

LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

SEPTIEMBRE 2023



Durante el mes de septiembre presenciamos la ocurrencia de 4 tormentas geomagnéticas asociadas a llamaradas de clase M, las que produjeron perturbaciones en la componente horizontal H del campo geomagnético en la estación magnética de Jicamarca, como se aprecia en la [Figura 1](#). Además, monitoreamos los valores de las derivas verticales promediadas en altura (300-400 km) y los comparamos con las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer ([Figura 8](#)).

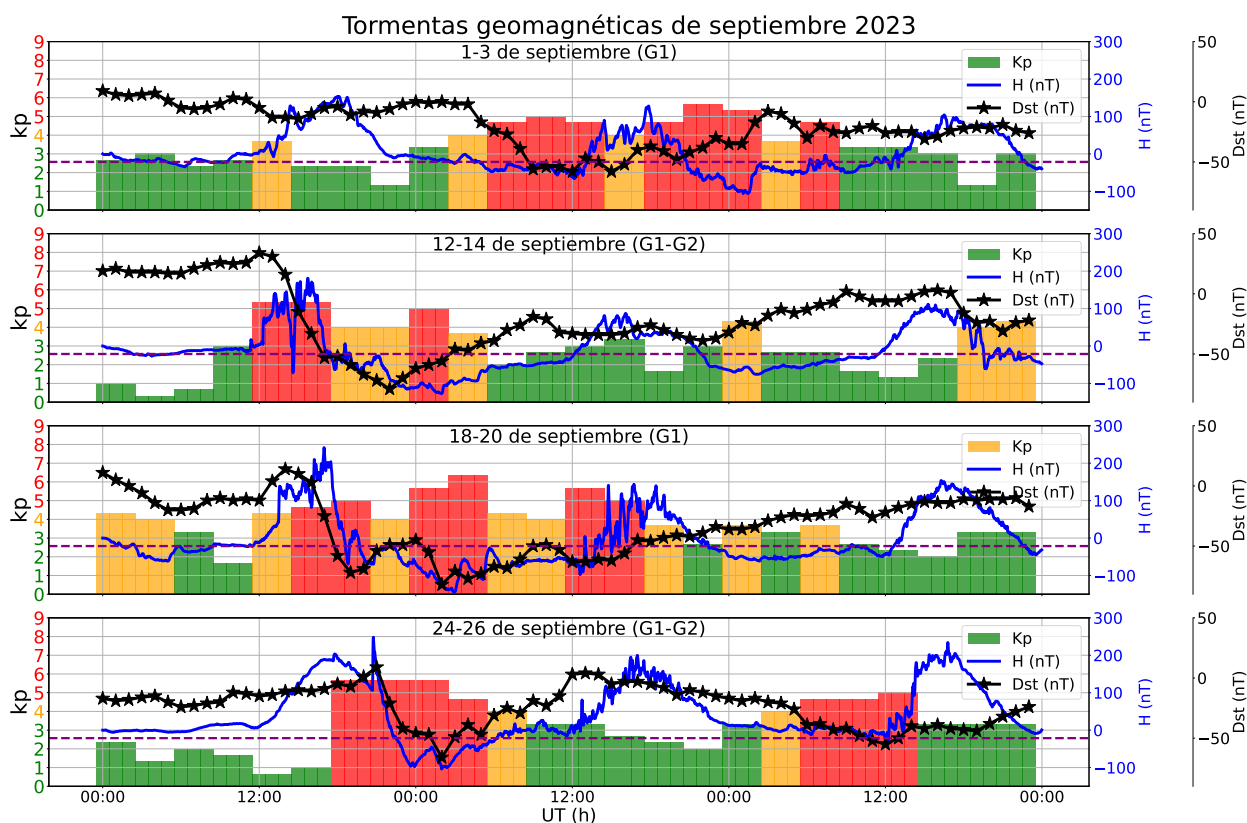


Figura 1. Valores de la variación diurna del componente horizontal H del campo geomagnético (curva azul) comparadas con los valores de los índices Dst (curva negra) y Kp (barras de colores) para las tormentas geomagnéticas del mes.

