



# LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

ABRIL 2023



Durante el mes de abril se observaron los efectos de la tormenta geomagnética de intensidad G4 durante los días 23 y 24 en las mediciones de derivas verticales, con el modo JULIA MP de nuestro radar principal, como se muestra en la [Figura 1](#). Además detectar sus efectos en las mediciones de la componente horizontal H del campo geomagnético ([Figura 4](#)).

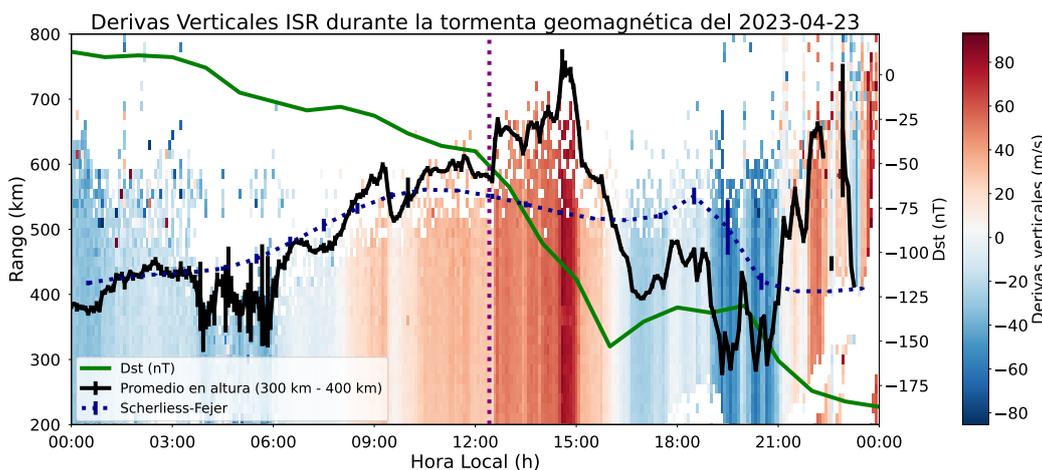


Figura 1. Derivas verticales medidas con el modo JULIA-MP durante la tormenta geomagnética del 23 de abril de 2023. La curva verde corresponde al valor del índice Dst; la curva negra, al valor de las derivas verticales promediadas entre los 300 km y 400 km y la línea azul oscuro punteada, a las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer. La línea vertical morada punteada indica el inicio de la tormenta, que es cuando el índice Dst llega a los -50 nT.

Tabla 1. Resumen de las mediciones de parámetros ionosféricos y condiciones predominantes del clima espacial del mes de abril del 2023.

Vientos promedio MLT a 90 km [m/s]		Derivas verticales de plasma promedio (300 km- 400 km) [m/s]		Variación máxima de campo geomagnético horizontal (H) [nT]	
Meridional	Zonal	Mín	Máx	LIM: 164	NAZ: 94
Mín: 88.8 S	Mín: 63.4 O	-30	25	HYO: 151	
Máx: 83.6 N	Máx: 18.3 E				
ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: <b>TRANQUILA</b>				ACTIVIDAD SOLAR: <b>ALTA</b>	

## ¿SABÍAS QUÉ?

La sociedad es vulnerable a la alta actividad solar, debido a que los sistemas actuales de predicción y monitoreo del clima espacial no se encuentran tan desarrollados como los del clima atmosférico (ya que los primeros se basan en modelos que utilizan un menor número de datos observacionales en comparación a los segundos)[1], por lo que existe la posibilidad de no prever la ocurrencia de una llamarada solar muy intensa o de una eyección de masa coronal (CME) de muy alta energía que impacte directamente con la Tierra, por lo que las consecuencias para la sociedad podrían ser devastadoras. El mejor ejemplo registrado es el Evento Carrington, acontecido a inicios de septiembre de 1859 (ciclo solar 10) en honor al astrónomo inglés aficionado Richard C. Carrington. Se cree que la causa más probable de esta tormenta geomagnética, con valores estimados del índice Dst entre  $-800$  nT y  $-1750$  nT, fue una CME asociada a una llamarada solar de clase X de aproximadamente 5 minutos de duración[2]. Las consecuencias fueron la aparición de auroras alrededor del mundo, en latitudes tan cercanas al ecuador magnético como Colombia[3], además de fallos en los sistemas de telégrafos reportados en América del Norte y Europa, a lo que se suman quemaduras y choques eléctricos recibidos por los algunos operarios de telégrafos y el hecho de que podían seguir enviando y recibiendo mensajes aún desconectando sus equipos de las fuentes de suministro

de energía[2]. Esta vulnerabilidad frente a los fenómenos del clima espacial es más latente en la actualidad, en una sociedad inmensamente dependiente de la tecnología y podría tener magnitudes catastróficas. La compresión del campo magnético terrestre ocasionada por un evento como el de Carrington dejaría a los satélites sin protección frente al viento solar[4][5] y produciría desde la pérdida de los sistemas de telecomunicaciones y de navegación, hasta el posible colapso de la red de distribución de energía a nivel global causado por las corrientes telúricas inducidas[6], lo que implicaría pérdidas multimillonarias[7].

