



LA ALTA ATMÓSFERA SOBRE EL PERÚ

AGOSTO 2020



El Instituto Geofísico del Perú (IGP), a través de su sede científica del Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ), realizó el monitoreo de eventos de fenómenos físicos de la alta atmósfera sobre el Perú gracias a su sistema de radar ionosférico. Este mes se han realizado observaciones de irregularidades ionosféricas conocidas como Ecos de 150 km durante horas del día que ocurren entre los 130 km y 170 km de altura con ecos de forma típica de "collar", entre las 09:00 y 17:00 horas como se aprecia en la [Figura 1](#). Estas mediciones proporcionan la ventaja de permitirnos estimar los valores de las derivas verticales de iones de manera más continua usando otras técnicas como las de radar incoherente. Sus magnitudes se encuentran entre los 10 a 20 m/s y se observa su valor máximo entre las 11:00 y 13:00 horas. Además, se ha encontrado una gran variabilidad diaria en los valores de las derivas verticales. Durante la noche, se detectó la presencia de estructuras o burbujas de plasma conocidas como el fenómeno de F dispersa y se realizó la identificación de los tipos según su morfología. De las 24 noches de toma de datos, se detectaron 19 burbujas de plasma, de ese total 10 fueron plumas de radar. En comparación a los meses anteriores, se observa una mayor ocurrencia de eventos antes de la medianoche y alturas menores de 400 km. Asimismo, se muestran las mediciones del campo magnético terrestre obtenidas con los instrumentos denominados magnetómetros, así como la variación de parámetros característicos de la ionósfera mediante las mediciones con la ionosonda. Estas mediciones nos indican que la frecuencia crítica de la ionósfera se encuentra entre los 3 MHz y 8 MHz y que la altura de densidad máxima de plasma se encuentra entre los 160 km y los 375 km. Este comportamiento también se observó los meses anteriores. Los magnetómetros registraron las máximas variaciones del promedio mensual por cada estación: 90 nT para Jicamarca, 85 nT para Huancayo, 57 nT para Nazca, 45 nT para Arequipa y 42 nT para Piura.

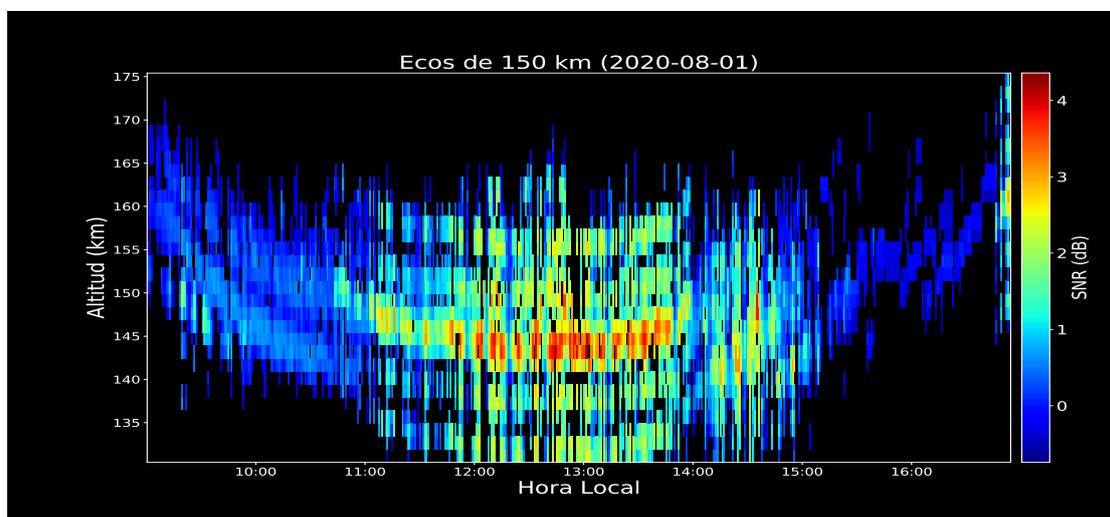


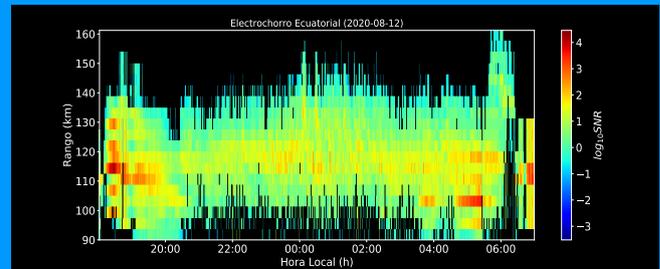
Figura 1. Evento representativo de Ecos de 150 km detectados con el radar principal el 01 de agosto. Se puede apreciar que exhiben su característica forma de "collar".

