



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Instituto Geofísico del Perú

“Decenio de la Igualdad de oportunidades para mujeres y hombres”
“Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho”

BOLETÍN
IGP / ROJ / 2024-07



LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

JULIO 2024



Durante el mes de julio de 2024 fuimos testigos de una llamarada solar de clase M9.51 el día 30, la cual ocasionó la absorción y atenuación de señales en la capa D entre las 14:28 y las 15:15 horas, como se aprecia en la secuencia de ionogramas mostrada en la [Figura 1](#). Además, se produjeron 3 tormentas geomagnéticas de clase G1 que tuvieron un impacto en las mediciones de la componente horizontal del campo magnético terrestre (H) en la estación de Jicamarca ([Figura 5](#)), así como en las derivas verticales ISR y de los ecos de 150 km ([Figura 6](#)).

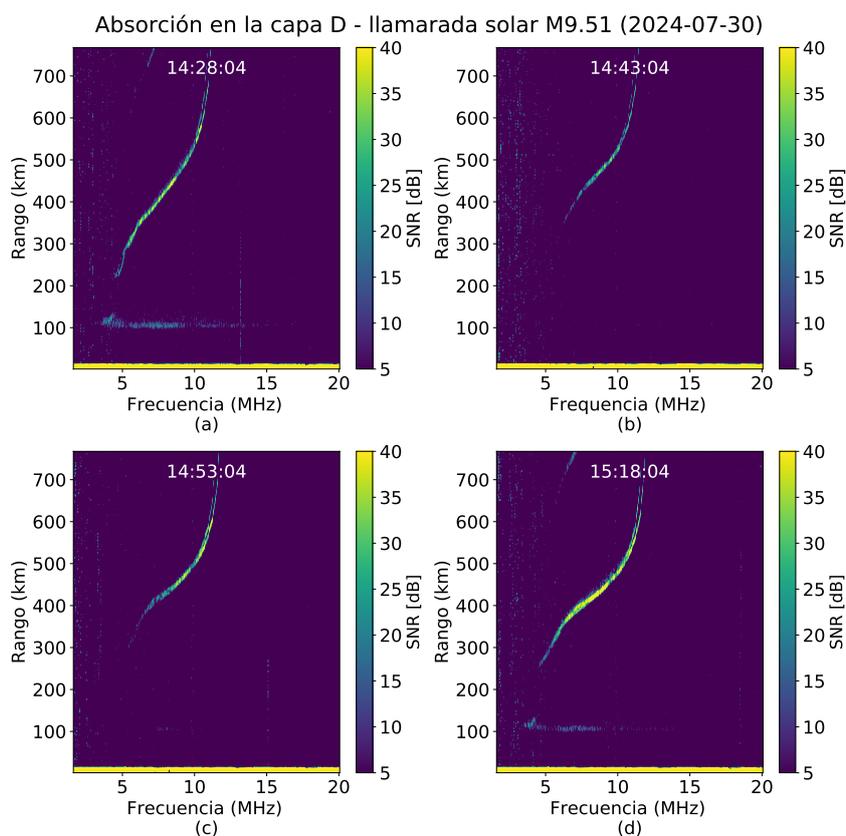


Figura 1. (a) Ecos típicos detectados por la ionosonda del IGP-ROJ. (b) y (c) Desaparición temporal de ecos en la baja ionosfera debido a la absorción en la capa D ocasionada por la llamarada solar de clase M9.51 del 30 de julio. (d) Detección típica de ecos luego de la llamarada.

Tabla 1. Resumen de las mediciones de parámetros ionosféricos y condiciones predominantes del clima espacial del mes de julio 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:141	AQP:66	Mín.	Máx.
Mín: 55.2 S	Mín: 34.6 O	HYO: 146	NZC: 82	-26	19
Máx: 59.1 N	Máx: 30.9 E	PIU: 71			

ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: TRANQUILA	ACTIVIDAD SOLAR: ALTA
--	------------------------------

¿SABÍAS QUÉ?

