



LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

MARZO 2025



Durante el mes de marzo de 2025 fuimos testigos de 4 tormentas geomagnéticas, la primera y la última de intensidad G2, y las otras 2 de intensidad G1. Además, una fulguración solar de clase X1.14 ocurrió el día 28 de marzo, la cual perturbó la baja ionósfera (Figura 1) en donde se registró un comportamiento atípico en la forma de "collar" de los ecos de 150 km, así mismo la extensión en alturas del Electrochorro ecuatorial se redujo al igual que su potencia.

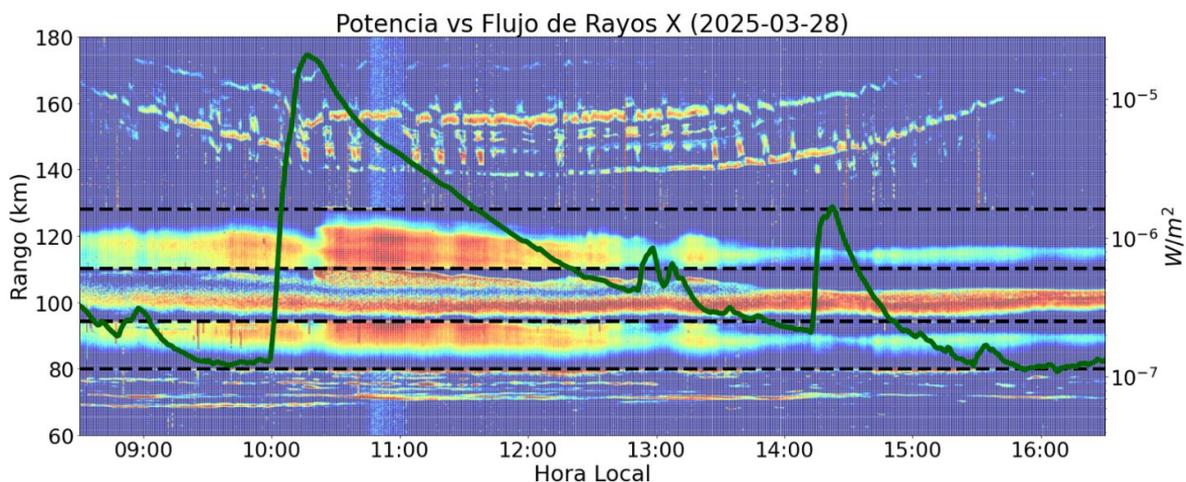


Figura 1. Efectos de la fulguración solar X1.14, ocurrida el 28 de marzo, sobre las mediciones de los ecos de 150 km, los ecos del Electrochorro Ecuatorial (EEJ) y los ecos mesosféricos. La intensidad de la potencia en 2 regiones del EEJ, limitadas por las líneas negras, fue disminuída para fines ilustrativos.

Tabla 1. Resumen de las mediciones de parámetros ionosféricos y condiciones predominantes del clima espacial del mes de marzo 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: 194	TPP: 101	Mín.	Máx.
Mín: 54.7 S	Mín: 39.1 O	HYO: 192	PIU: 104	-30	28
Máx: 25.5 N	Máx: 3.7 O				

ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: TRANQUILA A: 11 % M: 15 % T: 74 %	ACTIVIDAD SOLAR: ALTA A: 77 % M: 23 % B: 0 %
---	--

Tormentas geomagnéticas

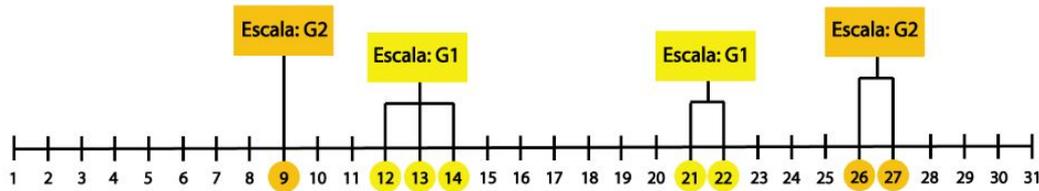
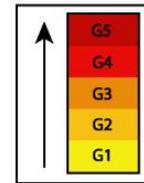


Figura 2. Intensidad de las tormentas geomagnéticas del mes de marzo.