¿SABÍAS QUÉ?

El electrochorro ecuatorial es un flujo de cargas eléctricas centradas en el ecuador magnético y con una extensión de $\pm 2^\circ$ en latitud que orbita la Tierra sobre el ecuador magnético terrestre[7]. Se encuentra regularmente entre los 90 km y 130 km de altitud, tal como se muestra en la figura, y tiene una gran influencia sobre las mediciones de los magnetómetros ubicados a $\pm 5^\circ$ en latitud del ecuador magnético. Además, el electrochorro es un recurso natural que permite realizar comunicaciones de radio en la banda VHF[8].

El efecto combinado de vientos neutros y mareas atmosféricas ocasiona el flujo de corrientes entre los 100 km y 130 km de altitud. Este sistema de corrientes produce un campo eléctrico hacia el este de 0.5mV/ y

éste, a su vez, produce un campo eléctrico hacia arriba entre 5 a 10 veces más grande y es el responsable de las derivas verticales hacia arriba de 20 m/s (electrones con velocidad $v=ExB/B^2$) y del electrochorro ecuatorial.



Electrochorro ecuatorial observado durante la noche del 12 de agosto

1. Climatología esperada del mes

Este mes se detectaron estructuras de plasma de la actividad geomagnética y solar fue baja durante este mes (Figura 2). Una manera de cuantificar la actividad geomagnética y solar es mediante los índices geomagnéticos, como lo son Kp[1] y F10.7[2]. El Kp es un índice de actividad geomagnética global basado en observaciones de cada 3 horas de los magnetómetros ubicados por el mundo en diferentes latitudes y longitudes. Se considera actividad geomagnética baja para $Kp < 3,67$ [1]. El índice F10.7 es una medida del nivel de ruido causado por el Sol a la longitud de onda $\lambda = 10.7$ cm. Se considera que la actividad solar es baja cuando los valores de F10.7 son menores a los 75 s.f.u. y alta cuando este índice supera las 150 sfu (solar flux units = $10^{-22} \text{ x m}^{-2} \text{ x Hz}^{-1}$). Los valores registrados de los índices geomagnéticos por día del mes pueden verse en la Figura 2. Kp es menor a 4 y F10.7 es menor a 73 s.f.u. Ambos son los límites que enmarcan este periodo como actividad solar y geomagnética baja.

La climatología tanto de observaciones como de modelos empíricos (Scherliess-Fejer[3]), concluyen que las derivas verticales de plasma obtenidas de los Ecos de 150 km son predominantemente positivas durante el día (muy pocas veces toma valores negativos en la mañana y estos no bajan de los -10 m/s). La magnitud de las derivas verticales aumenta en la mañana, y alcanza su máximo valor entre las 10:00 y 12:00, hora local. El máximo de los valores promedio de las derivas verticales está alrededor de los 20 m/s y rara vez excede los 30 m/s.

Según investigaciones previas[4], para las condiciones geomagnéticas similares al mes de agosto, la

climatología de eventos de F dispersa esperada se puede describir como una mayor ocurrencia de eventos antes de la medianoche y a alturas menores a 400 km pero con presencia de irregularidades, asimismo después de la medianoche aunque con menor frecuencia.

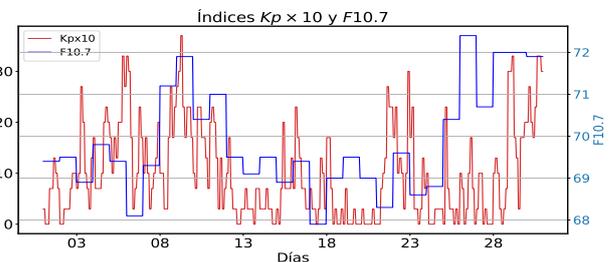


Figura 2. Índices geomagnéticos Kp(x10) y F10.7 muestran baja actividad geomagnética y solar durante el mes. Valores extraídos de [5].

