se modificaron las dimensiones obtenidas con el fin de optimizar la antena, reducir el VSWR (2.32) y obtener una mayor ganancia, ya que de estos depende el correcto funcionamiento de la antena. Así, se consiguieron las dimensiones mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones de la antena QHA optimizadas.

	Altura (en cm)	Diámetro (en cm)
Espira 1	25.3	10.6
Espira 2	23.8	9.6

Con estas dimensiones se obtuvieron los siguientes valores mostrados en las Figuras 3 y 4.

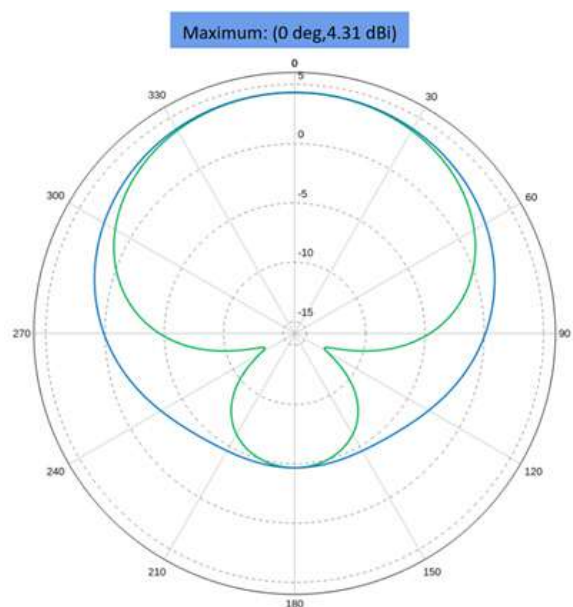


Figura 3. Patrón de radiación de antena QHA de 400 MHz con las dimensiones optimizadas.

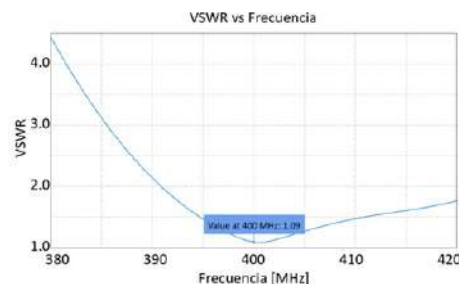


Figura 4. VSWR de antena QHA de 400 MHz con las dimensiones optimizadas.

Del mismo modo, con ayuda del *software* FEKO, se calculó el ancho de banda teórico de la antena, el cual se muestra en la Figura 5.

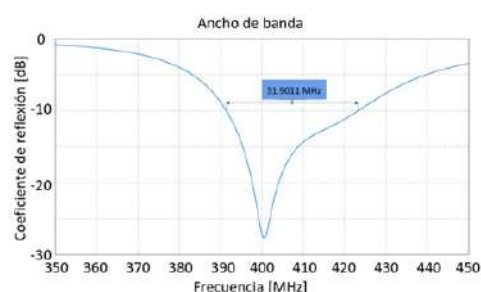


Figura 5. Ancho de banda de la antena QHA de 400 MHz.

Para la construcción de la antena simulada se usaron los siguientes materiales:

- Cable unifilar de cobre de 3.4 mm de diámetro.
- Tubo de PVC de 4 cm de diámetro de 1 m de longitud.
- Cable coaxial LMR-240.

Para medir el VSWR de la antena construida se armó el arreglo presentado en la Figura 6, el cual consiste principalmente de un analizador vectorial de redes S5180B y el *software* S2VNA.

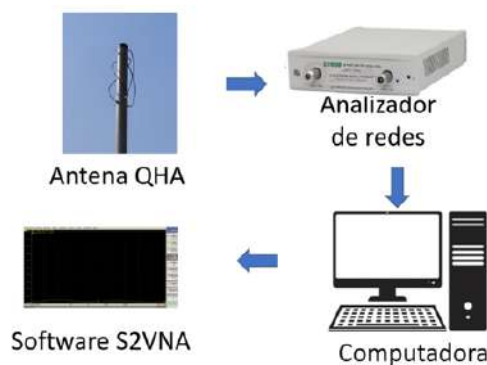


Figura 6. Arreglo experimental para la medición de VSWR de la antena.

Para la verificación del funcionamiento de la antena se armó el arreglo mostrado en la Figura 7, el cual está conformado fundamentalmente por el receptor ADALM-PLUTO y el *software* SDR Console.



Figura 7. Arreglo experimental para la recepción del satélite COSMIC-2.

3. RESULTADOS

3.1 Antena QHA 400 MHz

La antena QHA registró un VSWR de 1.85; asimismo, se observó que el ancho de banda de la antena es de 43.5 MHz, como se muestra en la Figura 8.

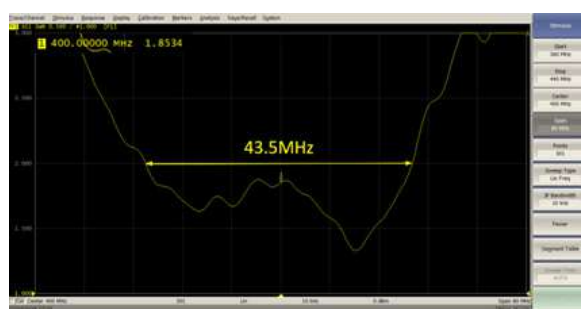


Figura 8. Antena QHA de 400 MHz construida con un VSWR de 1.85.

Además, se verificó su eficiencia en la recepción de señales satelitales. En la Figura 9, se observa el efecto Doppler en la señal satelital de 400 MHz, generada por el COSMIC-2 y captada en un lapso de 6 minutos.

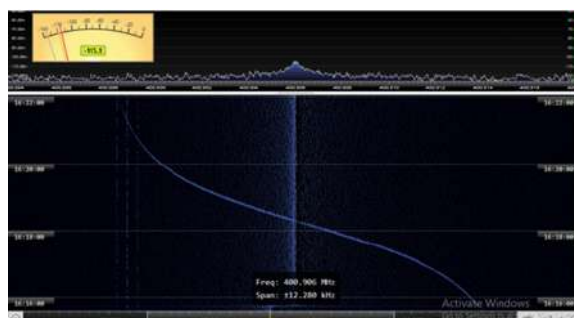


Figura 9. Efecto Doppler captado del satélite COSMIC-2 con la antena QHA construida.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en las mediciones experimentales muestran una alta concordancia con los valores obtenidos en la fase de simulación, lo que confirma la efectividad de las técnicas de diseño y optimización empleadas en el *software* FEKO. Este hecho demuestra que el modelado computacional fue capaz de predecir con precisión el comportamiento electromagnético de las antenas cuadrifilares helicoidales (QHA), lo que facilitó su fabricación e implementación con un alto grado de confiabilidad.

Durante el proceso de implementación y prueba, se observó que pequeñas variaciones en la geometría de la antena pueden tener un impacto significativo en su rendimiento. Cambios en la separación de las dimensiones de la antena, imprecisiones en la fabricación de los conductores o ligeras deformaciones en la estructura de soporte pueden alterar el patrón de radiación y el valor del VSWR. Esto resalta la importancia de un control preciso en la manufactura de antenas, especialmente cuando se trabaja en frecuencias UHF, donde pequeñas modificaciones pueden modificar de manera considerable las propiedades electromagnéticas del sistema.

En el caso de la antena diseñada para 400 MHz, los resultados obtenidos indicaron la necesidad de ajustes en sus dimensiones. Se obtuvo un VSWR de 1.85, lo que sugiere que, a pesar de obtener un valor aceptable y funcional para el proyecto, se puede optimizar para obtener un mejor valor. Debido a esto, es necesario realizar ajustes en la geometría de la antena para mejorar su eficiencia de transmisión y garantizar un desempeño adecuado en condiciones reales de recepción satelital. Para validar su desempeño en la detección de señales, se realizaron pruebas utilizando el receptor SDR ADALM-Pluto, el cual permitió la

captura de señales provenientes de la constelación COSMIC-2. La exitosa recepción de estas señales confirma la aplicabilidad del diseño y su utilidad para el monitoreo del centelleo ionosférico.

Asimismo, se identificó que la antena QHA ofrece ventajas significativas en términos de patrón de radiación omnidireccional y polarización circular, lo que la hace ideal para la captación de señales satelitales sin requerir sistemas de seguimiento mecánico.

5. CONCLUSIONES

- Se diseñó y fabricó una antena cuadrifilar helicoidal para 400 MHz, optimizada mediante simulaciones en el *software* FEKO.
- La medición experimental mostró un valor de VSWR, 1.85. Si bien no es cercano al valor obtenido en simulación, 1.09, es un valor aceptable para el funcionamiento de la antena.
- Las pruebas con el receptor SDR Pluto permitieron la recepción de señales satelitales, validando el desempeño de las antenas en la detección de centelleo ionosférico.

6. RECOMENDACIONES

- Implementar técnicas de fabricación más precisas para minimizar variaciones geométricas.
- Realizar pruebas en diferentes condiciones atmosféricas para evaluar el impacto de la ionósfera en la recepción de señales.
- Utilizar materiales con menor factor de pérdida dieléctrica para mejorar la eficiencia de la antena.

7. AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer al Instituto Geofísico del Perú (IGP) por facilitar los recursos necesarios para la realización de la presente investigación; al Dr. Edgardo Pacheco y Frahan Justo, por su invaluable apoyo y asesoramiento constante durante el programa. Al personal del área de operaciones, por su ayuda en la construcción de la antena cuadrifilar. Finalmente, quiero expresar mi gratitud a todas las personas que, de una u otra forma, me brindaron su apoyo y aliento durante

el desarrollo de este trabajo, su colaboración y amistad fueron un gran impulso para seguir adelante y alcanzar mis metas.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Vera B. (2012). Diseño y construcción de una antena cuadrifilar helicoidal para recepción de imágenes transmitidas por satélites de órbita polar
- Gómez, J. (2017). Diseño e implementación de un sistema receptor para la estimación del contenido total de electrones relativo(rTEC)
- Cañelles, D. (2010). Obtenció d'imatges de satèl·lits meteorològics polars amb una antena quadrifilar
- Eugene F. (1996). The W3KH Quadrifilar Helix Antena
- C. C. KILGUS. (1970). Resonant Quadrifilar Helix Design
- R.W. Hollander. (1999). Resonant Quadrafilar Helical Antenna WORKING GROUP SATELLITES

IMPLEMENTACIÓN DEL CÁLCULO DE VARIABLES POLARIMÉTRICAS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA PARA EL RADAR SOPHY

**Implementation of the calculation of polarimetric variables in the frequency domain for the SOPHy radar*

Mauricio Alonzo Rejas Morales

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ciencias
mauricio.rejas.m@uni.pe

Asesores:

Alexander Olmedo
Valdez Portocarrero
Dirección en Ciencias del Geoespacio

RESUMEN

Este estudio comparó el procesamiento por Spectra con el método Pulse Pair en el radar SOPHy, identificando discrepancias en las variables polarimétricas que requirieron ajustes en los módulos de procesamiento y ploteo. Mediante análisis de perfiles por ángulo y un *script* en Python, se concluyó que el método Spectra mejora la resolución y precisión, aunque requiere ajustes para minimizar diferencias con Pulse Pair. Estos hallazgos optimizan la cadena de procesamiento en sistemas de radar.

Palabras clave: Spectra, Pulse Pair, Signal Chain, SOPHy

ABSTRACT

This study compared Spectra processing with the Pulse Pair method in the SOPHy radar, identifying discrepancies in polarimetric variables that required adjustments in processing and plotting modules. Through profile analysis by angle and a Python script, it was concluded that the Spectra method improves resolution and accuracy, though further adjustments are needed to minimize differences with Pulse Pair. These findings optimize the processing chain in radar systems.

Keywords: Spectra, Pulse Pair, Signal Chain, SOPHy

1. INTRODUCCIÓN

El IGP impulsa la investigación científica para prevenir desastres y promover el bienestar social, utilizando sistemas de monitoreo en tiempo real para detectar las precipitaciones que pueden causar deslizamientos, inundaciones y huaicos. Estos sistemas proporcionan información esencial para alertar a las comunidades en riesgo y apoyar la gestión de emergencias y la planificación territorial.

El procesamiento de datos es vital en meteorología, ya que incrementa la precisión y confiabilidad de la información, permitiendo mejores análisis y decisiones. En este contexto, el radar meteorológico SOPHy, desarrollado en el Radio Observatorio de Jicamarca y con un alcance de hasta 60 km, depende de un robusto sistema de procesamiento llamado Signal Chain, creado en Python 3.0 [4]. Esta librería opera con dos métodos: el Pulse Pair, que es el utilizado actualmente para procesar los datos del radar, y el procesamiento espectral, que se presenta en este informe como alternativa.

1.1 Pulse Pair

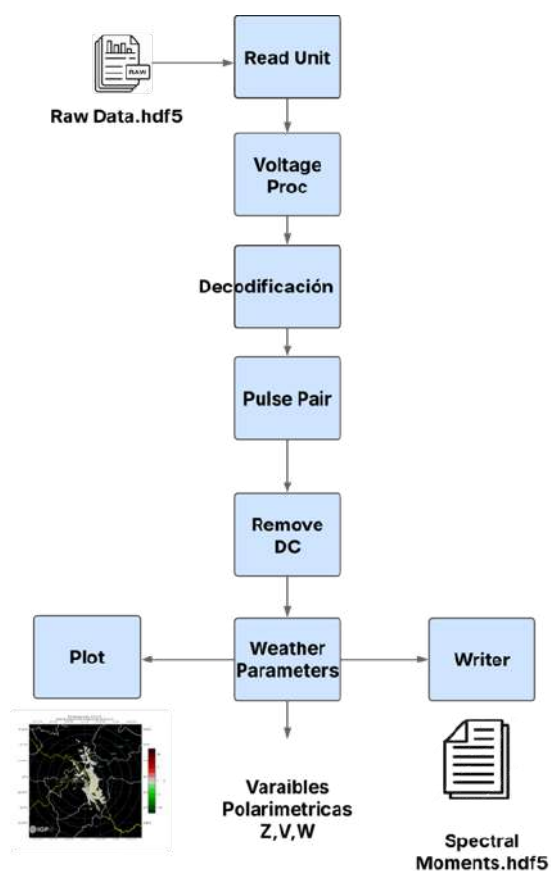


Figura 1. Diagrama de bloques de Signal Chain utilizando el método Pulse Pair.

El método Pulse Pair (PP) (Figura 1) es una técnica utilizada en radares para estimar la velocidad Doppler de un objetivo (como gotas de lluvia o partículas en la atmósfera). Este método opera en el dominio del tiempo y se basa en analizar la correlación entre dos pulsos consecutivos emitidos por el radar [3].

1.2 Procesamiento Spectral

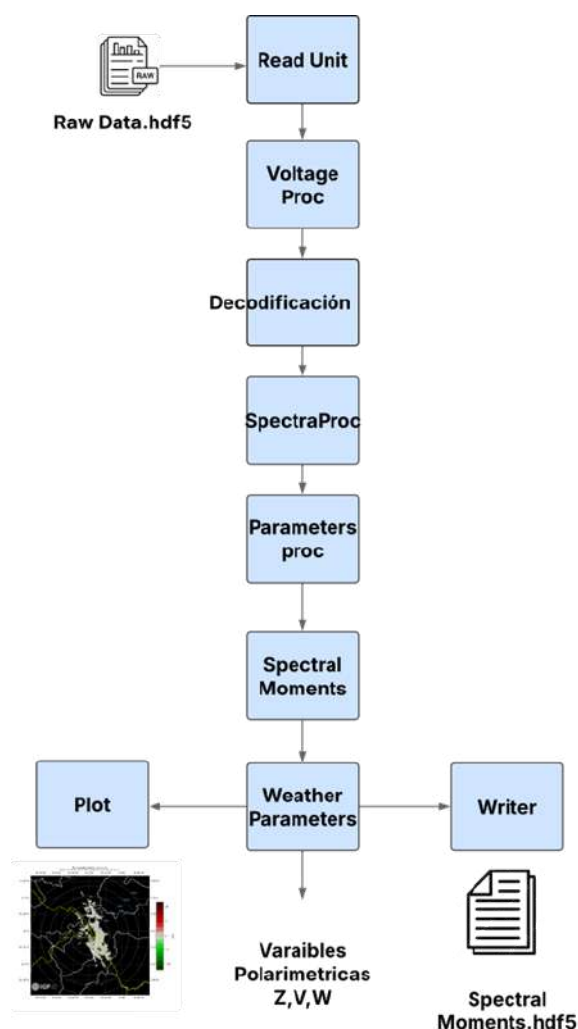


Figura 2. Diagrama de bloques de Signal Chain utilizando el método Spectra.

A diferencia del método PP, este opera en el dominio de la frecuencia aplicando la transformada de Fourier a la data de voltaje procesada por el módulo de Signal Chain. La principal diferencia entre el procesamiento por DFT y el procesamiento Pulse Pair radica en la forma en que se realiza el filtrado de clutter (Figura 2). El procesamiento Pulse Pair utiliza un filtro IIR (Infinite Impulse Response) en el dominio del tiempo, mientras que el modo DFT emplea un filtro en el dominio de la frecuencia [2].

2. DESARROLLO

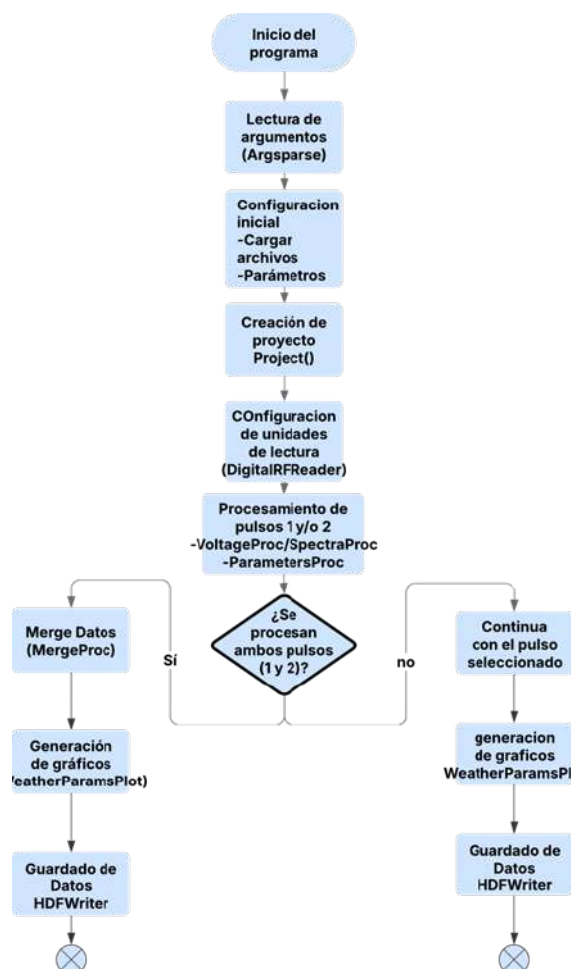


Figura 3. Diagrama de bloques para procesar los 2 pulsos del radar SOPHY.

Para empezar a utilizar Signal Chain debemos entender el funcionamiento y la secuencia de sus módulos. Este presenta una arquitectura modular, es decir, cada algoritmo de procesamiento es separado en 'bloques'. Estos bloques forman parte de una jerarquía bien definida la cual se tiene como referencia para describir algún experimento [1].

