



LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

AGOSTO 2023



Durante el mes de agosto presenciamos una tormenta geomagnética asociada a una llamarada solar de clase X que produjo perturbaciones en la componente horizontal del campo geomagnético (Figura 4) y posiblemente afectó el desarrollo de irregularidades ionosféricas en la capa F[1], como se aprecia en la Figura 1.

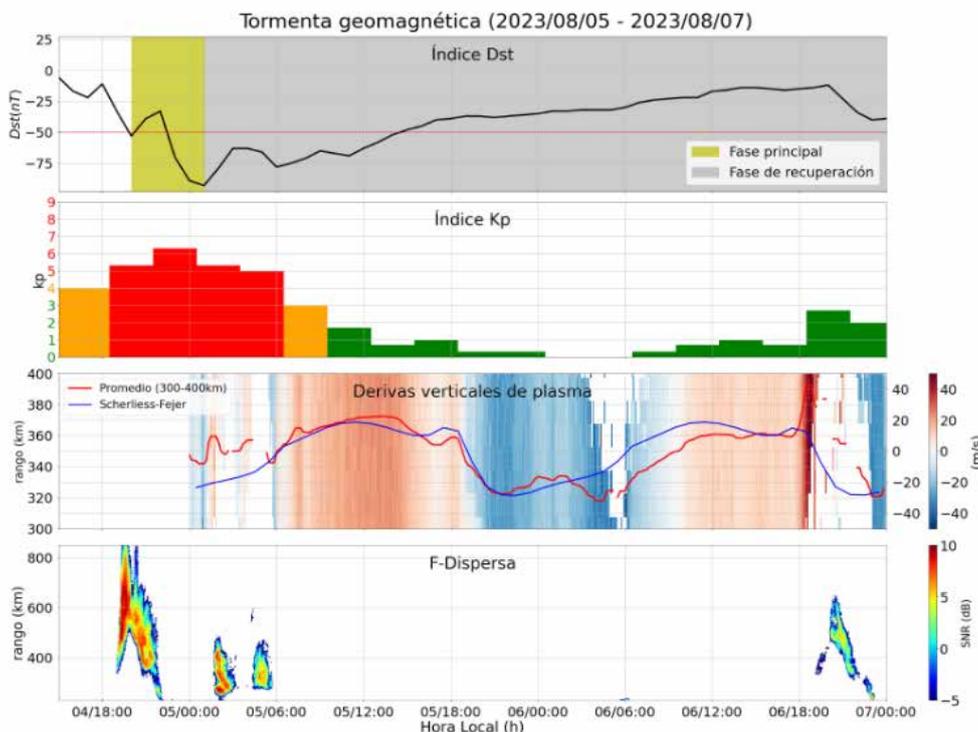


Figura 1. Efectos de la tormenta geomagnética del 4-5 de agosto en la ocurrencia de F-Dispersa.

Tabla 1. Resumen de las mediciones de parámetros ionosféricos y condiciones predominantes del clima espacial del mes de agosto 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]	
Meridional	Zonal	Mín	Máx	LIM: 128	AQP: 72
Mín: 65.9 S	Mín: 27.5 O	-23	15	NZC:82	
Máx: 51.5 N	Máx: 28.7 E				
ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: TRANQUILA				ACTIVIDAD SOLAR: ALTA	

¿SABÍAS QUÉ?

Existen 3 tipos de ondas atmosféricas con un rol crucial en la dinámica de la atmósfera neutra y que se propagan desde la superficie de la Tierra hacia la atmósfera superior.

Tipo I: ondas de gravedad de baja frecuencia u ondas de gravedad interna. Se ocasionan al desplazar un elemento de volumen de forma vertical, siendo la fuerza de restauración la gravedad, por lo que imparte un movimiento transversal a las moléculas de aire[2].

Tipo II: ondas acústicas de alta frecuencia y debe su existencia a la fuerza de restauración producida por la compresión del aire, por lo que desplaza a las moléculas de aire de manera longitudinal.

