



LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

ABRIL 2024



El 8 de abril de 2024 ocurrió un eclipse de Sol desde las 10:42 horas hasta las 15:52 horas y se pudo apreciar de manera total en México, Estados Unidos y Canadá; y de manera parcial en países de Centroamérica. En Perú no se pudo visualizar este fenómeno, pero mediciones de la variación diurna de la componente horizontal del campo geomagnético muestran una disminución en sus valores y estas ocurrieron primero en las estaciones ubicadas en latitudes más cercanas a donde ocurrió la totalidad del eclipse (Figura 1), lo cual hace presumir que éstas fueron causadas por el eclipse.

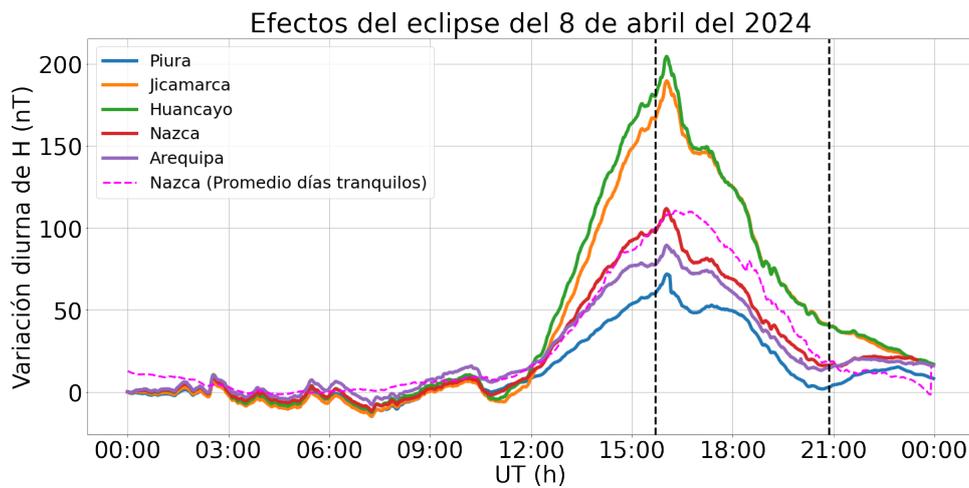


Figura 1. Efectos del eclipse, ocurrido el 8 de abril del 2024, en la variación diurna de la componente horizontal del campo magnético terrestre para las estaciones en Perú. Las líneas negras verticales representan el inicio y el final del eclipse.

Tabla 1. Resumen de las mediciones de parámetros ionosféricos y condiciones predominantes del clima espacial del mes de abril 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:154 | AQP:81 | Mín. | Máx. |
| Mín: 76.7 S | Mín: 42.3 O | HYO: 160 | NZC: 94 | -28 | 18 |
| Máx: 57.9 N | Máx: 4.8 E | PIU: 74 | | | |
| ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA: TRANQUILA | | | ACTIVIDAD SOLAR: MODERADA | | |

¿SABÍAS QUÉ?

Un eclipse solar puede generar cambios en la ionosfera (densidad y temperatura de electrones, entre otras) debido a que su fuente principal de energía (el Sol) es bloqueada en forma temporal. La radiación ultravioleta de alta energía que proviene del Sol produce el efecto de fotoionización en las diferentes especies de materia en la atmósfera, generando partículas cargadas, principalmente electrones libres, las cuales forman una región estratificada llamada ionosfera, con sus características de densidad y temperatura de electrones e iones, así como la composición de otras especies y su dinámica. Al ocultarse el Sol ya no existe la fotoionización y ocurre el efecto de recombinación de las partículas, disminuye la densidad de electrones y las diferentes especies entran en equilibrio térmico.

