PERÚ | Ministerio del Ambiente | Instituto Geofísico del Perú
"Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

BOLETÍN

IGP / ROJ / 2025-06

LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

JUNIO 2025

IGP

Durante el mes de junio de 2025 fuimos testigos de 3 tormentas geomagnéticas, de intensidades G4, G2 y G1. La tormenta más intensa (G4) inició el 01 de junio y fue disminuyendo su intensidad hasta el 04 de junio, la cual tuvo un impacto significativo en las mediciones de las derivas verticales de los Ecos de 150 km (Figura 1), en donde durante la tarde del primero de junio se registró un cambio súbito en la dirección de las derivas pasadas las 14:30 horas, lo cual corresponde con registros de inusuales valores negativos de la variación diurna de la componente horizontal del campo magnético terrestre de la estación geomagnética de Jicamarca.

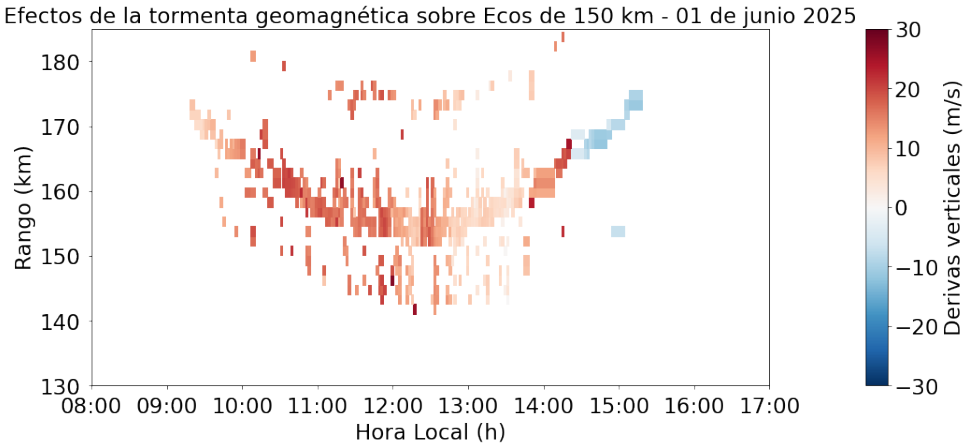

Figura 1. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida el 01 de junio, sobre las derivas verticales de los Ecos de 150 km, donde a las 14:30 horas las derivas cambian de dirección.

Tabla 1. Resumen de las mediciones de parámetros ionosféricos y condiciones predominantes del clima espacial del mes de junio del 2025.

Vientos promedios MLT a 90 km [m/s]	
Meridional	Zonal
Mín: 62.9 S Máx: 34.0 N	Mín: 5.2 O Máx: 45.5 E

Variación máxima de campo geomagnético horizontal (H)[nT]	
LIM: 108	TPP: 56
HYO: 99	PIU: 58

Derivas verticales de plasma promedio (300 km- 400 km) [m/s]	
Mín.	Máx.
-20	17

ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: **TRANQUILA**	ACTIVIDAD SOLAR: **MODERADA**
A: 16 % M: 11 % T: 73 %	A: 13 % M: 87 % B: 0 %

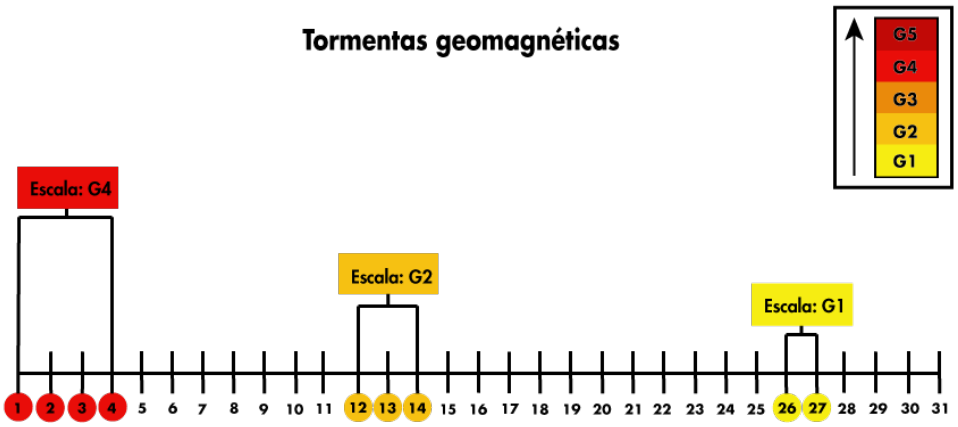

Figura 2. Intensidad de las tormentas geomagnéticas del mes de junio.