En general, al combinar las ondas del tipo I y II se generan ondas gravito-acústicas (Figura 2) con un movimiento elipsoidal[3]. Estudios señalan que estas ondas juegan un papel fundamental en la formación y modulación de los Ecos de 150 km[4], así como también en la generación de la F-dispersa nocturna[5] que se detectan con el radar de Jicamarca.

Tipo III: ondas de Lamb que se propagan horizontalmente, son propias de vibraciones superficiales y pueden transportar energía a grandes distancias. Un ejemplo de estas ondas se observaron en el evento volcánico de Tonga del 15 de enero del 2022. La erupción produjo ondas de Lamb que

se propagaron alrededor del mundo hasta 4 veces, dejando huellas en diferente tipos de mediciones, entre los que se encuentran las mediciones de magnetómetros y satélites[6].

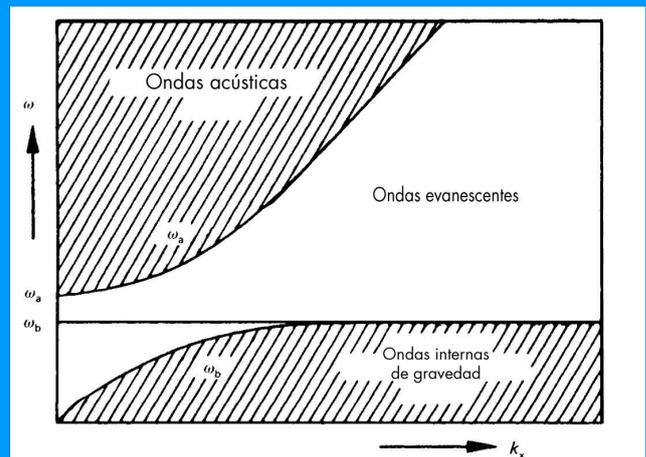


Figura 2. Relación de dispersión de las ondas gravito-acústicas. Podemos apreciar que solo las ondas con frecuencias mayores a la frecuencia acústica (ω_a) y menores a la frecuencia de flotabilidad (ω_b) pueden propagarse en la atmósfera, de lo contrario se generan ondas de corta duración o evanescentes. Gráfico adaptado de [2].

1. Climatología del mes

La actividad geomagnética (índice Kp[4]) fue predominantemente tranquila en un 95 % del tiempo, moderada en un 3 % y alta en un 2%; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7[5]) fue alta en su 71 % del tiempo y 29%, moderada (Figura 3 y Tabla 1).

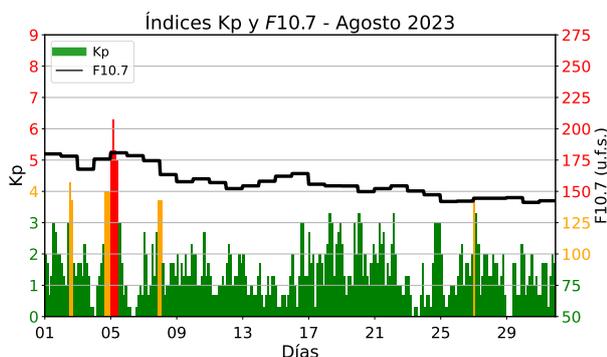


Figura 3. Los valores de los índices Kp y F10.7 cm (u.f.s. = $10^{-22} W m^{-2} Hz^{-1}$) para el mes de agosto. Extraídos de OMNIWeb [7].

Además, investigaciones previas señalan que hay una fuerte relación entre la variabilidad diaria y estacional de la componente horizontal del campo geomagnético (H)[6], lo que se refleja en nuestras mediciones. 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, además de una muy baja incidencia de eventos posteriores a la medianoche[8]. Las mediciones muestran una buena concordancia con la climatología[8], salvo para el 4-5 de agosto durante la fase principal de la tormenta geomagnética del mismo día, cuando una irregularidad ionosférica en la capa F llegó a alturas de hasta 850 km.

