



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 / 2025-09



LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

SEPTIEMBRE 2025



Durante el mes de septiembre de 2025 fuimos testigos de 5 tormentas geomagnéticas, 3 de clase G1, una de clase G2 y otra de clase G3. La tormenta de mayor intensidad (G3) comenzó el día 29 de septiembre y se desarrolló por varios días. Esta tuvo un impacto en las velocidades verticales de plasma, lo cual pudo generar inestabilidades en la ionósfera y como consecuencia producir una F-Dispersa del tipo Post-midnight la cual alcanzó alturas de hasta 1000 km y tuvo una duración de 3 horas, como se aprecia en la [Figura 1](#).

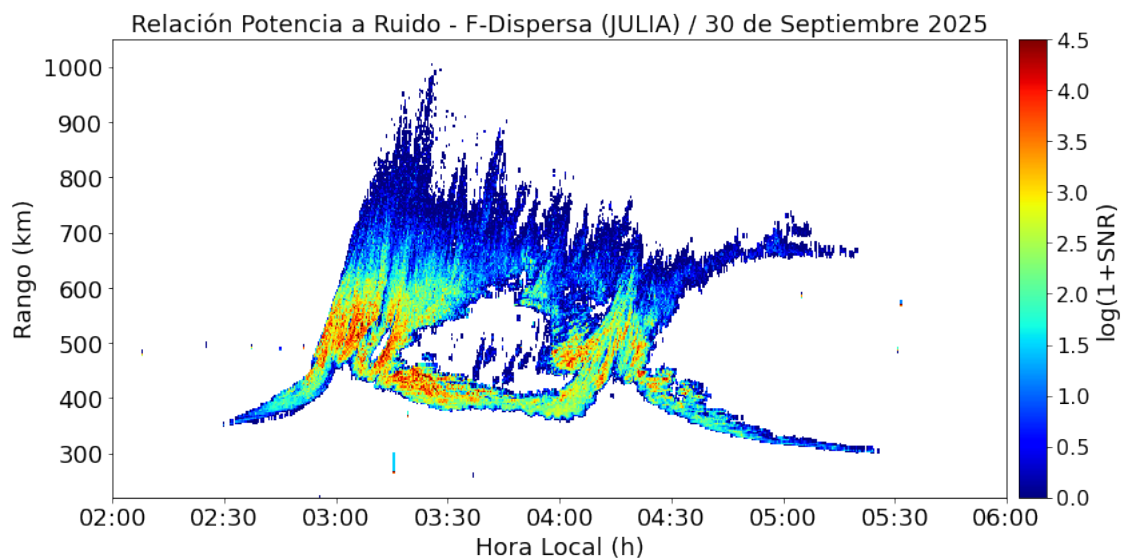


Figura 1. Irregularidad del tipo Post-midnight observada luego de la ocurrencia de la tormenta geomagnética de clase G3 ocurrida el 30 de septiembre a las 00:25 horas.

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

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: 164	TPP: 84	Mín.	Máx.
Mín: 56.6 S	Mín: 44.9 O	HYO: 160	PIU: 86	-37	23
Máx: 60.9 N	Máx: 15.7 E				
ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: TRANQUILA A: 8 % M: 11 % T: 81 %				ACTIVIDAD SOLAR: ALTA A: 60 % M: 40 % B: 0 %	