¿SABÍAS QUÉ?

La locación en la cual se encuentra el Radio Observatorio de Jicamarca fue escogida debido a que está rodeado de montañas las cuales aíslan al radar de interferencias que pudieran provenir de la ciudad y viceversa. Además, al estar situado a solo 25 km del centro de la ciudad de Lima, el soporte logístico, las viviendas, y las universidades estaban relativamente cerca, así como el aeropuerto internacional y el puerto del Callao. La Figura 3 muestra una vista del área escogida para la construcción de Radio Observatorio de Jicamarca (marzo de 1960), la cual era una zona de lodo seco relativamente plano, además dentro del lodo seco habían grandes rocas lo cual evidenciaba que la zona estaba expuesta a inundaciones repentinas de lodo. Estas inundaciones de lodo conocidas como “huaicos” habían sido reportadas por locadores, quienes mencionaban que ocurrían de manera infrecuente y que ahora se conoce que está relacionado al fenómeno del El Niño. Como precaución, durante la etapa de remoción de

tierras pesadas se construyó una presa de desviación para proteger al personal y los equipos de los huaicos [1].



Figura 3. Vista aérea del área elegida para la construcción del Radio Observatorio de Jicamarca, marzo de 1960. Imagen extraída de Woodman et al., 2019[1].

1. Climatología del mes

La actividad geomagnética (índice Kp[9]) fue predominantemente tranquila en un 74 % del tiempo, moderada en un 15 % y alta en un 11 %; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7[2]) fue alta un 77 % del tiempo y 23 % 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)[3], lo que se refleja en nuestras mediciones.

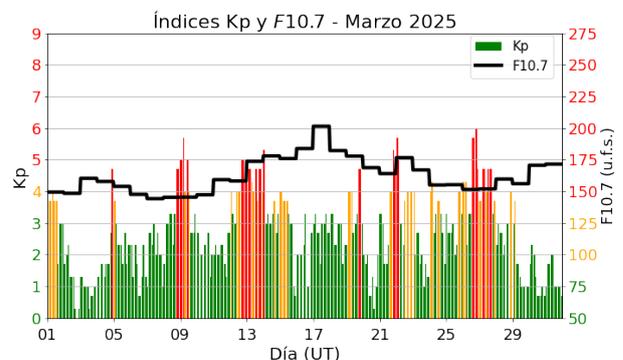


Figura 4. Valores de los índices Kp y F10.7 cm (u.f.s. = $10^{-22} W m^{-2} H z^{-1}$) para el mes de marzo. Extraídos de OMNIWeb.

Para los meses cercanos al solsticio de marzo (febrero, marzo, abril), 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[4]. Las mediciones muestran una buena concordancia con la climatología.

Asimismo, la climatología de marzo 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 21 m/s a las 10:00 horas. Posteriormente, estos valores disminuyen hasta 8 m/s a las 15:00 horas, cuando vuelven a incrementar temporalmente debido al fenómeno de pre-reversal enhancement[5], hasta 27 m/s a las 18:00 horas, para finalmente decrecer hasta los -24 m/s antes de la medianoche. Los valores indicados por la climatología muestran buena concordancia con las mediciones.

Estudios climatológicos[6] indican que cerca a los meses del equinoccio de marzo los Ecos de 150 km aparecen alrededor de las 09:00 horas, desaparecen pasadas las 15:30 horas y están contenidos entre los 140 km y los 165 km de altura. En este periodo, encontramos que la máxima altura de aparición fue mayor en 5 km que lo esperado mientras que la mínima altura de aparición coincide con la climatología. Además, estas irregularidades aparecen y desaparecen de acuerdo a lo esperado.