Tabla 1. Resumen de las mediciones de parámetros ionosféricos y condiciones predominantes del clima espacial del mes de septiembre del 2023.

Vientos promedio MLT a 90 km [m/s]		Derivas verticales de plasma promedio (300 km- 400 km) [m/s]		Variación máxima de campo geomagnético horizontal (H) [nT]		Pico de la densidad de electrones (Ne) [m^{-3}]	
Meridional	Zonal	Mín	Máx	LIM: 162	AQP: 79	Mín	Máx
Mín: 48.3 S	Mín: 51.2 O	-20	10	HYO: 158	NZC: 94	0.14×10^{12}	2.81×10^{12}
Máx: 50.2 N	Máx: 14.9 E			PIU: 79			

ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: TRANQUILA	ACTIVIDAD SOLAR: ALTA
--	------------------------------

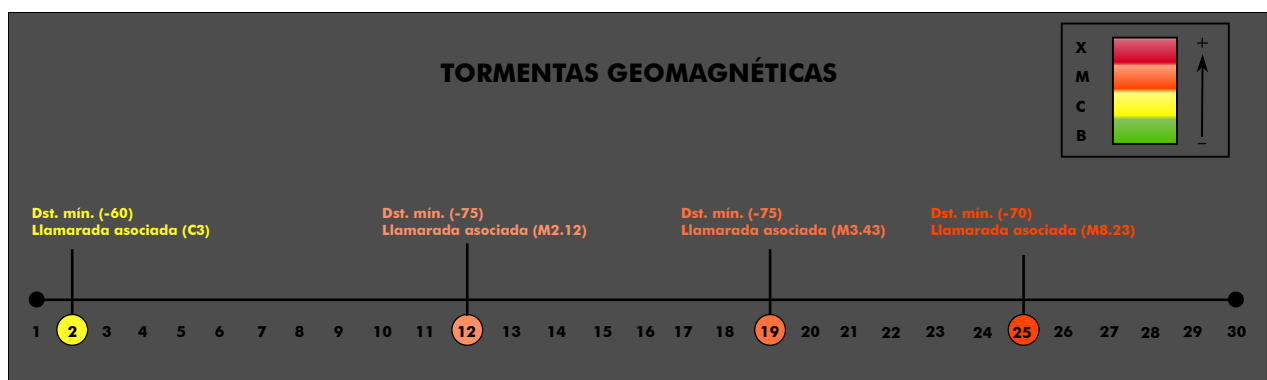


Figura 2. Tormentas magnéticas del mes.

¿SABÍAS QUÉ?

La región de mayor concentración de electrones libres e iones de la ionósfera se denomina región F, la cual contiene gases ionizados en un rango de altura entre los 150 a 1000 km aproximadamente [1]. La región F se subdivide en regiones F1 y F2, donde la región F2 es la más densa y alcanza su punto máximo de concentración de electrones en altitudes entre 200 y 600 km aproximadamente. La región F1 es una capa de la ionósfera que se caracteriza por presentar un pico más pequeño en la densidad de electrones que la región F2 y se forma en altitudes más bajas durante el día entre los 150 y 250 km pero está presente sólo durante el día. Debajo de la región F se encuentra la capa E y la D sucesivamente. Durante la noche, ante la ausencia de radiación solar y por procesos de recombinación desaparece la capa F1. Una de las más importantes aplicaciones de la región F es su utilización como capa reflectora de señales de radio para comunicaciones HF. La región F es ampliamente estudiada utilizando las mediciones de instrumentos en tierra como el radar

del Radio Observatorio de Jicamarca, mediante el cual se pueden medir parámetros como derivas de plasma, densidad, temperatura y composición.