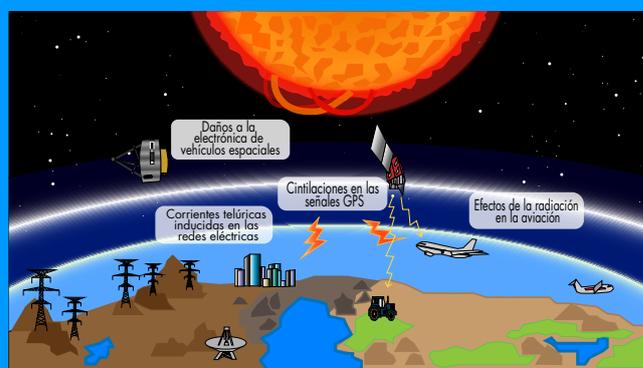


Figura 2. Esquema de los efectos en la sociedad de una tormenta geomagnética de gran intensidad. Imagen adaptada de [7].

## 1. Climatología del mes

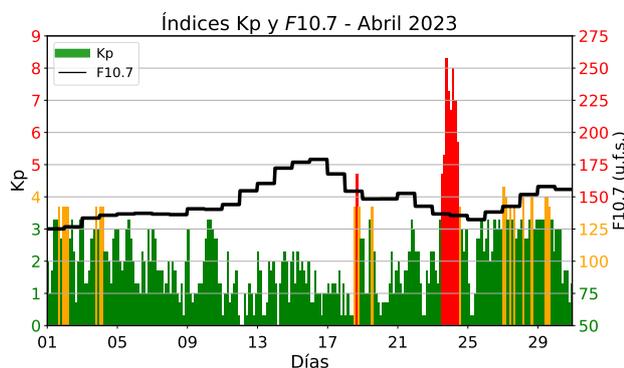


Figura 3. Los valores de los índices Kp y F10.7 cm (s.f.u. =  $10^{-22} \text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$ ) para el mes de abril. Extraídos de [8].

La actividad geomagnética (índice Kp[9]) fue predominantemente tranquila en un 88% del tiempo, moderada en un 8% y alta en un 4%; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7[10]) fue moderada

en un 37% del tiempo y alta en un 63% (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)[11], lo que se refleja en nuestras mediciones.

Los estudios climatológicos realizados para los meses cercanos al equinoccio vernal fueron hechos con el modo JULIA del radar principal del Radio Observatorio de Jicamarca-IGP, que opera a 50 MHz, y estos indican que se espera una ocurrencia mediana de burbujas de plasma, con burbujas contenidas entre los 200 km y 700 km de altura y con una incidencia mayor antes de la medianoche[12].

Las mediciones realizadas para este mes con el radar AMISR-14, que opera a 450 MHz, muestran una concordancia moderada con lo esperado por la climatología.

## 2. Tormentas geomagnéticas y llamaradas solares

Entre los días 23 y 24 del mes de abril aconteció una tormenta geomagnética aún más intensa que la reportada el mes anterior, causada por una CME emitida por el Sol el 21 de abril y acompañada por una llamarada solar de clase M1.76, que impactó directamente con la Tierra[13]. Sus efectos se manifestaron en nuestra instrumentación en forma de perturbaciones magnéticas medidas por los magnetómetros, como se muestra en la Figura 4.

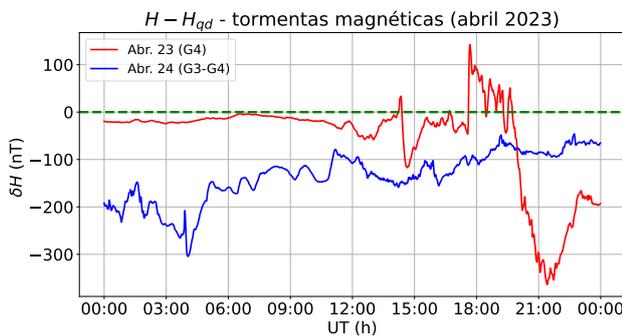


Figura 4. Efecto de la tormenta geomagnética acontecida entre el 23 (curva roja) y 24 (curva azul) de abril en las mediciones de los magnetómetros en Jicamarca.