Un ejemplo de ello ocurrió el 12 de noviembre de 1966 debido al eclipse total de Sol sobre Perú (observación del efecto de "anillo de diamante" al inicio y final), con oscuridad máxima promedio a las 08:10 horas, tal como lo muestran las mediciones del radar ionosférico del Radio Observatorio de Jicamarca ($11^{\circ}57'5''$ S, $76^{\circ}52'27.5''$ W, Lima-Perú) ubicado dentro de la trayectoria de máxima oscuridad del eclipse. Se observa la disminución gradual de la densidad de electrones y el aumento en la altura de máxima densidad desde el inicio (primera línea verde de la Figura 2a), pero un cambio abrupto en la temperatura de electrones al inicio del eclipse y

al terminar la oscuridad total (primera línea verde y segunda línea roja de la Figura 2b); estos son los mismos efectos que ocurren a diario durante la salida y puesta del sol.

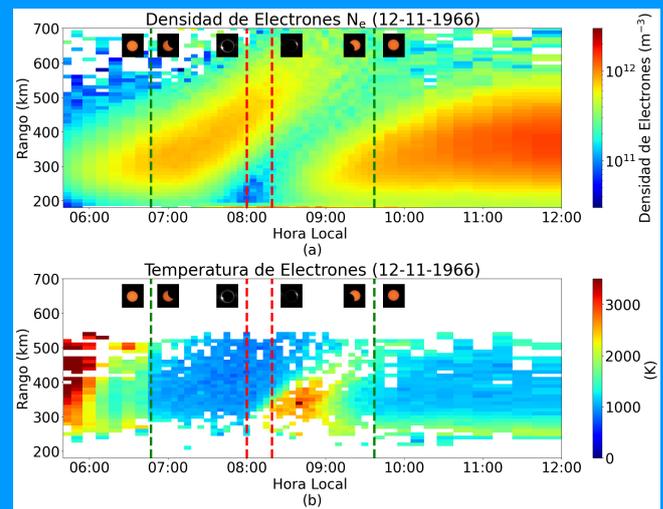


Figura 2. (a) Densidad de electrones. (b) Temperatura de electrones. Las líneas rojas representan la duración de 19 minutos del eclipse total sobre el Perú, mientras que las verdes indican el inicio y final de todo el eclipse sobre el Perú, la salida diaria del sol fue a las 05:33 horas. Los cuadros negros en ambas figuras representan las fases del eclipse.

1. Climatología del mes

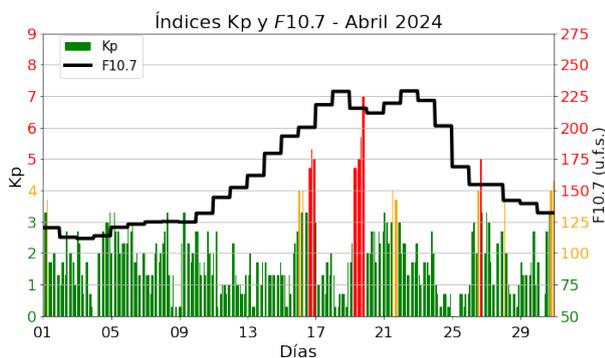


Figura 3. Valores de los índices Kp y F10.7 cm (u.f.s. = $10^{-22} \text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$) para el mes de abril. Extraídos de OMNIWeb [1].

La actividad geomagnética (índice Kp[2]) fue predominantemente tranquila en un 92% del tiempo, moderada en un 5% y alta en un 3%; por otro lado, la actividad solar (índice F10.7[3]) fue alta un 47% del tiempo y 53% moderada (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)[4], lo que se refleja en nuestras mediciones.

Para los meses cercanos al equinoccio de marzo (febrero, marzo, abril), en un régimen de actividad solar alta o moderada, se espera que la ocurrencia de F-Dispersa sea mayor para el intervalo de tiempo anterior a la medianoche, entre los 200 y 700 km de altura. Por otro lado, se espera una muy baja incidencia de eventos posteriores a la medianoche[5]. Las mediciones muestran una buena concordancia con la climatología. Asimismo, la climatología de abril para un régimen de actividad solar alta o moderada (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 17 m/s a las 11:00 horas. Posteriormente, estos valores disminuyen hasta 7 m/s a las 15:00 horas, cuando vuelven a incrementar temporalmente debido

al fenómeno de pre-reversal enhancement[6], hasta 25 m/s a las 18:00 horas, para finalmente decrecer hasta los -28 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 y las circundantes a la ocurrencia de pre-reversal enhancement.