¿SABÍAS QUÉ?

Una forma aproximada de estimar el movimiento vertical de plasma en la ionósfera durante el día puede obtenerse a través de las derivas verticales de los Ecos de 150 km[1] y, que debido a su naturaleza, pueden detectarse más fácilmente que los ecos de dispersión incoherente. Además, estos ecos también pueden ser afectados por fulguraciones solares y tormentas geomagnéticas como en el caso del plasma. Las fulguraciones afectan la típica forma de collar de los Ecos de 150 km, provocando que repentinamente los ecos se generen a menores alturas, sin embargo su movimiento permanece hacia arriba pero con menor magnitud (Figura 3), lo cual indica que los ecos no fueron desplazados hacia abajo desde su posición típica, sino que las condiciones de fondo que generan estas irregularidades cambiaron de altura debido a la fulguración. Por otro lado, las tormentas geomagnéticas afectan el movimiento de los Ecos de 150 km pero no su forma típica de collar. Similar a lo que ocurre con las velocidades de plasma, las velocidades de los ecos pueden magnificarse[2] o incluso revertirse a velocidades negativas (movimiento hacia abajo) debido al cambio del campo eléctrico zonal a causa de la tormenta (Figura 1).

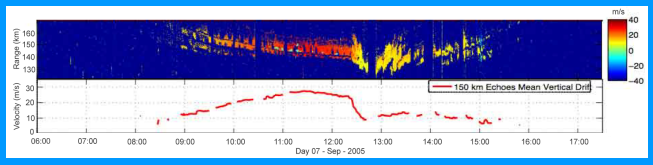

Figura 3. Panel superior: Ecos de 150 km en donde se observa que a las 12:30 horas se pierde la típica forma de collar. Panel inferior: Disminución abrupta a las 12:30 horas en la velocidad positiva de los ecos. Imágen extraída de Reyes, 2012[3].

1. Climatología del mes

La actividad geomagnética (índice Kp) fue predominantemente tranquila en un 73 % del tiempo, moderada en un 11 % y alta en un 16 %; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7) fue alta un 13 % del tiempo y 87 % 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)[4], lo que se refleja en nuestras mediciones.

Para los meses cercanos al solsticio de junio (mayo, junio, julio), en un régimen de actividad solar moderada o alta, se espera que la ocurrencia de F-Dispersa sea baja, menor al 20 %[5]. Las mediciones muestran una buena concordancia con la climatología.

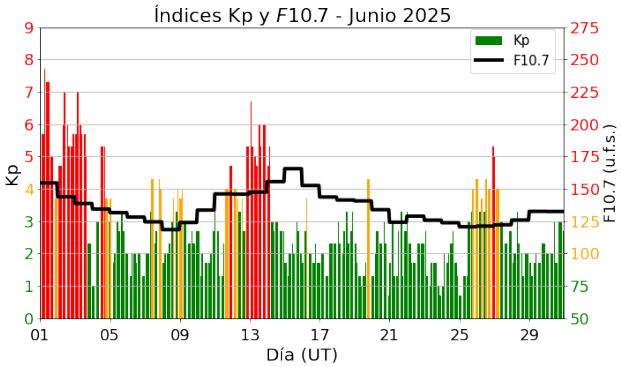

Figura 4. Valores de los índices Kp y F10.7 cm (u.f.s. = $10^{-22} W m^{-2} Hz^{-1}$) para el mes de junio. Extraídos de OMNIWeb.

Asimismo, la climatología de junio para un régimen de actividad solar moderada (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 -20 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 8 m/s a las 16:00 horas, cuando vuelven a incrementar temporalmente debido al fenómeno de pre-reversal enhancement[6], hasta 9 m/s a las 17:00 horas, para finalmente decrecer hasta los -22 m/s antes de la medianoche. Los valores indicados por la climatología muestran moderada concordancia con las mediciones.