Un excelente indicador de la actividad solar es el registro del flujo de emisiones de radio en la longitud de onda de 10.7 cm (2800 MHz), llamado índice F10.7, el cual es expresado en unidades de flujo solar (u.f.s.) y es medido 3 veces por día, durante la mañana, al mediodía y en la tarde[1], este flujo se origina en la interface externa del sol (cromosfera y corona), y tiene fuerte correlación con el número de manchas solares y con la intensidad de radiación ultravioleta (UV). Cuanto mayor es el flujo solar, más radiación ionizante incide sobre la ionosfera, produciendo electrones libres que se estratifican en las capas D, E y F.

Los valores del índice F10.7 pueden variar desde valores por debajo de 50, hasta valores por encima de 300 (Figura 2), como el ocurrido el 30 de julio del 2024 (Figura 3) que alcanzó valores de alrededor de 400 u.f.s., un valor del índice F10.7 alto generalmente indica mejores condiciones de propagación en las frecuencias

HF (3 - 30 MHz). Por otro lado, rápidas variaciones en el flujo solar no producen perturbaciones significativas en la ionosfera de la misma manera que lo hacen variaciones progresivas (promedio de 81 días)[2].

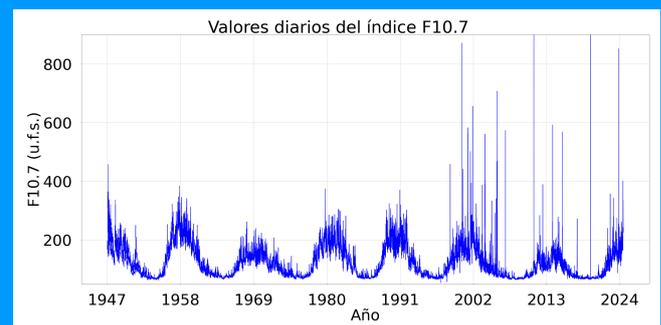


Figura 2. Índice F10.7 entre enero de 1947 y agosto de 2024. Se observan valores por encima de los 400 en pocos días durante los máximos solares.

1. Climatología del mes

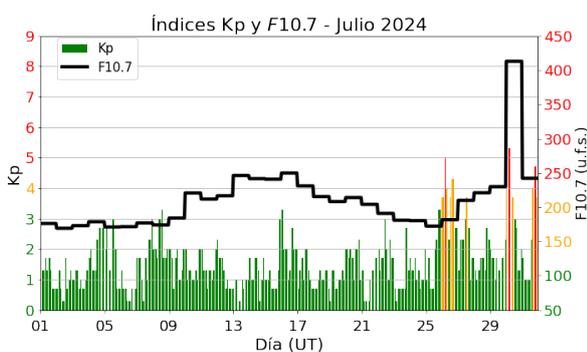


Figura 3. Valores de los índices Kp y F10.7 cm (u.f.s. = $10^{-22} W m^{-2} Hz^{-1}$) para el mes de julio. Extraídos de OMNIWeb.

La actividad geomagnética (índice Kp[3]) fue predominantemente tranquila en un 95 % del tiempo, moderada en un 4 % y alta en un 1 %; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7[4]) 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)[5], 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[6].

Las mediciones muestran una buena concordancia con la climatología. Asimismo, la climatología de julio 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 -25 m/s pasada la medianoche, cuya magnitud incrementa hasta llegar a un valor de cerca de 18 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[7], hasta 18 m/s a las 17:00 horas, para finalmente decrecer hasta los -29 m/s antes de la medianoche. Los valores indicados por la climatología muestran una moderada concordancia con las mediciones salvo para las horas circundantes a la ocurrencia del pre-reversal enhancement y las horas antes de la medianoche.