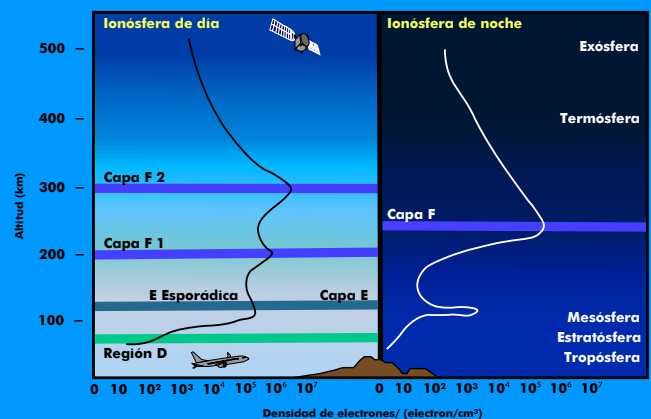


Figura 3. Variación de la densidad de electrones en la región F de la ionósfera durante el día y la noche. Imagen adaptada de [2].

1. Climatología del mes

La actividad geomagnética (índice Kp[3]) fue predominantemente tranquila en un 80 % del tiempo, moderada en un 10 % y alta en un 10 %; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7[4]) fue alta un 60 % del tiempo y 40 % moderada (Figura 4 y Tabla 1). Además, investigaciones previas señalan que hay una fuerte relación entre la variabilidad diaria y estacional de la componente horizontal del campo geomagnético (H)[5], lo que se refleja en nuestras mediciones.

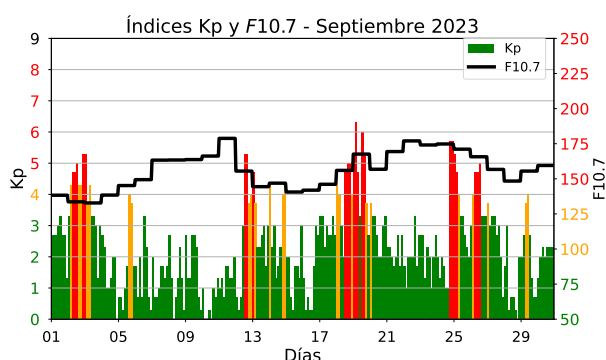


Figura 4. Los valores de los índices Kp y F10.7 cm (u.f.s. = $10^{-22} \text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$) para el mes de septiembre. Extraídos de OMNIWeb [6].

Para los meses cercanos al equinoccio de septiembre en un régimen de actividad solar alta, se espera que la ocurrencia de F-Dispersa sea mayor para el intervalo de tiempo anterior a la medianoche, entre los 200 y 600 km de altura. Por otro lado, se espera una muy baja incidencia de eventos posteriores a la medianoche[7]. Las mediciones muestran una buena concordancia con la climatología[7].

La climatología de septiembre para un régimen de actividad solar alta (dada por el modelo de Scherliess-Fejer) indica que el promedio en altura (300 km-400 km) de las derivas verticales de plasma tiene un valor cercano a los -25 m/s pasada la medianoche, cuya magnitud incrementa hasta llegar a un máximo de cerca de 20 m/s a las 11:30 horas. Posteriormente, estos valores disminuyen hasta 8 m/s a las 16:30 horas, cuando vuelven a incrementar temporalmente debido al fenómeno de pre-reversal enhancement[8], hasta cerca de 15 m/s a las 18:30 horas, para finalmente decrecer hasta los -25 m/s antes de la medianoche. Los valores indicados por la climatología muestran una buena concordancia con la climatología, siendo el caso de mayor discrepancia el de las 20:30 horas, cuando esta asciende hasta los 15 m/s.

2. Llamaradas solares y tormentas geomagnéticas

Este mes pudimos registrar el acontecimiento de 4 tormentas geomagnéticas, las que se manifestaron en perturbaciones en la componente horizontal H del campo geomagnético, como se muestra en la Figura 5. La primera, de intensidad G1, ocurrió el 2 de septiembre y estuvo asociada a una llamarada solar de clase C3 ocurrida el 30 de agosto. La segunda tormenta geomagnética, de intensidad G1, acaeció el 12 y 13 de septiembre y fue relacionada a una llamarada solar de clase M2.12 (13:58 - 14:09 hora local) originada el 7 de septiembre.