Estudios climatológicos[7] 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 y la máxima altura de aparición fueron mayores en 5 km y 10 km que lo esperado, respectivamente. 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

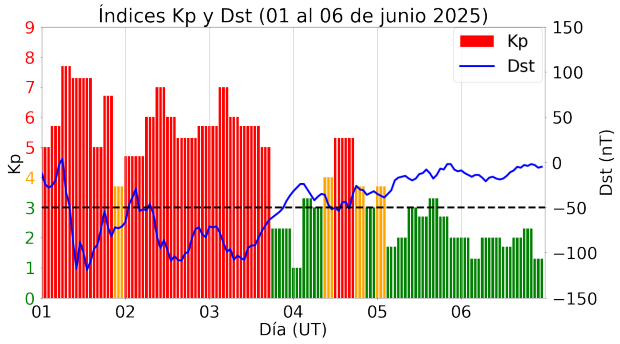

Figura 5. Índices geomagnéticos Kp y Dst del 01 al 06 de junio. La línea horizontal negra representa el valor de Dst igual a -50 nT.

La moderada/alta actividad solar se manifestó en la ocurrencia de 3 tormentas geomagnéticas, las cuales acontecieron los días 01-04, 12-14 y 26-27 de junio. La primera tormenta fue la más intensa y fue clasificada como clase G4 (Figura 5), mientras que la segunda y tercera fueron de clase G2 y G1, respectivamente. La tormenta más fuerte del mes (01-04 de junio) alcanzó valores de índice Dst de -119 nT y fue ocasionada por una eyección de masa coronal emitida el 30 de mayo debido a una fulguración solar de clase M8.1[8]. Mientras que la segunda y tercera alcanzaron valores de índice Dst de -101 nT y -28 nT, respectivamente.

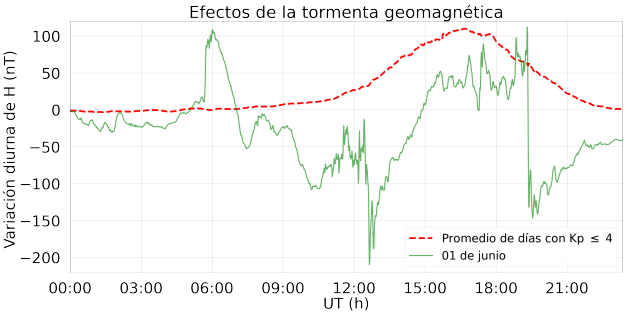

Figura 6. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida el 01 de junio, sobre la variación diurna de H de la estación geomagnética de Jicamarca.

La tormenta de clase G4, ocurrida el 01-04 de junio produjo perturbaciones en 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 6. Como consecuencia, se registraron oscilaciones (curva verde) a comparación del promedio de los días geomagnéticamente tranquilos (curva roja). Antes de las 00:00 horas (05:00 horas UTC) se observan valores negativos lo cuales incrementan súbitamente hasta alcanzar los 100 nT de la variación diurna de H a las 01:00 horas (06:00 horas UTC), y luego descendieron hasta registrar valores negativos pasadas las 02:00 horas (07:00 horas UTC) con un mínimo de -210 nT a las 07:50 horas (12:50 horas). Estos valores negativos se mantuvieron hasta las 10:00 horas (15:00 horas UTC) para luego cambiar a los típicos valores positivos, pero aproximadamente a las 14:30 horas (19:30 horas UTC) se registró un cambio abrupto hasta alcanzar los -150 nT para luego ascender en las horas posteriores.

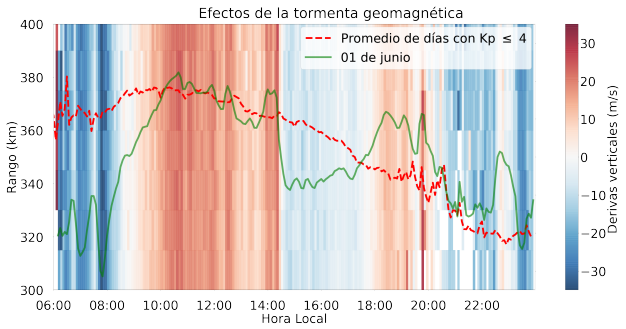

Figura 7. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida el 01 de junio, sobre las derivas verticales ISR

Similares oscilaciones fueron detectadas en las estimaciones de las derivas verticales ISR (Figura 7) medidas con el radar principal del Radio Observatorio de Jicamarca, sede del Instituto Geofísico del Perú (IGP-ROJ). Hasta antes de las 09:00 horas se registraron velocidades negativas (curva verde), con un mínimo de -31 m/s a las 07:50 horas, lo cual difiere con el promedio de las mediciones de días tranquilos (curva roja) cuya tendencia muestra derivas

positivas. Además, a las 14:30 horas se observa un cambio repentino en la dirección de las derivas las cuales se mantuvieron en dirección hacia abajo hasta antes de las 18:00 horas y permanecieron positivas hasta pasadas las 20:00 horas cuando cambiaron a la dirección típica negativa de las horas nocturnas, pero que nuevamente osciló de velocidades positivas y negativas luego de las 23:00 horas.