Tormentas geomagnéticas

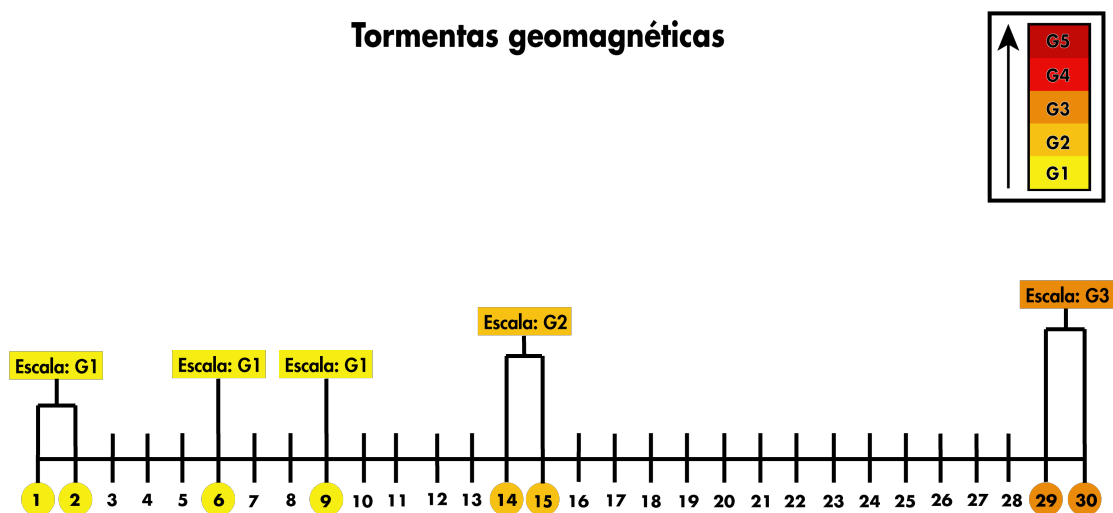


Figura 2. Intensidad de las tormentas geomagnéticas del mes de septiembre.

¿SABÍAS QUÉ?

Ha sido posible medir la inclinación del campo magnético terrestre en las alturas de la capa F de la ionósfera usando la técnica de dispersión incoherente en el Radio Observatorio de Jicamarca. Para ello se usaron técnicas de interferometría con apuntes de Norte a Sur perpendiculares al campo magnético. Ello permitió obtener la inclinación del campo magnético con una precisión de 1 minuto de arco ($1/60$ de un grado), lo cual fue similar a la precisión obtenida por la NASA quienes usaron mediciones satelitales.

Y aunque sus mediciones fueron realizadas "in-situ", el Radio Observatorio de Jicamarca demostró que las mediciones de la NASA tenían un error de 1 grado (un orden de magnitud más grande), este hecho fue admitido por la NASA unos años después quienes aceptaron las mediciones del IGP-ROJ.

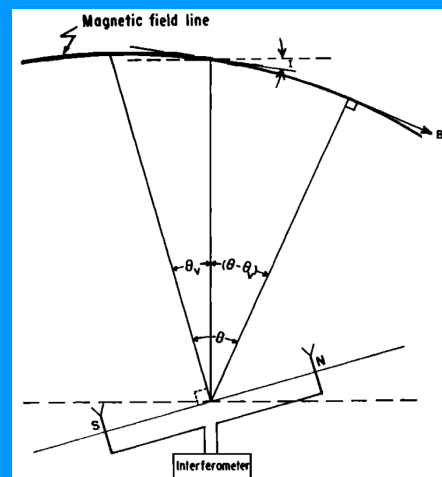


Figura 3. Apuntes para determinar la inclinación del campo magnético terrestre. Imagen extraída de Woodman, 1971[1].

1. Climatología del mes

La actividad geomagnética (índice Kp[2]) fue predominantemente tranquila en un 81 % del tiempo, moderada en un 11 % y alta en un 8 %; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7[3]) 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)[4], lo que se refleja en nuestras mediciones.

Para los meses cercanos al equinoccio de septiembre (agosto, septiembre, octubre), en un régimen de activi-

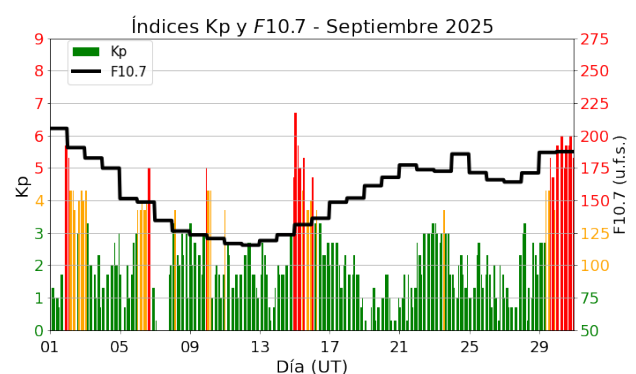


Figura 4. Valores de los índices Kp y F10.7 cm (u.f.s. = $10^{-22} \text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$) para el mes de septiembre. Extraídos de OMNIWeb.

-dad solar moderada o alta, se espera que la ocurrencia de F-Dispersa sea moderada para las horas anteriores a la medianoche, entre el 30 % y 50 % de ocurrencia[5]. Las mediciones muestran una buena concordancia con la climatología.