Se desarrolló el *script* que incorpora las librerías de Signal Chain. En él se definió un proyecto capaz de recibir los *raw data* y procesarlos mediante las unidades correspondientes. Primero, los datos pasan por la Reading Unit (unidad de lectura de datos); luego, ingresan a la Processing Unit (unidad de procesamiento), donde se implementan los métodos Pulse Pair y Spectral Processing. Finalmente, se aplican las operaciones de escritura y graficado para obtener las variables polarimétricas de la data procesada.

En nuestro caso, el radar opera alternando dos pulsos de transmisión con diferentes anchos. Esta estrategia permite una mejor visualización de los datos: el pulso corto se usa para detectar precipitaciones cercanas con alta precisión, mientras que el pulso largo es más adecuado para detectar precipitaciones lejanas o débiles. Por lo tanto, nuestro *script* ejecutará el procesamiento, ya sea mediante Pulse Pair o Spectral Processing, para ambos tipos de pulsos, para luego fusionar con la operación *merge* los datos y graficarlos (véase Figura 3).

Una vez implementados los *scripts* para cada método de procesamiento, los ejecutamos desde la línea de comandos, especificando el parámetro que deseamos obtener para la comparación entre los métodos.

Se identificó que los gráficos de potencia generados por el método Spectra estaban siendo subestimados en comparación con los generados por el método Pulse Pair (véase Figura 4).

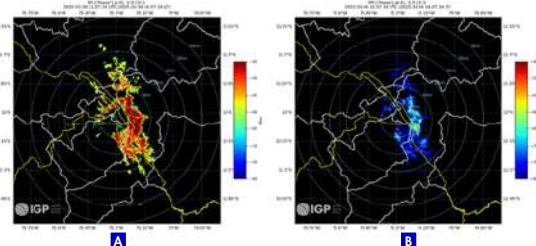


Figura 4. (a) Gráfico meteorológico de potencia generado por el método Pulse Pair. (b) Gráfico meteorológico de potencia generado por el método Spectra.

Esto se debía a que la data de potencia estaba siendo dividida dos veces por un factor de normalización (normfactor):

- En el archivo `jroproc_parameters.py`, dentro de la función `setMoments` de la clase `WeatherRadar`, específicamente en la condicional `if type == "Spectra"`.
- En el archivo `jroplot_parameters.py`, dentro de la función `update` de la clase `WeatherParamPlots`.

Para corregir este problema, se eliminó el factor en el módulo de ploteo `jroplot_parameters.py`. De esta manera, también arreglamos los gráficos de reflectividad debido a que este parámetro depende directamente de la Potencia.

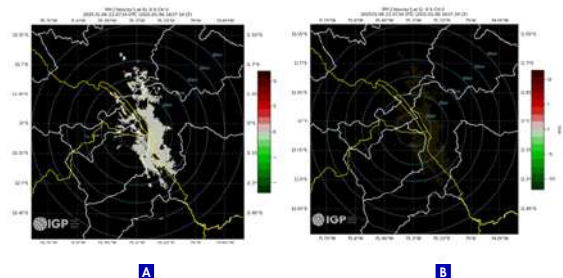


Figura 5. (a) Gráfico meteorológico de velocidad Doppler generado por el método Pulse Pair. (b) Gráfico meteorológico de velocidad Doppler generado por el método Spectra.

También se identificaron incoherencias entre las gráficas de velocidad Doppler obtenidas por los dos métodos (Figura 5). Dado que la data utilizada corresponde a una zona montañosa y no hubo precipitaciones aquel día, el método Pulse Pair registró velocidades nulas de la montaña. En cambio, con el método Spectra se apreciaron, en la escala de color, velocidades con valores extremos. Esto se debió a que la frecuencia empleada para la lectura de la rawdata correspondía al radar principal de Jicamarca, por lo que se hizo el cambio de frecuencia en la función Setup de la clase DigitalRFReader en el módulo `jroLO_digitalRF.py` al valor de $9.345e9$, que es la frecuencia a la que opera el radar SOPHy.

Dados estos cambios, y verificando que nuestros métodos generan gráficos similares con la data de prueba, implementamos los algoritmos en la computadora del radar SOPHy. Para evitar modificar archivos críticos del sistema, creamos un entorno de Anaconda e instalamos nuevamente Signal Chain. Además, elaboramos una guía de instalación de Signal Chain, basada en el repositorio del Radio Observatorio de Jicamarca, para facilitar el uso por nuevos usuarios.

Una vez instalado Signal Chain en el entorno de Anaconda con su respectiva versión de Python y librerías necesarias, procedimos a procesar la data más reciente del radar. Debido a que el radar genera grandes volúmenes de datos al estar operando y recolectando información continuamente durante todo el día, es necesario especificar el rango de tiempo que queremos analizar desde la línea de comandos del terminal. Se recomienda seleccionar un intervalo de aproximadamente una hora para obtener una cantidad suficiente de gráficos y facilitar el análisis de los datos.

3. RESULTADOS

Una vez implementados los algoritmos en la computadora del radar SOPHy, generamos los gráficos meteorológicos de los momentos espectrales, incluyendo potencia, velocidad Doppler, reflectividad y ancho espectral (Figuras 6 y 7).

Al comparar los gráficos obtenidos mediante el método Pulse Pair y el procesamiento espectral (Spectral Processing), observamos que este último presenta una mejor remoción de ruido, lo que mejora la calidad de los datos. Sin embargo, en términos de tiempo de ejecución, encontramos una desventaja significativa:

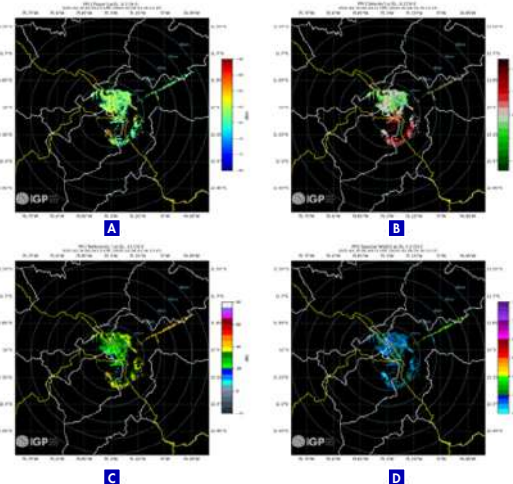


Figura 6. Gráfico meteorológico generado por el método Pulse Pair: (a) potencia, (b) velocidad Doppler, (c) reflectividad, (d) ancho espectral.

El método Pulse Pair procesó una celda de datos en 2.38 microsegundos, mientras que el método Spectra tardó 24.31 microsegundos, casi diez veces más. A nivel global, Pulse Pair tomó aproximadamente 30 minutos para procesar todos los datos, mientras que Spectral Processing requirió alrededor de una hora y media, siendo significativamente más lento.

Debido a esta diferencia en el rendimiento, el método Spectral Processing no es adecuado para uso en tiempo real en la computadora del radar SOPHy. Actualmente, el radar emplea el método Pulse Pair en tiempo real para generar los gráficos que luego se envían a la página del IGP para su uso meteorológico.

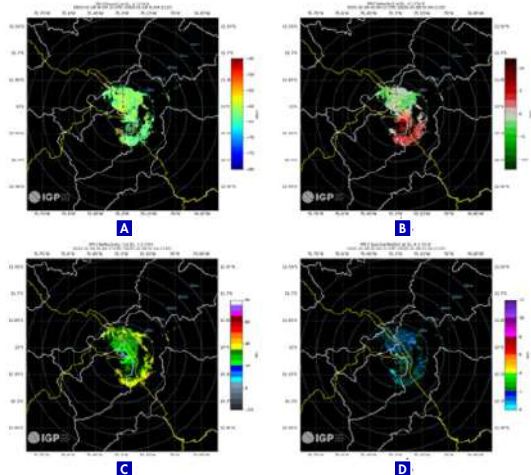


Figura 7. Gráfico meteorológico generado por el método Spectra: (a) potencia, (b) velocidad Doppler, (c) reflectividad, (d) ancho espectral.

4. DISCUSIÓN

La implementación y comparación de los métodos Pulse Pair y Spectral Processing en el radar SOPHy han permitido evaluar sus ventajas y limitaciones en el procesamiento de datos meteorológicos. Ambos métodos proporcionan estimaciones de las variables polarimétricas como potencia, velocidad Doppler, reflectividad y ancho espectral, pero presentan diferencias clave en términos de calidad de la señal, remoción de ruido y tiempo de procesamiento.

Uno de los aspectos más relevantes de este análisis es la mejor remoción de ruido lograda con el método Spectral Processing en comparación con Pulse Pair. Esta mejora sugiere que el uso de transformadas espectrales permite filtrar interferencias y obtener una señal más precisa, lo que es crucial para la interpretación de datos meteorológicos. Sin embargo, esta ventaja viene acompañada de una desventaja significativa en el tiempo de ejecución, siendo casi el triple del tiempo que le toma al método Pulse Pair.

Desde una perspectiva práctica, esta diferencia en rendimiento plantea un desafío para la implementación del método Spectral Processing en tiempo real dentro del radar SOPHy. La adopción de Spectral Processing en este contexto requeriría una optimización del algoritmo o el uso de hardware con mayor capacidad de procesamiento para evitar retrasos en la entrega de datos.

Una alternativa sería evaluar la viabilidad de combinar ambos métodos, utilizando Pulse Pair para la visualización en tiempo real y Spectral Processing para análisis posteriores, con mayor precisión.

5. CONCLUSIONES

En conclusión, aunque el método Spectral Processing ofrece mejoras en la calidad de los datos procesados, su tiempo de ejecución representa un obstáculo para su aplicación en tiempo real. Es necesario continuar explorando estrategias de optimización que permitan aprovechar sus ventajas sin sacrificar la eficiencia operativa del radar SOPHy.

6. RECOMENDACIONES

Para el correcto uso de Signal Chain se recomienda leer el Manual de instalación SchainPy.

7. AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi asesor, Alexander Valdez, por su guía y apoyo durante mis prácticas preprofesionales. También agradezco al Instituto Geofísico del Perú (IGP) por brindarme la oportunidad de formar parte de este proyecto, lo que me ha permitido ampliar mis habilidades y adquirir valiosa experiencia en el procesamiento de datos.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Cortez, Diseño de una arquitectura de software para procesamiento paralelo escalable en Signal Chain. Instituto Geofísico del Perú (IGP), 2018.
- [2] O. Şireci, Training course on weather radar systems – Module C: Processing basics in Doppler weather radars. Electronic Observing Systems Division, Turkish State Meteorological Service; WMO RMTC-Turkey, Alanya Facilities, Antalya, Turkey, Sep. 12–16, 2005.
- [3] B. Gallardo Hernando, Nuevas técnicas para la mitigación de clutter de aerogeneradores en radares meteorológicos [Tesis doctoral]. Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 2011.
- [4] J. C. Espinoza, D. Scipión, A. Valdez, and J. Verástegui, "SOPHy: Scanning-system for Observations of Peruvian Hydrometeorological-events," in IEEE Proceedings, Radio Observatorio de Jicamarca, Instituto Geofísico del Perú, 2021. doi:10.1109/[DOI]



PROGRAMA INTERNACIONAL DE EXPERIENCIA EN INVESTIGACIÓN

ALGORITHM FOR DETECTING PLASMA DEPLETIONS IN TOTAL ELECTRON CONTENT

*Algoritmo para la detección de depleciones plasmáticas en el contenido total de electrones

Adeniran Gbadebo Seun

National Institute for Space Research
adeniran.seun@inpe.br

Asesor:

Edgardo Pacheco

Dirección en Ciencias del Geoespacio

ABSTRACT

Equatorial plasma bubbles (EPBs) are post-sunset plasma depletions in the equatorial ionosphere that cause fluctuations in Total Electron Content (TEC) and degrade GNSS performance. Traditionally identified through manual inspection, depletion detection is both time-consuming and subjective. This study presents a Python-based automated algorithm for detecting EPB-related depletions using data from the Low Latitude Ionospheric Sensor Network (LISN). The method applies dual Butterworth band-pass filters to classify narrow (3–40 min) and wide (25–120 min) depletion events, with thresholds based on the TEC drop, elevation angle, and recovery percentage. Validation was conducted by comparing detections with amplitude scintillation index (S4). Additionally, depletion occurrence statistics were used. Results from Huancayo station data (2014) show strong correspondence between detected events and scintillation peaks, while seasonal patterns agree with known EPB climatology, particularly during equinoctial months. The algorithm provides a reliable and objective tool for identifying plasma depletions and offers potential applications for regional monitoring and space weather forecasting.

Keywords: EPBs, ionosphere, TEC, GNSS, LISN

RESUMEN

Las burbujas de plasma ecuatoriales (EPBs) son depleciones de plasma en la ionósfera ecuatorial que causan fluctuaciones en el contenido total de electrones (TEC) y degradan el rendimiento de los receptores GNSS. Tradicionalmente, son identificados mediante la inspección manual; la detección de las depleciones requiere mucho tiempo y es subjetiva. Este estudio presenta un algoritmo automatizado basado en Python para detectar depleciones relacionadas con el EPB utilizando datos de la red de sensores ionosféricos de baja latitud (LISN). El método aplica dos filtros de paso banda Butterworth para clasificar los eventos de depleciones angostas (3-40 min) y anchas (25-120 min), con umbrales basados en la caída del TEC, el ángulo de elevación y el porcentaje de recuperación. La validación se llevó a cabo comparando las detecciones con las mediciones del índice de centelleo de amplitud (S4) y las estadísticas de ocurrencia de depleciones. Los resultados de los datos de la estación de Huancayo (2014) muestran una fuerte correspondencia entre los eventos detectados y los picos de centelleo, mientras que los patrones estacionales concuerdan con la climatología conocida de EPB, particularmente durante los meses equinocciales. El algoritmo proporciona una herramienta fiable y objetiva para identificar las depleciones de plasma y ofrece aplicaciones potenciales para la vigilancia regional y la predicción del clima espacial.

Palabras clave: EPBs, ionósfera, TEC, GNSS, LISN

1. INTRODUCTION

The equatorial ionosphere is often disturbed by large-scale plasma irregularities known as Equatorial Plasma Bubbles (EPBs), which occur after sunset due to the Rayleigh–Taylor instability. These structures deplete electron density and cause significant fluctuations in the Total Electron Content (TEC) along GNSS signal paths. Such disturbances result in phase and amplitude scintillations, leading to positioning errors and signal loss of lock.

Traditionally, TEC depletion identification is performed visually by experts, which is both time-intensive and prone to subjectivity. The need for automated detection has become more pressing with the expansion of GNSS networks and the availability of continuous high-resolution TEC measurements.

This project addresses that need by designing and implementing an automated depletion detection algorithm that processes LISN (Low Latitude Ionospheric Sensor Network) data. The approach follows the principles described by Seemala & Valladares (2011) but is extended and optimized for dualfilter classification and automatic event handling. Validation is performed through comparison with scintillation data and depletion count statistics.

2. OBJECTIVES

The specific objectives of this project are:

- Algorithm Development:

Create a Python-based algorithm to automatically detect plasma depletions from GPS-derived TEC time series.

- Event Classification

Differentiate between narrow (3–40 min) and wide (25–120 min) depletion events using dual band-pass filters

- Validation:

Confirm algorithm performance by:

- » Cross-checking detections with S4 amplitude scintillation data
- » Comparing depletion count statistics with known seasonal occurrence patterns

- Application:

Apply the algorithm to Huancayo LISN station data for December 2014 to produce validated depletion detections.

3. DESCRIPTION AND DEVELOPMENT

3.1 Data source

- » Station: Huancayo, Peru (12.0° S, 284.7° E; magnetic latitude ~0.6° S).
- » Network: LISN (Low Latitude Ionospheric Sensor Network).
- » Data Format: .dat files containing slant TEC (sTEC), elevation, azimuth, and associated metadata for individual GPS satellites (PRNs).
- » Period: Year 2014 (high solar activity year).

3.2 Algorithm workflow

The detection procedure involves several processing stages (Figure 1):

- Step 1: Data Parsing
 - » Read TEC data by PRN block from LISN .dat files.
 - » Extract observation time (UTC), sTEC, elevation, and other parameters.
- Step 2: Vertical TEC Calculation
 - » Convert sTEC to vTEC using the standard mapping function:

$$vTEC = \frac{sTEC}{\cos \left[\arcsin \left(\frac{R_E}{R_E + h_{iono}} \cos E \right) \right]}$$

where R_E is the Earth's radius, h_{iono} is the ionospheric shell height (350 km), and E is satellite elevation.

- Step 3: Filtering
 - » Apply two Butterworth band-pass filters:
 - Narrow: 3–40 min period range
 - » Wide: 25–120 min period range
 - » Filtering enhances depletion signatures while suppressing noise and trends
- Step 4: Event Detection

For each filtered signal:

 - » Identify points where slope is negative and signal falls below a threshold

- Narrow threshold: -1.0 TECu
- Wide threshold: -0.6 TECu
- » Apply criteria:
 - Minimum elevation: 30°
 - TEC drop: ≥ 4 TECu from event start to minimum
 - Recovery: $\geq 70\%$ of drop
 - Duration: 5–60 min
- Step 5: Overlap Handling
 - » Remove duplicate detections: if narrow and wide events overlap, retain narrow event.
- Step 6: Output
 - » Save:
 - Event plots (vTEC + elevation + marked depletion intervals).
 - Filtered signal plots (narrow & wide).
 - Daily depletion count summaries.

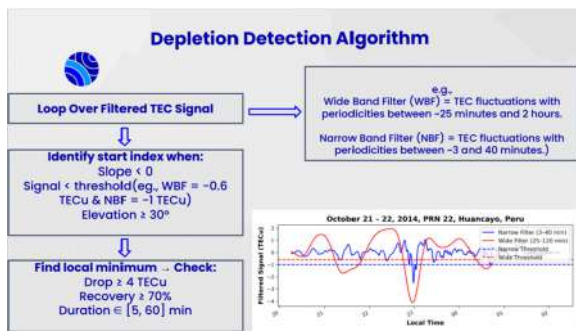


Figure 1. Flowchart of the automated depletion detection algorithm.

3.3 Validation approach

Two independent validation strategies were used:

- S4 Scintillation Comparison
 - » Events detected by the algorithm were compared with amplitude scintillation index (S4) peaks.
 - » Co-occurrence of depletions and elevated S4 values confirms that detected events correspond to plasma irregularities.
- Depletion Count Statistics
 - » Daily depletion counts were compiled for December 2014.
 - » Occurrence patterns were compared to known EPB climatology for equatorial stations.

4. RESULTS

4.1 Algorithm detection performance

The algorithm successfully processed all Huancayo TEC files for 2014 and identified depletion events in multiple GPS satellite tracks.

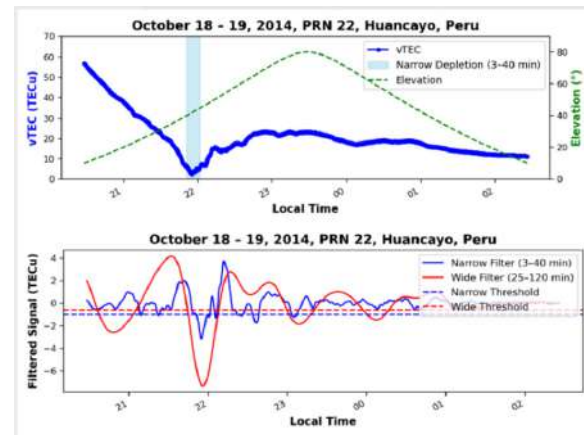


Figure 2. Example vTEC plot for PRN 22 showing detected narrow and depletion intervals and filtered signal plots (narrow and wide) for the same event.