Estudios climatológicos[8] 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

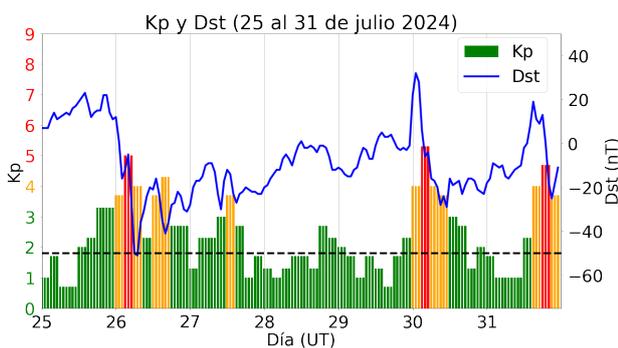


Figura 4. Índices geomagnéticos Kp y Dst del 25 al 31 de julio. La línea horizontal negra representa el valor de Dst igual a -50 nT.

La creciente actividad solar se manifestó en la ocurrencia de tres tormentas geomagnéticas de intensidad G1 (Figura 4). Estas acontecieron los días 26, 30 y 31 de julio, las cuales alcanzaron valores de índice Dst de -51 nT, -29 nT y -25 nT, respectivamente. Aunque las 2 últimas no sobrepasan los -50 nT, se

consideran tormentas geomagnéticas por su valor de Kp asociado[9].

Las tormentas de este mes perturbaron 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, la tormenta del día 26 tuvo un impacto 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 en este día las derivas incrementaron su valor súbitamente a la 01:30 horas (primera línea magenta) y que alcanzaron valores positivos, a diferencia del promedio de las derivas durante los días geomagnéticamente tranquilos. Además, a las 09:30 horas (segunda línea magenta) hubo otro incremento súbito y a las 11:00 horas (tercera línea magenta) disminuyó repentinamente. 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.

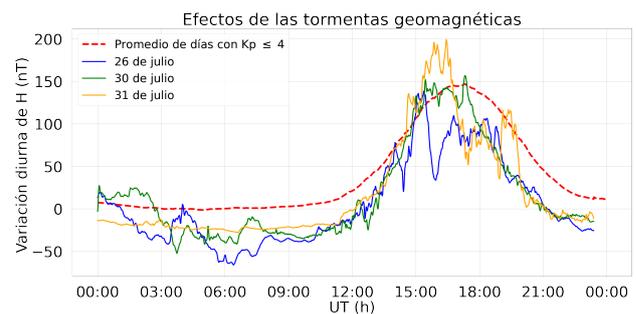


Figura 5. Efectos de las tormentas geomagnéticas, ocurridas el 26, 30 y 31 de julio del 2024, sobre la variación diurna de H de la estación geomagnética de Jicamarca.

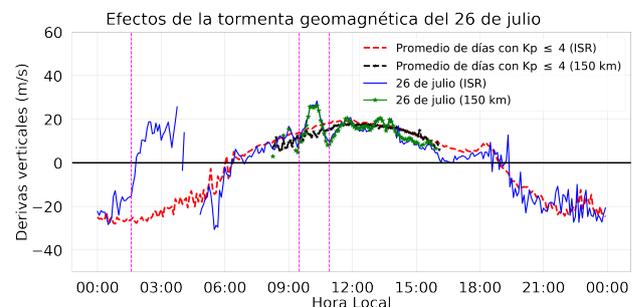


Figura 6. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida el 26 de julio del 2024, sobre el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km de las derivas verticales ISR y sobre el promedio en alturas de las derivas verticales de los Ecos de 150 km.

3. Observaciones de la alta atmósfera con radares

Se pudo monitorear el comportamiento de las derivas verticales y la ocurrencia de los Ecos de 150 km durante 13 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.

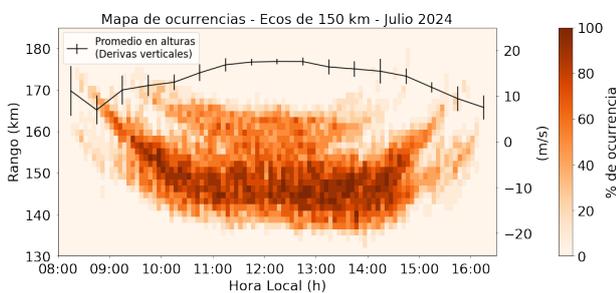


Figura 7. Mapa de ocurrencias de los Ecos de 150 km y el promedio en alturas de sus derivas verticales.