3. Observaciones de la alta atmósfera con radares

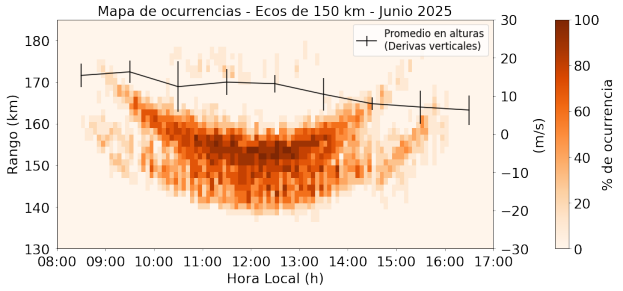

Figura 8. Mapa de ocurrencias de los Ecos de 150 km y el promedio en alturas de sus derivas verticales durante los días geomagnéticamente tranquilos.

Se pudo monitorear el comportamiento de las derivas verticales y la ocurrencia de los Ecos de 150 km durante 9 días geomagnéticamente tranquilos, con el modo JULIA-MP, en la región de transición entre las capas E y F. Podemos apreciar en la Figura 8 que los ecos inician a las 08:30 horas y desaparecen pasadas las 16:00 horas, además éstos están contenidos entre los 140 km y los 175 km de altura, lo que difiere moderadamente con lo predicho por la climatología (realizada con el modo JULIA[7]) debido a que las mediciones superaron en 5 km la mínima y en 10 km la máxima altura de aparición, y los ecos aparecieron media hora antes y desaparecieron media hora después que lo esperado.

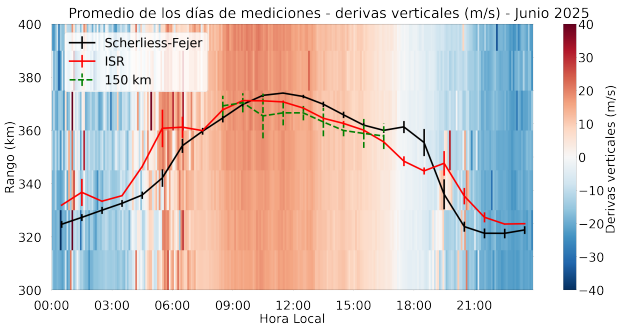

Figura 9. Promedio de las derivas verticales ISR para los días geomagnéticamente tranquilos de junio. La curva roja representa el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km y la curva negra, las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.

En cuanto a las derivas verticales de plasma, se realizaron 16 días (8 días completos y 8 días solo durante la noche) de mediciones entre los 300 km y 400 km durante los días geomagnéticamente tranquilos del mes haciendo uso del radar principal del IGP-ROJ con el modo JULIA-MP. Estas mediciones indican que las derivas verticales promedio empezaron aproximadamente a -14 m/s (hacia abajo) después de la medianoche para aumentar hasta cambiar de dirección (hacia arriba) a las 05:00 horas. Luego incrementaron hasta llegar a un valor cercano a 17 m/s a las 09:00 horas. Posteriormente descendieron hasta alcanzar un valor de -20 m/s antes de la medianoche (Figura 9). Luego, los valores predichos por el modelo de Scherliess-Fejer exhiben una moderada concordancia con las mediciones. Finalmente, las derivas diurnas ISR fueron mayores que las derivas de los Ecos de 150 km y muestran en promedio una diferencia de 1.23 m/s.

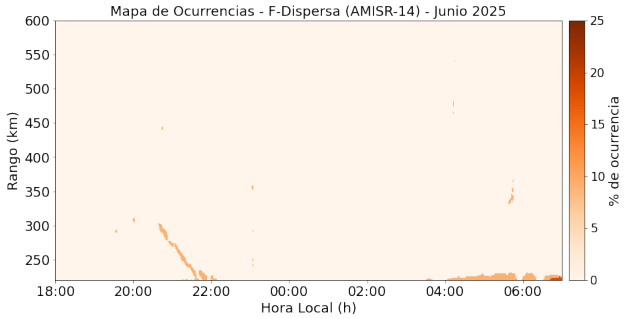

Figura 10. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el radar AMISR-14.

