"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"





Durante el mes de mayo de 2024 fuimos testigos de la ocurrencia de múltiples tormentas geomagnéticas. La de mayor intensidad (G5) ocurrió los días 10 y 11 de mayo con un valor de Dst mínimo de -412 nT; una tormenta de similar magnitud no había sido registrada desde hace 20 años. Estas tormentas produjeron perturbaciones en las derivas verticales ISR, cuyos valores alcanzaron los 100 m/s el día 10 (azul), mientras que el día 11 (verde) se registraron valores negativos luego del amanecer como se aprecia en la Figura 1.

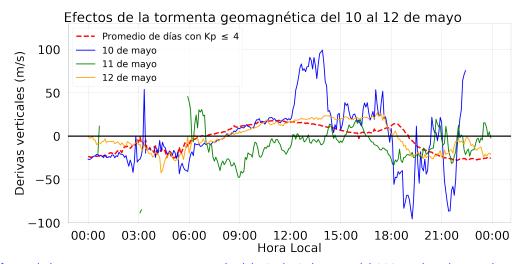


Figura 1. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida del 10 al 12 de mayo del 2024, sobre el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km de las derivas verticales ISR.

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

Vientos promedios		
MLT a 90 km		
[m/s]		
Meridional	Zonal	
Mín: 67.5 S	Mín: 14.3 O	
Máx: 31.0 N	Máx: 23.9 E	

Variación máxima		
de campo geomagnético		
horizontal (H)[nT]		
LIM:138	AQP:74	
HYO: 140	NZC: 84	
PIU: 72		

Derivas verticales de			
plasma promedio			
(300 km- 400 km) [m/s]			
Mín.	Máx.		
-26	17		

ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: TRANQUILA

ACTIVIDAD SOLAR: ALTA

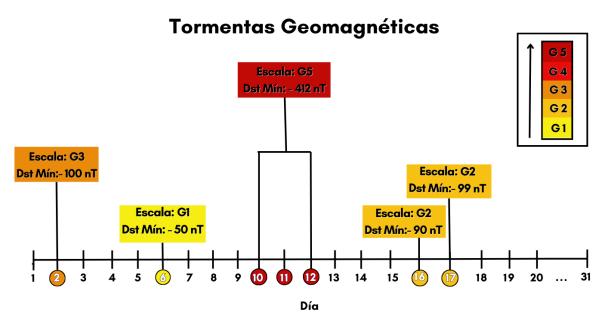


Figura 2. Intensidad de las tormentas geomagnéticas del mes de mayo y su índice Dst asociado.

## ¿SABÍAS QUÉ?

Las auroras polares, son fenómenos luminosos que se observan generalmente alrededor de los polos geomagnéticos, ocurren cuando los gases en la alta atmósfera son impactados por partículas cargadas y campos magnéticos transportados por el viento solar producido por intensas tormentas solares. La tormenta geomagnética del 10 al 12 de mayo del 2024 (clase G5) fue la más fuerte de las últimas dos décadas y provocó una de las auroras más intensas en 500 años, generando auroras boreales y australes que se observaron hasta en latitudes más alejadas de los polos, como España o México por el hemisferio norte y Uruquay, Argentina, Chile en el hemisferio sur. Estos eventos fueron desencadenados por grandes erupciones solares y eyecciones de masa coronal (EMC) que bombardearon la Tierra con nubes de partículas cargadas y campos magnéticos. Por otro lado, la atmósfera terrestre está compuesta aproximadamente por nitrógeno (78%), oxígeno (21%), y el resto con gases como dióxido de carbono, etc. La concentración de cada elemento depende de la altitud, por lo que a cada región le corresponderá un color determinado dependiendo de la especie de átomo que fue excitado y la cantidad de energía recibida. En altitudes bajas el nitrógeno (<100 km) da lugar a auroras azules o violetas, el oxígeno molecular (100 - 300 km) produce auroras verdes. En altitudes intermedias la mezcla de componentes puede provocar auroras rosadas o amarillentas. En altitudes más elevadas (>300 km) el oxígeno atómico produce auroras rojas o rosadas (Figura 3), esto debido a que como el oxígeno atómico tiene menor concentración necesita ser excitado por partículas muy energéticas, provenientes de tormentas solares muy intensas[1].



Figura 3. Aurora boreal observado en Madrid-España (40° latitud Norte), el 10 de mayo del 2024[2], la predominancia del color rosado y rojo indica una intensa tormenta magnética, interactuando con átomos de oxígeno a altitudes mayores a 300 km.

### 1. Climatología del mes

La actividad geomagnética (índice Kp[3]) fue predominantemente tranquila en un 85 % del tiempo, moderada en un 5 % y alta en un 10 %; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7[4]) fue alta un 94 % del tiempo y 6 % 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)[5], lo que se refleja en nuestras mediciones.