4.2 Validation with scintillation

High correspondence was observed between detected depletions and elevated S4 values from co-located scintillation monitors.

Narrow events typically coincided with short-duration S4 spikes, while wide events aligned with more prolonged scintillation.

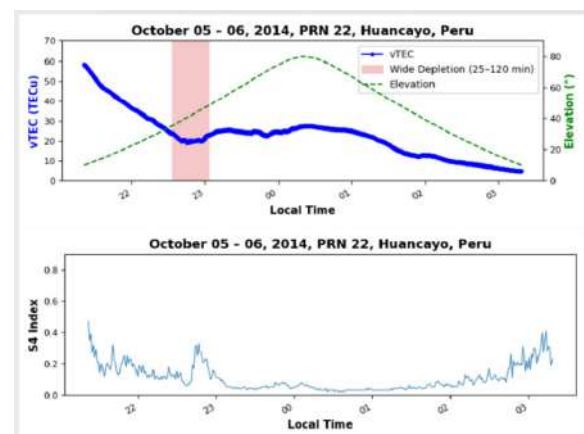


Figure 3. Example of matched depletion detections and S4 scintillation peaks on October 05-06, 2014 for Huancayo, Peru 2014.

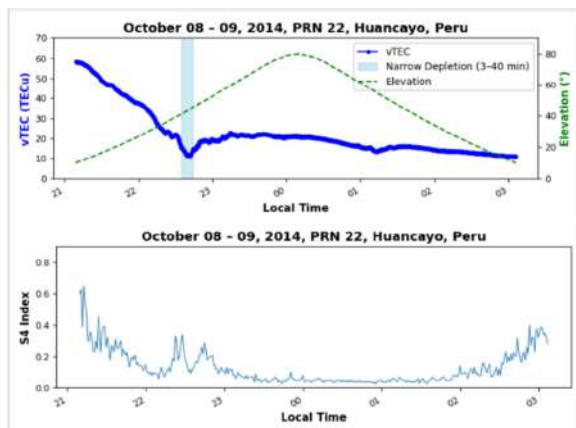


Figure 4. Example of matched depletion detections and S4 scintillation peaks on October 05-06, 2014 for Huancayo, Peru 2014.

4.3 Depletion count statistics

The occurrence statistics reveal that a higher number of plasma depletions is typically observed during the equinoctial months (March–April and September–October). This seasonal preference is consistent with the well-known terminator alignment effect, whereby the post-sunset solar terminator aligns with the magnetic meridian over the station. Such alignment enhances the eastward electric field in the evening sector, which in turn strengthens the pre-reversal enhancement (PRE) of the F-region upward plasma drift. The increased vertical drift promotes the growth of the Rayleigh–Taylor instability, favoring the generation of equatorial plasma bubbles.

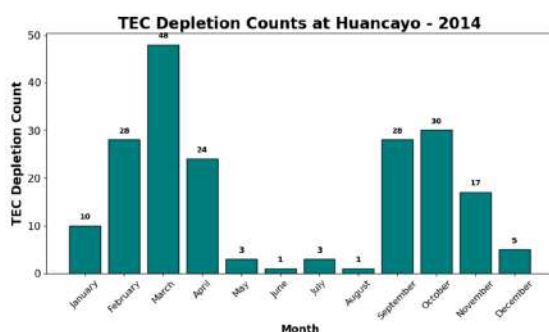


Figure 5. Daily TEC depletion counts at Huancayo station for December 2014.

4.4 Summary of findings

- The algorithm reliably identifies depletions with minimal false detections.
- Validation via S4 scintillation supports that detections represent genuine plasma irregularities.
- Statistical patterns align with established EPB occurrence trends.

5. FUTURE WORK

- Extend detection to multiple LISN stations for regional statistics.
- Implement real-time processing for space weather applications.
- Assess performance during geomagnetic storm events.
- Explore machine learning approaches for adaptive thresholding.

6. ACKNOWLEDGMENTS

I am sincerely grateful to the JIREP Committee for selecting me for this unique opportunity. I thank Dr. Danny Scipión, Director of Geospace science-IGP, for his leadership; Dr. Edgardo Pacheco, my supervisor, for his invaluable guidance; and Dr. Ram Singh, for his insightful support throughout the program.

I also appreciate the assistance and friendliness of César De La Jara, Jose Carlos Rodríguez, and all the LISN department staff, as well as the helpful contributions of Karim Kuyeng and Anette Alessandra De la Cruz Meza.

My gratitude extends to the Instituto Geofísico del Perú (IGP) for hosting this remarkable program, and to all fellow interns and researchers for the inspiring collaboration and shared learning experiences. Above all, I thank God for the grace and opportunity to be part of this life-changing experience.

RECONSTRUCTION OF VERTICAL ELECTRON DENSITY PROFILES AND EXTRACTION OF REALISTIC TOPSIDE PARAMETERS OVER THE MAGNETIC EQUATOR: INSIGHTS FROM JICAMARCA ISR OBSERVATIONS

*Reconstrucción de perfiles verticales de densidad electrónica y extracción de parámetros realistas de superficie sobre el ecuador magnético: observaciones del ISR de Jicamarca

Siba Kiran Guru Kotakota

Indian Institute of Geomagnetism
sibakiranguru@gmail.com

Asesor:

Ram Singh

Dirección en Ciencias del Geoespacio

ABSTRACT

The ionosphere, a highly dynamic region of Earth's upper atmosphere, plays a critical role in radio wave propagation and space weather effects, particularly over equatorial and low-latitude regions where electrodynamic processes are complex. Among the ionospheric layers, the F2 region is of greatest importance due to its peak electron density and strong variability driven by solar, geomagnetic, and thermospheric influences. While ionosondes provide valuable bottomside observations, their inability to resolve the topside ionosphere where most of the total electron content resides limits their applicability. Incoherent scatter radars (ISRs) offer altitude-resolved measurements extending into the topside, with the Jicamarca Radio Observatory (IGP-JRO; 11.95° S, 76.87° W) serving as the world's premier equatorial ISR facility. In this study, vertical electron density profiles over the magnetic equator were reconstructed using ISR observations at IGP-JRO. Different modelling approaches, including the α -Chapman formulation, the semi-Epstein formulation, and a hybrid scheme optimized on the basis of RMSE and nRMSE from least-squares fittings were applied to extract realistic topside parameters such as the scale height at the F2 peak (H_m) and its altitudinal gradient (α). These parameters, which fundamentally govern the shape of the topside profile, were further analysed for variations driven by seasonal, solar activity, and geomagnetic factors. The overarching aim is to develop a robust methodology for reconstructing topside electron density profiles that can complement ionosonde observations in regions lacking ISR coverage, particularly over the highly dynamic equatorial and low-latitude ionosphere. The outcomes of this work provide new insights into equatorial ionospheric dynamics and support the improvement of global ionospheric models for communication, navigation, and space weather applications.

Keywords: Ionosphere, radio wave propagation, electrodynamic processes, F2 region

RESUMEN

La ionósfera, una región altamente dinámica de la atmósfera superior de la Tierra, desempeña un papel fundamental en la propagación de ondas de radio y los efectos del clima espacial, particularmente en las regiones ecuatoriales y de baja latitud donde los procesos electrodinámicos son complejos. Entre las capas ionosféricas, la región F2 es la de mayor importancia debido a su densidad máxima de electrones y su fuerte variabilidad impulsada por influencias solares, geomagnéticas y termoesféricas. Si bien las ionosondas proporcionan valiosas observaciones de fondo, su incapacidad para resolver la ionósfera de la superficie, donde reside la mayor parte del contenido total de electrones, limita su aplicabilidad. Los radares de dispersión incoherentes (ISR) ofrecen mediciones con resolución de altitud que se extienden hacia la parte superior, como

el Radio Observatorio de Jicamarca (IGP-JRO; 11.95° S, 76.87° W), que se constituye como la principal instalación de ISR ecuatorial del mundo. En este estudio se reconstruyeron perfiles verticales de densidad electrónica sobre el ecuador magnético utilizando observaciones ISR en IGP-JRO. Se aplicaron diferentes enfoques de modelado, incluyendo la formulación α -Chapman, la formulación semiEpstein y un esquema híbrido optimizado sobre la base de RMSE y nRMSE a partir de ajustes de mínimos cuadrados, para extraer parámetros topside realistas, tales como la altura de escala en el pico F2 (Hm) y su gradiente altitudinal (α). Estos parámetros, que fundamentalmente rigen la forma del perfil de superficie, se analizaron más a fondo en relación con las variaciones estacionales, la actividad solar y la actividad geomagnética. El objetivo general es desarrollar una metodología sólida para reconstruir los perfiles de densidad de electrones en la superficie que puedan complementar las observaciones de ionosondas en regiones sin cobertura ISR, particularmente sobre la altamente dinámica ionósfera ecuatorial y de baja latitud. Los resultados de este trabajo proporcionan nuevos conocimientos sobre la dinámica de la ionósfera ecuatorial y apoyan el mejoramiento de los modelos globales de la ionósfera para las aplicaciones de comunicación, navegación y meteorología espacial.

Palabras clave: Ionósfera, propagación de ondas de radio, procesos electrodinámicos, región F2

1. INTRODUCTION

The ionosphere, a crucial region of Earth's upper atmosphere ranging approximately from 50 to 1000 km altitude, is characterized by its highly variable plasma composition and electron density. This dynamic environment plays a vital role in controlling the propagation of radio waves, particularly in the high-frequency (HF) band, through mechanisms such as reflection, refraction, and absorption. As a result, understanding the vertical structure and temporal behaviour of ionospheric electron density is essential for the reliability of communication, navigation, and surveillance systems especially near the equatorial and low-latitude regions, where electrodynamic processes are particularly complex and unpredictable. Due to the diverse sources of ionization and altitude-dependent plasma behaviour, the ionosphere is conventionally divided into the D, E, and F layers. The F-layer is further divided into two layers, F1 and F2. These layers are distinguished by electron density and altitude, with the F1 layer typically located at lower altitudes than the F2. Among these, the F-region, particularly the F2 layer is of greatest importance in space research, as it contains the peak electron density and exhibits significant spatial and temporal variability. These variations are driven by solar radiation, geomagnetic activity, thermospheric winds, and electrodynamic $E \times B$ drifts, making the F2 layer highly sensitive to both regular and disturbed space weather conditions. To study ionospheric structure and dynamics, researchers employ both ground-based and space-based observational techniques. Ground-based ionosondes are among the oldest and most widely used tools, providing vertical sounding of the ionosphere by transmitting radio pulses and analysing their reflected echoes. Although ionosondes effectively map the bottomside ionosphere, they are inherently limited in their ability to resolve the topside region, that is altitudes above the F2 peak where the majority of the ionosphere's total electron content (TEC) resides. Space-based platforms such as satellites and sounding rockets equipped with Langmuir probes, retarding potential analysers, and instruments like plasma wave detectors can offer valuable in-situ measurements of electron density. However, such observations are often spatially and temporally sparse, constrained by orbital dynamics and limited revisit times over specific ground locations. In this context, incoherent scatter radars (ISRs) serve as a powerful alternative for comprehensive ionospheric profiling. ISRs, such as the one at the Jicamarca Radio Observatory near the magnetic equator, operate by transmitting high-power radio waves and analysing the weak backscattered

signals from free electrons in the ionosphere. They provide altitude-resolved measurements of electron density, ion and electron temperatures, and ion composition from the bottomside E region well into the topside F region and beyond, with high temporal resolution and accuracy. Despite their capabilities, ISR measurements are still bounded by observational limitations, especially under conditions of low signal-to-noise ratio in the topside region. Moreover, ISRs are geographically limited to a few locations worldwide, which restricts their global applicability for wide range ionospheric research. To overcome these challenges, various empirical and semi-empirical models are employed to reconstruct vertical electron density profiles beyond the F2 peak (Gao et al., 2024a; Pignalberi et al., 2020). These models, such as the α -Chapman and semi-Epstein formulations, are typically fitted to available observations to extrapolate realistic topside behaviour. Hybrid modelling approaches that integrate observational constraints with theoretical assumptions have also gained attention, particularly when in-situ satellite data are unavailable.

The purpose of this work is to reconstruct vertical electron density profiles over the magnetic equator using incoherent scatter radar (ISR) measurements performed at the Jicamarca Radio Observatory (IGP-JRO). The IGP-JRO (11.95° S, 76.87° W) is an equatorial station located near Lima, Peru, and comprises a suite of radio and optical remote sensing instruments, with its centrepiece facility being a 50 MHz incoherent scatter radar featuring megawatt power transmitters and a 300 m by 300 m modular antenna array system. The incoherent scatter radar at IGP-JRO is the premier instrument used to probe the equatorial ionosphere worldwide, possessing the largest power-aperture product in the VHF band (Woodman et al., 2015). Different topside modelling approaches including α -Chapman, semi-Epstein, and hybrid model which is combination of the both models on the basis of realistic fitting of observed electron density were applied to extract realistic topside parameters such as the scale height at the F2 peak and its linear altitudinal gradient. Since ionospheric scale height is a fundamental parameter governing the shape of the topside profile, its accurate estimation is critical for reliable modelling. Further analysis was carried out on the basis of the seasonal, solar activity, and geomagnetic activity-based variations of these parameters. The ultimate goal is to develop a robust understanding of topside structure that, when combined with bottomside ionosonde data at other locations, can be used to reconstruct near-accurate topside profiles where ISR measurements are not available. The results

from this study provide valuable insights into equatorial ionospheric dynamics and support the improvement of global ionospheric models for space weather applications.

2. OBJECTIVES

The primary objectives of the study are listed as follows.

- To reconstruct vertical electron density profiles over the magnetic equator using Jicamarca ISR observations.
- To apply and compare different ionospheric modelling approaches, including α -Chapman and semi-Epstein.
- To understand the deviation in chapman theory in describing ionospheric density.
- To extract realistic topside parameters, particularly the scale height at the F2 peak and its linear variation with altitude.
- To analyse the seasonal, solar activity, and geomagnetic activity-based variations of the topside scale height and the linear gradient in topside scale height.

3. DESCRIPTION AND DEVELOPMENT

In the present study, incoherent scatter radar (ISR) based electron density profiles over the Jicamarca Radio Observatory were analysed for the period spanning 2013 to 2024 to accommodate all solar flux conditions. These profiles were obtained using the double pulse Faraday rotation experiment (Oblique Mode), a reliable technique for determining absolute electron density by exploiting the Faraday rotation of linearly polarized radar signals as they traverse the ionospheric plasma (Hysell et al., 2015). This method ensures high vertical resolution and accurate estimation of plasma parameters, especially in the F-region and topside ionosphere.

The electron density data were acquired from the CEDAR Madrigal database at <https://cedar.openmadrigal.org>, a publicly accessible repository that archives geospace observational data from various instruments worldwide. To study the influence of geophysical conditions on topside behaviour, daily average values of F10.7 solar flux and Kp indices were also included in the analysis. These indices were obtained from the NASA OMNIWeb database at <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>.

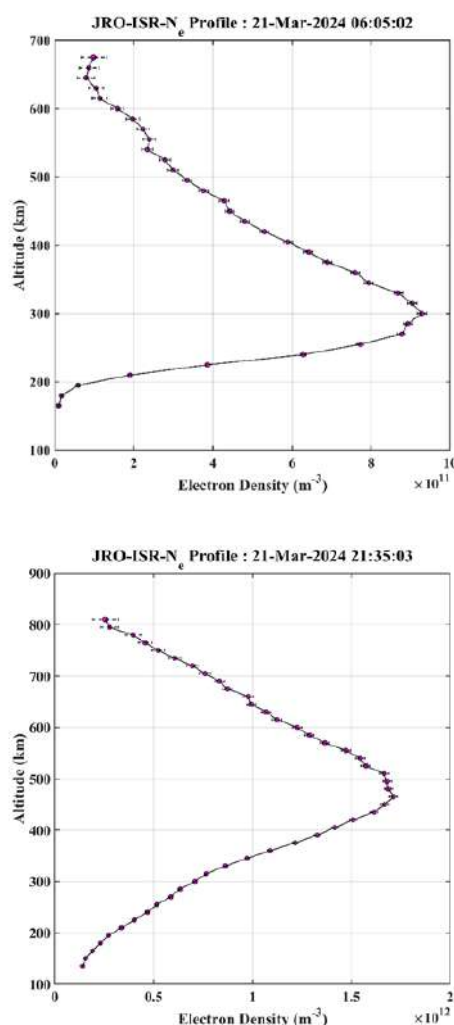


Figure 1. Typical electron density profiles over Jicamarca measured by ISR.

Figure 1 shows two representative examples of electron density profiles observed by the Jicamarca ISR on 21 March 2024. The horizontal dashed lines denote the uncertainty bounds associated with the electron density measurements. In total, over 20,000 ISR-derived electron density profiles were analysed in this study, spanning the period from 2013 to 2024. The data were obtained for 243 individual days across this interval. Notably, no density measurements were available for the year 2016, and data below 200 km altitude were excluded from all profiles to avoid low-altitude artifacts.

3.1 Model fitting and quality control

All valid electron density profiles were fitted using both the α -Chapman and Semi-Epstein formulations through non-linear least squares fitting. The scale height was varied between 10 km and 150 km

to determine the best-fit value for each profile. Using the optimal scale height at the F2 peak, the corresponding linear gradient of the topside scale height was then estimated. The objective of this process was to accurately model the topside electron density structure by optimizing the scale height parameters and identifying the most representative formulation of the ionosphere's vertical behaviour.

- Model Formulation

- » α -Chapman Function: It is a widely used method to describe the electron density distribution of the ionosphere, especially around the F-region. This method is derived from theoretical consideration of photoionization and recombination under isothermal atmosphere.

$$N_e(h) = NmF_2 \cdot \exp\left[\frac{1}{2} (1 - z - e^{-z})\right]$$

- » Semi-Epstein Function: A more flexible empirical model that smoothly transitions between two asymptotic regions.

$$N_e(h) = 4NmF_2 \frac{\exp(z)}{[1 + \exp(z)]^2}$$

For linearly varying topside.

$$z = \frac{(h - hmF_2)}{H_0 + \alpha(h - hmF_2)}$$

For bottomside, $\alpha = 0$ here,
 $N_e(h)$: electron density at height h
 N_mF_2 and h_mF_2 : peak density and height respectively
 H_0 : scale height at peak
 α : topside linear gradient (km^{-1})

The fitting procedure is depicted in Figure 2. The estimated scale heights (H_0) and corresponding topside scale height gradients (α) for both models are indicated in the legend.

The profile times are given in UT. A distinct contrast can be observed between the nighttime (left) and daytime (right) profiles in terms of both the fitted scale height and the gradient behaviour. These differences and their geophysical implications are discussed in detail in later sections.

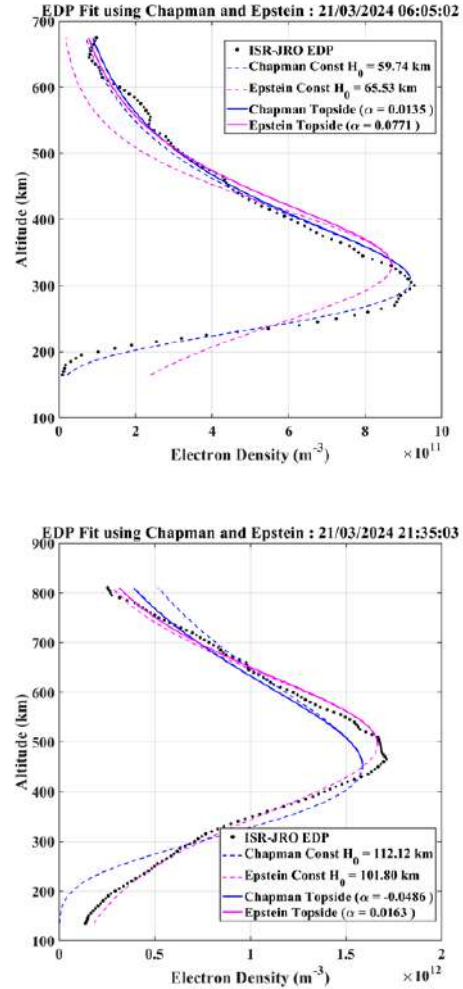


Figure 2. Fitting procedure of electron density profiles for two typical profiles on 21st March, 2024.