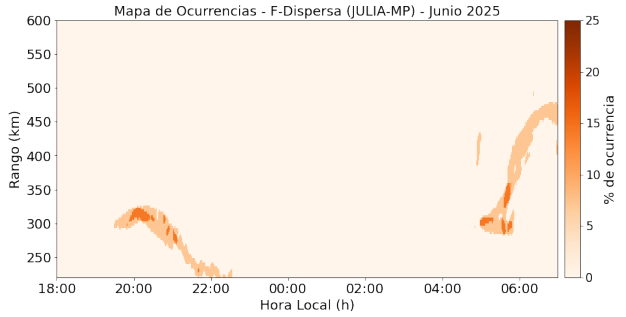

Figura 11. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el radar principal en su modo JULIA-MP.

Asimismo, se realizaron 10 noches de mediciones con el sistema de radar AMISR-14, periodo durante el cual solo se observó la presencia de 2 irregularidades en la Capa F, entre los 200 km y 400 km de altura, las cuales fueron del tipo Bottom-type y Post-midnight, como se aprecia en la Figura 10. Además, el sistema del radar principal en su modo JULIA-MP funcionó durante 14 noches, durante las cuales se detectaron 7 irregularidades entre los 200 km y los 500 km, siendo la más frecuente la morfología del tipo Post-midnight,

con 57 %, seguida por la del tipo Bottom-type con 43 %, como se aprecia en la Figura 11. La diferencia del número diferente de irregularidades detectadas por ambos sistemas se debe a que no funcionaron necesariamente las mismas noches o que en algunas ocasiones solo el radar principal en su modo JULIA-MP logró detectar irregularidades probablemente por su frecuencia de operación (50 MHz) diferente a la del radar AMISR-14 (445 MHz), además de que ambos radares no apuntan a la misma región de la ionosfera. Las observaciones de ambos sistemas concuerdan con lo señalado por la climatología (realizada con el modo JULIA)[5].

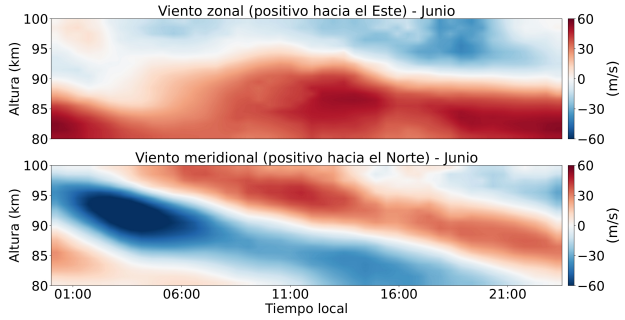

Figura 12. Promedio de los vientos zonales y meridionales durante el mes de junio del 2025.

El promedio en tiempo y altura de los vientos zonales y meridionales para el mes de junio, como se aprecia en la Figura 12, 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 +45.5 m/s a las 13:30 horas y el promedio mínimo de -5.2 m/s a las 01:30 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de +34.0 m/s a las 19:00 horas y el promedio mínimo de -62.9 m/s a las 04:00 horas. El viento zonal máximo fue de +147.5 m/s a las 13:45 horas del día 14 de junio y el mínimo -68.6 m/s a las 01:45 horas del día 20 de junio, mientras que el viento meridional máximo fue +91.8 m/s a las 21:15 horas del día 08 de junio y el mínimo -110.1 m/s a las 04:15 horas del día 19 de junio.

4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

Los valores de la amplitud de las cintilaciones GPS (índice S4) de las estaciones de Jaén, San Bartolomé, Jicamarca y Ayacucho se muestran en la Figura 13. Durante el periodo de estudio se observaron valores bajos y moderados entre las 19:00 y 22:30 horas, similar a lo observado durante el mes de mayo. Los valores moderados ocurrieron los días 01-02 en la estación de Jaén, y los días 12-13 y 27 de junio en todas las estaciones, lo cual coincide con los días cuando ocurrieron tormentas geomagnéticas. La mayor actividad del mes ($\Delta S4_{mx}$=0.42) se produjo en la estación de Jicamarca el día 13 a las 20:20 horas aproximadamente.