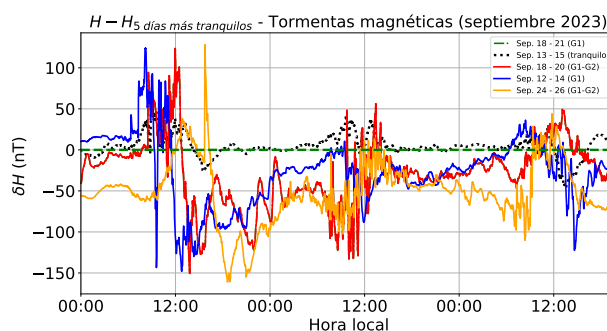


Figura 5. Perturbaciones en H ocasionadas por las tormentas geomagnéticas del 1-3 (curva verde), del 13-15 (curva azul), del 18-20 (curva roja) y del 24-26 (curva naranja) de septiembre registradas en la estación de Jicamarca. La curva negra punteada representa las perturbaciones magnéticas para un día geomagnéticamente tranquilo (13-15 de septiembre).

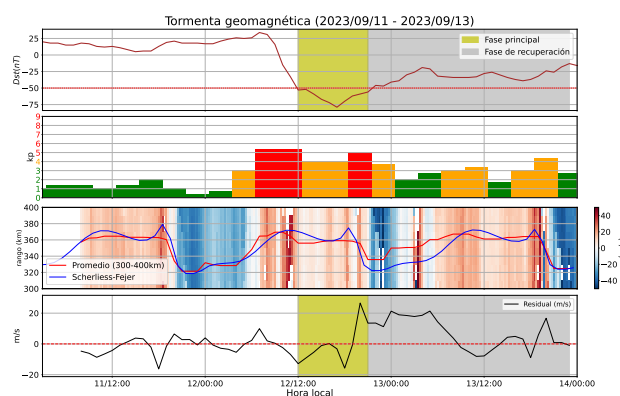


Figura 6. Aumento de las derivas verticales de plasma promediadas en altura (300 - 400 km) causado por la tormenta geomagnética del 12 de septiembre.

Durante la fase principal de esta tormenta se registró la mayor discrepancia entre el promedio de derivas

verticales en altura (300 - 400 km) y las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer, como se aprecia en la Figura 6. La tercera tormenta del mes sucedió el 18 y el 19 de septiembre, de intensidad G1-G2, vinculada a una llamarada solar ocurrida el 16 de septiembre de clase M3.43 (00:30-00:51 hora local). Finalmente, la cuarta tormenta del mes acaeció los días 24 y 25 y estuvo asociada a la llamarada del 21 de septiembre (M8.23). Además, se registraron 2 llamaradas solares más que acarrearón la absorción de señales en la capa D, las cuales fueron: 19 de septiembre (M4.09) de 15:01-15:21 hora local y 20 de septiembre (M8.23) de 09:11-09:25 hora local, mostrada en la Figura 7.

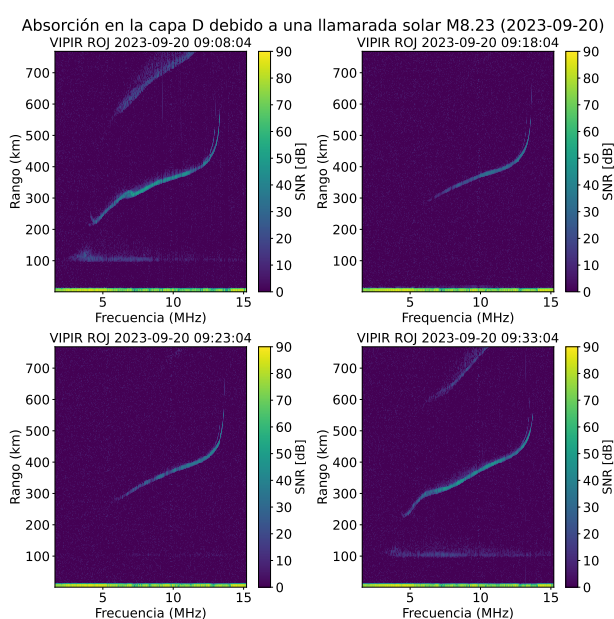


Figura 7. Absorción de señales emitidas por la ionosonda del IGP-ROJ en la capa D originada por el exceso de ionización producido por la llamarada solar del 6 de septiembre.