La climatología de agosto 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 18 m/s a las 11:30 horas. Posteriormente, estos valores disminuyen hasta 12 m/s a las 16:30 horas, cuando vuelven a incrementar

temporalmente debido al fenómeno de pre-reversal enhancement[9], hasta cerca de 15 m/s a las 17:30 horas, para finalmente decrecer hasta los -29 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 casi los 10 m/s.

2. Llamaradas solares y tormentas geomagnéticas

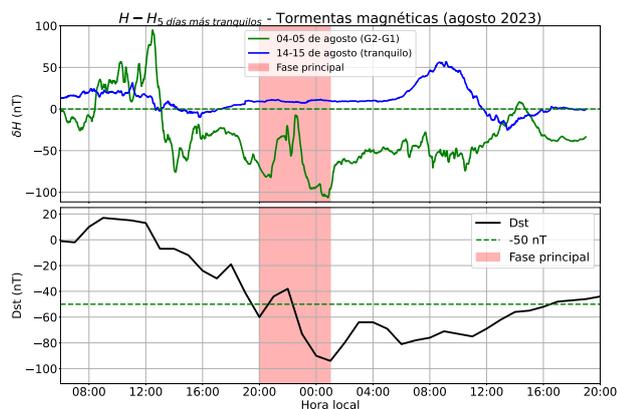


Figura 4. Perturbaciones en H (curva verde) ocasionadas por la tormenta geomagnética del 4-5 de agosto registradas en la estación de Jicamarca. La curva azul representa las perturbaciones magnéticas para un día geomagnéticamente tranquilo (15 de agosto). La región sombreada de rojo indica el periodo de tiempo que comprende la fase principal de la tormenta geomagnética.

El 1 de agosto aconteció una llamarada solar de clase M3.6 (01:28 - 02:19 LT) que no tuvo efectos en nuestra instrumentación y que estuvo asociada a una eyección de masa coronal (CME). Esta CME alcanzó la magnetósfera terrestre el 4-5 de agosto, produciendo una tormenta geomagnética de intensidad G1-G2 que causó perturbaciones en la componente horizontal H del campo geomagnético, como se muestra en la Figura 4. Además, el día 4 se registró la ocurrencia de una irregularidad ionosférica en la capa F con alturas de hasta 850 km, correspondiendo a un evento atípico para la presente climatología (Figura 1). El día 5, fuimos testigos de la ocurrencia de una llamarada solar de clase X1.6 (16:45 - 17:44 horas) que ocasionó el incremento temporal de la componente horizontal H del campo geomagnético, como se aprecia en la Figura 5. Debido a la hora que aconteció no pudimos ver efectos en la absorción de señales en la capa D. Por otro lado, el 6 de agosto se registró otra llamarada solar de clase M5.51 (13:20 - 13:58 horas), la cual no produjo perturbaciones en las mediciones de nuestros magnetómetros, pero sí causó la absorción de señales en la capa D, como

se puede observar en los ionogramas presentados en la Figura 6. Finalmente, otra llamarada solar de clase X1.6 (15:30 - 16:18 LT) acarreó la absorción de señales en la capa D el día 7.

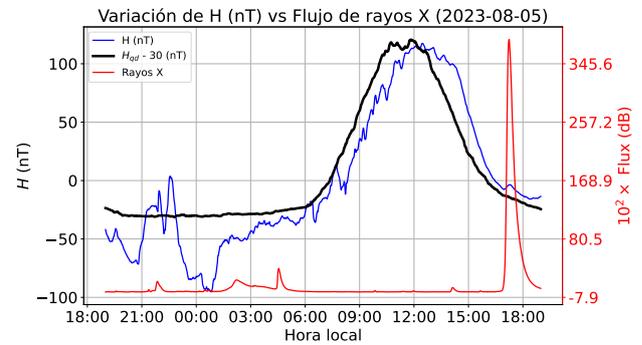


Figura 5. Aumento temporal de H en la estación de Jicamarca (curva azul) antes de las 18:00 horas debido al excedente de ionización producido por la llamarada solar del 5 de agosto y que coincide con el valor máximo de flujo de rayos X (curva roja). También se ilustra el promedio de la variación de H de los 5 días geomagnéticamente más tranquilos (curva negra).