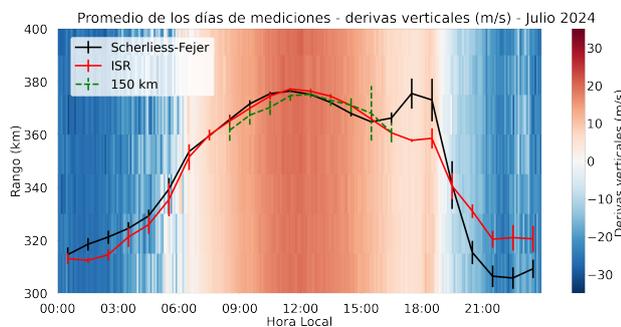


Figura 8. Promedio de las derivas verticales ISR. La curva roja representa el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km y la curva negra, las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.

Por otro lado, se realizaron 28 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 -26 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 19 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[7], con valores cercanos a

los 6 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.

Asimismo, se realizaron 25 noches de mediciones con el sistema de radar AMISR-14, periodo durante el cual se observó la presencia de 3 irregularidades en la Capa F, entre los 200 km y 400 km de altura. Las dos primeras de morfología del tipo Bottom-type y la tercera del tipo Post-midnight, como se aprecia en la [Figura 9](#). Además, el sistema de radar JULIA-MP funcionó durante 22 noches, durante las cuales se detectaron 6 irregularidades entre los 200 km y los 400 km, siendo la más frecuente la morfología del tipo Bottom-type, con 83 %, seguida por Post-midnight, con 17 %, como se aprecia en la [Figura 10](#). 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 JULIA-MP logró detectar irregularidades quizá por su frecuencia de operación (50 MHz) diferente a la de AMISR-14 (445 MHz). Las observaciones de ambos sistemas concuerdan con lo señalado por la climatología (realizada con el modo JULIA)[10].

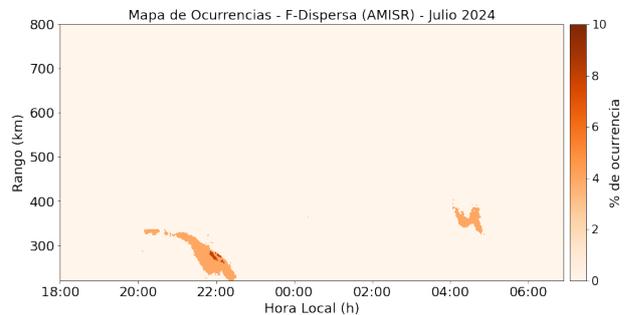


Figura 9. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el sistema AMISR-14.

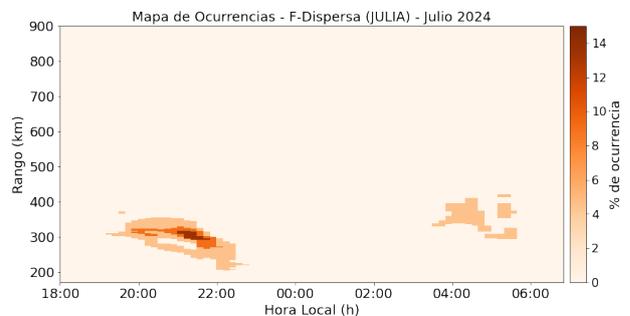


Figura 10. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el sistema JULIA MP.

El promedio en tiempo y altura de los vientos zonales y meridionales para el mes de julio, como se aprecia

en la **Figura 11**, 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 $+30.9$ m/s a las 12:30 horas y el promedio mínimo de -34.6 m/s a las 03:00 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de $+59.1$ m/s a las 19:00 horas y el promedio mínimo de -55.2 m/s a las 06:30 horas. El viento zonal máximo fue de $+104.7$ m/s a las 14:45 horas del 2 de julio y el mínimo -103.9 m/s a las 02:45 horas del día 11 de julio, mientras que el viento meridional máximo fue $+126.9$ m/s a las 17:45 horas del día 25 de julio y el mínimo -147.3 m/s a las 05:15 horas del día 26 de julio.