Asimismo, la climatología de septiembre para un régimen de actividad solar alta (dada por el modelo de Scherliess-Fejer) indica que el promedio en altura (300-400 km) de las derivas verticales de plasma tiene un valor cercano a los -22 m/s pasada la medianoche, cuya magnitud incrementa hasta llegar a un valor de cerca de 22 m/s a las 10:00 horas. Posteriormente, estos valores disminuyen hasta 9 m/s a las 16:00 horas, cuando vuelven a incrementar temporalmente debido al fenómeno de pre-reversal enhancement[6], hasta 26 m/s a las 18:00 horas, para finalmente decrecer hasta los -25 m/s antes de la medianoche. Los valores indicados por la climatología muestran buena concordancia con las mediciones a excepción de las horas previas al amanecer.

Estudios climatológicos[7] indican que cerca a los meses del equinoccio de septiembre los Ecos de 150 km aparecen alrededor de las 09:00 horas, desaparecen pasadas las 15:30 horas y están contenidos entre los 138 km y los 160 km de altura. En este periodo, encontramos que la máxima altura de aparición fue mayor en 20 km, mientras que la mínima altura de aparición fue igual a lo esperado. Además, la hora de aparición de estas irregularidades ocurre una hora antes, mientras que la hora de desaparición ocurre media hora después de lo esperado.

2. Tormentas geomagnéticas

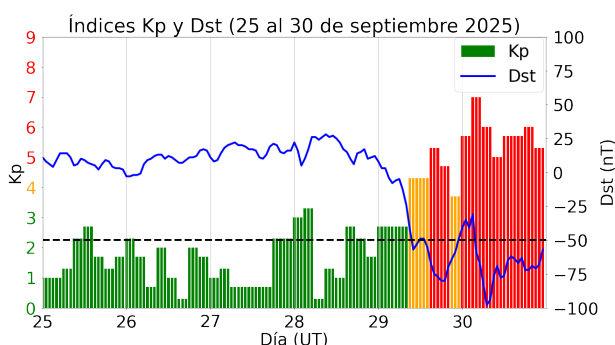


Figura 5. Índices geomagnéticos Kp y Dst del 25 al 30 de septiembre. La línea horizontal negra representa el valor de Dst igual a -50 nT.

La alta actividad solar se manifestó en la ocurrencia de 5 tormentas geomagnéticas, las cuales acontecieron los días 01-02, 06, 09, 14-15 y 29-30 de septiembre. Las tres primeras fueron clasificadas como clase G1, la cuarta como G2 y la última como clase G3. La

tormenta más intensa del mes se produjo por el arribo de varias eyecciones de masa coronal (CME)[8], lo cual ocasionó que el índice Dst disminuya hasta un valor de -98 nT (Figura 5).

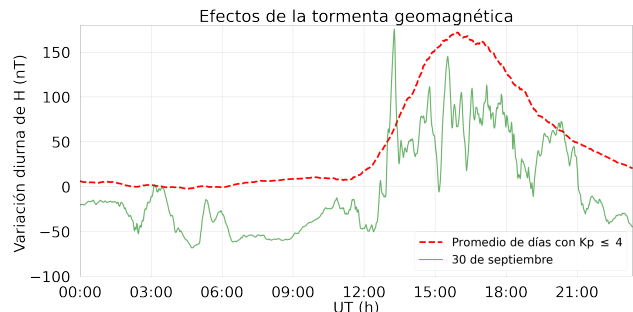


Figura 6. Efectos de la tormenta geomagnética G3, ocurrida el 30 de septiembre, sobre la variación diurna de H de la estación geomagnética de Jicamarca.

Esta tormenta alcanzó la clasificación G3 a las 00:25 horas y produjo perturbaciones en las mediciones de la variación diurna de la componente horizontal del campo magnético terrestre (H) en la estación de Jicamarca (Figura 6). Como consecuencia, se registraron valores atípicos (curva verde) a comparación del promedio de los días geomagnéticamente tranquilos (curva roja). A las 19:00 horas del día anterior (00:00 horas UTC) se observa un valor alrededor de los -20 nT lo cual indica que el campo magnético terrestre ya estaba perturbado pero sin llegar a ser clasificado como tormenta. Además, se observan oscilaciones durante todo el día, en donde resalta un máximo de 176 nT a las 08:17 horas (13:17 horas UTC) y un mínimo diurno de -6 nT a las 10:10 horas (15:10 horas UTC).