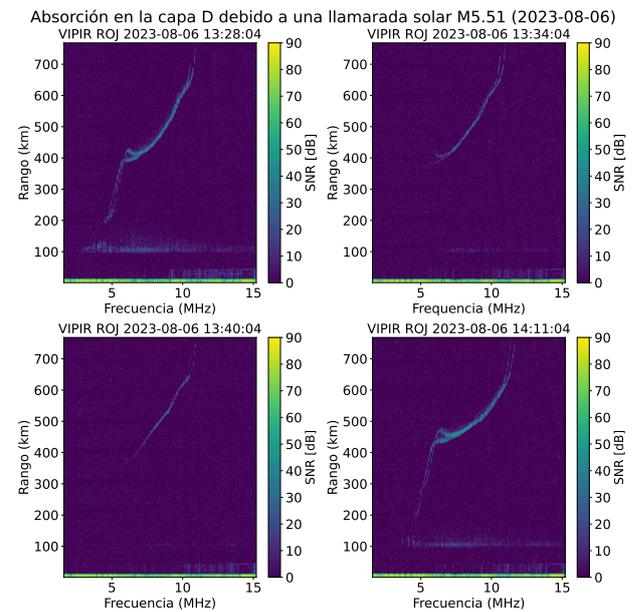


Figura 6. Absorción de señales emitidas por la ionosonda del IGP-ROJ en la capa D originada por el exceso de ionización producido por la llamarada solar del 6 de agosto.

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) en su modo JULIA-MP (Figura 7). Estas mediciones indican que las derivas verticales promedio empezaron aproximadamente a -18 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[9], con valores cercanos a los 15 m/s. Finalmente, las derivas verticales continuaron su descenso hasta llegar a valores cercanos a -23 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 casi 10 m/s a las 20:30 horas.

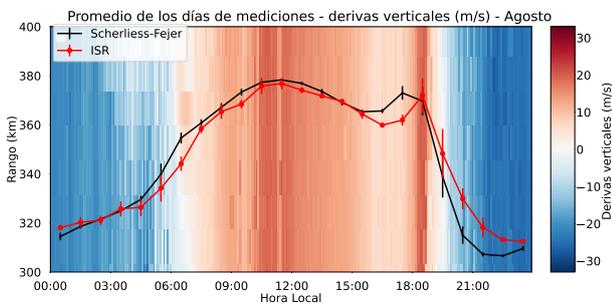


Figura 7. Promedio mensual de las derivas verticales ISR para el mes de agosto. La curva roja representa el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km y la curva negra, las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.

Asimismo, se registraron 21 días de mediciones con el sistema de radar AMISR-14, periodo durante el cual se observó la presencia de 11 burbujas de plasma en 8 noches. La morfología dominante fue Bottomside y Bottom-type, con un 55% de ocurrencia, secundada por los tipos Pluma de Radar y Post Midnight, con 18% cada uno, seguidos por la morfología Bottomside, como se aprecia en la Figura 8. Esto concuerda con lo señalado por la climatología[8].

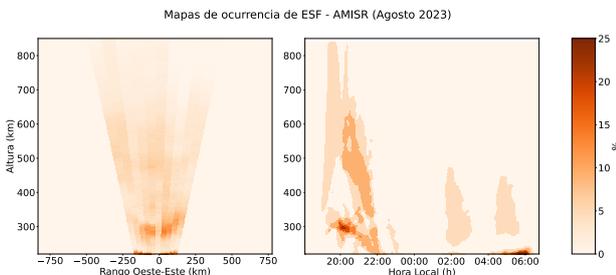


Figura 8. Derecha: Mapa de ocurrencias tradicional. Izquierda: mapa de ocurrencias polar.