2. Observaciones con el radar de Jicamarca

Mediante el modo de radar denominado JULIA que opera de manera automática se identificaron estructuras de plasma de Ecos de 150 km y de F-dispersa. Las primeras consisten en el reflejo de las señales emitidas por el radar a alturas entre los 130km y 170 km. Se caracterizan por conservar tanto una amplitud como una fase similar a las emitidas, lo que se conoce como dispersión coherente y de ahí el nombre del modo de operación del radar. Podemos ver un ejemplo de la forma típica de "collar" de las señales de Ecos de 150 km en la Figura 1, en función de hora local y altura. Las alturas mínimas detectadas por día se dieron en el rango de las 12:00 y 14:00 horas (130 km), mientras que las alturas máximas (178 km) se observan cerca a las 09:00 y 16:00 horas. La Figura 3 nos muestra el promedio mensual de las derivas verticales de los iones obtenidos de los

Ecos de 150 km con un rango de variación entre los 10 a 20 m/s. Estas se incrementan durante la mañana y logran su máximo valor entre las 11:00 y la 13:00 horas, donde la magnitud cercana a los 20 m/s coincide con la climatología esperada para el mes. Se obtuvo el promedio y la desviación estándar por cada hora. La ocurrencia de los Ecos de 150 km se indica en la Figura 4. La escala de colores indica la fracción de veces que un eco fue detectado en una región del espacio y en un intervalo de tiempo determinado. Se observa que la mayor ocurrencia de los ecos se encuentra entre los 130 km y 150 km y entre las 09:00 y las 17:00 horas.

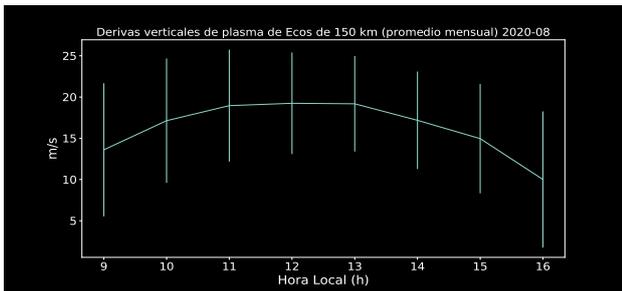


Figura 3. Promedio mensual y desviación estándar de las derivas verticales de plasma obtenido de los Ecos de 150 km.

La morfología dominante de las estructuras del tipo F-dispersa fue la del tipo pluma de radar. Mediante el modo de radar denominado JULIA, se observaron burbujas de plasma de los tres tipos más comunes y dos eventos que no entran en esas categorías, de acuerdo a su morfología[3]. Las estructuras de tipo pluma de radar se caracterizan por extenderse desde la parte baja de la ionósfera (cerca a los 200km) hasta alturas por encima del valor máximo de la densidad de la ionósfera, que se ubica alrededor de los 350 km. En la Figura 4 se muestra un evento representativo de tipos de pluma de radar del 23 al 24 de agosto. En este caso llega a ascender hasta los 700 kilómetros de altura. Se encontraron burbujas de plasma para 18 de los 24 días. Se observaron 19 tipos de burbujas de 4 morfologías: 10 Plumitas de Radar (53%), 4 Bottom-type (21%), 3 Bottomside (16%) y 2 de una morfología diferente (10%) (Figura 5). Todas las burbujas empezaron entre las 20 horas y las 00:30 horas (Figura 6), con mayor incidencia entre las 20:30 horas y las 22:30 horas (78%).

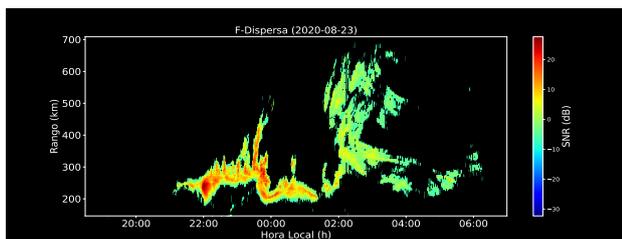


Figura 4. Pluma de Radar observada entre la noche del 23 y la madrugada del 24 de agosto.