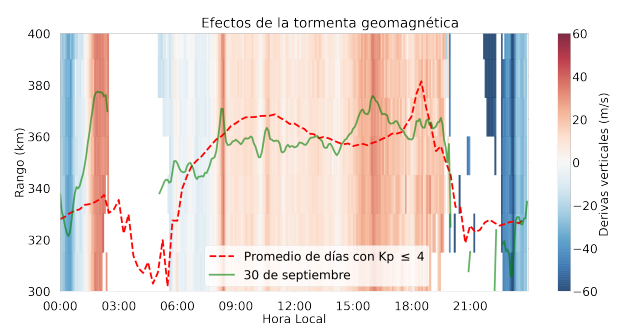


Figura 7. Efectos de la tormenta geomagnética de clase G3, ocurrida el 30 de septiembre, sobre las derivas verticales ISR.

Similares perturbaciones 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). Antes del amanecer se observaron periodos con un movimiento atípicamente ascendente del plasma (velocidades positivas). Luego del amanecer se aprecia que el movimiento descendente (velocidades negativas) perdura hasta las 08:00 horas

aproximadamente y que a las 08:15 horas ocurre un incremento súbito hasta los 25 m/s. Finalmente, durante este día no se observó una clara ocurrencia del pre-reversal enhancement a la hora esperada, como se esperaba según la climatología y del promedio de los días tranquilos del mes (curva roja).

3. Observaciones de la alta atmósfera con radares

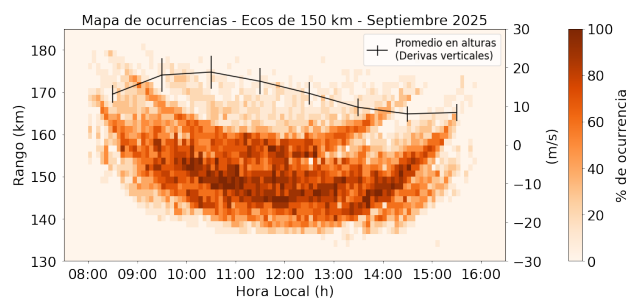


Figura 8. Mapa de ocurrencias de los Ecos de 150 km y el promedio en alturas de sus derivas verticales durante los días geomagnéticamente tranquilos.

Se logró monitorear el comportamiento de las derivas verticales y la ocurrencia de los Ecos de 150 km durante 10 días geomagnéticamente tranquilos, utilizando el modo JULIA-MP, en la región de transición entre las capas E y F. En la Figura 8 se observa que los ecos inician alrededor de las 08:00 horas y desaparecen antes de las 16:00 horas, contenidos entre los 138 km y los 180 km de altura. Este comportamiento presenta una discrepancia moderada respecto a lo predicho por la climatología (realizada con el modo JULIA[7]) ya que las mediciones exceden en 20 km la altura máxima esperada, además de comenzar una hora antes y persistir alrededor de media hora más de lo esperado.

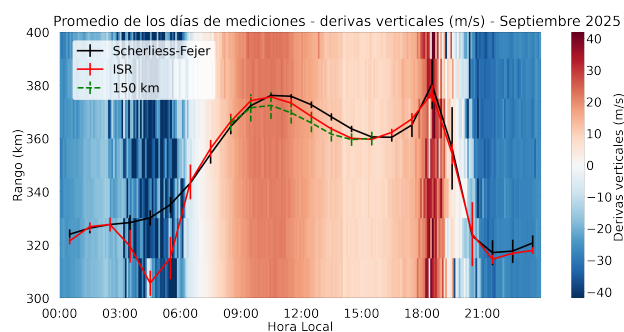


Figura 9. Promedio de las derivas verticales ISR para los días geomagnéticamente tranquilos de septiembre. La curva roja representa el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km y la curva negra, las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.

En relación con las derivas verticales de plasma, se realizaron mediciones durante 21 días geomagnéticamente tranquilos (10 días completos y 11 días solo durante la noche) entre los 300 km y 400 km haciendo uso del radar principal del IGP-ROJ con el modo JULIA-MP. Las mediciones muestran que el promedio de las derivas verticales iniciaron alrededor de -24 m/s (movimiento descendente) después de la medianoche, incrementando progresivamente hasta invertir su dirección (movimiento ascendente) alrededor de las 07:00 horas. Posteriormente, alcanzaron un valor cercano a 21 m/s hacia las 10:00 horas, para luego disminuir hasta el incremento súbito observado a las 18:00 horas, asociado al fenómeno conocido como pre-reversal enhancement[6], con magnitudes próximas a 23 m/s (Figura 9). Los valores estimados por el modelo de Scherliess-Fejer muestran una buena concordancia con las mediciones, excepto para las horas antes del amanecer donde la predicción no muestra el decremento pasadas las 02:00 horas que se observa en las mediciones. Finalmente, se observó que las derivas diurnas obtenidas mediante ISR fueron mayores que las asociadas a los Ecos de 150 km, con una diferencia promedio de 1.62 m/s.