2. Fulguraciones Solares y Tormentas geomagnéticas

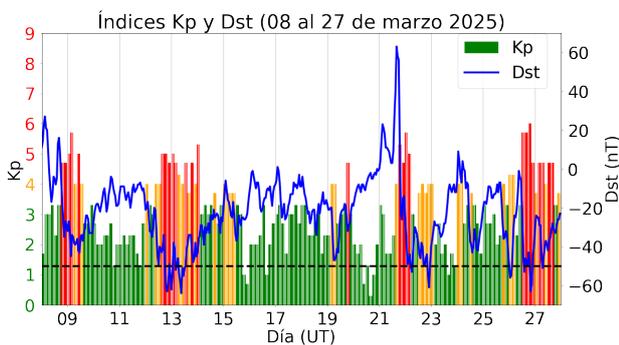


Figura 5. Índices geomagnéticos Kp y Dst del 08 al 27 de marzo. La línea horizontal negra representa el valor de Dst igual a -50 nT.

La alta actividad solar se manifestó en la ocurrencia de 4 tormentas geomagnéticas (Figura 5), las cuales acontecieron los días 9, 12-14, 21-22 y 26-27 de marzo. La primera y la última tormenta alcanzaron el nivel de clase G2, mientras que las demás fueron

de clase G1. El índice Dst de la primera tormenta no sobrepasó los -50 nT, pero se considera tormenta geomagnética por su valor de Kp asociado ($k_p = 6$)[7]. La segunda y tercera tormenta alcanzaron los -64 nT y -61 nT, respectivamente. Además, la última tormenta, de clase G2, fue ocasionada por una región de interacción corrotante debido a un agujero coronal en el hemisferio sur del Sol[8]. Por otro lado, se registró una llamarada solar de clase X1.14 el día 28 de marzo que inició a las 10:03 horas y finalizó a las 10:42 horas, y cuyo pico ocurrió a las 10:21 horas.

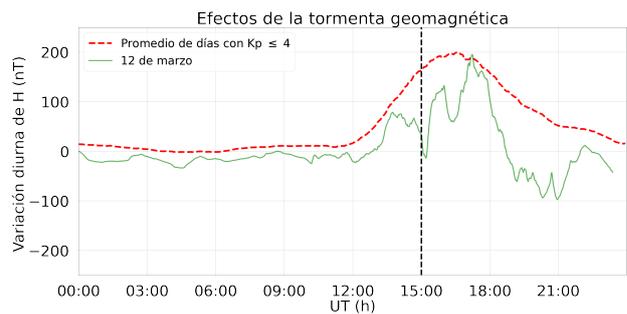


Figura 6. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida el 12 de marzo, sobre la variación diurna de H de la estación geomagnética de Jicamarca. La línea vertical negra indica el comienzo de la tormenta.

Aunque se registraron dos tormentas de clase G2, la tormenta de clase G1 ocurrida el día 12 fue la que tuvo un mayor impacto en nuestras mediciones posiblemente porque el índice Dst asociado a esta tormenta fue menor (que -50 nT) durante un periodo de tiempo mayor a comparación de las otras dos tormentas. Esta tormenta del 12 de marzo 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). Pasadas las 10:00 horas (15:00 horas UTC) se observa un decremento en las mediciones hasta alcanzar valores negativos, y luego empieza a oscilar hasta el final del día.

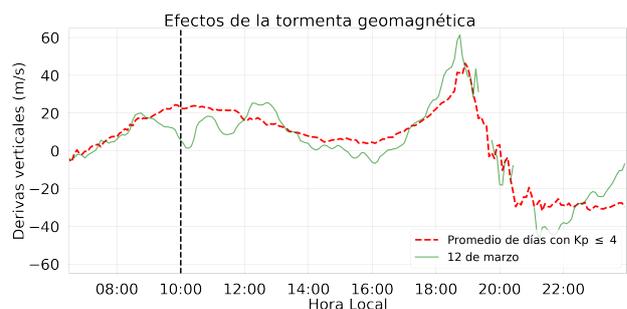


Figura 7. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida el 12 de marzo, sobre el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km de las derivas verticales ISR. La línea vertical negra indica el comienzo de la tormenta.