Se observaron duraciones diversas de las burbujas de plasma (de 45 minutos a 9 horas) donde más del 56% de las burbujas duró entre 45 minutos y 3 horas (Figura 7). Esto muestra que hubo predominancia de las plumas de radar, pero fueron de menor duración en comparación a los meses de junio y julio.

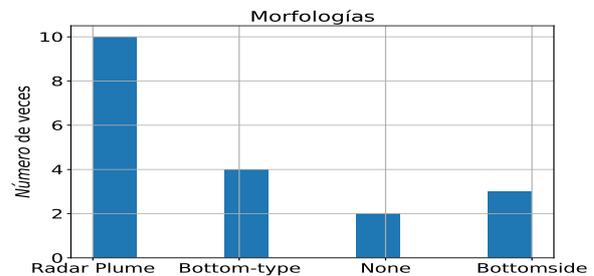


Figura 5. Morfologías para agosto: 10 plumas de radar (53%), 4 Bottom-type (21%), 3 Bottomside (16%) y 2 de una morfología diferente (10%).

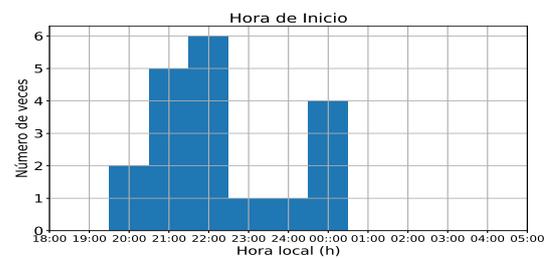


Figura 6. Hora de inicio de las burbujas (hora local) para el mes de agosto, entre las 20 horas y las 00:30 horas, con mayor incidencia entre las 20:30 horas y las 22:30 horas (78%).

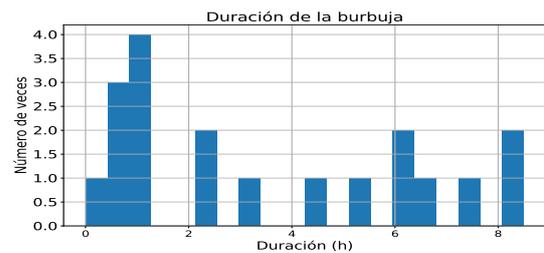


Figura 7. La duración de las burbujas para este mes fue de entre 45 minutos a 9 horas. Más del 56% de las burbujas duró entre 45 minutos y 3 horas. Solo cerca del 32% de las burbujas son plumas de radar de extensión de tiempo prolongado (entre 6 a 9 horas).

3. Observaciones con la red de instrumentos LISN

La red LISN (Low-Latitude Ionospheric Sensor Network) es un observatorio distribuido en Sudamérica conformado por múltiples instrumentos que monitorean la alta atmósfera en la región ecuatorial. Este esfuerzo colaborativo internacional comprende la utilización de instrumentos como magnetómetros, ionosondas y receptores GPS.

El magnetómetro y la ionosonda del ROJ operaron todo el mes.

Los magnetómetros de diferentes estaciones detectaron una gran variabilidad diaria y valores altos, medidos por la estación del ROJ, en comparación a las demás estaciones (Figura 8). Se estimaron las máximas variaciones del promedio mensual por cada estación (Jicamarca, Huancayo, Nazca, Arequipa y Piura). Además, se realizó un seguimiento a los parámetros ionosféricos como la frecuencia crítica f_oF2 y la altura de la densidad máxima de plasma (h_mF2), medidos por la ionosonda y se encontró que f_oF2 toma valores entre los 3 MHz y 8 MHz (Figura 9), pero los valores promedio de la altura de la densidad máxima están entre los 160 km y 375 km, en promedio 50 km más bajos que los predichos por la simulación (Figura 10). Este comportamiento también fue observado el mes anterior.