3. Observaciones de la alta atmósfera con radares

Se pudo monitorear el comportamiento de las derivas verticales de plasma entre los 300 km y 400 km de altura con el uso del radar principal del Radio Observatorio de Jicamarca del Instituto Geofísico del Perú (IGP-ROJ) entre los días 4 al 7 de setiembre (Figura 8). Estas mediciones indican que las derivas verticales promedio empezaron aproximadamente a -15 m/s (hacia abajo) después de la medianoche para inmediatamente aumentar su magnitud y cambiar de dirección (hacia arriba) cerca de las 06:30 horas. Luego, incrementaron hasta llegar a su valor pico de 15 m/s a las 11:30 horas. Posteriormente, descendieron hasta que aconteció el incremento

súbito a las 18:30 horas conocido como pre-reversal enhancement[8], con valores cercanos a los 15 m/s. Finalmente, las derivas verticales continuaron su descenso hasta llegar a valores cercanos a -15 m/s a la medianoche. Los valores predichos por el modelo de Scherliess-Fejer son concordantes con los indicados por las mediciones, siendo la mayor discrepancia de 15 m/s a las 20:30 horas.

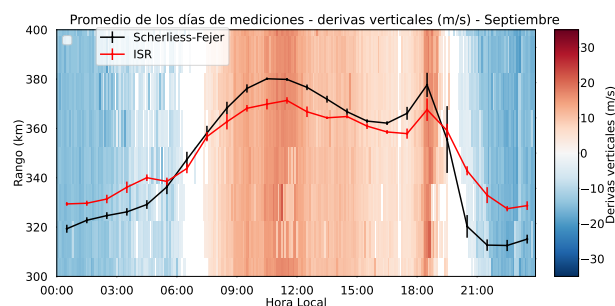


Figura 8. Promedio de las derivas verticales ISR para los días del 4 al 7 de septiembre. La curva roja representa el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km y la curva negra, las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.

Asimismo, se tomaron 12 días de mediciones con el sistema de radar AMISR-14[9], periodo durante el cual se observó la presencia de 8 irregularidades en la capa F en 8 noches, entre los 200 km y 800 km de altura. La morfología dominante fue la del tipo Pluma de Radar, con un 50 % de ocurrencia, secundada por el tipo Bottom-type, con 25 %, seguida por los tipos Bottomside y Post Midnight, con 12.5 % cada uno, como se aprecia en la Figura 9. Esto concuerda con lo señalado por la climatología[7].

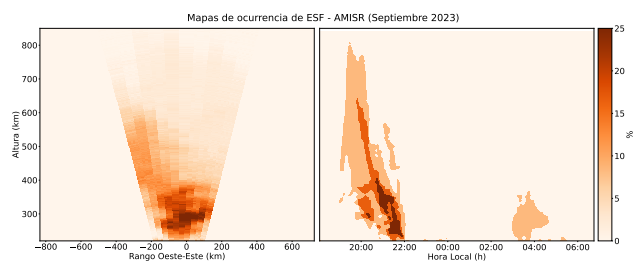


Figura 9. Derecha: Mapa de ocurrencias tradicional. Izquierda: mapa de ocurrencias polar.