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). Pasadas las 10:00 horas se registró un valor inusual cercano a cero (curva verde) y que luego comenzó a oscilar, lo cual difiere con el promedio de las mediciones de días tranquilos (curva roja). Además, se puede observar que la perturbación en las mediciones comenzó antes de que la tormenta inicie (línea vertical negra), esto se debe a que el campo magnético ya había sido perturbado pero todavía no alcanzaba la clasificación de tormenta.

Por otro lado, la fulguración solar de clase X1.14 ocurrida el 28 de marzo tuvo un impacto en las mediciones de ecos coherentes de la baja ionósfera, como se aprecia en la Figura 1. Aquí se puede observar que la característica típica de "collar" de los ecos de 150 km (130 - 180 km) fue perturbada a las 10:00 horas cuando la fulguración comenzó. Además, la amplitud en altura del Electrochorro Ecuatorial (90 - 125 km) disminuyó, así como su intensidad. Finalmente, los ecos mesosféricos (60 - 80 km) no sufrieron alguna perturbación relevante probablemente porque la fulguración de clase X no fue tan intensa como la ocurrida el 7 de septiembre de 2005 cuando ocurrió una fulguración solar de clase X17.1[9].

3. Observaciones de la alta atmósfera con radares

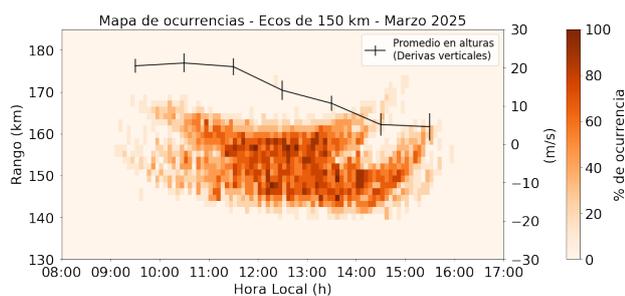


Figura 8. Mapa de ocurrencias de los Ecos de 150 km y el promedio en alturas de sus derivas verticales durante los días geomagnéticamente tranquilos.

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 09:00 horas y desaparecen pasadas las 15:30 horas, además éstos están contenidos entre los 140 km y los 170 km de altura, lo que concuerda moderadamente con lo predicho por la climatología, excepto por la máxima altura de aparición la cual ocurrió 5 km por encima de lo esperado.

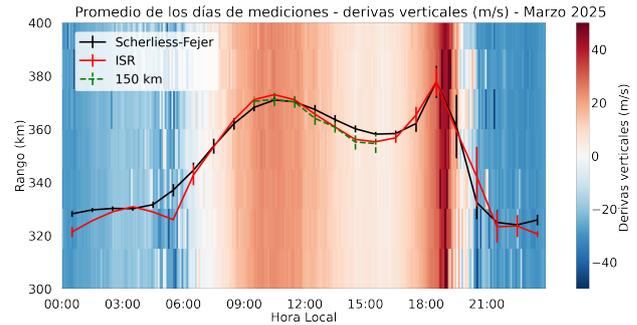


Figura 9. Promedio de las derivas verticales ISR para los días geomagnéticamente tranquilos de marzo. La curva roja representa el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km y la curva negra, las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.

En cuanto a las derivas verticales de plasma, se realizaron 15 días (8 días completos y 7 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 -29 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 23 m/s a las 10:00 horas. Posteriormente descendieron hasta que aconteció el incremento súbito a las 18:00 horas conocido como pre-reversal enhancement[5], alcanzando valores cercanos a los 28 m/s (Figura 9). Finalmente, los valores predichos por el modelo de Scherliess-Fejer exhiben gran concordancia con las mediciones.

