



LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

JUNIO 2024



Durante el mes de junio de 2024 fuimos testigos de la baja ocurrencia de irregularidades en la capa F debido a la alta actividad solar y la estación del año en la que nos encontramos. Solo en una noche de las 23 con mediciones disponibles se observaron estas irregularidades, cuya morfología se muestra en la [Figura 1](#). Por otro lado, el 28 de junio a las 07:00 horas aconteció una tormenta geomagnética de clase G3 la cual perturbó las mediciones de la variación diurna de la componente horizontal del campo magnético terrestre (H) en la estación de Jicamarca ([Figura 5](#)), así como las derivas verticales ISR y de los ecos de 150 km ([Figura 6](#)).

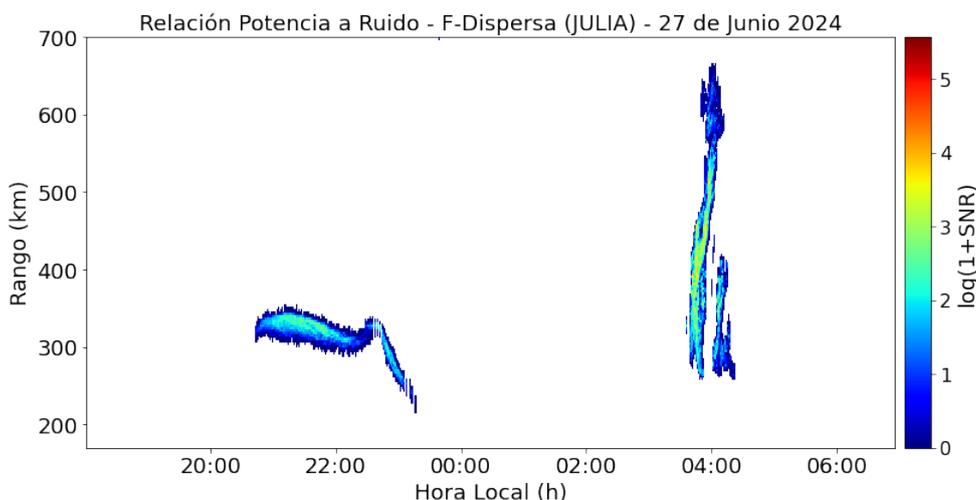


Figura 1. Relación de potencia a ruido de los ecos de F-Dispersa detectados con el sistema JULIA MP el día 27 de junio del 2024.

Tabla 1. Resumen de las mediciones de parámetros ionosféricos y condiciones predominantes del clima espacial del mes de junio del 2024.

Vientos promedios MLT a 90 km [m/s]		Variación máxima de campo geomagnético horizontal (H)[nT]		Derivas verticales de plasma promedio (300 km- 400 km) [m/s]	
Meridional	Zonal	LIM:120	AQP:64	Mín.	Máx.
Mín: 58.2 S	Mín: 8.3 O	HYO: 125	NZC: 69	-25	17
Máx: 24.9 N	Máx: 40.4 E	PIU: 65			
ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: TRANQUILA				ACTIVIDAD SOLAR: MODERADA	

¿SABÍAS QUÉ?

La ionosfera y sus irregularidades deben su existencia a la radiación solar efectiva, la cual varía con el transcurso del día, la estación del año, la posición geográfica y la actividad solar, además su ángulo cenital determina la cantidad de radiación recibida. La F-dispersa ecuatorial (ESF, por sus siglas en inglés) son irregularidades en la región F que producen un empobrecimiento de la densidad del plasma, que típicamente ocurren durante las condiciones de equinoccios posteriores a la puesta del sol en la mayor parte de las longitudes, a diferencia del solsticio de junio, donde las condiciones que producen estas irregularidades son desfavorables Figura 1. Se cree que estas irregularidades, con tamaños de escala que van desde decenas a cientos de kilómetros en la dirección zonal magnética, y que se producen a varios grados en latitud y a diferentes alturas, son generadas por la llamada inestabilidad ionosférica generalizada de Rayleigh-Taylor (GRTI, por sus siglas en inglés), la cual se refiere a la interacción entre 2 fluidos de diferentes densidades. Más recientemente, se ha sugerido que una inestabilidad llamada "Electrostatic shear instability" (Inestabilidad de Kelvin Helmholtz), la cual se refiere a diferentes capas de fluidos moviéndose a diferentes velocidades, también podría desempeñar un papel importante en el desarrollo y la dinámica del ESF. Uno de los parámetros más importantes para el crecimiento lineal de la inestabilidad GRTI es la velocidad vertical del plasma vertical ecuatorial en la región F, impulsada por el campo eléctrico zonal en el ecuador magnético, y que se incrementa previa a la reversión (PRE, por sus siglas en inglés Pre-Reversal Enhancement), alrededor de la puesta del sol. Esto explica la alta ocurrencia de ESF después de la puesta