Por otro lado, se realizaron mediciones durante 10 días para estimar la densidad de electrones con el radar principal. Durante estos días ocurrieron eventos de F-dispersa prolongados que no permitieron estimar los valores de densidad de electrones durante varias horas de la noche y madrugada, a diferencia del 25 de septiembre donde se lograron estimar valores desde las 00:00 horas hasta las 22:30 horas. Los valores pico para este día se encontraron entre $0.59 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ y $2.81 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ y ocurrieron en el rango comprendido entre 270 km y 675 km

(Figura 10). Adicionalmente, la máxima densidad registrada ($2.81 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$) de los 10 días de mediciones ocurrió este mismo día a una altura de 390 km a las 11:10 horas.

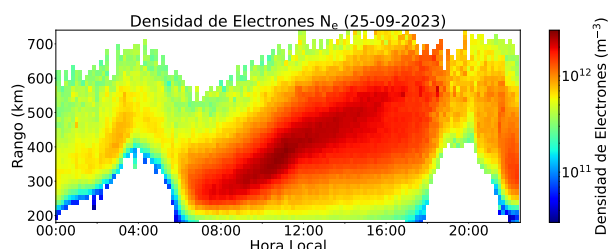


Figura 10. Densidad de electrones durante el 25 de septiembre del 2023. El valor máximo fue de $2.81 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ a una altura de 390 km a las 11:10 horas. Mediciones realizadas con el radar principal de Jicamarca.

Adicionalmente, se registró el comportamiento de los vientos zonales y meridionales en la región de la mesósfera y baja termósfera para el mes de septiembre, como se aprecia en la Figura 11, donde se muestran periodos predominantes de 24 horas (marea solar diurna). En la mesopausa ($\sim 90 \text{ km}$) se observa que el valor del viento zonal promedio máximo fue de $+14.9 \text{ m/s}$ a las 13:00 horas y el promedio mínimo de -51.2 m/s a las 01:30 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de $+50.2 \text{ m/s}$ a las 19:00 horas y el promedio mínimo de -48.3 m/s a las 04:00 horas. El viento zonal máximo fue de $+76.2 \text{ m/s}$ a las 07:45 horas del día 9 de septiembre y el mínimo -109.8 m/s a las 18:15 horas del día 5 de septiembre, mientras que el viento meridional máximo fue 113.9 m/s a las 18:15 horas del día 2 de septiembre y el mínimo -101.9 m/s a las 02:45 horas del día 11 de septiembre.

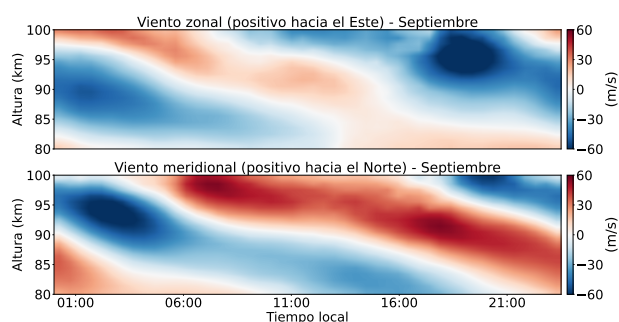


Figura 11. Promedio de los vientos zonales y meridionales durante el mes de septiembre del 2023.

4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

Las mediciones de la variación diurna de la componente horizontal del campo geomagnético (H) de las estaciones magnéticas del IGP-ROJ se

presentan en la Figura 12.. Aquí se aprecia que el promedio de las estaciones de Jicamarca y Huancayo estuvieron muy por encima de las demás debido a que se encuentran en el ecuador magnético y el Electrochorro Ecuatorial (EEJ) contribuye al incremento en sus mediciones. Así también, se apreció una gran variabilidad diaria, mayormente a las 11:00 horas (16:00 horas UTC). Se registraron las máximas variaciones del promedio del mes de septiembre de H por cada estación: Piura, 79 nT; Huancayo, 158 nT; Jicamarca, 162 nT; Arequipa, 79 nT y Nazca, 94 nT.