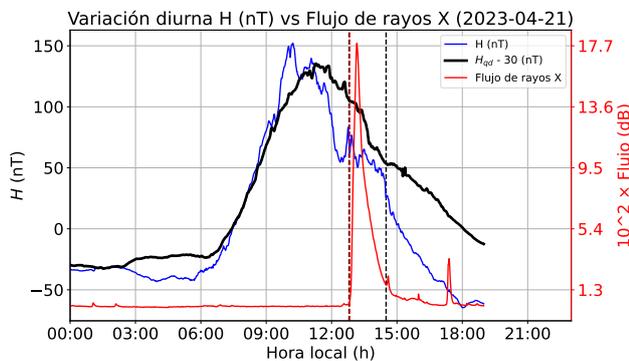


Figura 5. Efecto de la llamarada solar del 21 de abril (asociada a la CME del mismo día) en las mediciones del magnetómetro ubicado en el ROJ. La curva negra representa el promedio de los 5 días geomagnéticamente más tranquilos del mes.

Asimismo, a las 12:25 horas se registró un incremento considerable en el valor de las derivas verticales coincidente con el inicio de la tormenta geomagnética (cuando el valor del índice Dst llega a -50 nT) hasta aproximadamente las 16:00 horas con respecto a las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer, además de la ausencia del fenómeno conocido como pre-reversal enhancement (alrededor de las 18:00 horas) y valores positivos durante horas de la

noche, mientras que las predicciones indican valores negativos a estas horas Figura 1. Por otro lado, observamos el efecto de la llamarada solar asociada a la CME en las mediciones de H del magnetómetro de Jicamarca y notamos que no fue tan notorio como el que reportamos el mes pasado, pero aún así pudimos contemplar un mayor decrecimiento de los valores de H al empezar la tormenta (12:45 horas) hasta aproximadamente las 14:30 horas, como se muestra en la Figura 5.

## 3. Observaciones de la alta atmósfera con radares

Con el radar AMISR-14[12] se realizaron mediciones de F-Dispersa por 10 días con los apuntes disponibles[12]. Se observaron 3 burbujas durante 3 días, entre 250 km y 550 km de altura, como se puede apreciar en la Figura 6. Se encontró que la morfología dominante fue la del tipo Bottomside con 67%, seguida del tipo Pluma de Radar con 33% de ocurrencia. Se encontró una moderada concordancia con la climatología, en donde se indica que la gran mayoría de burbujas se producirían antes de la medianoche, aunque la máxima altura de aparición de ecos resultó ser 150 km menor que las reportadas por la climatología[14].

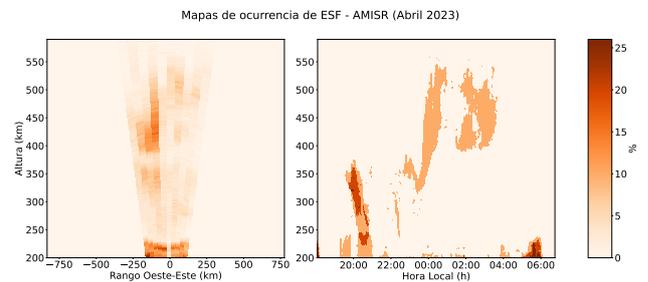


Figura 6. Mapas de ocurrencias de F dispersa o ESF (Equatorial Spread F) para las mediciones de AMISR-14 del mes de abril. Izquierda: mapa polar. Derecha: mapa tradicional.

Por otro lado, se pudo monitorear el comportamiento de las derivas verticales de plasma entre los 300 km y 400 km de altura con el uso del radar principal del IGP-ROJ en su modo JULIA-MP. Estas mediciones indican que las derivas verticales promedio empezaron en cerca de -25 m/s (hacia abajo) después de la medianoche para inmediatamente aumentar su magnitud y cambiar de dirección (hacia arriba) cerca de las 07:00 horas. Posteriormente, el valor de esta magnitud física incrementó hasta 5 m/s un poco antes de las 9 horas y no cambió significativamente hasta las 17:00 horas, cuando empezó a acontecer un fenómeno conocido como pre-reversal enhancement, llegando a su valor pico de 20 m/s a las 19:00 horas.