a. Magnetómetros

Los magnetómetros son instrumentos que miden el campo magnético de la Tierra en sus 3 componentes vectoriales. Las estaciones magnéticas del IGP operaron todos los días del mes. Se compararon las mediciones de la componente horizontal del campo geomagnético H de las estaciones de Jicamarca, Huancayo, Nazca, Arequipa y Piura. El procedimiento consiste en calcular un promedio mensual de H. Primero se calcula el promedio diario de H para todas las horas y un promedio nocturno para cada día en cada estación y el promedio nocturno es restado a las mediciones de todo el día. Esta es una práctica común para comparar valores de H de diferentes estaciones. Además, esta técnica nos muestra la variabilidad diaria de H. Se puede apreciar, en la Figura 8, que el promedio de H registrado en el ROJ está muy por encima de las otras estaciones, solo cercano al de la estación de Huancayo, y esto puede deberse a que ambas se encuentran en el ecuador magnético y son afectadas por el campo magnético producido por el Electrochorro Ecuatorial.

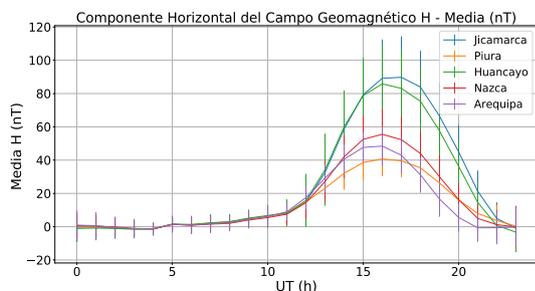


Figura 8. Valores promedio mensuales por hora para todas las estaciones operativas durante el mes. Se aprecia una gran variabilidad diaria una vez que se sustrae el promedio de las mediciones nocturnas. Esta es una práctica común para aislar los efectos debidos únicamente al comportamiento diurno del componente horizontal del campo geomagnético.

Podemos ver que estas curvas tienen formas similares una vez que se aíslan los efectos diurnos.

Se obtuvieron las máximas variaciones del promedio mensual por cada estación: 90 nT para Jicamarca, 85 nT para Huancayo, 57 nT para Nazca, 45 nT para Arequipa y 42 nT para Piura.

b. Ionosonda

La ionosonda es un sistema de radar que nos permite medir parámetros de señales reflejadas en la ionósfera realizando barridos en frecuencia de señales de radio. Esto permite estudiar el comportamiento de la ionósfera como la identificación del valor máximo de densidad de plasma y de su correspondiente variación en altura. Se observaron los parámetros de la frecuencia crítica (f_oF2) —frecuencia máxima a la que se reciben los ecos reflejados de la capa F de la ionósfera— y de la altura de la densidad máxima (h_mF2) de la capa F de la ionósfera. La estación de Jicamarca genera registros de las mediciones cada 15 minutos. Estos resultados del mes se compararon con el modelo IRI2016[6], un modelo paramétrico de la ionósfera basado en mediciones de múltiples instrumentos alrededor del planeta.

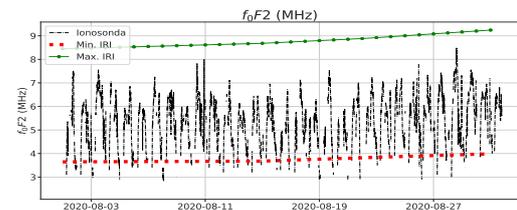


Figura 9. Valores promedio del parámetro f_oF2 para el mes de agosto comparados con las estimaciones de IRI2016.

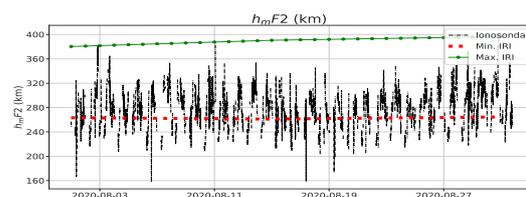


Figura 10. Valores promedio del parámetro h_mF2 para el mes de agosto. Gran discrepancia con los valores estimados por IRI2016.