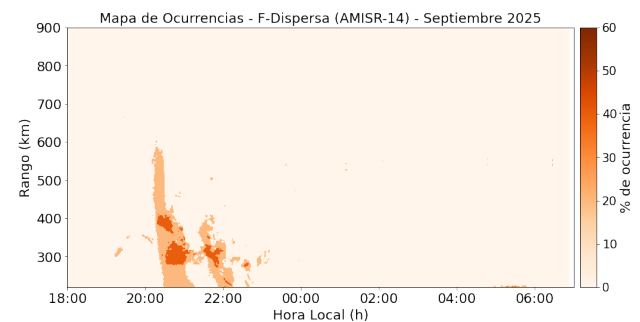


Figura 10. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el radar AMISR-14.

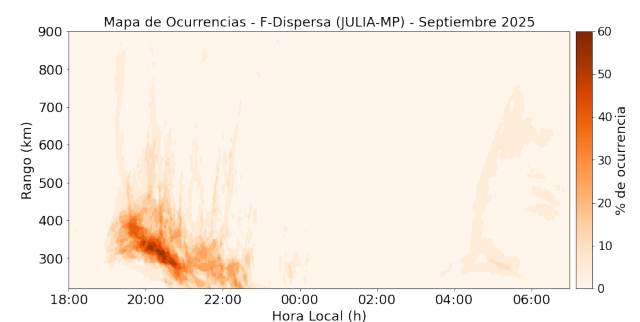


Figura 11. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el radar principal en su modo JULIA-MP.

Asimismo, se realizaron 5 noches de mediciones con el sistema de radar AMISR-14[9], periodo durante el cual solo se observó la presencia de 4 irregularidades en la Capa F, entre los 200 km y 600 km de altura, donde la única morfología observada fue la

de tipo Pluma de radar, como se aprecia en la Figura 10. Además, el sistema del radar principal en su modo JULIA-MP funcionó durante 20 noches, durante las cuales se detectaron 20 irregularidades entre los 200 km y los 850 km, siendo las más frecuentes las morfologías del tipo Bottomside y Pluma de radar, con 38 % cada una, seguidas por las del tipo Bottom-type con 14 % y Post-midnight con 10 %, 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].

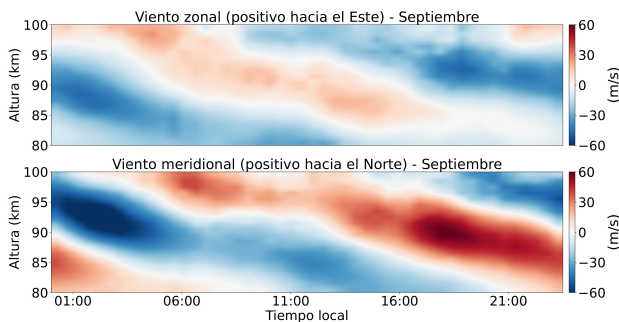


Figura 12. Promedio de los vientos zonales y meridionales durante el mes de septiembre del 2025.

El promedio en tiempo y altura de los vientos zonales y meridionales para el mes de septiembre, 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 +15.7 m/s a las 12:30 horas y el promedio mínimo de -44.9 m/s a las 01:00 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de +60.9 m/s a las 18:30 horas y el promedio mínimo de -56.6 m/s a las 03:00 horas. El viento zonal máximo fue de +94.1 m/s a las 10:15 horas del día 03 de septiembre y el mínimo -109.6 m/s a las 09:15 horas del día 18 de septiembre, mientras que el viento meridional máximo fue +124.8 m/s a las 18:15 horas del día 07 de septiembre y el mínimo -115.4 m/s a las 02:45 horas del día 06 de septiembre.