A partir de este momento, las derivas verticales decrecieron hasta llegar a valores cercanos a  $-30$  m/s a la medianoche. Las mediciones (curva roja) muestran una muy buena concordancia con las predicciones del modelo Scherliess-Fejer (curva negra), como se muestra en la [Figura 7](#).

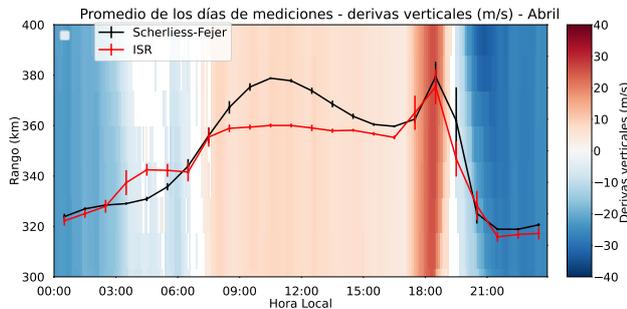


Figura 7. Promedio mensual de las derivas verticales ISR para el mes de abril. La curva roja representa el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km y la curva negra, las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.

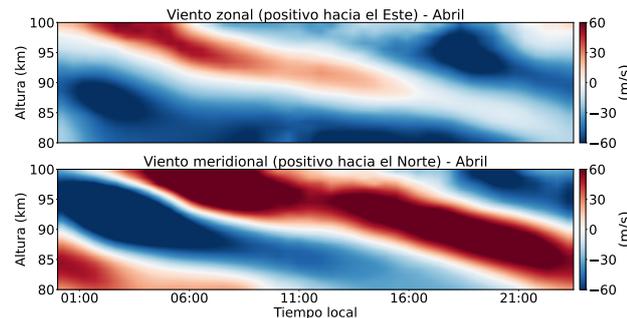


Figura 8. Promedio de los vientos zonales y meridionales durante el mes de abril del 2023.

Adicionalmente, se registró el comportamiento de los vientos zonales y meridionales en la región de la mesosfera y la baja termosfera de la zona central del Perú con la ayuda del sistema de radar de meteoros especulares SIMONE. El promedio en tiempo y altura de los vientos zonales y meridionales para el mes de abril, como se aprecia en la [Figura 8](#), muestra periodos predominantes de 24 horas (marea solar diurna). En la mesopausa ( $\sim 90$  km) se observa que el valor del viento zonal promedio máximo fue de  $+18.3$  m/s a las 14:00 horas y el promedio mínimo de  $-63.4$  m/s a las 01:30 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de  $+83.6$  m/s a las 19:00 horas y el promedio mínimo de  $-88.8$  m/s a las 04:00 horas. El viento zonal máximo fue de  $+88.7$  m/s a las 11:45 horas del día 23 de abril y el mínimo  $-117.8$  m/s a las 02:45 horas del día 3 de abril, mientras que el viento meridional máximo fue  $+146.7$  m/s a las 17:45 horas del día

6 de abril y el mínimo  $-137.5$  m/s a las 02:15 horas del día 29 de abril.

#### 4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

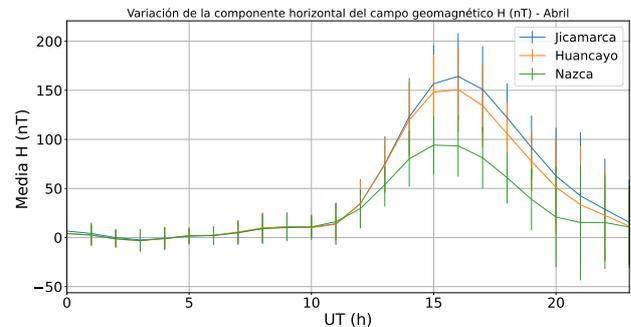


Figura 9. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante el mes de abril del 2023.

Las mediciones de la variación diurna de la componente horizontal del campo magnético (H) de las estaciones magnéticas del IGP-ROJ se presentan en la [Figura 9](#). Aquí se aprecia que el promedio de las estaciones de Jicamarca y Huancayo estuvieron muy por encima de las demás debido a que ambas se encuentran en el ecuador magnético y el Electrochorro Ecuatorial (EE) 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 abril de H por cada estación: Jicamarca, 164 nT; Huancayo, 151 nT y Nazca, 94 nT.