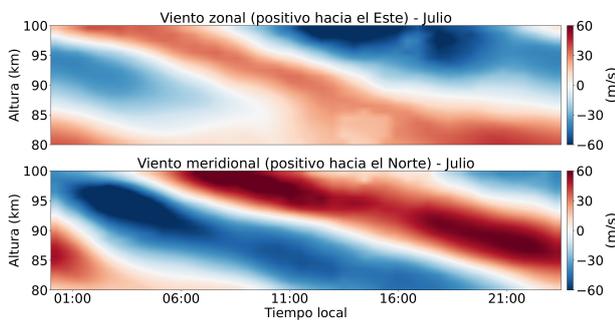


Figura 11. Promedio de los vientos zonales y meridionales durante el mes de julio del 2024.

4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

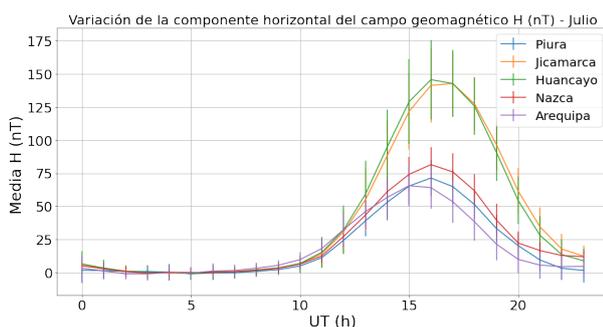


Figura 12. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante julio.

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 12**. 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

(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 julio de H por cada estación: Piura, 71 nT; Huancayo, 146 nT; Jicamarca, 141 nT; Arequipa, 66 nT y Nazca, 82 nT.

5. Conclusiones

- Las tormentas geomagnéticas del 26, 30 y 31 de julio de clase G1 perturbaron la variación diurna de la componente horizontal del campo geomagnético H.
- La tormenta geomagnética del 26 de julio perturbó las derivas verticales ISR desde las 01:30 horas, donde se registraron inusuales valores positivos en la madrugada.
- Siguiendo la tendencia del mes de junio, la actividad solar (índice F10.7) fue alta el 100% del tiempo, e incluso se registró un valor que superó las 400 u.f.s. Y aunque valores similares han sido registrados pocas veces, estos no generan un impacto significativo como lo hace el promedio de los 81 días previos como se menciona en la sección sabías qué.
- Se observó la absorción en la capa D en las mediciones de la ionosonda como efectos de la llamarada solar de clase M9.51 ocurrida el 30 de julio.

6. Referencias

- [1] "About the solar flux data," [2024, Aug 21]. [Online]. Available: [1https://www.spaceweather.gc.ca/forecast-precision/solar-solaire/solarflux/sx-3-en.php](https://www.spaceweather.gc.ca/forecast-precision/solar-solaire/solarflux/sx-3-en.php)
- [2] T. D. de Wit and S. Bruinsma, "The 30 cm radio flux as a solar proxy for thermosphere density modelling," *J. Space Weather Space Clim.*, vol. 7, p. A9, 2017. [Online]. Available: [1https://doi.org/10.1051/swsc/2017008](https://doi.org/10.1051/swsc/2017008)
- [3] "The Kp-index | Help," Oct 2020, Accessed on: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: [1https://www.spaceweatherlive.com/en/help/the-kp-index.html](https://www.spaceweatherlive.com/en/help/the-kp-index.html)
- [4] "F10.7 cm Radio Emissions | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center," Jul 2020, Accessed on: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: [1https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radio-emissions](https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radio-emissions)

- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] "Catalog of geomagnetic storms with dst index ≤ -50 nt and their solar and interplanetary origin," [1996–2019]. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/atmos14121744>
- [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

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"***