4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

Los valores de la amplitud de las cintilaciones GPS (índice S4) de las estaciones de Iquitos, Piura, Pucallpa, Jicamarca, Huancayo, Ayacucho y Tacna se muestran

en la Figura 13. Durante el periodo de estudio se observaron valores bajos, moderados y altos entre las 19:00 y 22:00 horas. La cantidad de días con estos valores fue mayor que los meses anteriores (junio, julio y agosto) lo cual sigue la tendencia observada el año pasado[10]. La mayor actividad del mes ($\Delta S4_{m.x}=1.1$) se produjo en la estación de Ayacucho el día 15 a las 20:40 horas aproximadamente.

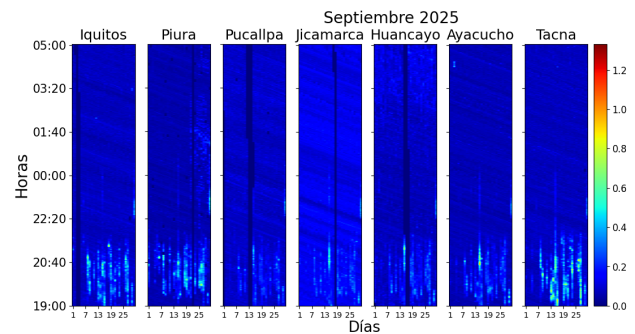


Figura 13. Valores diarios máximos de S4 para las estaciones de Iquitos, Piura, Pucallpa, Jicamarca, Huancayo, Ayacucho y Tacna durante el mes de septiembre.

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 septiembre de H por cada estación: Piura, 86 nT; Tarapoto, 84 nT; Huancayo, 160 nT y Jicamarca, 164 nT. Estas mediciones muestran que el valor máximo de todas las estaciones están aumentando cada mes, lo cual muestra el mismo comportamiento climatológico que lo observado durante el año 2024[10].

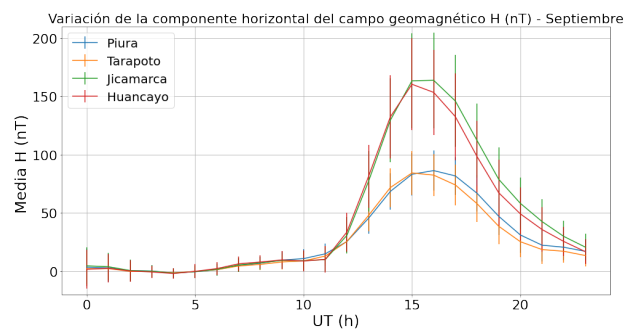


Figura 14. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante los días geomagnéticamente tranquilos de septiembre.

5. Conclusiones

- La madrugada del 30 de septiembre se observó una irregularidad del tipo Post-midnight que alcanzó los 1000 km de altura y que posiblemente fue ocasionada por la tormenta geomagnética de clase G3 que inició el día anterior.
- La ocurrencia de F-Dispersa detectada por el radar principal aumentó hasta un 50% antes de la medianoche, lo cual concuerda con la climatología.
- El índice S4 muestra alta actividad antes de la medianoche durante una mayor cantidad de días en comparación al trimestre anterior, lo cual se asemeja a lo observado durante el año pasado. Además, la actividad alta se correlaciona con lo observado por los sistemas AMISR-14 y JULIA-MP.

6. Referencias

- [1] R. F. Woodman, "Inclination of the geomagnetic field measured by an incoherent scatter technique." *Journal of Geophysical Research*, vol. 76(1), pp. 178–184, 1971.
- [2] "The Kp-index | Help," Oct 2020, Accessed on: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.spaceweatherlive.com/en/help/the-kp-index.html>
- [3] "F10.7 cm Radio Emissions | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center," Jul 2020, Accessed on: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radio-emissions>
- [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] "G3 (STRONG) GEOMAGNETIC STORM CONDITIONS OBSERVED." 2025, [October 01]. [Online]. Available: <https://www.swpc.noaa.gov/news/g3-strong-geomagnetic-storm-conditions-observed-0>
- [9] "Instituto Geofísico del Perú, "Realtime at Jicamarca," Aug. 2022, [Online; accessed 14. jan. 2024]. [Online]. Available: https://www.igp.gob.pe/observatorios/radio-observatorio-jicamarca/realtime/static/reports/2022/Boletin_Agosto.pdf
- [10] "Instituto Geofísico del Perú, Realtime at Jicamarca," Dec. 2025. [Online]. Available: <https://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

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"**