#### 5. Conclusiones

- La tormenta geomagnética del 23-24 de abril fue ocasionada por una CME a la que estuvo asociada una llamarada de clase M, emitida el 21 de abril, la cual causó un decrecimiento de los valores de H entre las 12:45 y las 14:30.
- La tormenta geomagnética del 23-24 de abril se manifestó en perturbaciones notorias de la componente horizontal H del campo geomagnético. Además, pudieron apreciarse las 3 fases típicas de una tormenta geomagnética.
- Se observó un incremento inusual en el valor de las derivas verticales de plasma coincidente con el comienzo de la tormenta geomagnética, además de valores positivos anómalos pasadas las 21:00 horas.

## 6. Referencias

- [1] M. Zastrow, "How to Improve Space Weather Forecasting - Eos." Feb 2023, Accessed on: May. 18, 2023. [Online]. Available: [1https://eos.org/research-spotlights/how-to-improve-space-weather-forecasting](https://eos.org/research-spotlights/how-to-improve-space-weather-forecasting)
- [2] "Contributors to Wikimedia projects.Carrington Event - Wikipedia," May 2023, [Online; Accessed: May 9, 2023]. [Online]. Available: [1wikipedia.org/w/index.php?title=Carrington\\_Event&oldid=1152657423](https://wikipedia.org/w/index.php?title=Carrington_Event&oldid=1152657423).
- [3] D. S. Kimball, "A Study of the Aurora of 1859," Geophysical Institute at the University of Alaska, Apr. 19605. [Online]. Available: [1https://scholarworks.alaska.edu/bitstream/handle/11122/3607/GI%20Reports%20109.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://scholarworks.alaska.edu/bitstream/handle/11122/3607/GI%20Reports%20109.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [4] "The 1859 Carrington Event," Jan. 2019, [Online; Accessed: Apr. 9, 2023]. [Online]. Available: [1https://hackaday.com/2019/01/22/the-1859-carrington-event](https://hackaday.com/2019/01/22/the-1859-carrington-event).
- [5] W. Li, H. Li, X. Guo, K. Ding, and Z. Huang, "Numerical study on the response of the Earth's magnetosphere-ionosphere system to a super solar storm." Science China Earth Sciences, vol. 55.
- [6] "Telluric current - Wikipedia," Apr. 2023, [Online; Accessed: Apr. 15, 2023]. [Online]. Available: [1https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Telluric\\_current&oldid=1151758593](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Telluric_current&oldid=1151758593).
- [7] "Solar storm havoc: 3 times Earth was hit and damage it caused," Oct. 2022, [Online; Accessed: Apr. 9, 2023]. [Online]. Available: [1https://tech.hindustantimes.com/tech/news/solar-storm-havoc-3-times-earth-was-hit-and-damage-it-caused-71633864885277.html](https://tech.hindustantimes.com/tech/news/solar-storm-havoc-3-times-earth-was-hit-and-damage-it-caused-71633864885277.html).
- [8] N. Papitashvili, "OMNIWeb Data Explorer," Oct 2020, Accessed on: Nov. 10, 2022. [Online]. Available: [1https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html](https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html)
- [9] "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)
- [10] "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)
- [11] 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.
- [12] D. Hysell and J. Burcham, "Long term studies of equatorial spread f using the julia radar at jicamarca," Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol. 64, no. 12, pp. 1531–1543, 2002, equatorial Aeronomy. [Online]. Available: [1https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682602000913](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682602000913)
- [13] "Severe Geomagnetic Storm: April 23-24," Apr. 2023, [Online; accessed 26. apr. 2023]. [Online]. Available: [1https://spaceweatherarchive.com/2023/04/26/severe-geomagnetic-storm-april-23-24-2023](https://spaceweatherarchive.com/2023/04/26/severe-geomagnetic-storm-april-23-24-2023)
- [14] "Instituto Geofísico del Perú, "Realtime at Jicamarca," Aug. 2021, [Online; accessed 12. may. 2023]. [Online]. Available: [1https://www.igp.gob.pe/observatorios/radio-observatorio-jicamarca/realtime/static/reports/2022/Boletin\\_Agosto.pdf](https://www.igp.gob.pe/observatorios/radio-observatorio-jicamarca/realtime/static/reports/2022/Boletin_Agosto.pdf)

### Elaborado por:

Bach. Juan Pablo Velásquez Ormaeche  
 Bach. Roberto Flores Arroyo  
 Mag. Luis Condori Illahuamán  
 Dr. Edgardo Pacheco Josan

### Diseño y diagramación:

Bach. Juan Pablo Velásquez Ormaeche  
 Bach. Anette De la Cruz Meza

### Colaboradores:

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

### Contacto:

[roj@igp.gob.pe](mailto:roj@igp.gob.pe)