Estudios climatológicos[7] indican que cerca a los meses del equinoccio de marzo los Ecos de 150 km aparecen alrededor de las 9 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 mínima altura de aparición de estos ecos fue menor en 10 km y que la máxima altura de aparición fue mayor en 5 km aproximadamente, mientras que el tiempo de aparición de estas irregularidades concuerda con la climatología.

2. Tormentas magnéticas

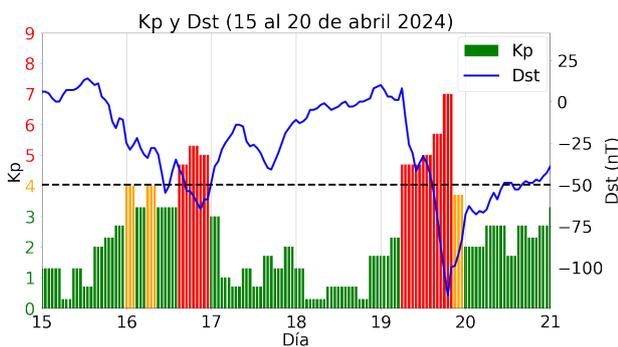


Figura 4. Índices geomagnéticos Kp y Dst del 15 al 20 de abril. Se aprecian las tormentas geomagnéticas de clase G1 y G3 ocurridas el 16 y 19 de abril respectivamente.

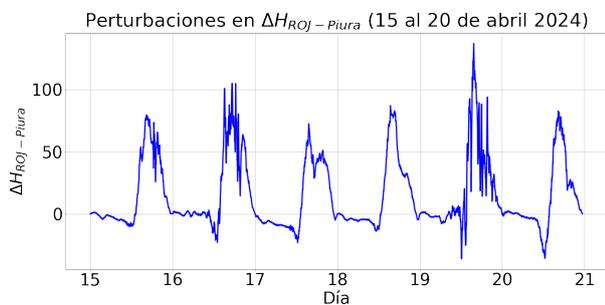


Figura 5. Perturbaciones en $\Delta H_{ROJ-Piura}$ debido a las tormentas geomagnéticas del 16 y 19 de abril.

La creciente actividad solar se manifestó en la ocurrencia de 2 tormentas geomagnéticas (Figura 4), las cuales produjeron perturbaciones en las mediciones de nuestros magnetómetros. La primera aconteció el

16 de abril, de intensidad G1, fue causada por una eyección de masa coronal (CME) emitida el 12 de abril[8] y cuyo valor de Dst sobrepasó los -60 nT. La segunda tormenta, de intensidad G3, ocurrió el 19 de abril y el valor de Dst asociado alcanzó los -120 nT. Ambas tormentas produjeron variaciones en los magnetómetros del Radio Observatorio de Jicamarca, sede del Instituto Geofísico del Perú (IGP-ROJ) y se evidenció en la perturbación de $\Delta H_{ROJ-Piura}$ durante ambos días, como se puede apreciar en la Figura 5.

3. Observaciones de la alta atmósfera con radares

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 6. 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 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 18:00 horas conocido como pre-reversal enhancement[6], con valores cercanos a los 19 m/s. Finalmente, los valores predichos por el modelo de Scherliess-Fejer exhiben una moderada concordancia con las mediciones, siendo la mayor discrepancia de 16 m/s a las 19:30 horas.