- Error Metrics

To evaluate the fitting performance of both models, two error metrics were computed:

- » Root Mean Square Error (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{N_{e,obs}(h_i) - N_{e,fit}(h_i)\}^2}$$

- » Root Mean Square Error (RMSE):

$$nRMSE = \frac{RMSE}{N_mF_2} \times 100 \%$$

These metrics were used to quantify the goodness of fit and guide the selection of the most physically realistic profiles.

- Quality control and filtering
All invalid, noisy, and anomalous profiles were removed through a set of strict quality control filters. The final dataset includes only profiles satisfying the following selection criteria:

- » $10^{10} \text{ m}^{-3} \leq N_m F_2 \leq 10^{13} \text{ m}^{-3}$
- » $200 \text{ km} \leq h_m F_2 \leq 500 \text{ km}$
- » $10 \text{ km} \leq H_o \leq 150 \text{ km}$
- » $-1 < \alpha < 1$
- » $\text{nRMSE} < 15 \%$

Only profiles meeting all the above conditions were considered for further seasonal, solar activity, and geomagnetic activity-based analysis. The overall statistics of all the selected profiles are presented in Figure 3.

The dataset was categorized into two solar activity classes based on the daily average F10.7 solar flux:

- » High Solar Activity: $F10.7 \geq 120$
- » Moderate Solar Activity: $F10.7 < 120$

Similarly, based on the daily K_p index, the profiles were classified by geomagnetic activity as:

- » High Geomagnetic Activity: $K_p \geq 2$
- » Low Geomagnetic Activity: $K_p < 2$

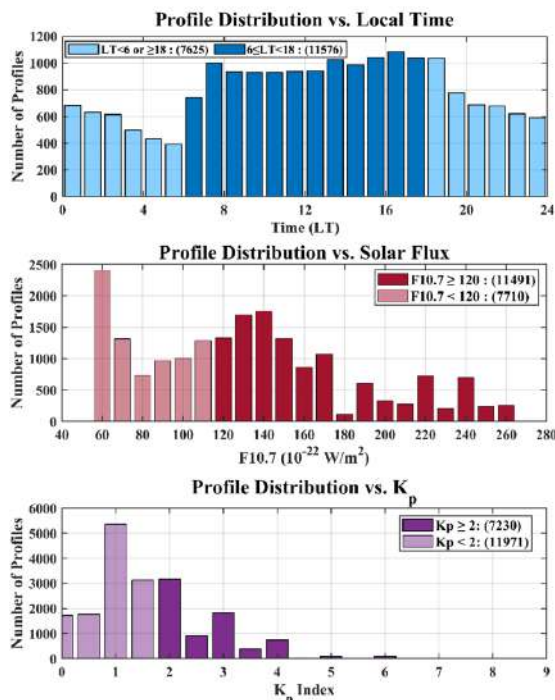


Figure 3. Data statistics of all the profiles used in the study.

3.2 Hybrid method for optimal model selection and parameter extraction

To improve the accuracy of topside electron density modelling, a hybrid method was introduced in this study to dynamically select the most suitable fitting model either α -Chapman or Semi-Epstein based on specific error metrics and profile characteristics. This approach ensures better representation of the topside ionosphere, especially under varying geophysical conditions.

Figure 4 illustrates the performance of both models and proposed hybrid approach for a representative day: 21 March, 2024. The top-left panel shows the observed ISR electron density profiles as a function of time and height. The corresponding modelled densities using the α -Chapman and Semi-Epstein formulations with linearly varying scale height, and the hybrid density are shown in the left panels, respectively. The residuals (Observed – Modelled or Hybrid) for each method are presented in the right column. From the residual plots, it is evident that the Chapman model underperforms during daytime hours, particularly in the noon sector, failing to capture the elevated densities in the topside region. In contrast, the Epstein model shows smaller residuals, indicating a better fit during those hours. But, in the early morning and night time Chapman model performs well.

To determine the best-fitting model at each time step, a hybrid approach was employed by giving equal weightage to $\Delta h m F_2$ (deviation of the modelled F2-peak height from observation), nRMSE (Normalized Root Mean Square Error), and RMSE (Root Mean Square Error). The model (Chapman or Epstein) that minimized these errors was selected as the better representation for that time step. The corresponding scale height at the F2 peak (H_p) and the linear gradient (α) were extracted and retained for further statistical analysis.

This hybrid strategy enables a more realistic reconstruction of the topside profile by combining the strengths of both formulations while mitigating their limitations. The results of this analysis including seasonal, solar, and geomagnetic variations in scale height and gradient are presented in the next sections.

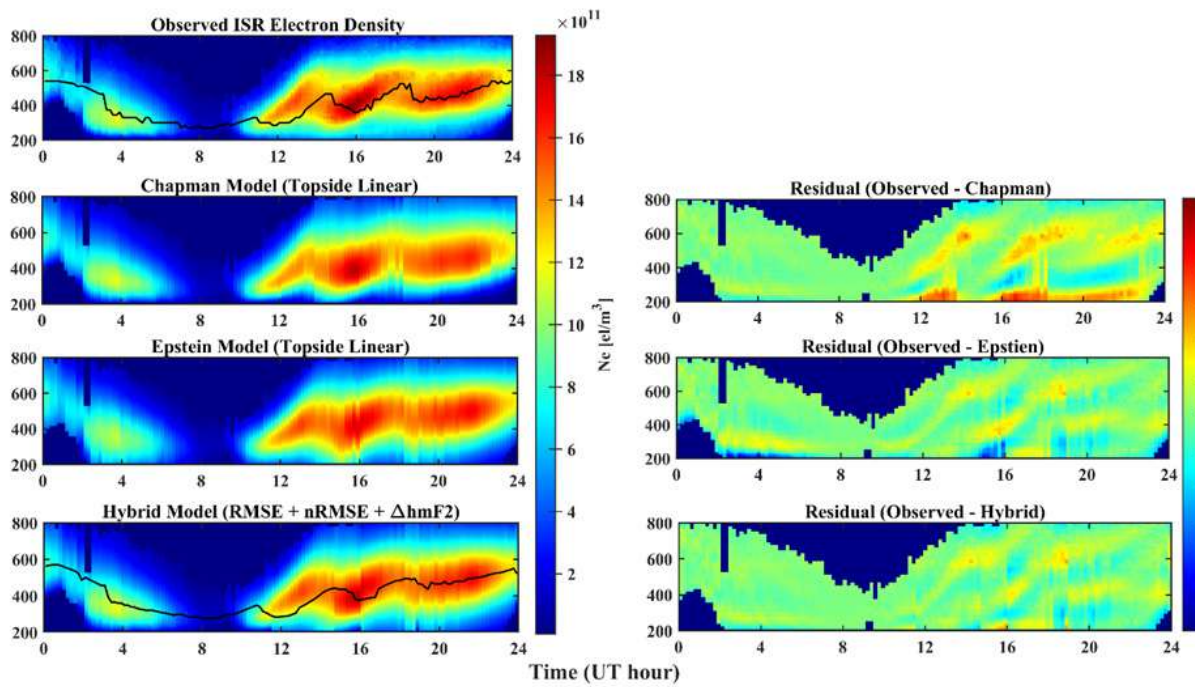


Figure 4. Comparison of Diurnal Variation in ISR electron density profiles fitted using α -Chapman and Semi-Epstein models on 21st March, 2024.

4. RESULTS

In this section some of the important findings of this study are outlined.

4.1 Superiority of hybrid approach in estimating topside parameters

Figure 5 illustrates the ν variation of RMSE and nRMSE for the Chapman, Epstein, and Hybrid reconstruction methods under varying solar and geomagnetic activity conditions. The performance of each model is evaluated across the diurnal cycle to identify model reliability during different geophysical states.

It is evident that the Hybrid method consistently

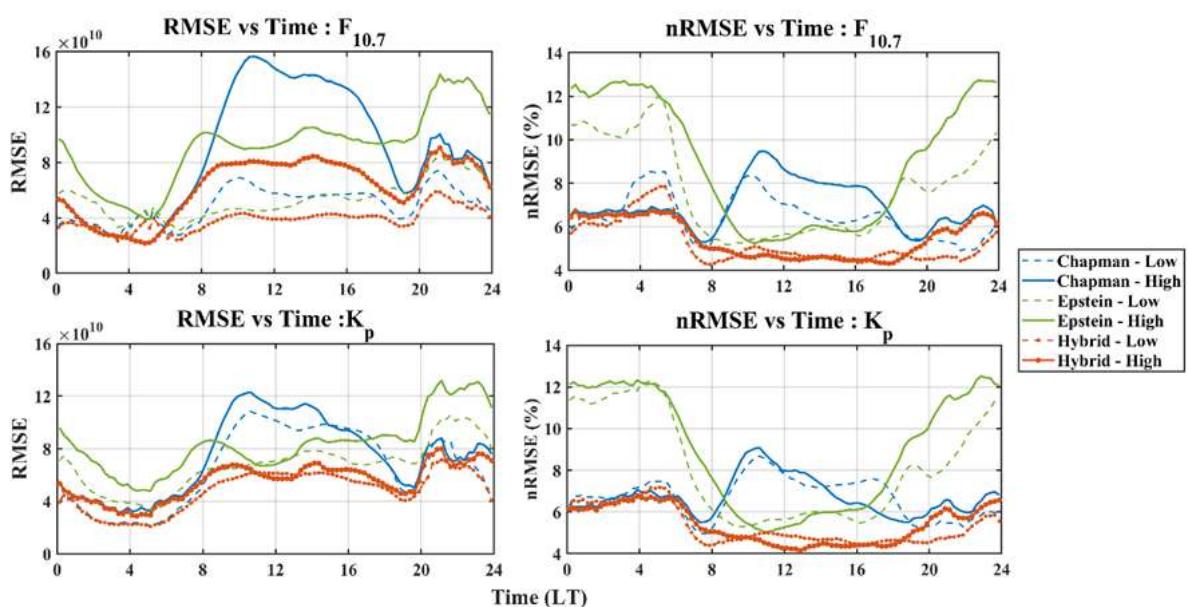


Figure 5. Error analysis of chapman, Epstein, and hybrid method.

yields the lowest RMSE and nRMSE values, confirming its robustness and adaptability across all conditions. The Chapman model performs relatively better during nighttime and early morning hours, where the topside profile exhibits more gradual variations. However, it tends to produce significant errors during daytime, likely due to its limited ability to capture steep density gradients. On the other hand, the Epstein model demonstrates improved performance during daytime hours, where its flexibility in scale height formulation better represents the rapidly changing topside structure. Despite this, it still underperforms in comparison to the Hybrid method.

These findings reinforce that the Hybrid approach provides more accurate and reliable representations of topside electron density, particularly in terms of scale height and gradient parameters under dynamic geophysical conditions.

4.2 Diurnal variation of H_0 and α under different geophysical conditions

Figure 6 presents the diurnal variation of scale height (H_0) and gradient (α) derived using the Hybrid method, categorized by solar and

geomagnetic activity levels. The upper panel shows the variation of H_0 under high and moderate solar activity, as well as under high and low geomagnetic activity. A clear diurnal trend is observed, with H_0 peaking around local noon (Liu et al., 2019). Under low solar activity, a secondary peak is also noticeable during early morning hours. In contrast, geomagnetic activity appears to have a lesser influence on H_0 . The lower panel illustrates the behaviour of the gradient α , which exhibits sensitivity to both solar and geomagnetic conditions. Unlike previous studies relying solely on the Chapman model (Gao et al., 2024b), the gradient does not show pronounced negative values during daytime. Instead, distinct enhancements in α are observed during morning and evening hours. These features suggest a modulation in topside electron density driven by dynamic changes in the scale height gradient.

For the purpose of further analysis, the profiles were categorized into three seasons based on observation months by enabling seasonal trends in topside ionospheric parameters under varying solar and geomagnetic activity levels:

- Summer: November, December, January, and February.
- Winter: May, June, July, and August.
- Equinox: March, April, September, and October.

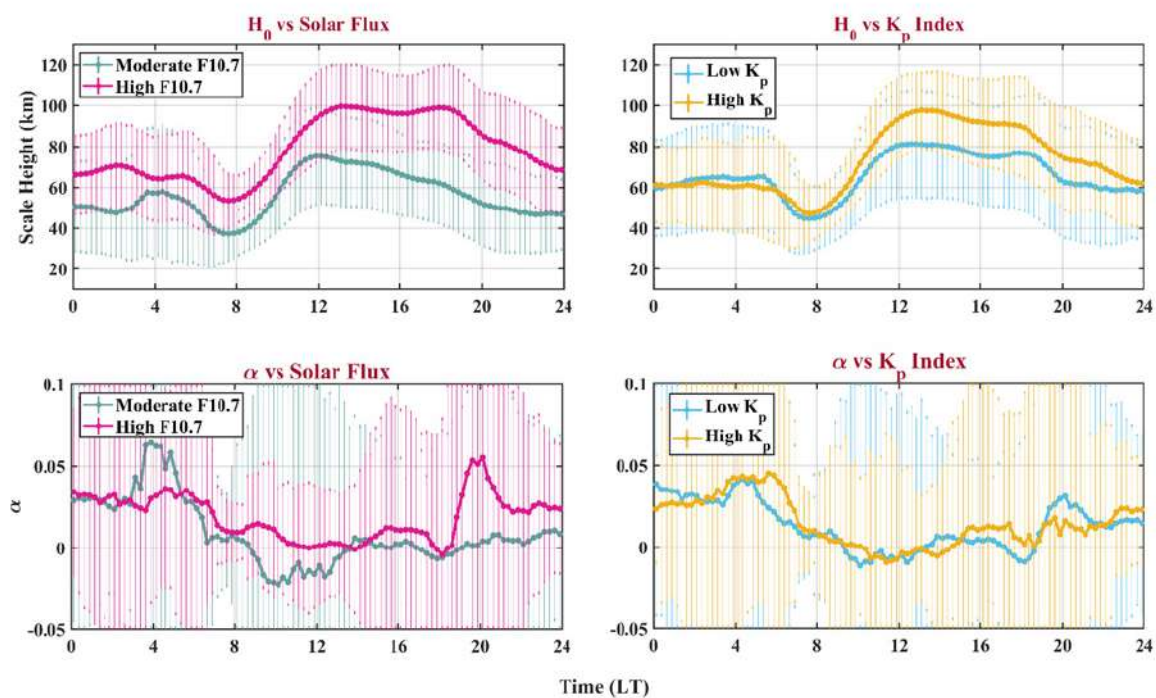


Figure 6. Diurnal variation in scale height and its linear gradient under varied solar and geomagnetic activity levels

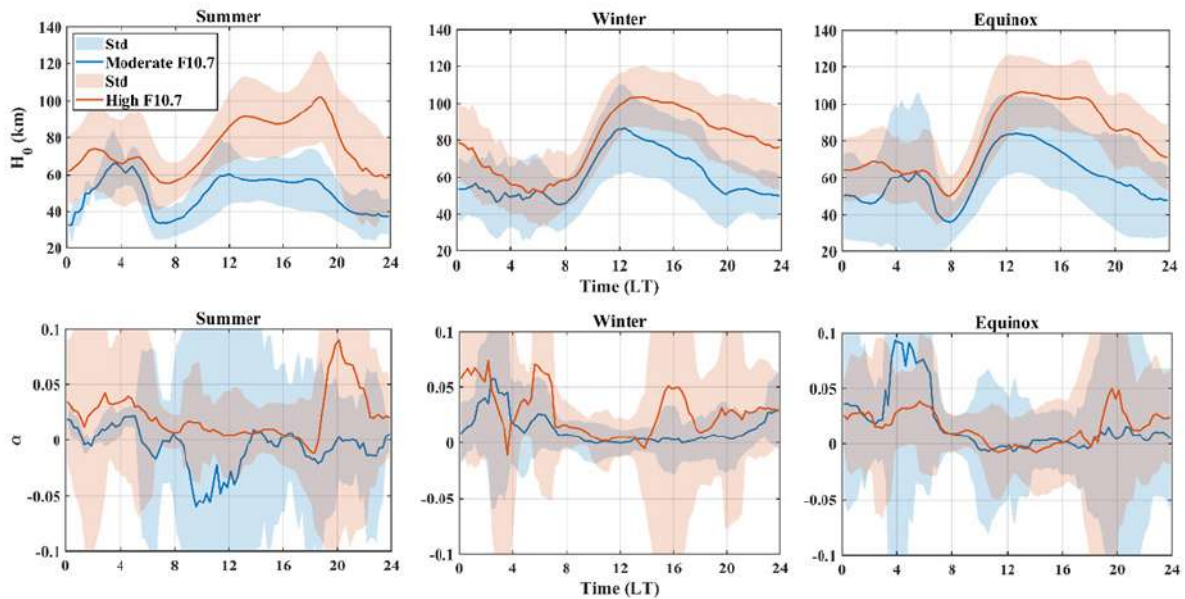


Figure 7. Seasonal variation in scale height and its linear gradient under varied solar activity.

Figure 7 illustrates the seasonal variation in the diurnal behaviour of the H_0 and α under high and moderate solar activity conditions. A distinct morning peak in H_0 is observed during Summer and Equinox, which is notably absent in Winter. Interestingly, under moderate solar activity in Summer, the morning peak in scale height surpasses the noon peak, suggesting dynamic early morning processes. Overall, the scale height tends to be lower during Winter months compared to Summer and Equinox, reflecting seasonal differences in thermospheric conditions. The gradient α shows a strong seasonal dependence as well. Under moderate solar activity, a more negative gradient is seen during the daytime in Summer, indicating a sharper decay of electron density with altitude. Evening enhancements in α are a consistent feature across all seasons under high solar activity, though the peak tends to occur earlier in Winter. Additionally, a pronounced daytime enhancement in α is particularly evident during Equinox months. While not shown here, a similar seasonal behaviour is observed under varying geomagnetic conditions, with only minor differences.

4.3 Features of altitudinal variation in topside scale height under varied solar activity

Figure 8 presents the diurnal variation of topside scale height as a function of relative height ($h-hmF2$), derived using the Hybrid method (upper panel) and

the Chapman method (lower panel), for moderate and high solar activity conditions. Both methods reproduce the early morning enhancement in scale height, which is more prominent during moderate solar activity, and also capture the evening rise, especially under high solar activity. However, during daytime hours, the Chapman method shows a pronounced reduction in topside scale height due to its assumption of a consistently negative gradient, which limits its ability to reflect the more gradual variation seen in actual observations. The Hybrid approach, on the other hand, maintains more realistic scale height values during the day, avoiding such underestimation.