del sol y durante los meses equinocciales Figura 2. Por otro lado, estudios han demostrado que los eventos de ESF pueden ocurrir durante el solsticio de junio, especialmente en condiciones de bajo flujo solar y las ocurrencias disminuyen en alto flujo solar. Una mejor comprensión de los procesos que contribuyen a las irregularidades del solsticio de junio es un tema de interés e investigación actual.

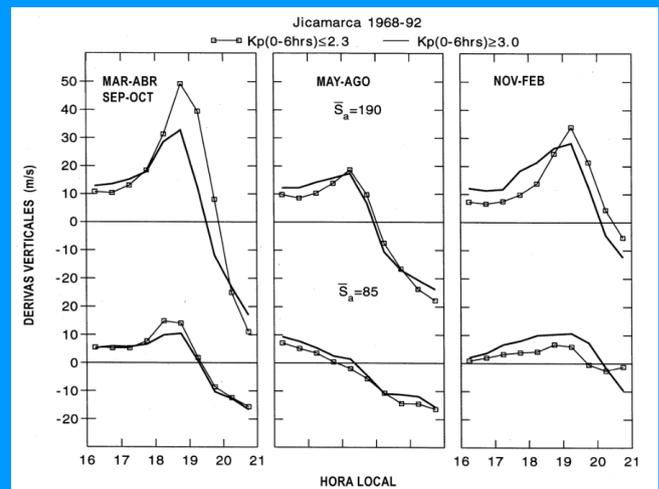


Figura 2. Variación de la velocidad de la deriva vertical para periodos de bajo (paneles inferiores) y alto flujo solar (paneles superiores), en condiciones geomagnéticas tranquilas (líneas con cuadrados) y perturbadas (líneas continuas), y para diferentes estaciones del año[1]. Nótese que para el solsticio de junio (panel central), los valores de la velocidad vertical no alcanzan los valores que puedan generar la inestabilidad en la ionosfera que produzca el fenómeno de F-dispersa. Figura adaptada de [1]

1. Climatología del mes

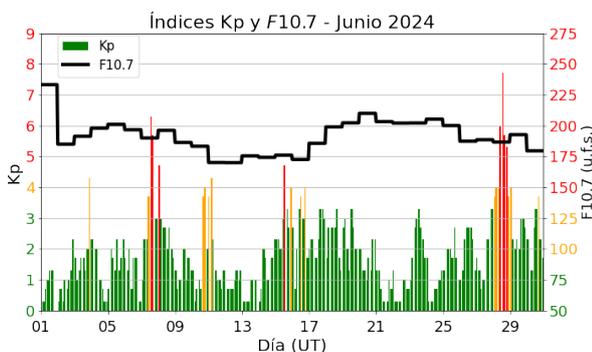


Figura 3. Valores de los índices Kp y F10.7 cm (u.f.s. = $10^{-22} W m^{-2} Hz^{-1}$) para el mes de junio. Extraídos de OMNIWeb [2].

La actividad geomagnética (índice Kp[3]) fue predominantemente tranquila en un 90 % del tiempo, moderada en un 6 % y alta en un 4 %; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7[10]) fue alta el 100 % del tiempo (Figura 3 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), lo que se refleja en nuestras mediciones.

Para los meses cercanos al solsticio de junio (mayo, junio, julio), en un régimen de actividad solar alta o moderada, se espera que la ocurrencia de F-Dispersa sea baja, con burbujas contenidas entre los 200 y 400 km de altura antes de la medianoche y entre los 200 y 600 km de altura después de la medianoche[4]. Las mediciones muestran una buena concordancia con la climatología.