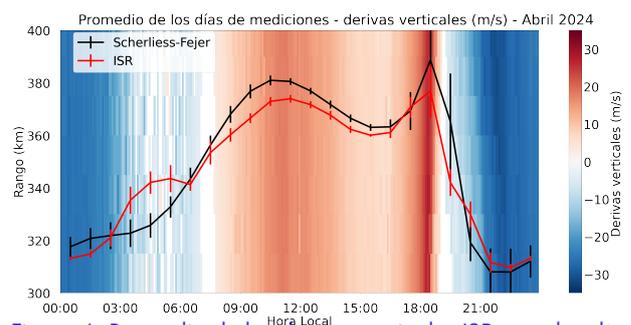


Figura 6. Promedio de las derivas verticales ISR para los días de abril. La curva roja representa el promedio en alturas entre los 300 km y 400 km y la curva negra, las predicciones del modelo de Scherliess-Fejer.

Por otro lado, se realizaron 25 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 7 que los ecos empiezan minutos antes de las 09:00 horas, que desaparecen pasadas las 15:00 horas y que están contenidos entre los 130 km y los 170 km de altura, lo que concuerda moderadamente con lo predicho por la climatología.

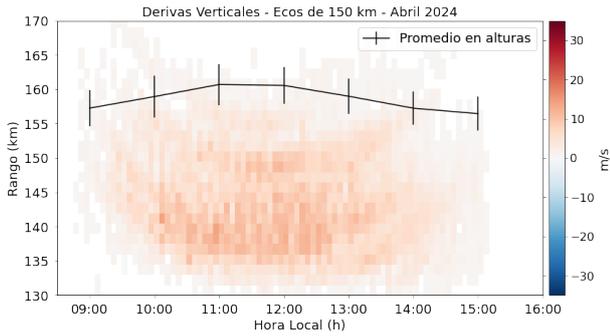


Figura 7. Promedio de las derivas verticales de los Ecos de 150 km.

Asimismo, se realizaron 10 noches de mediciones con el sistema de radar AMISR-14[9], periodo durante el cual se observó la presencia de 7 irregularidades en la Capa F, entre los 200 km y 800 km de altura. La morfología dominante fue la del tipo Bottom-type, con un 72% de ocurrencia, secundada por los tipos Bottomside y Pluma de Radar, con 14% cada uno, como se aprecia en la Figura 8. Estas observaciones concuerdan con lo señalado por la climatología (realizada con el modo JULIA)[5]. Además, el sistema de radar JULIA-MP funcionó durante 27 noches, durante las cuales se detectaron 18 irregularidades entre los 200 km y los 850 km, siendo la más frecuente la morfología del tipo Bottom-type, con 78%, seguida por Bottomside, con 17% y Pluma de Radar, con 5%, como se aprecia en la Figura 9. Las observaciones de ambos sistemas concuerdan con lo señalado por la climatología (realizada con el modo JULIA)[10].

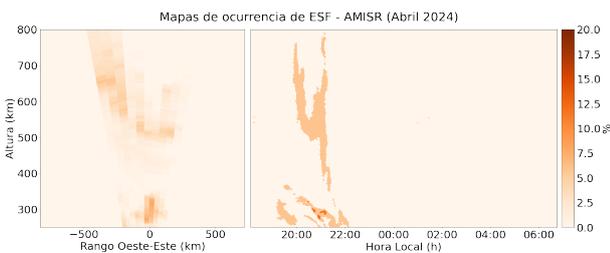


Figura 8. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el sistema AMISR-14. Derecha: Mapa de ocurrencias tradicional. Izquierda: mapa de ocurrencias polar.