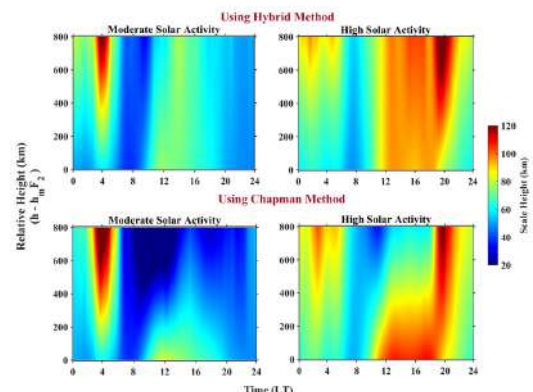


Figure 8. Altitudinal variation of topside scale height (HT) over magnetic equator.

To validate these observations, full-profile ISR data from a special experiment conducted on 14 July 2015 at Jicamarca are presented below.

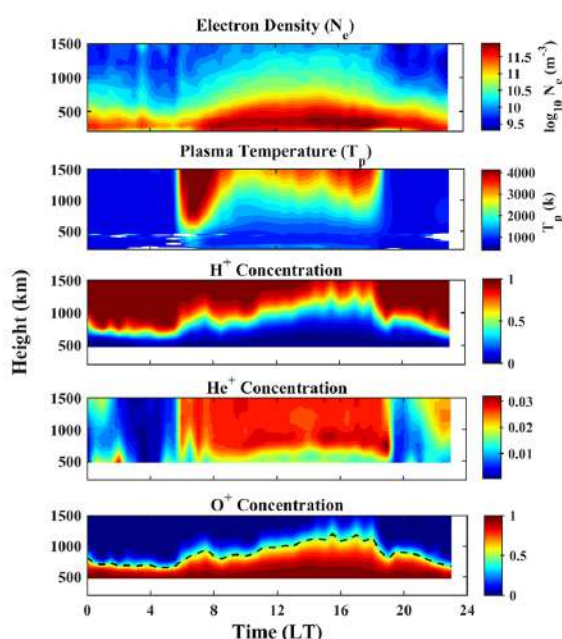


Figure 9. Full profile parameters over Jicamarca on 14th July, 2015.

Figure 9 includes electron density (N_e), plasma temperature ($T_p = (T_e + T_i)/2$), and ion composition (H^+ , He^+ , and O^+ fractions). The plasma temperature exhibits distinct early morning and evening enhancements, with relatively slower variations during the day, consistent with the behaviour predicted by the Hybrid method. This comparison highlights the improved physical consistency and accuracy of the Hybrid approach in modelling topside ionospheric conditions.

The analysis clearly demonstrates the superior performance of the Hybrid reconstruction method across varying solar and geomagnetic conditions. While the Chapman and Epstein models capture specific features such as nighttime accuracy and daytime behaviour respectively, the Hybrid method combines their strengths and provides more reliable estimates of topside scale height and gradient. Seasonal and diurnal variations, as well as validation with full-profile ISR data, further reinforce its consistency with physical observations. These results underline the Hybrid approach as a robust tool for characterizing topside ionospheric parameters.

5. FUTURE WORK

In this study, a comprehensive comparison of three topside electron density profile reconstruction methods Chapman, Epstein, and a newly implemented Hybrid approach was carried out using Jicamarca ISR observations under varying

geophysical conditions. The results highlight the limitations of individual models: the Chapman method performs well during nighttime but fails to capture daytime density behaviour accurately, while the Epstein model better captures daytime variations. The Hybrid method, by selecting the optimal model based on RMSE, nRMSE, and $\Delta hmF2$ criteria for each time instance, proves to be consistently more accurate across all conditions. The diurnal and seasonal analysis of topside scale height (H_o) and gradient (α) reveals unique temporal features such as early morning and evening enhancements, which are better preserved by the Hybrid approach. These variations correlate well with plasma temperature and composition, as observed from full-profile ISR experiments, reinforcing the physical relevance of the method.

The future work will focus on integrating these topside observations with Ionosonde-derived bottomside profiles to develop a continuous and more precise ionospheric density profile. Additionally, a detailed scientific investigation will be conducted to understand the underlying physical processes that make the Hybrid approach superior, particularly its ability to adaptively capture transitions in ionospheric dynamics that static models like Chapman and Epstein cannot fully resolve when used independently.

6. ACKNOWLEDGMENTS

I sincerely acknowledge the Geophysical Institute of Peru (IGP) through the Jicamarca Radio Observatory (IGP-JRO) for providing me the opportunity to carry out this work through the JIREP 2025 program. I am grateful to Ciencia Internacional (CI) and the U.S. National Science Foundation (NSF) for funding this program. I would like to express my heartfelt thanks to Dr. Danny Scipion, Director of Geospace Science Program, for selecting me for this prestigious program and for his leadership and support. Heartfelt gratitude is extended to my supervisor, Prof. Sripathi, and the Indian Institute of Geomagnetism (IIG) for their continuous guidance and support, as well as for granting permission to undertake this international research experience. A very special thanks to Dr. Ram Singh for his invaluable mentorship and scientific guidance throughout the entire JIREP tenure. Finally, I thank the entire IGP-JRO team for their technical and administrative support, which was instrumental in the successful completion of this research work.

7. REFERENCES

- Gao, S., Xiong, C., Zhu, Z., Zhan, W., Pignalberi, A., & Zhang, H. (2024). Altitudinal Variation of O⁺ Scale Height at the Equatorial Topside Ionosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129(12). <https://doi.org/10.1029/2024JA033033>
- Hysell, D. L., Milla, M. A., Rodrigues, F. S., Varney, R. H., & Huba, J. D. (2015). Topside equatorial ionospheric density, temperature, and composition under equinox, low solar flux conditions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(5), 3899-3912
- Liu, L., Wan, W., Zhang, M. L., Ning, B., Zhang, S. R., & Holt, J. M. (2007, October). Variations of topside ionospheric scale heights over Millstone Hill during the 30-day incoherent scatter radar experiment. In *Annales Geophysicae* (Vol. 25, No. 9, pp. 2019-2027). Göttingen, Germany: Copernicus Publications
- Pignalberi, A., Pezzopane, M., Nava, B., & Coisson, P. (2020). On the link between the topside ionospheric effective scale height and the plasma ambipolar diffusion, theory and preliminary results. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73886-4>
- Woodman, R. F., Farley, D. T., Balsley, B. B., and Milla, M. A.: The early history of the Jicamarca Radio Observatory and the incoherent scatter technique, *Hist. Geo Space. Sci.*, 10, 245–266, <https://doi.org/10.5194/hgss-10-245-2019>, 2019

ANALYSIS OF SPREAD F EVENTS OVER JICAMARCA AND TUCUMAN USING GROUND-BASED MEASUREMENTS

*Análisis de los eventos de propagación F sobre Jicamarca y Tucumán utilizando mediciones terrestres

Ana Paulina Aragón Rodríguez

National University of Tucuman
anitaaragonrodriguez@gmail.com

Asesor:

Edgardo Pacheco
Dirección en Ciencias del Geoespacio

ABSTRACT

This study analyzes the occurrence of the ionospheric phenomenon Spread F using ground-based measurements at two stations: one located at Jicamarca (Peru) and the other one at Tucuman (Argentina). At Jicamarca, RTI graphs from the IGP-JRO radar in JULIA mode were used to identify irregularities in the ionospheric plasma. In Tucuman, an automated analysis of VIPIR ionosonde data was used, combining measurement modes and generating power histograms to classify large-scale events. The results are compared with climatological data and observations from the SWARM satellite, revealing a higher occurrence in Jicamarca due to its proximity to the geomagnetic equator. The study contributes to the understanding of the spatial variability of Spread F and its dependence on geographical and geomagnetic coordinates.

Keywords: Ionospheric irregularities, ground-based measurements, climatological data

RESUMEN

En este estudio se analiza la ocurrencia del fenómeno ionosférico Spread F, mediante mediciones realizadas desde tierra en dos estaciones ubicadas en Jicamarca (Perú) y Tucumán (Argentina). En Jicamarca, los gráficos RTI del radar IGP-ROJ en modo JULIA se utilizan para identificar irregularidades en el plasma ionosférico. En Tucumán se utiliza un análisis automatizado de los datos de la ionosonda VIPIR, combinando modos de medición y generando histogramas de potencia para clasificar eventos a gran escala. Los resultados se comparan con datos climatológicos y observaciones del satélite SWARM, revelando una mayor ocurrencia en Jicamarca debido a su proximidad al ecuador geomagnético. El estudio contribuye a la comprensión de la variabilidad espacial del Spread F y su dependencia de las coordenadas geográficas y geomagnéticas.

Palabras clave: Irregularidades ionosféricas, mediciones terrestres, datos climatológicos

1. INTRODUCTION

The ionosphere is a region of the Earth's atmosphere that extends from approximately 80 km to 600 km in altitude. In this zone, solar radiation ionizes atmospheric particles, generating plasma, a medium capable of refracting radio waves as we can see in Figure 1. This property is fundamental for the propagation of signals in communication and navigation systems. The ionosphere is divided into layers D, E, and F, whose structure varies between day and night: during the day, the F region is subdivided into F1 and F2, while at night it is reduced to a single F layer due to plasma recombination.

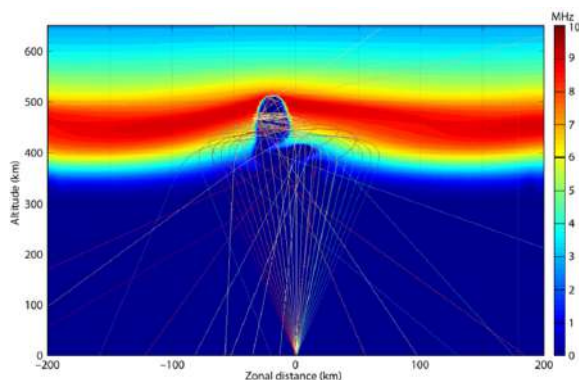


Figure 1. Radio wave dispersion associated with the Spread F phenomenon.

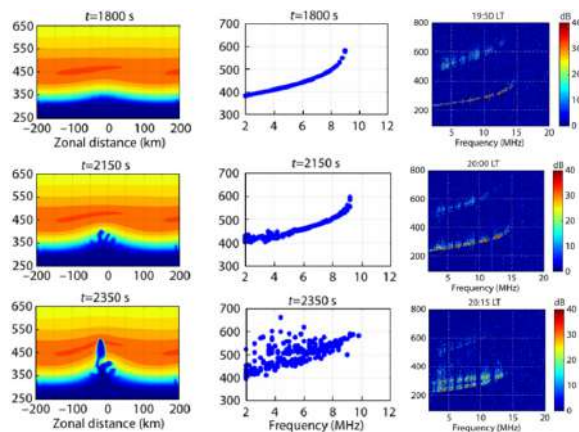


Figure 2. Ionospheric disturbance and its manifestation in ionograms.

After the transition from day to night, an irregularity known as equatorial Spread-F (ESF), or simply Spread-F, may arise, which is the main focus of this study. This phenomenon was first observed in 1938 in Huancayo, Peru[1][2], and is characterized by a dispersion in the traces of ionograms, as we can see in Figure 2, records obtained by ionosondes, instruments that emit

radio waves at different frequencies and measure the delay time and intensity of the reflected signals. Spread-F is caused by the formation of low density plasma bubbles at the bottom of the F layer. These bubbles rise, generating plume-like structures that can be observed in RTI (rangetime-intensity) graphs obtained with radars such as JULIA[3].

Most importantly, these irregularities modify the refractive index of the ionospheric plasma, causing an anomalous deviation of radio waves. This refraction can alter their trajectory, scatter them, or even prevent their proper reflection, generating interference and signal degradation in systems that depend on ionospheric propagation, such as GPS, HF communications, and near-space radars. The study of Spread-F not only improves the ability to predict ionospheric events, but also contributes to understanding the underlying physical mechanisms, such as equatorial dynamics and plasma instabilities. Given its complexity, automated strategies have been developed to facilitate its analysis, with the aim of advancing toward a more reproducible, accessible, and useful science for technological applications sensitive to near-space conditions.

2. PROBLEM DESCRIPTION AND OBJECTIVES

Spread F can be recognized when the signal trace widens, loses definition, or shows multiple trajectories in ionograms. This occurs in certain representative cases observable in Figure 2. However, its visual and manual classification is complex due to factors such as signal hops, interference, and subjective criteria that vary among researchers, among others. This difficulty drives the need for a clear strategy for their analysis. Therefore, a methodology is proposed to evaluate the occurrence rate of Spread F using data from the IGP-JRO and Tucuman stations. This methodology is based on the manual classification of ionograms using histograms and the binarization of RTIs by power, also considering the geographical and geomagnetic location of each station.

3. DESCRIPTION AND DEVELOPMENT

3.1 Evaluation of results through scientific literature

Relevant scientific literature has been selected to compare the expected results of the proposed

methodology. In particular, the article entitled “Statistical Analysis of Equatorial Plasma Irregularities From Swarm 2013–2019 Observations” by Aa, Zou, and Liu (2020)[4] has been considered, which performs a comprehensive statistical analysis of equatorial plasma irregularities (EPIs) using in situ electron density data obtained by the Swarm satellite constellation between December 2013 and December 2019. This study characterizes the occurrence of EPIs based on geospatial and temporal parameters, evaluating their longitudinal distribution using geographic coordinates. The authors identify patterns of seasonal and diurnal variability, as well as significant differences between regions as we can see in Figure 3. In particular, they highlight that the region near Jicamarca (approximately 75°W) has one of the highest rates of EPI occurrence compared to other equatorial longitudes, reinforcing its relevance as an observation and validation site for ionospheric studies.

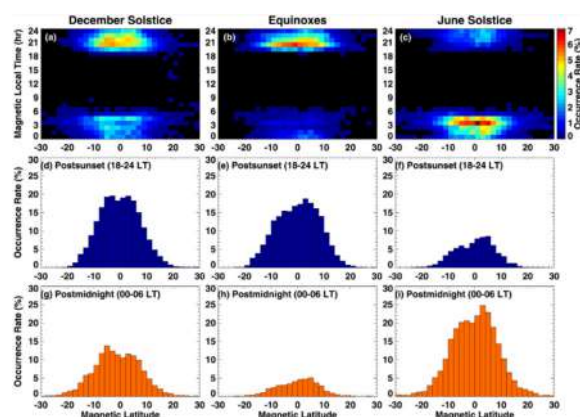


Figure 3. Spread F occurrence rates as a function of magnetic latitude and local time during different seasonal periods, highlighting greater activity in Jicamarca compared to Tucuman.

The article also discusses the influence of factors such as solar activity, the Kp index, and local time on the generation of these irregularities, providing a robust statistical framework for interpreting future results obtained using similar methodologies.

The article “Climatology of Spread F Over Tucuman from Massive Statistical Analysis of Autoscaled Data” by Scotto and Sabbagh (2021) [5] was also considered, which presents a detailed climatological study of the occurrence of Spread F at the Tucumán station using more than 328,000 ionograms recorded between 2012 and 2020 by the AIS-INGV ionosonde.

The analysis was performed using Autoscala software, which allows for the automatic interpretation of ionograms and the detection of diffuse echoes associated with ionospheric

irregularities. This tool was originally designed to discard low-quality ionograms, but in this study it is used as a tool for massive retrospective analysis, allowing for the identification of temporal and spatial patterns of Spread F with high resolution.

The study considers three levels of solar activity -high (HSA), medium (MSA), and low (LSA) and three ranges of geomagnetic activity defined by the ap index: quiet conditions ($ap < 7$), moderately disturbed ($7 \leq ap < 27$), and highly disturbed ($ap \geq 27$). The results show that the maximum occurrence of Spread F is recorded during the local summer, and that the time of appearance tends to be earlier than midnight under conditions of high solar activity. In addition, it is observed that under highly disturbed geomagnetic conditions, the occurrence of Spread F persists after midnight, even during HSA, as we can see in Figure 4.

The article also highlights Autoscala’s ability to detect the post-twilight rise of the F2 layer (hmF2), a phenomenon that precedes the development of Spread F. This temporal evolution of the electron density profile allows us to infer favorable conditions for the formation of irregularities, which opens up possibilities for applications in space weather monitoring and prediction.

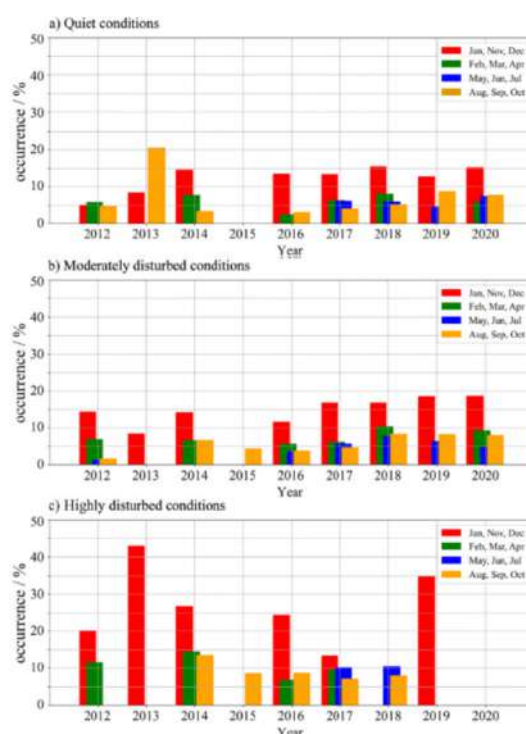


Figure 4. Percentage distribution of Spread F occurrences in Tucuman under geomagnetic conditions classified as: (a) quiet, (b) moderately disturbed, and (c) highly disturbed, between 2012 and 2020. It can be observed that the highest occurrence rate is concentrated in the months close to the December solstice, especially under quiet and moderate geomagnetic conditions.

3.2 Data Collection

The primary datasets employed in this study include:

- Ionograms

Recorded by the VIPIR ionosonde located at the Tucuman Station, as we can see in Figure 5. These data are stored in ngi/NetCDF format and provide vertical profiles of electron density, enabling characterization of local ionospheric conditions. The station contributes to the Low Latitude Ionospheric Sensor Network (LISN)¹, which offers continuous monitoring across South America.

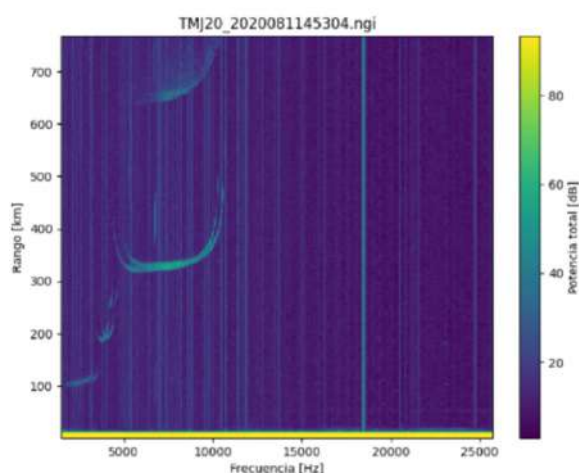


Figure 5. Processed NetCDF file.

- Coherent Scatter Radar (CSR)

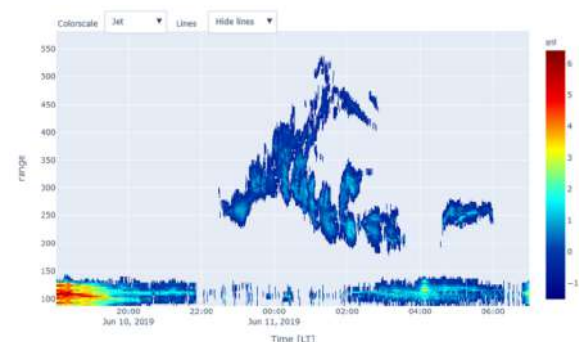


Figure 6. JULIA RTIs map.