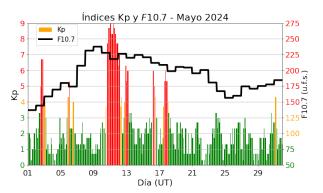


Figura 4. Valores de los índices Kp y F10.7 cm (u.f.s. =  $10^{-22} {\rm W} m^{-2} Hz^{-1}$ ) para el mes de mayo. Extraídos de OMNIWeb.

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[6]. Las mediciones muestran una buena concordancia con la climatología.

Asimismo, la climatología de mayo 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[7], hasta 16 m/s a las 18:00 horas, para finalmente decrecer hasta los -30 m/s antes de la medianoche. Los valores indicados por la climatología muestran una moderada concordancia con las mediciones salvo para las horas antes del amanecer.

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 de estos ecos fue menor en 5 km mientras que la máxima

altura de aparición concuerda con la climatología. Además, la hora de aparición de estas irregularidades concuerda con la climatología a diferencia de la hora de desaparición que ocurre una hora antes.

### 2. Tormentas geomagnéticas

La creciente actividad solar se manifestó en la ocurrencia de 5 tormentas geomagnéticas (Figura 5). El detalle de las intensidades de las tormentas y los índices Dst asociados se muestran en la Figura 2, en donde resalta la tormenta de escala G5 acontecida el 10 y 11 de mayo, la cual duró hasta el término del día 12 en hora local. El valor de Dst mínimo asociado a esta tormenta alcanzó un mínimo de -412 nT el día 11; una intensidad similar no había sido registrada desde hace 20 años cuando ocurrió la conocida tormenta de Halloween del 2003 cuyo valor de Dst fue de -383 nT, es decir, la tormenta de este año fue más intensa[9].

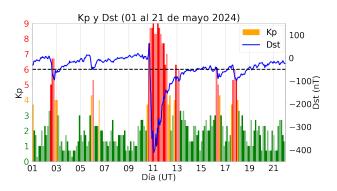


Figura 5. Índices geomagnéticos Kp y Dst del 01 al 21 de mayo. La línea horizontal negra representa el valor de Dst igual a -50 nT. Intensidades menores o iguales a este valor se consideran tormentas geomagnéticas.



Figura 6. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida del 10 al 12 de mayo del 2024, sobre la variación diurna de H de la estación geomagnética de Jicamarca.

La tormenta más intensa del mes (10 al 12 de mayo) 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 6. Además, esta tuvo un impacto significativo en las derivas verticales ISR medidas con el radar principal Radio Observatorio de Jicamarca, sede del Instituto Geofísico del Perú (IGP-ROJ), como se muestra en la Figura 1. Aquí se puede apreciar que el día 10 las derivas alcanzaron valores de 100 m/s, mientras que el día 11 las derivas fueron negativas luego de la salida del Sol hasta el mediodía. Además, luego del mediodía del 12 de mayo el valor de las derivas continuó ascendiendo hasta las 17 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 (Figura 7) y mantienen la misma tendencia que las descritas en las mediciones ISR.



Figura 7. Efectos de la tormenta geomagnética, ocurrida del 10 al 12 de mayo del 2024, sobre el promedio en alturas de las derivas verticales de los Ecos de 150 km.

# 3. Observaciones de la alta atmósfera con radares

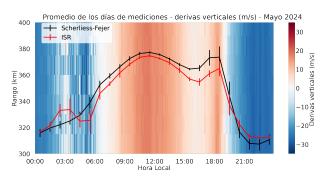


Figura 8. Promedio de las derivas verticales ISR para los días geomagnéticamente tranquilos de mayo. La curva roja representa el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km y la curva negra, las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.

Se pudo monitorear el comportamiento 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.

Durante los días geomagnéticamente tranquilos, estas mediciones indican que las derivas verticales promedio empezaron aproximadamente a -24 m/s (hacia abajo) después de la medianoche para aumentar hasta cambiar de dirección (hacia arriba) a las 07:00 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 17:00 horas conocido como pre-reversal enhancement[7], con valores cercanos a los 11 m/s. Finalmente, los valores predichos por el modelo de Scherliess-Fejer exhiben una moderada concordancia con las mediciones, siendo la mayor discrepancia de 9 m/s a las 05:30 horas.

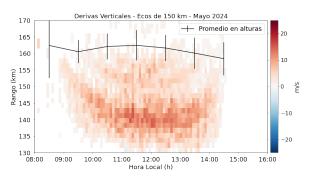


Figura 9. Promedio de las derivas verticales de los Ecos de 150 km durante los días geomagnéticamente tranquilos.