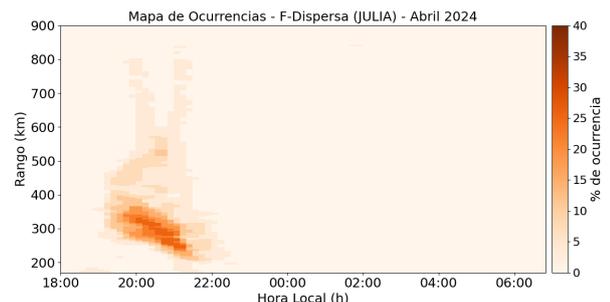


Figura 9. Mapa de ocurrencias de F-Dispersa con el sistema JULIA MP

El promedio en tiempo y altura de los vientos zonales y meridionales para el mes de abril, como se aprecia en la Figura 10, 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 +4.8 m/s a las 13:30 horas y el promedio mínimo de -42.3 m/s a la 01:30 horas, mientras que el valor del viento meridional promedio máximo fue de +57.9 m/s a las 18:30 horas y el promedio mínimo de -76.7 m/s a las 03:00 horas. El viento zonal máximo fue de +139.7 m/s a las 08:15 horas del día 26 de abril y el mínimo -97.3 m/s a las 19:15 horas del día 10 de abril, mientras que el viento meridional máximo fue +112.2 m/s a las 16:45 horas del día 08 de abril y el mínimo -132.5 m/s a las 03:15 horas del día 17 de abril.

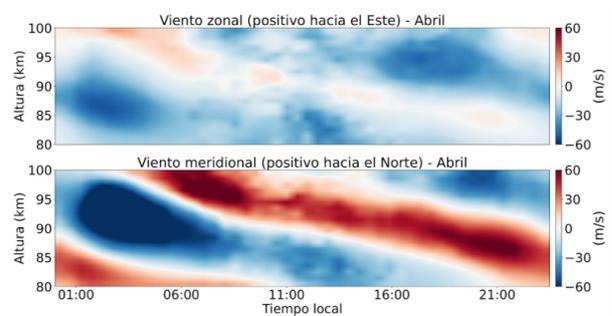


Figura 10. Promedio de los vientos zonales y meridionales durante el mes de abril del 2024.

4. Observaciones con la red de instrumentos LISN

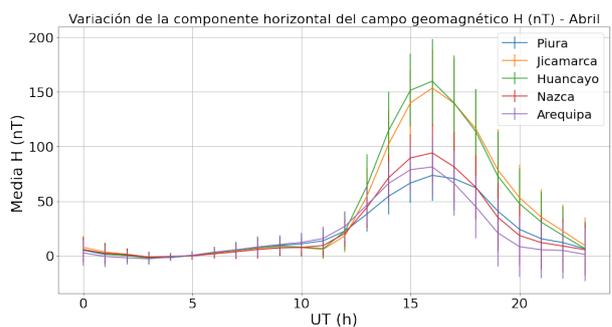


Figura 11. Valores del promedio horario de la variación diurna de H para todas las estaciones magnéticas operativas durante el mes de abril del 2024.

Las mediciones de la variación diurna de la componente horizontal del campo geomagnético (H) de las estaciones magnéticas del IGP-ROJ se presentan en la Figura 11. 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 (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: Piura, 74 nT; Huancayo, 160 nT; Jicamarca, 154 nT; Arequipa, 81 nT y Nazca, 94 nT.

5. Conclusiones

- Se registraron 2 tormentas geomagnéticas el 16 y 19 de abril que perturbaron el campo geomagnético lo cual se evidenció en la disminución del índice Dst que llegó hasta los -120 nT así como en la perturbación de $\Delta H_{ROJ-Piura}$.
- Se observó la disminución en la variación diurna de la componente horizontal campo geomagnético en todas las estaciones del IGP-ROJ posiblemente por el eclipse total acontecido el 8 de abril.

6. Referencias

- [1] N. Papitashvili, "OMNIWeb Data Explorer," Oct 2020, Accessed on: Mar. 16, 2023. [Online]. Available: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>
- [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. L. Chau and E. Kudeki, "Statistics of 150-km echoes over jicamarca based on low-power vhf observations," *Ann. Geophys.*, p. 1305–1310, 2006.
- [8] "Cme impact sparks g2 - moderate geomagnetic storm.gnetism," <https://watchers.news/2024/03/04/cme-impact-sparks-g2-moderate-geomagnetic-storm>.
- [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] "Geostationary operational environmental satellites - r series," Mar. 2024, [Online; accessed 14 Mar. 2024]. [Online]. Available: <https://www.goes-r.gov>

Elaborado por:

Bach. Juan Pablo Velásquez Ormaeche
 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