Data collected at the Jicamarca Station in Peru. The main radar system in JULIA mode is optimized for detecting coherent backscatter from fieldaligned irregularities in the equatorial F region. JULIA operated from 1996 to 2022, while the JULIA Medium Power (MP) configuration was active from

2022 to 2024. Both modes produce RTI (Range-Time- Intensity) maps that support the study of equatorial ionospheric irregularities as we can see in Figure 6. JULIA stands for Jicamarca Unattended Long-term Investigations of the Ionosphere and Atmosphere. All radar datasets (CSR from JULIA and JULIA MP) are available through the Madrigal2 distributed data system.

3.2 Methodology

As detailed in the data collection section, RTI maps from the Jicamarca station and ionograms obtained at the Tucuman station were used. Due to differences in the type of measurement and instrumental characteristics, it was necessary to apply different processing methodologies for each case. In Jicamarca, the analysis is based on the binarization of RTI maps, which allows for quick and visual identification of the presence of Spread F. In Tucuman, on the other hand, ionograms are processed and represented by histograms that reflect the occurrence of diffuse traces associated with this phenomenon.

Despite the differences in format and temporal resolution, both data sets were subjected to manual binary classification, assigning a value of 1 when Spread F is detected and 0 when it is not observed. This simple but robust technique allows the occurrence rate to be calculated as the ratio between the number of days with Spread F and the total number of days evaluated (Equation 1), thus facilitating comparison between stations and the integration of results within a common methodological framework.

$$\text{ESF Occurrence Rate} = \frac{\text{Number of Occurrences}}{\text{Total Number of Days Evaluated}} \quad (1)$$

- Jicamarca's methodology

To study the occurrence of Spread F in Jicamarca, RTI maps were used to show the intensity of the echoes as a function of time and altitude. These maps allow the presence of ionospheric irregularities to be visually identified, but their manual analysis is complex and not very scalable, especially when dealing with large volumes of data. With the aim of automating part of the process, a code was developed that analyzes the maps in 15-minute blocks, assigning a binary value:

- » 1 if echoes are detected
- » 0 if no echoes are observed

This approach simplifies daily analysis, but it has a significant limitation: it does not distinguish between echoes associated with Spread F and signals caused by interference. This can introduce noise into the results and affect the interpretation of the occurrence rate. For this reason, we propose moving toward a more refined binarization that not only detects the presence of echoes but also considers their intensity and spatial distribution. One alternative is to average the power values within pixel blocks (bins) and establish criteria that allow us to discriminate between valid signals and interference, an example of this is shown in Figure 7. This strategy seeks to reduce the complexity of the maps, improve the reliability of automated analysis, and facilitate comparison between stations.

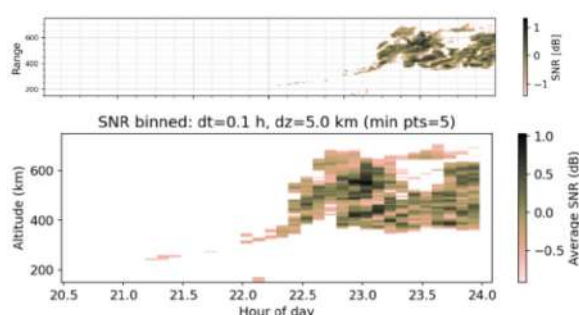


Figure 7. Example of RTI map processing with SNR-based binarization. The upper graph shows the distribution of SNR by time and altitude, while the lower graph shows the average for each hour and altitude. This visualization allows us to identify areas with a higher concentration of echoes and better differentiate valid signals from interference in the automated analysis of Spread F.

• Tucumán's methodology

As mentioned above, NetCDF (.ngi) files generated by the VIPIR radiosonde, available on the LISN portal, are used to study F-band spread events at the Tucumán station. These files contain raw data on ionospheric echoes recorded at different times of the day. However, downloading them is not easy because it is time-consuming and requires a lot of storage space.

To overcome this limitation, a script was developed that allows direct access to .ngi files via their URLs, without the need to download them locally. This approach facilitates remote analysis and significantly reduces the computational load.

Since spread F events typically occur after sunset and midnight, a second script was implemented that automates URL filtering based on the local time in Lima (UTC-5). This script:

- » Read the data of the available .ngi files.
- » Convert UTC time to local time by subtracting 5 hours.
- » Select only files corresponding to the interval between 6:00 p.m. and 2:00 a.m.
- » Build the associated URLs and save the final list in a text file for later use.

This filtering allows the analysis to focus on the periods most relevant to the occurrence of spread F, avoiding unnecessary processing of daytime data.

The processed ionograms contain information that exceeds the useful range for studying F region. Therefore, a third script was developed that systematically cleans the data, focusing on the most relevant physical characteristics. The procedure includes:

- » Loading key variables: frequency, virtual height, ordinary (O) and extraordinary (X) mode powers, and their respective noise levels.
- » Noise correction: powers are converted from dB to a linear scale, the corresponding noise is subtracted, and then they are converted back to dB.
- » Spectral and altitudinal filtering: only data in the range of 5 to 15 MHz and heights between 200 km and 800 km, corresponding to the F region of the ionosphere, are selected.
- » Mode combination: the average of the O and X mode powers is calculated to obtain an integrated representation of the ionospheric echo.
- » Normalization: the median of the data set is removed to improve visual contrast.
- » Visualization: a color map is generated with frequency on the x-axis, virtual height on the y-axis, and color representing the corrected total power.

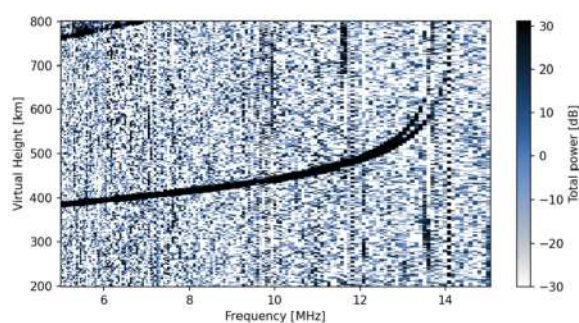


Figure 8. Processed "clean" ionogram, without Spread F.

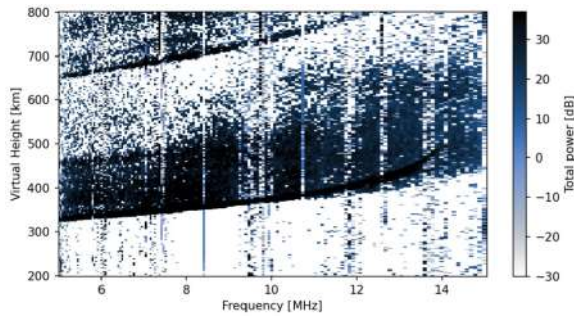


Figure 9. Processed ionogram, with Spread F.

This process allows for clean, high-contrast images focused on the information relevant to F-spread analysis, facilitating visual interpretation and comparison between events as we can see in Figure 8 and 9.

To complement the visual analysis of ionograms, another script was developed that counts pixels according to their power and organizes them into histograms. This tool allows us to identify characteristic patterns associated with the presence or absence of Spread F. In clean ionograms (Figure 10), the histograms show small peaks at medium powers and more pronounced peaks at low or negative powers, indicating a weak and well-defined signal. In contrast, when Spread F is present, significant peaks are observed at high powers and a notable reduction in low values, reflecting the presence of intense and diffuse echoes. This difference in power distribution facilitates manual classification and provides a quantitative basis for automating event detection.

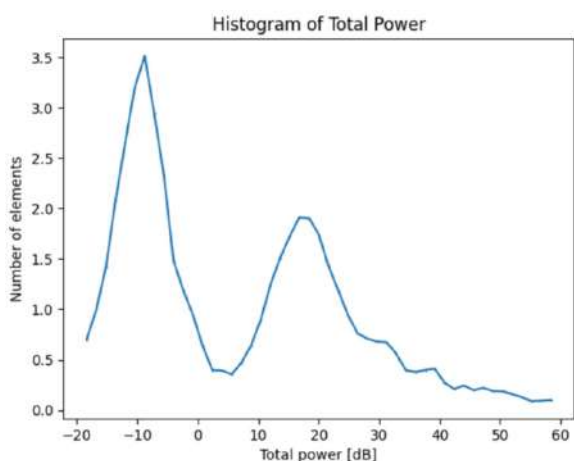


Figure 10. Clean ionograms show low peaks at medium powers and high peaks at negative powers.

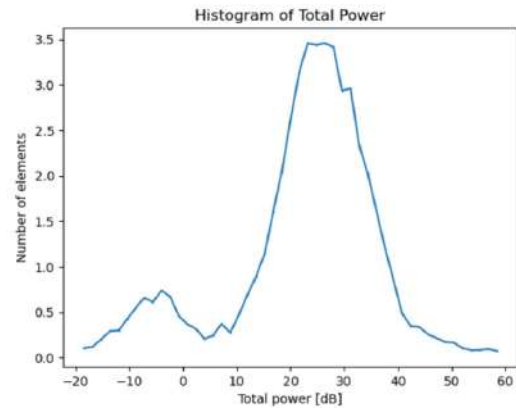


Figure 11. Ionograms with Spread F show strong peaks at high powers.

By concatenating and saving all the data obtained from the power histograms, a more complete temporal representation is obtained, allowing the evolution of the power distribution over several days to be observed as we can see in Figure 12. In this visualization, it is possible to distinguish that at certain intervals the peaks associated with low powers practically disappear in the histogram, which is a clear indicator of the presence of Spread F, since this ionospheric irregularity is characterized by the absence of concentrated echoes and the appearance of more diffuse signals. As an example, on the days indicated, there are noticeable differences between regions with and without Spread F, as evidenced in the total power histograms, where the shape of the distribution changes significantly.

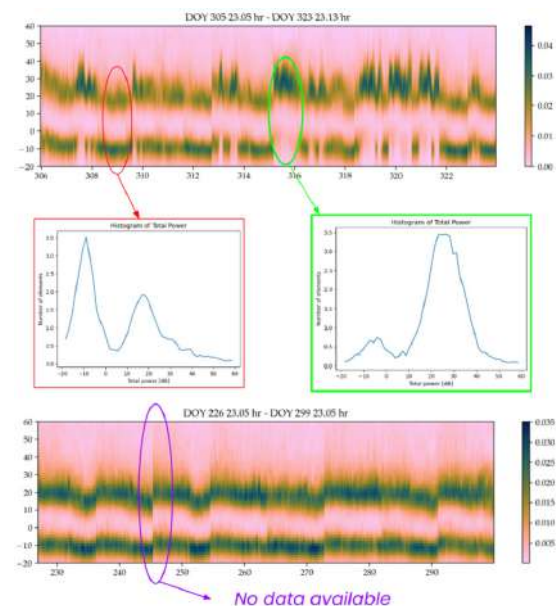


Figure 12. Temporal distribution of total power. The absence of low peaks suggests Spread F. Discontinuities due to missing data can lead to misinterpretations.

However, the procedure also has limitations: when joining the data, the current script does not take into account the existence of gaps in the measurements and is not able to represent them as blank spaces in the graph. This generates artificial discontinuities in the time series that could lead to confusion when analyzing the continuity of events. Therefore, while this histogram concatenation technique is useful for identifying general patterns and episodes of Spread F, additional processing is necessary to properly handle periods without data and avoid misinterpretation.

Although the use of histograms facilitates the manual classification of Spread F without the need to directly observe the ionogram, there are certain cases in which the methodology does not work optimally. One example occurs in situations of low Range Spread F (RSF) as we can see in Figure 13, where the histogram would be expected to show a higher peak in the high-power zone compared to the low-power zone. However, the histogram obtained does not clearly distinguish this behavior, making it difficult to make a decision without resorting to the ionogram. Despite this, it cannot be considered a failure of the method, but rather a limitation: the technique tends to underestimate the number of low-intensity occurrences, which does not significantly affect the overall analysis, as the main characteristics of the phenomenon are still captured.

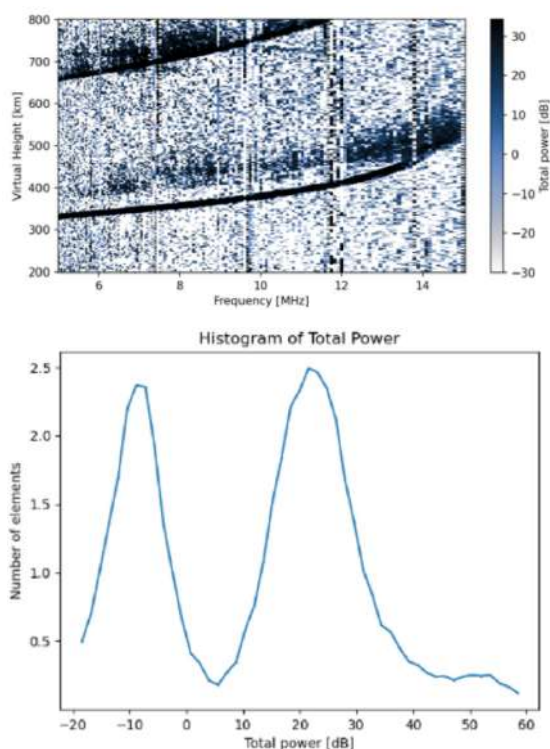


Figure 13. Case of low RSF where the histogram does not clearly reflect the predominance of intense signals and it is necessary to view the ionogram.

- Example using Tucuman's methodology and comparison with scientific literature

As an example of the manual classification methodology, the case of the December 2024 solstice was analyzed. Files in *ngi* format for the date of interest were processed through the entire procedure detailed in Section 2.3.2 and subsequently concatenated. The resulting histogram was classified manually, and Equation 1 was applied to determine the occurrence rate. An occurrence rate of approximately 50% was obtained.

This result was compared with the study conducted by Aa, Zou, and Liu (2020) (mentioned in section 2.1). The similarity in both the occurrence values and the longitudinal distribution observed in the two studies reinforces the validity of the manual procedure applied. Despite differences in the time periods analyzed and the techniques used, the main spatial characteristics of ionospheric irregularity occurrence are consistently captured.

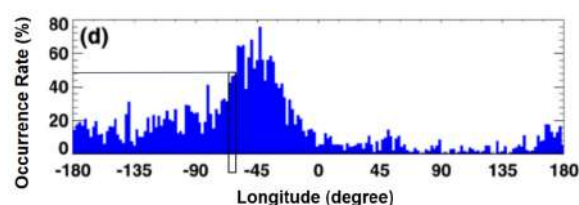


Figure 14. ESF occurrence rate as a function of geographic longitude during the December solstice, with a maximum of around 50% at approximately -45° . Adapted from Aa et al. (2020).

4. SUMMARY

This work proposes and applies methodologies to manually evaluate the occurrence of the ionospheric phenomenon Spread F through ground-based measurements at two stations: Jicamarca (Peru) and Tucuman (Argentina). In Jicamarca, RTI maps obtained with the main radar in JULIA and JULIA MP mode were binarized, while in Tucuman, an automated analysis of VIPIR ionograms was developed, using power histograms to classify largescale events. Both methodologies allow for robust and adaptable binary classification, contributing to the understanding of the spatial variability of Spread F and its dependence on geographic and geomagnetic coordinates.

Although the histogram-based technique has certain limitations in detecting low-intensity events, its visual simplicity facilitates systematic counting. During the December 2024 solstice, an occurrence

rate of close to 50% was observed through manual classification, validating the effectiveness of the proposed approach.

Preliminary results show a higher frequency of Spread F in Jicamarca, attributed to its proximity to the magnetic equator, in agreement with previous studies cited in the literature.

5. FUTURE WORK

Several lines of work are proposed to expand the climatology of Spread F and improve the automation of the analysis:

- Extension of the methodology in Jicamarca: Apply the counting procedure to historical and recent data from the JULIA and JULIA MP radars in order to build a more complete database of occurrences and evaluate seasonal variations. To improve the reliability of the analysis, we propose developing a script that refines the binarization of RTI maps, incorporating intensity and spatial distribution criteria that allow valid echoes to be distinguished from non-physical echoes or instrumental noise.
- Systematic application in Tucuman: Continue counting events in the VIPIR ionograms of Tucuman, incorporating improvements in the classification and concatenation of histograms to make manual analysis much easier. Also consider low-intensity cases such as RSF.
- Adaptation of the VIPIR methodology to IGP-JRO: Given that Jicamarca also has a VIPIR ionosonde, it is proposed to directly apply the methodology developed in Tucuman—based on power histograms, spectral filtering, and noise correction—to analyze its ionograms. This would allow for the unification of criteria between stations and facilitate longitudinal comparisons.
- Cross-validation with scientific literature: Integrate the results obtained with data from SWARM and Autoscala.

6. ACKNOWLEDGMENTS

I would like to express my sincere gratitude to my undergraduate thesis advisors in Physics, Dr. Enrique Rojas Villalba and Dr. Ana Georgina Elias, for their invaluable support throughout the application process and for their continued guidance during these ten weeks of the program.

I am also deeply thankful to the staff at the Jicamarca Radio Observatory for their warm welcome, their kindness, and their willingness to assist me with every question and challenge I encountered. I extend my appreciation to Dr. Edgardo Pacheco, my program coordinator, for his support and orientation.

Although I spent these weeks in Peru, I am especially grateful to my friends and boyfriend in Tucuman, whose encouragement and constant support from afar were essential throughout this experience. I also cherish the time shared with my fellow participants in the JIREP program, who made this journey both enriching and memorable.

7. REFERENCES

- [1] R. F. Woodman, "Spread F – an old equatorial aeronomy problem finally resolved?," *Ann. Geophys.*, vol. 27, no. 5, pp. 1915–1934, 2009.
- [2] H. G. Booker and H. W. Wells, "Scattering of radio waves by the F-region of the ionosphere," *Terr. Magn. Atmos. Electr.*, vol. 43, no. 3, pp. 249–256, 1938.
- [3] R. F. Woodman and C. La Hoz, "Radar observations of F region equatorial irregularities," *J. Geophys. Res.*, vol. 81, no. 31, pp. 5447–5466, 1976.
- [4] E. Aa, S. Zou, and S. Liu, "Statistical analysis of equatorial plasma irregularities retrieved from Swarm 2013–2019 observations," *J. Geophys. Res. Space Phys.*, vol. 125, e2019JA027022, 2020.
- [5] C. Scotto and D. Sabbagh, "Climatology of Spread F over Tucumán from massive statistical analysis of autoscaled data," *Atmosphere*, vol. 12, 1351, 2021.

VTEC VARIATIONS DURING COSMIC RAYS EVENTS STUDIED AT MAGNETIC EQUATOR USING GNSS

*Variaciones VTEC durante los eventos de rayos cósmicos estudiados en el ecuador magnético utilizando GNSS

Olaf Enríquez Lizama

Universidad Nacional Autónoma de México
olaf@igeofisica.unam.mx

Asesores:

César De La Jara
y Ram Singh
Dirección en Ciencias del Geoespacio

ABSTRACT

Data from GNSS receivers Huancayo and Ancon, Peru were used to identify the impact on Vertical Total Electron Content (VTEC) during Ultra High Energetic Cosmic Rays (UHECR) and Solar Energetic Particles (SEP) events when neither other significant variation in solar plasma (Bz) or solar radiation (XRS) occurred, nor geomagnetic perturbations were present. Due to the nature of the phenomena including cosmic rays, it is particularly difficult to determine the degree of atmospheric ionization caused exclusively by cosmic rays.