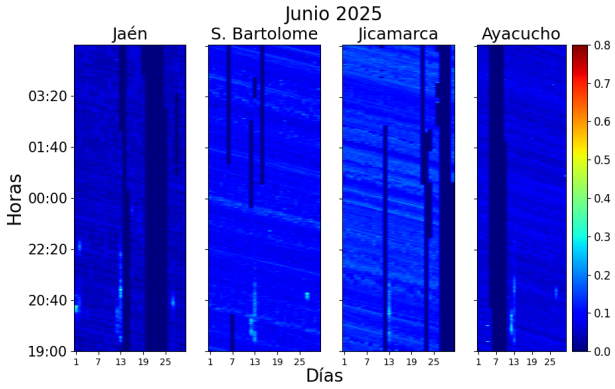

Figura 13. Valores diarios máximos de S4 para las estaciones de Jaén, San Bartolomé, Jicamarca y Ayacucho durante el mes de junio.

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 14. Aquí se aprecia que el promedio de las estaciones de Jicamarca y Huancayo estuvieron 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 junio de H por cada estación: Piura, 58 nT; Tarapoto, 56 nT; Huancayo, 99 nT y Jicamarca, 108 nT. Estas mediciones muestran que el valor máximo de todas las estaciones disminuyeron respecto al mes anterior, lo cual muestra el mismo comportamiento climatológico que lo observado durante el año 2024[9].

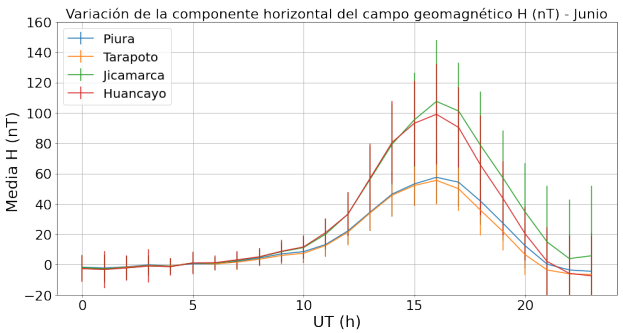

Figura 14. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante los días geomagnéticamente tranquilos de junio.

5. Conclusiones

- El movimiento de plasma permaneció con dirección hacia abajo hasta las 09:00 horas durante el primero de junio, a diferencia de los días geomagnéticamente tranquilos donde el movimiento cambia a dirección positiva (hacia arriba) a las 06:00 horas.
- El primero de junio se registraron inusuales valores negativos en las derivas verticales de los Ecos de 150 km debido a la tormenta geomagnética de clase G4.
- El índice S4 muestra moderada actividad antes de la medianoche durante los días de tormentas geomagnéticas en todas las estaciones, excepto para la tormenta del 01-04 de junio donde solo la estación de Jaén muestra la actividad moderada. Además, la actividad baja-moderada se correlaciona con lo observado por los sistemas AMISR-14, JULIA-MP y con lo esperado por la climatología.

6. Referencias

[1] J. L. Chau and R. F. Woodman, "Daytime vertical and zonal velocities from 150-km echoes: Their relevance to F-region dynamics," Geophysical Research Letters, vol. 31, no. 17, 2004.

[2] R. Singh, D. E. Scipión, K. Kuyeng, P. Condor, C. De La Jara, J. P. Velasquez, ..., and M. Migliozzi, "Ionospheric disturbances observed over the Peruvian sector during the Mother's Day Storm (G5-level) on 10–12 May 2024," Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 129(11), 2024.

[3] P. Reyes, "Solar flare effects observed over Jicamarca during MST-ISR experiments," Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2012.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] J. Chau and E. Kudeki, "Statistics of 150-km echoes over jicamarca based on low-power vhf observations," in Annales Geophysicae, vol. 24, no. 5. Copernicus GmbH, 2006, pp. 1305–1310.

[8] "Geomagnetic storm hits earth following intense solar activity," 2025. [Online]. Available: 1https://www.sansa.org.za/2025/06/geomagnetic-storm-hits-earth-following-intense-solar-activity/

[9] "Instituto Geofísico del Perú, Realtime at Jicamarca," Dec. 2025. [Online]. Available: 1https://www.igp.gob.pe/observatorios/radio-observatorio-jicamarca/realtime/static/reports/2025/202412.pdf

Elaborado por:
Bach. Roberto Flores Arroyo

Diseño y diagramación:
Bach. Anette De la Cruz Meza

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

Contacto:
roj@igp.gob.pe