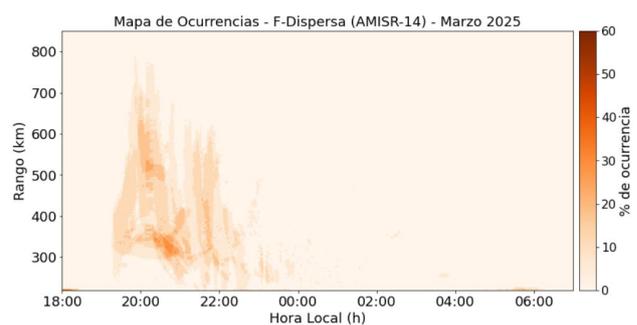


Figura 10. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el radar AMISR-14.

Asimismo, se realizaron 18 noches de mediciones con el sistema de radar AMISR-14[16], periodo durante el cual se observó la presencia de 11 irregularidades en la Capa F, entre los 200 km y 800 km de altura. La morfología dominante fue la de tipo Pluma de radar, con 55 % de ocurrencia, seguida por la del tipo Bottomside, con un 27 % y la de menor ocurrencia fue la de tipo Bottom-type con 18 %, como se aprecia en la Figura 10.

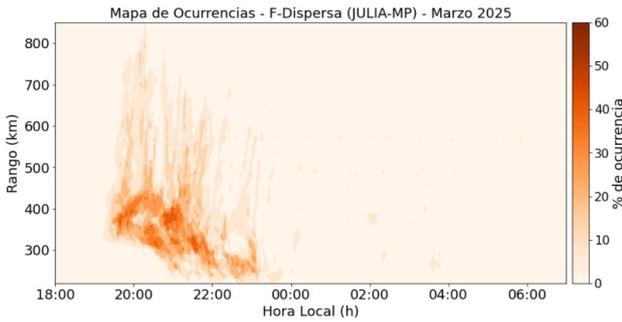


Figura 11. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el radar principal en su modo JULIA-MP.

Además, el sistema del radar principal en su modo JULIA-MP funcionó durante 15 noches, durante las cuales se detectaron 12 irregularidades entre los 200 km y los 800 km, siendo la más frecuente la morfología del tipo Pluma de radar, con 58 %, seguida por la del tipo Bottom-type, con un 25 % y Bottomside, con 17 %, 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)[10].

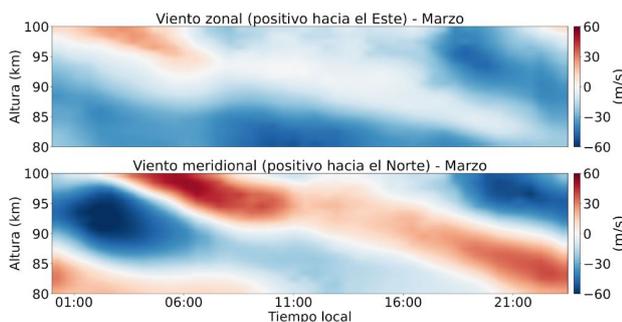


Figura 12. Promedio de los vientos zonales y meridionales durante el mes de marzo del 2025.

El promedio en tiempo y altura de los vientos zonales y meridionales para el mes de marzo, como se aprecia en la Figura 12, muestra periodos predominantes de 12 horas y 24 horas (marea solar semidiurna y diurna respectivamente). En la mesopausa (~90 km) se observa que el valor del viento zonal promedio máximo fue de -3.7 m/s a las 13:00 horas y el promedio mínimo de -39.1 m/s a las 22:30 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de +25.5 m/s a las 18:30 horas y el promedio mínimo de -54.7 m/s a las 02:30 horas. El viento zonal máximo fue de +57.9 m/s a las 19:15 horas del día 11 de

marzo y el mínimo -118.2 m/s a las 20:45 horas del día 20 de marzo, mientras que el viento meridional máximo fue +116.4 m/s a las 16:45 horas del día 25 de marzo y el mínimo -141.2 m/s a las 02:45 horas del día 28 de marzo.