Asimismo, la climatología de junio para un régimen de actividad solar alta (dada por el modelo de Scherliess-Fejer) indica que el promedio en altura (300-400 km) de las derivas verticales de plasma tiene un valor cercano a los -24 m/s pasada la medianoche, cuya magnitud incrementa hasta llegar a un valor de cerca de 19 m/s a las 11:00 horas. Posteriormente, estos valores disminuyen hasta 10 m/s a las 15:00 horas, cuando vuelven a incrementar temporalmente debido al fenómeno de pre-reversal enhancement, hasta 17 m/s a las 17:00 horas, para finalmente decrecer hasta los -27 m/s antes de la medianoche. Los valores indicados por la climatología muestran una moderada concordancia con las mediciones salvo para las horas luego de la medianoche y las circundantes a la ocurrencia de pre-reversal enhancement.

Estudios climatológicos[5] indican que cerca a los meses del solsticio de junio los Ecos de 150 km aparecen alrededor de las 09:00 horas, desaparecen pasadas las 15:30 horas y están contenidos entre los 135 km y los 165 km de altura. En este periodo encontramos que la mínima altura de aparición coincide con lo esperado mientras que la máxima altura de aparición fue mayor en 15 km. Además, la hora de aparición de estas irregularidades ocurre media hora antes, mientras que la hora de desaparición ocurre media hora después de lo esperado.

2. Tormentas geomagnéticas

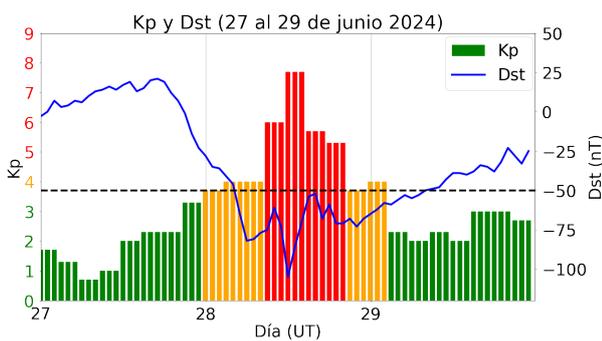


Figura 4. Índices geomagnéticos Kp y Dst del 27 al 29 de junio. La línea horizontal negra representa el valor de Dst igual a -50 nT. Intensidades menores o iguales a este valor se consideran tormentas geomagnéticas.

La creciente actividad solar se manifestó en la ocurrencia de una tormenta geomagnética de intensidad G3 (Figura 4). Ésta aconteció el 28 de junio, alcanzando un valor de Dst mínimo de -105 nT, y fue causada por una eyección de masa coronal (CME) emitida el 25 de junio[6] debido a la erupción de un filamento solar[7].

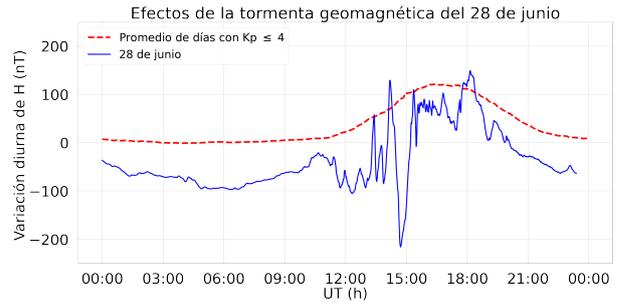


Figura 5. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida el 28 de junio del 2024, sobre la variación diurna de H de la estación geomagnética de Jicamarca.

La tormenta de este mes perturbó las mediciones de la variación diurna de la componente horizontal del campo magnético terrestre (H) en la estación de Jicamarca, como se aprecia en la Figura 5. Además, ésta tuvo un impacto significativo en las derivas verticales ISR medidas con el radar principal del Radio Observatorio de Jicamarca, sede del Instituto Geofísico del Perú (IGP-ROJ), como se muestra en la Figura 6. Aquí se puede apreciar que el día de la tormenta las derivas fueron negativas luego de la salida del Sol hasta las 08:00 horas y que luego estas variaron de positivo (hacia arriba) a negativo (hacia abajo) hasta las 10:00 horas, a diferencia del promedio de las derivas durante los días geomagnéticamente tranquilos. Por otro lado, las derivas verticales de los Ecos de 150 km también fueron afectadas y mantienen la misma tendencia que las descritas en las mediciones ISR (Figura 6).