Por otro lado, se realizaron 11 días de mediciones de las derivas verticales de los Ecos de 150 km, en la región de transición entre las capas E y F. Podemos apreciar en la Figura 9 que los ecos empiezan minutos antes de las 09:00 horas, que desaparecen pasadas las 14:30 horas y que están contenidos entre los 130 km y los 165 km de altura, lo que concuerda moderadamente con lo predicho por la climatología.

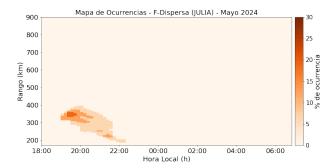


Figura 10. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el sistema JULIA MP para los días geomagnéticamente tranquilos del mes.

Asimismo, el sistema de radar JULIA-MP funcionó durante 16 noches geomagnéticamente tranquilas, durante las cuales se detectaron 3 irregularidades entre los 200 km y los 400 km, siendo la única morfología

observada la del tipo Bottom-type, como se aprecia en la Figura 10. Las observaciones concuerdan con lo señalado por la climatología[10].

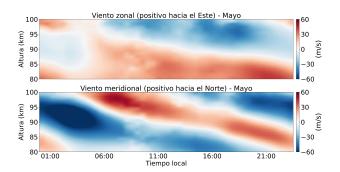


Figura 11. Promedio de los vientos zonales y meridionales durante el mes de mayo del 2024.

El promedio en tiempo y altura de los vientos zonales y meridionales para el mes de mayo, como se aprecia en la Figura 11, muestra periodos predominantes de 24 horas (marea solar diurna). En la mesopausa  $(\sim 90 \text{ km})$  se observa que el valor del viento zonal promedio máximo fue de +23.9 m/s a las 08:30 horas y el promedio mínimo de -14.3 m/s a la 23:30 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de +31.0 m/s a las 18:30 horas y el promedio mínimo de -67.5 m/s a las 03:00 horas. El viento zonal máximo fue de +80.0 m/s a las 00:15 horas del primero de mayo y el mínimo -124.2 m/s a las 13:15 horas del día 03 de mayo, mientras que el viento meridional máximo fue +105.7 m/s a las 09:15 horas del día 04 de mayo y el mínimo -116.5 m/s a las 03:15 horas del día 10 de mayo.

# 4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

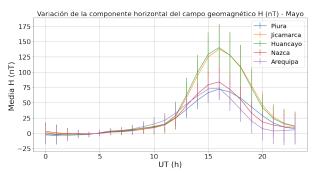


Figura 12. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante los días geomagnéticamente tranquilos de mayo.

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 mayo de H por cada estación: Piura, 72 nT; Huancayo, 140 nT; Jicamarca, 138 nT; Arequipa, 74 nT y Nazca, 84 nT.

#### 5. Conclusiones

- La tormenta geomagnética del 10 al 12 de mayo de clase G5 alcanzó un valor de Dst mínimo de -412 nT, la cual perturbó la variación diurna de la componente horizontal del campo geomagnético H.
- Esta misma tormenta, cuya intensidad similar no había sido detectada desde hace 20 años, perturbó las derivas verticales ISR y de los Ecos de 150 km, cuyos valores alcanzaron los 100 m/s y 85 m/s respectivamente.

#### 6. Referencias

- [1] "Colores de las auroras boreales: qué significa el color verde, rojo, rosa o azul." [Online]. Available: 1https://www.eltiempo.es/noticias/ colores-de-las-auroras-boreales-que-significa-elcolor-verde-rojo-rosa-o-azul
- [2] "ihistórico! auroras boreales vistas en toda españa con el cielo teñido de rosa." [Online]. Available: 1https://www.eltiempo.es/noticias/historico-auroras-boreales-vistas-en-toda-espana-con-el-cielo-tenido-de-rosa
- [3] "The Kp-index | Help," Oct 2020, Accessed on: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: 1https://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
- [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] "Let's compare! halloween 2003 2024 storms!" [2024, solar may Available: [Online]. May 17]. 1 https://www.spaceweatherlive.com/en/ news/view/544/20240517-let-s-comparehalloween-2003-vs-may-2024-solar-storms.html
- [10] "Geostationary operational environmental satellites r series | noaa/nasa," [2024, March 14]. [Online]. Available: 1https://www.goes-r.gov

#### Elaborado por:

Bach. Roberto Flores Arroyo Mag. Luis Condori Illahuamán Dr. Edgardo Pacheco Josan Dr. Ram Singh

#### Diseño y diagramación:

Bach. Anette De la Cruz Meza

#### **Colaboradores:**

Mag. Karim Kuyeng Ruiz Dr. Danny Scipión Castillo Dr. Marco Milla Bravo

#### **Contacto:**

roj@igp.gob.pe