4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

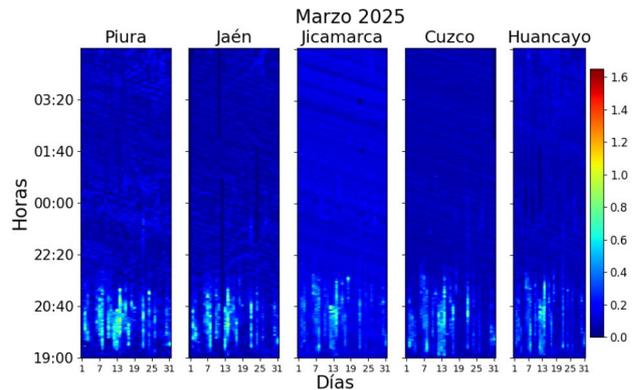


Figura 13. Valores diarios máximos de S4 para las estaciones de Piura, Jaén, Jicamarca, Cuzco y Huancayo durante el mes de marzo. Se observa una actividad moderada y alta.

Los valores de la amplitud de las cintilaciones GPS (índice S4) de las estaciones de Piura, Jaén, Jicamarca, Cuzco y Huancayo 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 mayor actividad del mes ($\Delta S4_{m,x}=1.65$) se produjo en la estación de Piura el día 14 a las 21:00 horas aproximadamente.

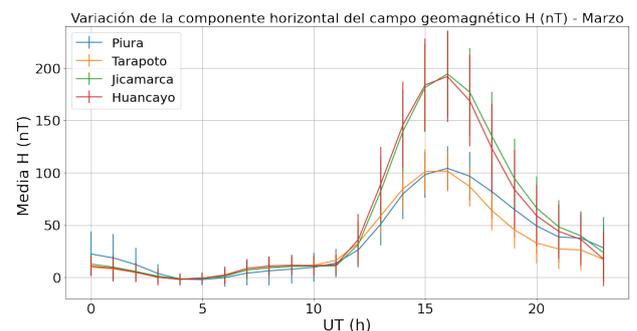


Figura 14. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante los días geomagnéticamente tranquilos de marzo.

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 marzo de H por cada estación: Piura, 104 nT; Tarapoto, 101 nT; Huancayo, 192 nT y Jicamarca, 194 nT.

5. Conclusiones

- Se registraron valores inusuales cercanos a cero en las derivas verticales ISR pasadas las 10:00 horas, a diferencia del valor promedio de 22 m/s durante los días geomagnéticamente tranquilos.
- La tormenta de clase X1.14 perturbó la forma de los ecos de 150 km, así como la extensión en altura del Electrochorro Ecuatorial, pero no generó un impacto en los ecos mesosféricos.
- La ocurrencia de la F-Dispersa medida por el radar principal en su modo JULIA-MP y el radar AMISR-14 es mayoritaria para el horario antes de la medianoche y tiene correlación con la amplitud del índice S4 la cual es más intensa durante el mismo horario para todas las estaciones disponibles del mes.

6. Referencias

- [1] R. F. Woodman, D. T. Farley, B. B. Balsley, and M. A. Milla, "The early history of the Jicamarca Radio Observatory and the incoherent scatter technique," vol. 10(2), pp. 245–266, 2019.
- [2] "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>

- [3] 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.
- [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. 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.
- [6] 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.
- [7] "Catalog of geomagnetic storms with dst index ≤ -50 nt and their solar and interplanetary origin," [1996–2019].
- [8] "Large coronal hole facing Earth, G2 – Moderate geomagnetic storm," 2025. [Online]. Available: <https://watchers.news/2025/03/26/large-coronal-hole-facing-earth-g2-moderate-geomagnetic-storm/>
- [9] P. Reyes, "Solar flare effects observed over jicamarca during mst-isr experiments," 2012.
- [10] "Geostationary operational environmental satellites - r series | noaa/nasa," [2024, March 14]. [Online]. Available: <https://www.goes-r.gov>

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