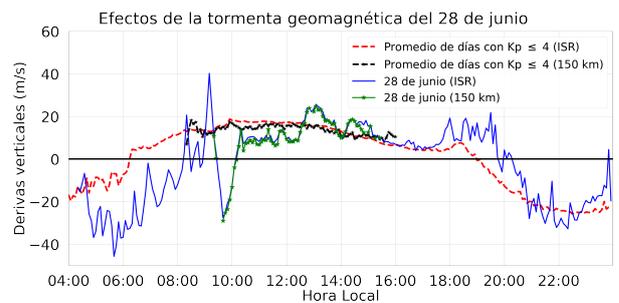


Figura 6. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida el 28 de junio del 2024, sobre el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km de las derivas verticales ISR y sobre el promedio en alturas de las derivas verticales de los Ecos de 150 km.

3. Observaciones de la alta atmósfera con radares

Se pudo monitorear el comportamiento de las derivas verticales de los Ecos de 150 km durante 17 días con el modo JULIA MP, en la región de transición entre las capas E y F. Podemos apreciar en la Figura 7 que los ecos empiezan minutos después de las 08:00

horas, que desaparecen a las 16:00 horas y que están contenidos entre los 135 km y los 180 km de altura, lo que concuerda moderadamente con lo predicho por la climatología, excepto por la máxima altura de aparición la cual superó por 15 km lo esperado.

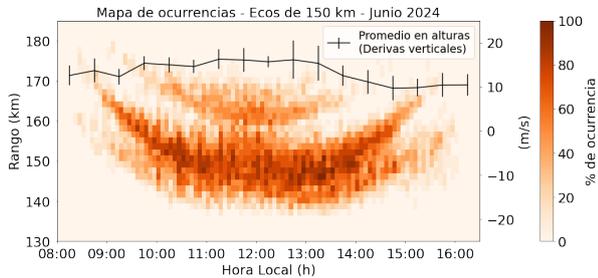


Figura 7. Mapa de ocurrencias de los Ecos de 150 km y el promedio en alturas de sus derivas verticales.

Por otro lado, se realizaron 27 días de mediciones de las derivas verticales de plasma entre los 300 y 400 km de altura con el uso del radar principal del IGP-ROJ con el modo JULIA MP, como se muestra en la Figura 8. Estas mediciones indican que las derivas verticales promedio empezaron aproximadamente a -16 m/s (hacia abajo) después de la medianoche para aumentar hasta cambiar de dirección (hacia arriba) a las 06:00 horas. Luego, incrementaron hasta llegar a un valor cercano a 17 m/s a las 11:00 horas. Posteriormente, descendieron hasta que aconteció el incremento súbito a las 18:00 horas conocido como pre-reversal enhancement, con valores cercanos a los 5 m/s. Finalmente, los valores predichos por el modelo de Scherliess-Fejer exhiben una moderada concordancia con las mediciones, siendo la mayor discrepancia de 12 m/s a las 17:30 horas.

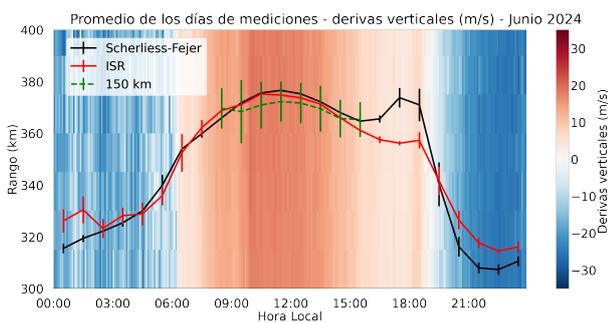


Figura 8. Promedio de las derivas verticales ISR. La curva roja representa el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km y la curva negra, las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.

Asimismo, se realizaron 17 noches de mediciones con el sistema de radar AMISR-14[8], periodo durante el cual no se observaron irregularidades en la Capa F. Estas observaciones concuerdan moderadamente con lo señalado por la climatología (realizada con el modo JULIA)[4]. Además, el sistema de radar JULIA-MP funcionó durante 23 noches, durante las cuales solo en

una se pudieron detectar irregularidades, la primera de las 2 detectadas fue del tipo Bottom-type y comprendió entre los 200 km y los 350 km, mientras que la segunda fue del tipo Post-midnight y se desarrolló entre los 250 km y los 670 km, como se aprecia en la Figura 1. Las observaciones concuerdan con lo señalado por la climatología.