Los valores del parámetro f_oF2 , medidos por la ionosonda, se encuentran entre los límites predichos por el modelo IRI2016 (Figura 9), que es aproximadamente entre los 3 MHz y 8 MHz, pero los valores promedio de la altura de la densidad máxima son al menos 50 km más bajos que los de la simulación (Figura 10), de tal manera que incluso son muy cercanos a los valores del límite mínimo obtenido del modelo. El rango de variación de h_mF2 se observa entre 160 km y 375 km. Un comportamiento similar también fue observado el mes anterior.

4. Conclusiones

- Este mes se observaron ecos de 150 km de 14 días de datos disponibles obtenidos con el radar. Estos ecos se observan aproximadamente entre los 130 km y 170 km de altura con su forma típica de "collar" y entre las 09:00 y 17:00 horas donde el mayor rango de alturas se presenta entre los 130 km y 165 km. El promedio mensual de las derivas verticales de iones obtenidos de los Ecos de 150 km durante el día coinciden con lo que se espera de la climatología con magnitudes entre los 10 a 20 m/s y con su valor máximo entre las 11:00 y 13:00 horas. El tamaño de las barras de desviación estándar refleja la gran variabilidad diaria de los valores de las derivas verticales (en el orden de los 15 m/s).
- La predominancia de las burbujas de plasma fueron de tipo pluma de radar. En promedio, los eventos muestran un comportamiento similar a la climatología correspondiente a agosto en mínimo solar, con mayor ocurrencia de eventos antes de la medianoche y a alturas menores de 400 km. El 78% de burbujas de plasma inició entre las 20:30 y las 22:30 horas mientras que el 56% de los eventos se observaron con duraciones que varían entre 45 minutos y 3 horas. Sólo el 32% de eventos dura entre 6 a 9 horas.
- Las observaciones con la ionosonda muestran que la frecuencia crítica de la ionósfera se encuentra entre los 3 MHz y 8 MHz y que la altura de densidad máxima de plasma se encuentra entre los 160 km y los 375 km.
- Se obtuvieron mediciones de las variaciones del campo magnético horizontal con magnetómetros y se registraron las máximas variaciones del promedio mensual por cada estación: 90 nT para Jicamarca, 85 nT para Huancayo, 57 nT para Nazca, 45 nT para Arequipa y 42 nT para Piura.

5. Referencias

- [1] The Kp-index | Help," Oct 2020. [Online]. Available: <https://www.spaceweatherlive.com/en/help/the-kp-index>". [Accessed: Oct. 19, 2020].
- [2] F10.7 cm Radio Emissions | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center," Jul. 2020. [Online]. Available: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radio-emissions>. [Accessed: Jul. 01, 2020].
- [3] F. S. Rodrigues, J. M. Smith, M. Milla and R. A. Stoneback, "Daytime ionospheric equatorial vertical drifts during the 2008–2009 extreme solar minimum", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 120, no. 2, pp.1452–1459, 2015. [Online]. Available:<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014JA020478>.
- [4] D.L. Hysell, J. D. Burcham. Long term studies of Equatorial spread F using the JULIA radar at Jicamarca. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 64, no. 10, pp 1531-1543, 2002.
- [5] N. Papitashvili, "OMNIWeb Data Explorer," Oct. 2020. [Online]. Available: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>. [Accessed: Jul. 01, 2020].
- [6] "iri2016," Oct 2020, [Online]. Available: <https://pypi.org/project/iri2016>. [Accessed: Jul. 01, 2020].
- [7] M. C. Kelley, "Chapter 3 - electrodynamics of the equatorial zone", in *The Earth's Ionosphere*, Ed. Academic Press, 1989, pp. 65 – 111.
- [8] N. P. Yoza, M. A. Milla, J. L. Chau and R. F. Alonso, "VHF voice and data communications via Equatorial Electrojet scattering: Channel characterization and application of a frequency diversity technique using Software Defined Radio technology," 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul, 2011, pp. 1-1, doi: 10.1109/URSIGASS.2011.6051050.

Elaborado por:

Bach. Juan Pablo Velásquez Ormaeche
Dr. Edgardo Pacheco Josan

Diseño y diagramación:

Bach. Shermely Moyna Rendón

Colaboradores:

Mag. Karim Kuyeng Ruiz
Dr. Marco Milla Bravo

Contacto:

roj@igp.gob.pe