Keywords: Total electron content, cosmic rays, solar energetic particles, ultra high energetic cosmic rays, ionosphere

RESUMEN

Los datos de los receptores GNSS Huancayo y Ancón (Perú) se utilizaron para identificar el impacto en el contenido total de electrones verticales (VTEC) durante los rayos cósmicos de energía ultra alta (UHECR) y las partículas energéticas solares (SEP), cuando no hubo ninguna otra variación significativa en el plasma solar (Bz), la radiación solar (XRS) y no se produjeron perturbaciones geomagnéticas. Debido a la naturaleza de los fenómenos que incluyen los rayos cósmicos, es particularmente difícil determinar el grado de ionización atmosférica causada exclusivamente por los rayos cósmicos.

Palabras clave: Contenido total de electrones, rayos cósmicos, partículas energéticas solares, rayos cósmicos de ultra alta energía, ionósfera

1. INTRODUCTION

Most atmosphere ionization is due to cosmic rays (CR) interactions with atmospheric particles [1]. Named spallation or ionization, CR provides Earth's environment with valuable resources. From the production of ^{14}C or the boost to start a lightening, this tiny messengers of the universe play an important part of what we know as space weather.

Most of the interactions of CR with the atmosphere occurs in lower layers of the latter, with a peak of particle production around 35 Km in altitude [2]. Nevertheless, interactions begin since the particle enters the atmosphere. With this in mind, one can expect that during unusually high CR flux, the ionization through the atmosphere should increase too.

As the interactions of CR with atmospheric particles take energy from the former, it is necessary to think about CR energetic enough to not only penetrate Earth's magnetosphere but to have a measurable impact on atmosphere ionization levels. If one thinks about the energy a CR needs to break through the magnetosphere at polar caps, it may not be sufficient for a sole particle to make a noticeable difference in ionization levels and, instead it would be the high flux of CR that could inject enough energy to make an impact. On the other hand, at lower magnetic longitudes, particles need to have higher energies to be able to penetrate Earth's magnetic field [3], with such energies a change in atmosphere ionization could be reasonable for single particles.

Within cosmic rays events, there are quite a few examples: enhancements, Forbush decreases, ground level enhancements, solar energetic particles (SEP) events, ultra high energetic cosmic rays (UHECR) – particles with $E \geq 10^{18}$ eV. As for this project, the work is focused on events where other kinds of radiation or perturbations could not be present i.e., UHECR and SEP events.

SEP events are commonly associated with solar flares because those are one of the most frequent phenomena on the solar surface. In this process several particles are accelerated, from photons mainly in UV and X Rays (XRS), to protons and electrons "nearby" the sun surface. For this reason, SEP usually arrives on Earth soon after a XRS flux limb, and it is therefore nearly impossible to differentiate the effects on VTEC due to XRS and CR.

A typical arrival of solar protons is as shown in Figure 1, where two SEP events occurred between 5 and 14 September, 2017. There it is clearly seen in the upper and second panels that an increase in proton flux is detected some time before the XRS enhancement. But, if the proton enhancement is separated enough of the limb because it arrived later than usual or because the SEP were accelerated via another mechanism (e.g. Coronal Mass Ejection), the effect of XRS can be sufficiently damped to link VTEC variations with the sudden flux of SEP [4].

2. OBJECTIVES

- Observe the impact due to cosmic rays on VTEC during UHECR and SEP events.
- Isolate SEP enhancements contribution on VTEC variations measured on the geomagnetic equator.

3. DESCRIPTION AND DEVELOPMENT

The first approach made in this work to visualize any kind of variation on VTEC due to cosmic rays was through UHECR. Currently at IGP-JRO there is no CR detector to determine which dates one should review, nevertheless; at approximately 2700 km SE of IGP-JRO there is one of the largest high energy CR detectors, the Pierre Auger. So, dates of the most energetic CR detected there were retrieved. Of the 109 events available at the Pierre Auger catalog, only 23 were detected coming from NW – relative direction of IGP-JRO from Auger. Moreover, only 15 met the criteria of being detected during quiet days, lacking any "noise" coming from other kinds of radiation. But having GNSS data available reduced the number to 9.

SEP events came as a second approach to search VTEC variations, having considerably less magnitudes of energy – $E \approx 10\text{-}100$ MeV – is compensated by being a relatively constant flow over periods of minutes to hours rather than being isolated events. In this case, data from 2011 to 2017 of the Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) was reviewed to find events where the flux of solar protons with energy greater than 10 MeV was above $10 \text{ p}/(\text{cm}^2 \text{ sr s})$.

Python codes were developed to plot and analyze the GNSS data.

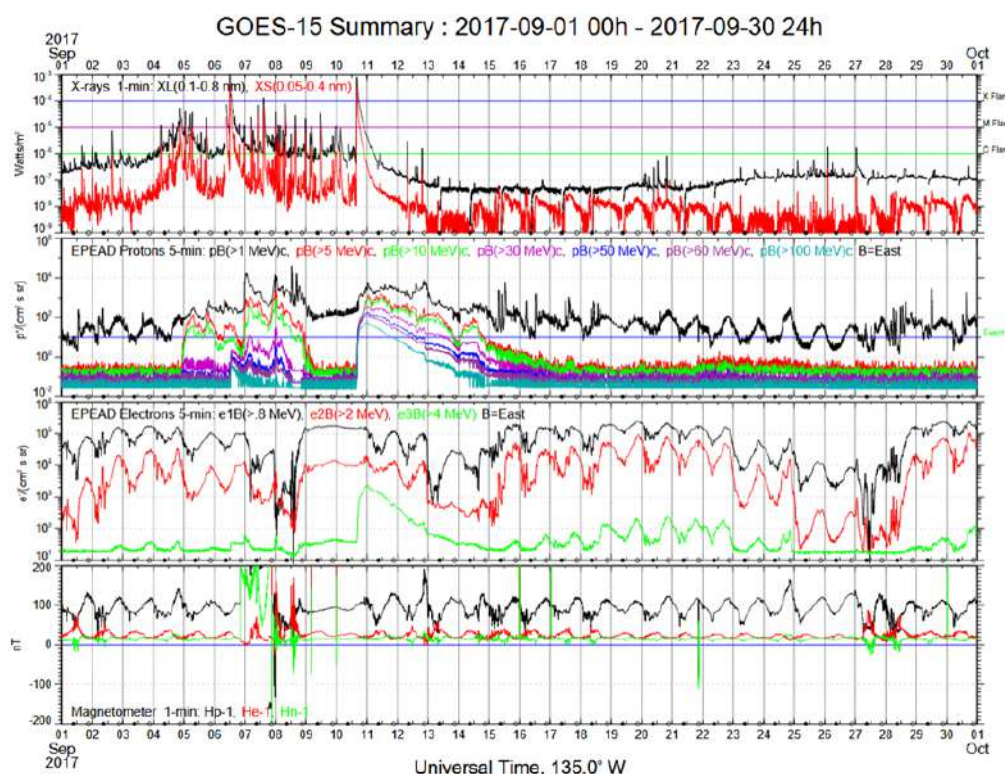


Figure 1. GOES monthly summary plot of (from top to bottom): 1-min avg. X Rays, 5-min avg. Protons, 5-min avg. Electrons, and 1-min averaged magnetometer.

4. RESULT AND DISCUSSION

The UHECR events reviewed are mentioned in Table 1, however, no significant variations on VTEC due to CR were found within those dates. Either for the nature of the phenomena being nearly instantaneous or for the events taken into account being so far away from GNSS receivers.

Table 1. UHECR events analyzed.

Event #	Date [dd/mm/yyyy]	CR Energy [EeV]
1	11/12/2007	94
2	03/07/2008	46
3	25/09/2008	140
4	26/08/2010	85
5	27/01/2011	116
6	16/04/2011	91
7	20/12/2014	93
8	25/12/2014	107
9	09/03/2016	115

Within the 7 years reviewed searching for SEP events more than 45 occurrences were analyzed, unfortunately, just 1 SEP event was spotted that satisfies being well separated from the XRS limb,

not being in a geomagnetic storm, nor happens completely on local nighttime. This event took place on 26th and 27th of November, 2011.

In Figure 2 the data related to this event is reported. Checking the main parameters as Kp index for geomagnetic perturbations, XRS flux for external sources of photo-ionization, and even F10.7 and Lyman- α indices, all were pointing to reasonably quiet days when the SEP event was developing. Furthermore, an anomalous high value on the VTEC day-side peak was spotted on November 27th at approximately 19:00 UT (14:00 LT), coinciding nicely within the span of time where the solar proton (>10 MeV) flux was above 10 p/(cm² sr s). The 27th peak was higher than the 26th and 28th by 15 a 10 UTEC respectively. Between the 2 adjacent days, the 26th had the most similar conditions.

Nonetheless, at the bottom of Figure 2 it is shown that the AE index had some important increments before the VTEC enhancement. It is known that a higher difference between eastward and westward auroral electrojets can lead to an enhancement on the $E \times B$ drift during daytime, thus incrementing the TEC. For this reason, one can not associate the particularly high VTEC peak to exclusively SEP contribution. However, the contribution of the solar proton flux to the Total Electron Content augmentation cannot be ruled out either.

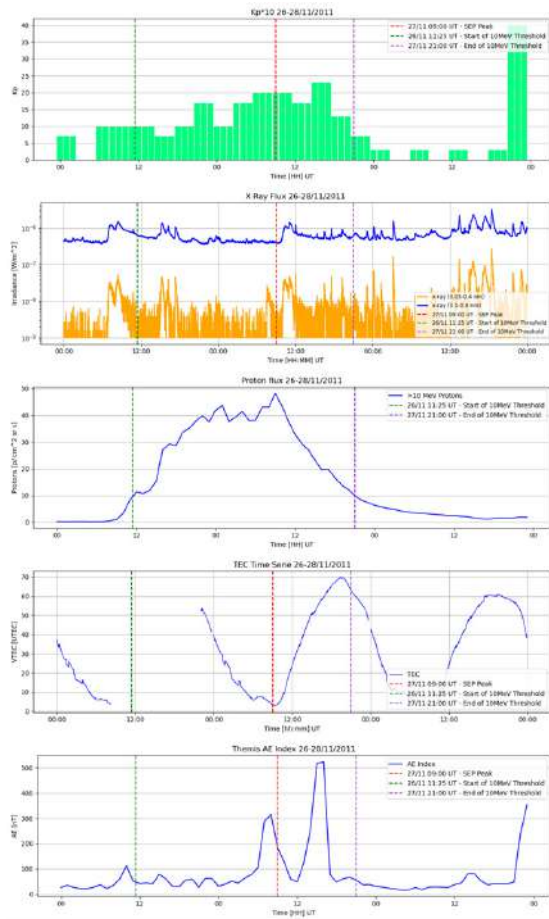


Figure 2. Data used to analyze the SEP event of 27/11/2024. From top to bottom, Kp index, X Ray flux, >10MeV Proton flux, VTEC and AE index.

5. FUTURE WORK

For reducing the distance between the system of UHECR detection and the VTEC measurements, the ongoing project of Southern Wide-field Gamma-ray Observatory (SWGO) is proposed for future use when a brand new catalog of energetic CR events become available.

This new project reduces the distance of detection and measurements about 40%, from 2700 to 1500 km. Even though the possibility of a Peruvian high energy CR detector is always open.

Among the 45+ SEP events reviewed, there was a strong candidate to show an isolated SEP contribution on VTEC.

Morning (03:00 UT) 29th October 2015, there was an increase on proton flux, every other parameter started increasing some hours later (09:00 UT), Figure 3. For Jicamarca it was nighttime, so impossible to see a proper variation, but working with another station at different longitude might show something.

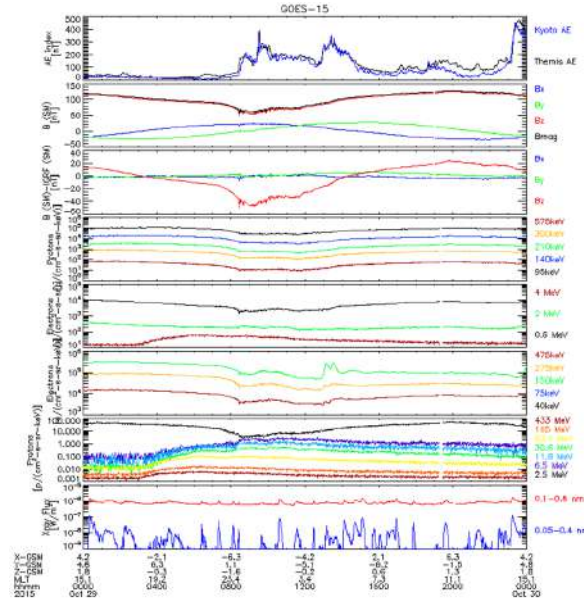


Figure 3. SEP event candidate to show isolated contribution on TEC measurements.

6. ACKNOWLEDGMENTS

To the Peruvian Geophysics Institute (IGP) and to all the Jicamarca Radio Observatory crew who provided the infrastructure needed to perform this world class experience. Also, thanks to the support from the organizers who made the JIREP program possible.

7. REFERENCES

- [1] L. Dorman, Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic, 2004.
- [2] D. F. Smart and M. A. Shea, Handbook of Geophysics and the Space Environment. Air Force Geophysics Laboratory, Air Force Systems Command, United States Air Force, 1985.
- [3] J. Labrenz, Radiation Field in Low Earth Orbit: Measurements from MATROSHKA DOSTEL onboard ISS. 2014. doi:10.13140/ RG.2.2.11166.18246.
- [4] C. O. G. Waterfall, S. Dalla, O. Raukunen, D. Heynderickx, P. Jiggins, and R. Vainio, "High energy solar particle events and their relationship to associated flare, CME and GLE parameters," Space Weather, vol. 21, e2022SW003334, 2023. doi:10.1029/2022SW003334.

ESTIMATING RELATION BETWEEN $E \times B$ DRIFTS AND EQUATORIAL ELECTROJET CURRENT (EEJ) OVER JICAMARCA AND PIURA USING ISR AND MAGNETOMETER

*Estimación de la relación entre las derivas $E \times B$ y la corriente electrojet ecuatorial (EEJ) sobre Jicamarca y Piura utilizando ISR y magnetómetro

Esteban Cortés Rojas

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
escortesr@udistrital.edu.co

Asesor:

César De La Jara
Dirección en Ciencias del Geoespacio

ABSTRACT

This study examines the relationship between vertical $E \times B$ drifts and the equatorial electrojet (EEJ) using data from Jicamarca and Piura. Direct measurements of vertical $E \times B$ drifts were obtained using the Incoherent Scatter Radar (ISR), while indirect estimates came from magnetometer data. The EEJ intensity was calculated as the difference in the H component between Jicamarca and Piura. Data were processed to identify quiet and disturbed periods, based on geomagnetic indices (K_p , SYM/H) and the B_z component. Results show a clear daytime correlation between EEJ and $E \times B$ drifts, with a correlation coefficient of 0.60 on quiet days, supporting the use of magnetometer data for indirect drift estimation. Future work will extend the methodology to other periods and integrate ionosonde measurements for enhanced characterization of ionospheric dynamics.

Keywords: Vertical $E \times B$ drifts, EEJ, ISR, Geomagnetic indices

RESUMEN

Este estudio examina la relación entre las derivas verticales $E \times B$ y el electrojet ecuatorial (EEJ) utilizando datos de Jicamarca y Piura. Las mediciones directas de los movimientos verticales $E \times B$ se obtuvieron utilizando el radar de dispersión incoherente (ISR), mientras que las estimaciones indirectas se derivaron de datos magnetométricos. La intensidad de EEJ se calculó como la diferencia en el componente H entre Jicamarca y Piura. Los datos se procesaron para identificar períodos tranquilos y perturbados utilizando índices geomagnéticos (K_p , SYM/H) y el componente B_z . Los resultados muestran una clara correlación diurna entre las derivas EEJ y $E \times B$, con un coeficiente de correlación de 0.60 en días tranquilos, lo que apoya el uso de datos magnetométricos para la estimación indirecta de la deriva. Los trabajos futuros ampliarán la metodología a otros períodos e integrarán mediciones con ionosondas para mejorar la caracterización de la dinámica ionosférica.

Palabras clave: Deriva vertical $E \times B$, EEJ, ISR, índices geomagnéticos

1. INTRODUCTION

The ionosphere is composed of electric fields and plasma drifts, specifically the vertical $E \times B$ drift, which induces important phenomena such as the equatorial electrojet (EEJ). This study aims to explore the relationship between the vertical $E \times B$ drifts measured directly by the Incoherent Scatter Radar (ISR) at Jicamarca and those measured indirectly from magnetometer data at Jicamarca and Piura. By comparing both methods, the study seeks to understand the relationship between the EEJ dynamics and its connection to the vertical $E \times B$ drifts.

2. OBJECTIVES

- General objective

To analyze the relationship of the vertical $E \times B$ drifts obtained by the Incoherent Scatter Radar (ISR) and by an indirect method using EEJ from magnetometer data over Jicamarca and Piura.

- Specific objectives
 - » To estimate vertical $E \times B$ drifts using the Incoherent Scatter Radar (ISR) from the Jicamarca Observatory.

- » To calculate $E \times B$ drifts indirectly using magnetometer data.
- » To determine the intensity of the equatorial electrojet (EEJ) based on the difference in the H component between Jicamarca and Piura.
- » To analyze the relationship between EEJ dynamics and the estimated $E \times B$ drifts.

3. DESCRIPTION AND DEVELOPMENT

Magnetometer data from Jicamarca and Piura were used, along with Incoherent Scatter Radar (ISR) measurements, Bz data, and geomagnetic indices such as Kp and SYM/H. The study includes the processing of magnetometer data, the estimation of vertical $E \times B$ drifts from ISR measurements, and the calculation of equatorial electrojet (EEJ) intensity. Key steps involve data cleaning (i.e., selection of quiet and disturbed days), temporal alignment, and a comparative analysis between radar-based and magnetometer-based drift estimations.

4. RESULT

In Figure 1, the respective components of the geomagnetic field (X, Y, Z, and H) for the Jicamarca and Piura stations are plotted, in order to observe their behavior during quiet and disturbed times.

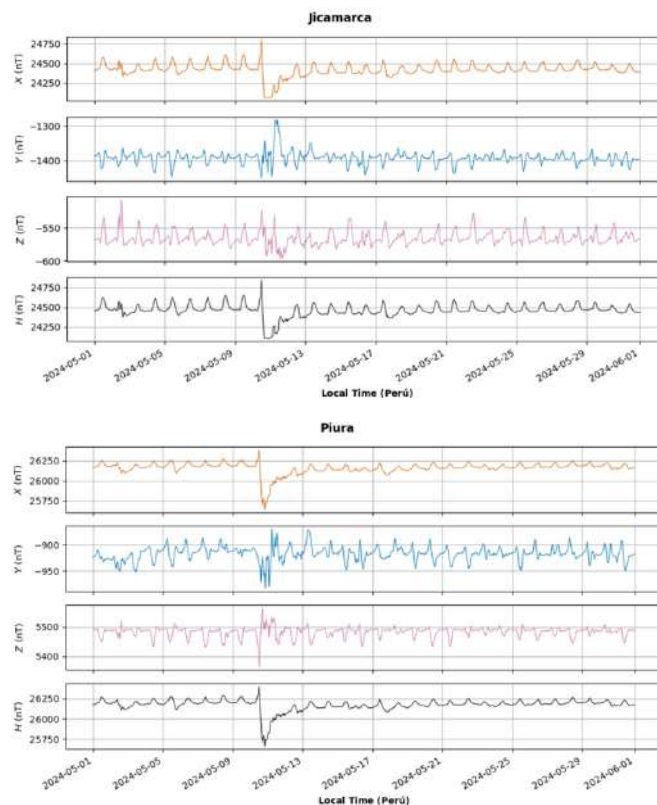


Figure 1. Components of geomagnetic field for Jicamarca and Piura.