Adicionalmente, se registró el comportamiento de los vientos zonales y meridionales en la región de la

mesósfera y baja termósfera para el mes de agosto, como se aprecia en la Figura 9, donde se muestran periodos predominantes de 24 horas (marea solar diurna). En la mesopausa (~90 km) se observa que el valor del viento zonal promedio máximo fue de +28.7 m/s a las 12:30 horas y el promedio mínimo de -27.5 m/s a las 00:30 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de +51.5 m/s a las 18:30 horas y el promedio mínimo de -65.9 m/s a las 03:30 horas. El viento zonal máximo fue de +114.2 m/s a las 16:15 horas del día 29 de agosto y el mínimo -95.9 m/s a las 02:45 horas del día 4 de agosto, mientras que el viento meridional máximo fue 115.7 m/s a las 18:45 horas del día 5 de agosto y el mínimo -134.4 m/s a las 04:15 horas del día 16 de agosto.

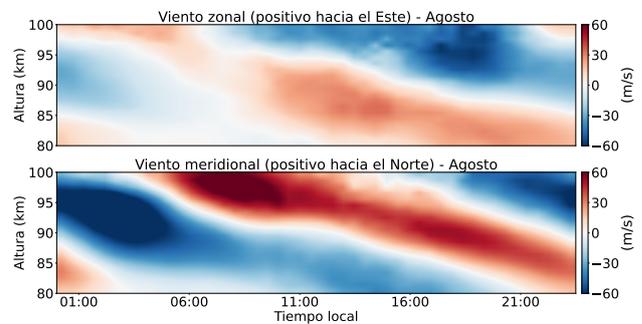


Figura 9. Promedio de los vientos zonales y meridionales durante el mes de agosto del 2023.

4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

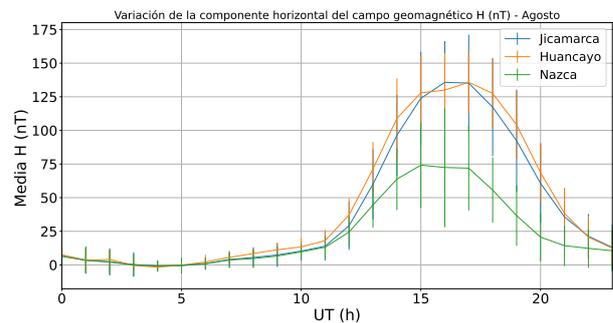


Figura 10. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante el mes de agosto del 2023.

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 10. Aquí se aprecia que el promedio de la estación de Jicamarca estuvo muy por encima de las demás debido a que se encuentra 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 agosto de H por cada estación: Jicamarca, 136 nT; Arequipa, 71 nT y Nazca, 74 nT.

5. Conclusiones

- Presenciamos una tormenta geomagnética de intensidad moderada (4-5 de agosto) ocasionada por una CME asociada a una llamarada solar ocurrida el 1 de agosto, cuyos efectos se manifestaron en perturbaciones de la componente horizontal del campo geomagnético y generaron un posible aumento de las alturas de ocurrencia de las irregularidades ionosféricas en la capa F (hasta 850 km).
- Los promedios en alturas (300 km - 400 km) de las derivas verticales de plasma del presente mes son, en promedio, 20% más bajas que las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.
- La incidencia de irregularidades en la capa F fue baja y mayormente antes de la medianoche, lo que concuerda con la climatología.

6. Referencias

- [1] M. A. Abdu, "Equatorial spread f/plasma bubble irregularities under storm time disturbance electric fields," pp. 75–76, 44–56, 2012.
- [2] J. K. Hargreaves, "The solar-terrestrial environment," vol. 1st ed, pp. 124–128, 1993.
- [3] P. M. Reyes, E. Kudeki, G. A. Lehmacher, J. L. Chau, and M. A. Milla, "Vipir and 50 mhz radar studies of gravity wave signatures in 150-km echoes observed at jicamarca," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 125, no. 8, 2020.
- [4] 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.
- [5] 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: I-con-mighti and swarm observations of extreme neutral winds and currents." vol. 49, 2022.
- [6] 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.
- [7] N. Papitashvili, "OMNIWeb Data Explorer," Oct 2020, Accessed on: Mar. 16, 2023. [Online]. Available: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>
- [8] 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.
- [9] 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.

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

Elaborado por:

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