El promedio en tiempo y altura de los vientos zonales y meridionales para el mes de junio, como se aprecia en la Figura 9, muestra 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 +40.4 m/s a las 12:00 horas y el promedio mínimo de -8.3 m/s a la 02:00 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de +24.9 m/s a las 19:00 horas y el promedio mínimo de -58.2 m/s a las 05:00 horas. El viento zonal máximo fue de +84.2 m/s a las 14:15 horas del 30 de junio y el mínimo -76.7 m/s a las 01:15 horas del día 28 de junio, mientras que el viento meridional máximo fue +95.3 m/s a las 18:45 horas del día 22 de junio y el mínimo -118.3 m/s a las 03:45 horas del día 26 de junio.

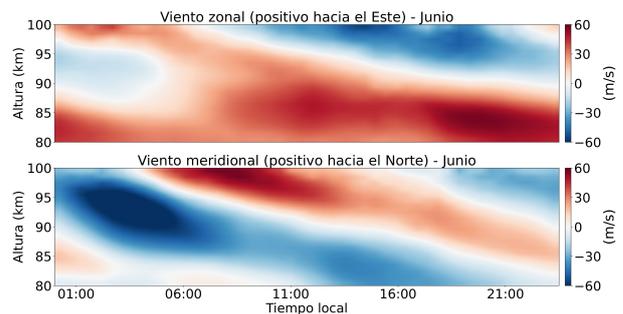


Figura 9. Promedio de los vientos zonales y meridionales durante el mes de junio del 2024.

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 durante los días geomagnéticamente tranquilos se presentan en la Figura 10. 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 (EE) 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 junio de H por cada estación: Piura, 65 nT; Huancayo, 125 nT; Jicamarca, 120 nT; Arequipa, 64 nT y Nazca, 69 nT.

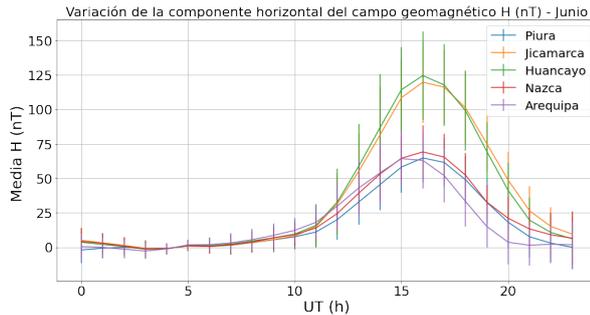


Figura 10. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante junio.

5. Conclusiones

- La tormenta geomagnética del 28 de junio de clase G3 alcanzó un valor de Dst mínimo de -105 nT, la cual perturbó la variación diurna de la componente horizontal del campo geomagnético H.
- Esta misma tormenta perturbó las derivas verticales ISR y de los Ecos de 150 km, donde se registraron inusuales valores negativos hasta las 10:00 horas.
- La actividad solar (índice F10.7) fue alta el 100% del tiempo y es el primer mes con este registro, a diferencia del mes pasado que se tuvo un 94% de actividad alta, ello indica que nos estamos acercando al máximo solar predicho para julio 2025.

6. Referencias

- [1] "Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread f,"

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/1999JA900271>.

- [2] N. Papitashvili, "OMNIWeb Data Explorer," Oct 2020, Accessed on: Mar. 16, 2023. [Online]. Available: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>
- [3] "The Kp-index | Help," Oct 2020, Accessed on: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.spaceweatherlive.com/en/help/the-kp-index.html>
- [4] 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.
- [5] J. L. Chau and E. Kudeki, "Statistics of 150-km echoes over jicamarca based on low-power vhf observations," *Ann. Geophys.*, p. 1305–1310, 2006.
- [6] "Cme impact sparks g2 - moderate geomagnetic storm.gnetism," <https://watchers.news/2024/03/04/cme-impact-sparks-g2-moderate-geomagnetic-storm>.
- [7] "Solar filament eruption captured with suvi," <https://www.nesdis.noaa.gov/news/solar-filament-eruption-captured-suvi>.
- [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.

Elaborado por:

Bach. Roberto Flores Arroyo

Diseño y diagramación:

Bach. Anette De la Cruz Meza

Colaboradores:

Mag. Karim Kuyeng Ruiz
Dr. Danny Scipión Castillo
Mag. Luis Condori Illahuamán
Dr. Edgardo Pacheco Josan
Dr. Marco Milla Bravo

Contacto:

roj@igpp.gob.pe