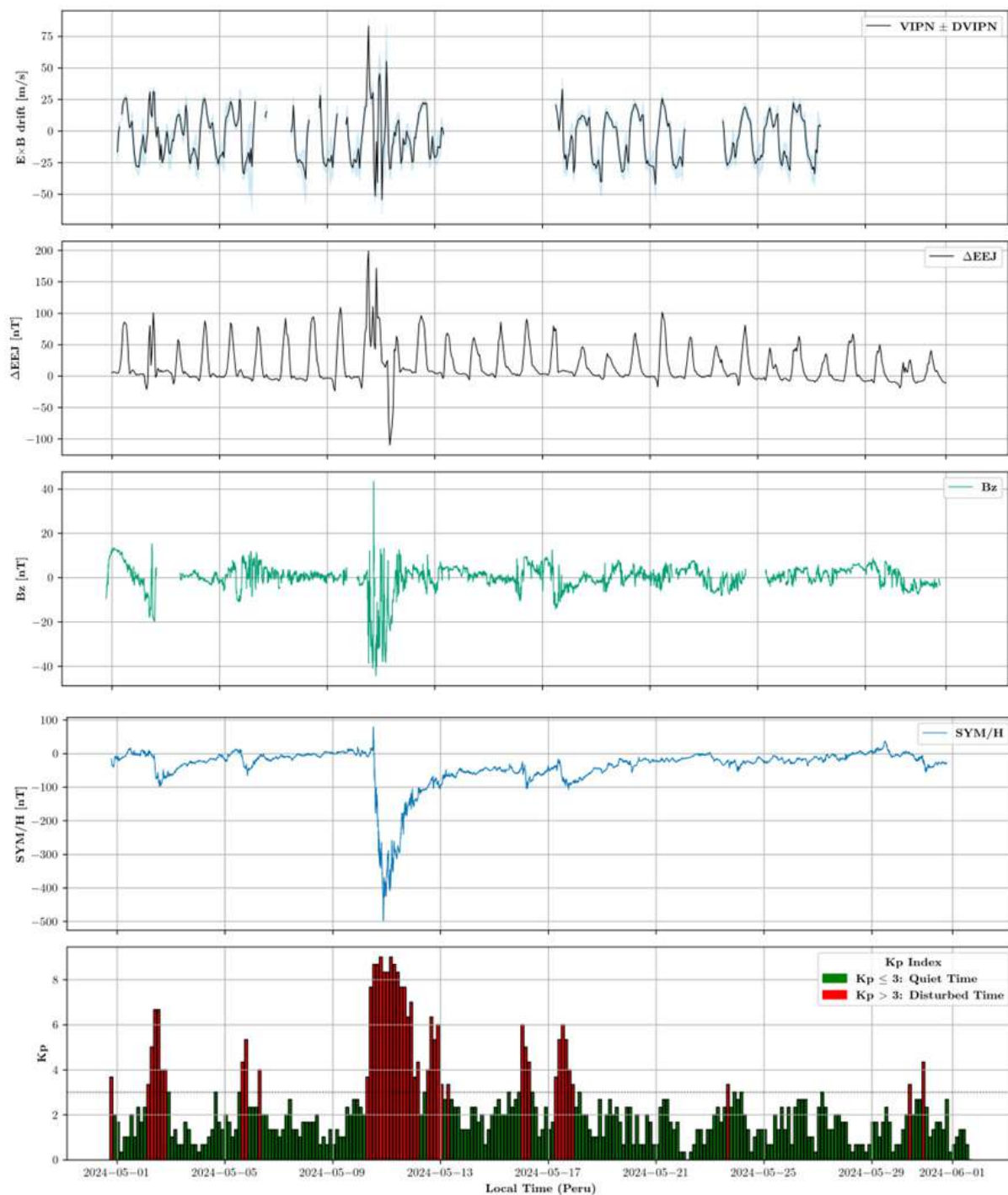


Figure 2. The $E \times B$ drift (from ISR data), the EEJ (from magnetometer data), the B_z component, the SYM/H index, and the Kp index were plotted to identify quiet and disturbed days.

In Figure 2, the graphs generated for the $E \times B$ Drift obtained from the ISR and the EEJ obtained by subtracting the H components from the Jicamarca and Piura stations are shown, after removing the average data between 00:00 and 05:00 hours, when the EEJ is not active. Additionally, graphs of B_z and the geomagnetic indices SYM/H and Kp are generated to determine quiet and disturbed periods, where values greater than or equal to 3

indicate storms, and values less than 3 indicate quiet periods for the Kp index.

In Figure 3, quiet days were selected, where 13 data points for $E \times B$ Drift and EEJ were found. With these 13 data points, an average line was calculated to represent the behavior of the $E \times B$ drift and the EEJ during the daytime.

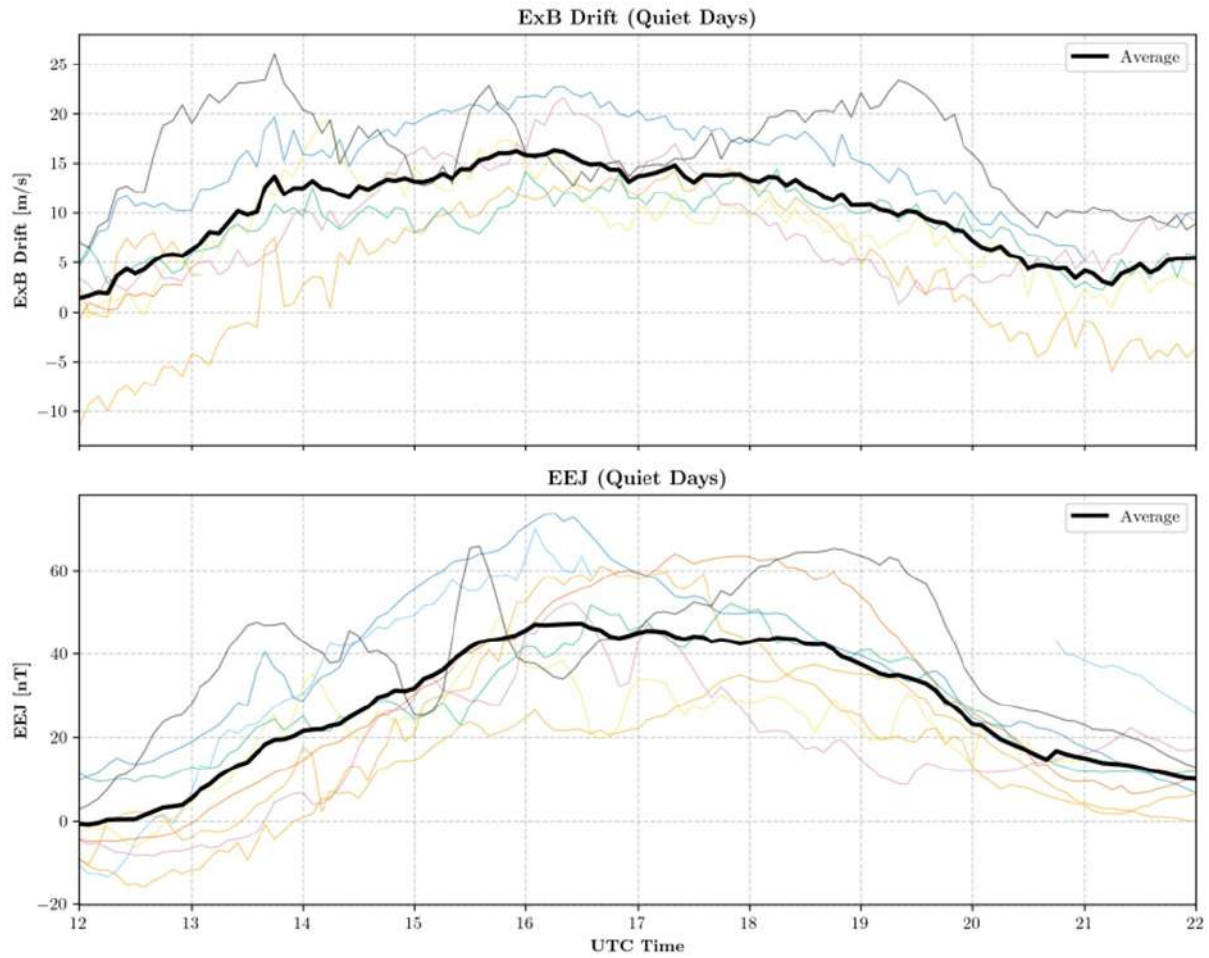


Figure 3. The $E \times B$ drift and the EEJ were calculated for a series of quiet days, and their average data (shown as the black line) was obtained.

In Figure 4, a linear correlation was made between the $E \times B$ Drift and EEJ data for quiet days, and only daytime values, between 12:00 and 22:00 UTC, were plotted. This resulted in

a good correlation of 0.602, indicating that the data are correlated at 60.20%. The generated equation will be useful for calculating $E \times B$ Drift values using magnetometer data.

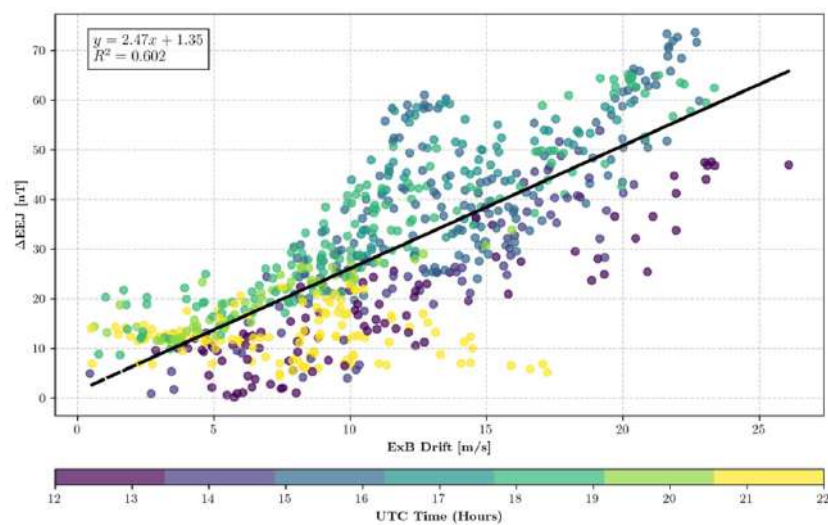


Figure 4. The linear correlation between the EEJ data and the $E \times B$ drift data was calculated on quiet days in order to evaluate the indirect estimation method.

In Figure 5, two periods were selected: one during a storm and one during a quiet period, and only daytime data, between 12:00 and 22:00 UTC, were plotted. This was done to compare the

$E \times B$ Drift measured with the ISR and the $E \times B$ Drift obtained using magnetometer data. In the lower graph, the logarithmic error is shown to indicate how well the data match.

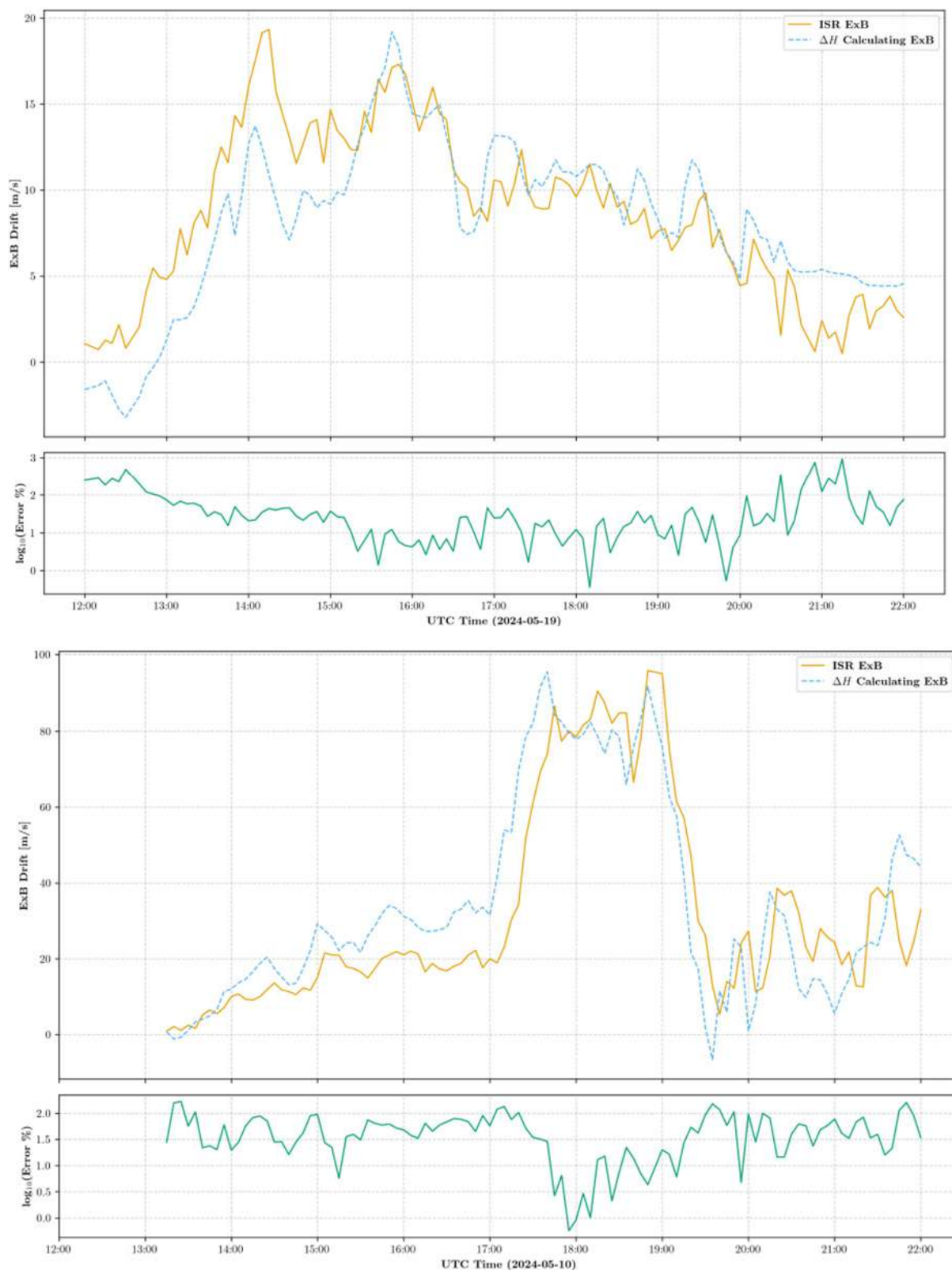


Figure 5. For quiet and disturbed conditions, the $E \times B$ drift was plotted for a single day (daytime only), along with its error plot.

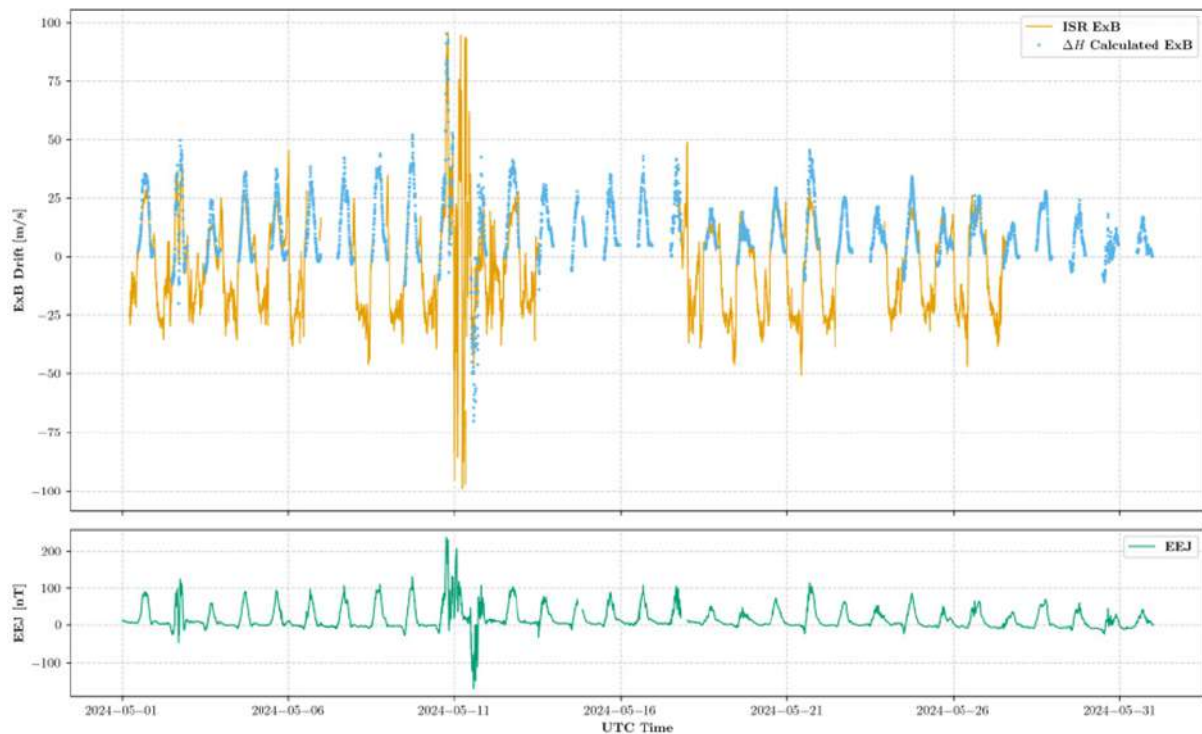


Figure 6. The $E \times B$ drift was obtained from magnetometer data, with only the daytime portion plotted over one month and compared with ISR and EEJ data.

In Figure 6, the $E \times B$ Drift measured with the ISR and the EEJ calculated by subtracting the H components from the Jicamarca and Piura stations are plotted. Additionally, the $E \times B$ Drift obtained from magnetometer data using the equation derived from the linear correlation is also plotted, the latter only for the daytime period.

5. FUTURE WORK

Future research will focus on applying the methods developed in this study to additional time periods, encompassing both geomagnetically quiet and disturbed conditions. This will enable a broader understanding of the variability in $E \times B$ drifts and equatorial electrojet (EEJ) behavior over time. Special attention will be given to integrating ionosonde data from the Jicamarca Observatory. By correlating the drift and EEJ estimates with ionospheric parameters such as the F-region minimum virtual height ($h'F$) and critical frequency (f_oF2), it will be possible to further investigate the physical mechanisms driving ionospheric dynamics under varying space weather conditions.

6. ACKNOWLEDGMENTS

I would like to thank the Geophysical Institute of Peru and, in particular, the Jicamarca Radio Observatory, led by Dr. Danny Scipión, for allowing me to participate in the JIREP 2025 program. I am also grateful to Dr. Ram Singh and Cesar de la Jara for their continuous support throughout this project, from which I learned a great deal about ionospheric events and variability, and through which I was able to obtain valuable results. Finally, I extend my sincere thanks to the IGP-JRO staff for their assistance and warm hospitality.



www.igp.gob.pe

© Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz N° 169
Urb. Mayorazgo, IV Etapa
Ate, Lima - Perú
(511) 317-2300