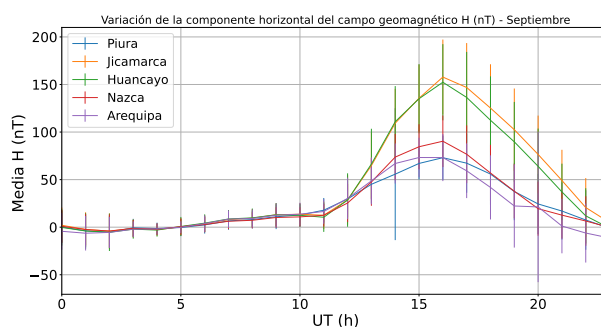


Figura 12. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante el mes de septiembre del 2023.

5. Conclusiones

- Presenciamos 2 tormentas geomagnéticas de intensidad baja (2 y 12 de septiembre) y 2 de intensidad moderada (18 y 24 de septiembre) asociadas cada una a una llamarada solar, cuyos efectos se manifestaron en perturbaciones de la componente horizontal del campo geomagnético y en un posible aumento en las derivas verticales, correspondiente al 12 de septiembre.
- Los promedios en alturas (300 km - 400 km) de las derivas verticales de plasma de los 4 días medidos son, en promedio, 23 % más bajas que las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.
- La incidencia de burbujas de plasma fue baja y mayormente antes de la medianoche, lo que concuerda con la climatología.

6. Referencias

- [1] J. K. Hargreaves, "The solar-terrestrial environment," vol. 1st ed, pp. 124–128, 1993.
- [2] "Introduction To Ionospheric Propagation," Oct. 2021. [Online]. Available: <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/ionospheric-propagation>.

- [3] D. L. Hysell, W. E. Kelley, M. C. and Swartz, and R. F. Woodman, "Seeding and layering of equatorial spread f by gravity waves," *Radio Science*, vol. 95, no. A10, p. 17253–17260, 1990.
- [4] Y.-J. J. Harding, B. J. and Wu, P. Alken, C. C. Yamazaki, Y. and Triplett, T. J. Immel, and et al., "Impacts of the january 2022 tonga volcanic eruption on the ionospheric dynamo: Icon-mighti and swarm observations of extreme neutral winds and currents." vol. 49, 2022.
- [5] I. Adimula, K. Gidado, and S. Bello, "Variability of horizontal magnetic field intensity from some stations within the equatorial electrojet belt," *Physical Science International Journal*, vol. 13, pp. 1–8, 01 2017.
- [6] N. Papitashvili, "OMNIWeb Data Explorer," Oct 2020, Accessed on: Mar. 16, 2023. [Online]. Available: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>
- [7] W. Zhan, F. S. Rodrigues, and M. A. Milla, "On the genesis of postmidnight equatorial spread f: Results for the american/peruvian sector," *Geophysical Research Letters*, vol. 45, no. 15, pp. 7354–7361, 2018.
- [8] J. V. Eccles, J. P. St. Maurice, and R. W. Schunk, "Mechanisms underlying the pre-reversal enhancement of the vertical plasma drift in the low-latitude ionosphere." *J. Geophys. Res. Space Physics*, vol. 120, p. 4950– 4970, 2015.
- [9] "Instituto Geofísico del Perú, "Realtime at Jicamarca", " Jul 2021, Accessed: Jul. 3, 2023. [Online]. Available: https://www.igp.gob.pe/observatorios/radio-observatorio-jicamarca/realtime/static/reports/2022/Boletin_Agosto.pdf

Elaborado por:

Bach. Juan Pablo Velásquez Ormaeche
 Bach. Roberto Flores Arroyo
 Mag. Luis Condori Illahuamán
 Dr. Edgardo Pacheco Josan

Diseño y diagramación:

Bach. Anette De la Cruz Meza

Colaboradores:

Mag. Karim Kuyeng Ruiz
 Dr. Danny Scipión Castillo
 Dr. Marco Milla Bravo

Contacto:

roj@igp.gob.pe

Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ)
 Instituto Geofísico del Perú
 Lurigancho-Chosica, Lima, Perú
 Teléfono: +51 1 3172313
 Webpage: www.gob.pe/igp

***"Ciencia para protegernos
 ciencia para avanzar"***