



Investigaciones sobre la alta atmósfera terrestre mediante radares ionosféricos

Research on the Earth's upper atmosphere using ionospheric radars

Presentación: 08/09/2024

Yamila Daniela Melendi

Universidad Nacional del Sur (UNS), IFISUR, TSWC
yamila.melendi@uns.edu.ar

Trinidad Duran

Universidad Nacional del Sur (UNS), IFISUR
trinidad.duran@uns.edu.ar

Marcos Fabián Paz

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán (FACET-UNT), TSWC
mfpaz@herrera.unt.edu.ar

Lorenzo De Pasquale

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca (UTN-FRBB)
pasquale@frbb.utm.edu.ar

Maria Graciela Molina

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán (FACET-UNT), TSWC, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)
gmolina@herrera.unt.edu.ar

Resumen

Este trabajo describe el funcionamiento y aplicaciones de la ionosonda AIS-INGV instalada en la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca (UTN-FRBB). Se utiliza para monitorear la ionosfera en tiempo real, a través de la generación de ionogramas que permiten estimar parámetros ionosféricos característicos (foF_1 , foF_2 , $MUF(3000)$, Es , $h'Es$, entre otros). Debido a que la ionosfera es el medio efectivo por el cual se propagan las señales y ondas de radio HF, su estudio resulta vital para los sistemas de comunicación. A través de los ionogramas, se han identificado numerosos eventos de "Spread F" y perturbaciones ocasionadas por la llegada de tormentas geomagnéticas al entorno terrestre. Además, presentamos el uso de los datos para la elaboración de reportes semanales de meteorología espacial, los cuales se suman a una descripción que incluye información del Sol, viento solar y campo magnético interplanetario, así como también la comparación de las condiciones de los parámetros ionosféricos locales respecto de otras regiones.

Palabras clave: Ionosonda, Telecomunicaciones, Meteorología del Espacio, parámetros ionosféricos.

Abstract

This work describes the operation and applications of the AIS-INGV ionosonde installed at the National Technological University, Bahía Blanca Regional Faculty (UTN-FRBB). It is used to monitor the ionosphere in real-time by generating ionograms that allow the estimation of characteristic ionospheric parameters (foF_1 ,



foF₂, MUF(3000), Es, h'Es, among others). Since the ionosphere is the effective medium through which HF radio signals and waves propagate, its study is vital for communication systems. Through ionograms, numerous "Spread F" events and disturbances caused by the arrival of geomagnetic storms to Earth's environment have been identified. Additionally, we present the use of the data for the preparation of weekly space weather reports, which include a description of the Sun, solar wind, and interplanetary magnetic field, as well as a comparison of local ionospheric conditions with those of other regions.

Keywords: Ionosonde, Telecommunications, Space Weather, Ionospheric parameters.

Introducción

La ionósfera es la región de la atmósfera terrestre que contiene una alta concentración de iones y electrones, situada aproximadamente entre los 50 y 1000 km de altitud (Zolesi & Cander, 2014). Esta capa afecta la propagación de ondas de radio, siendo un área de investigación crucial para las telecomunicaciones. El radar ionosférico (también conocido como sondador ionosférico) es un radar HF pulsado que permite estimar la altura virtual de las diferentes capas ionosféricas. En particular, en este trabajo presentamos resultados del sondador instalado en inmediaciones de la facultad FRBB en su sede de calle Montevideo (que es parte también del Tucumán Space Weather Center), permite el monitoreo continuo de esta región mediante la emisión de pulsos de alta frecuencia (1-20 MHz) y el análisis de las señales reflejadas. Contamos con datos de la estación ionosférica desde su instalación en el año 2016 hasta la actualidad (Figura 1).

Funcionamiento de la Ionosonda

La ionosonda es un radar HF que emite ondas electromagnéticas hacia la ionosfera. Cuando la frecuencia de la onda coincide con la frecuencia del plasma ionosférico, la señal se refleja, permitiendo estimar la altura y la densidad de electrones de la capa F2 (Rishbeth and Garriott, 1969). La información obtenida se organiza en gráficos, llamados ionogramas. Estos ionogramas se pueden escalar manualmente o mediante un escalado automático para obtener parámetros como la frecuencia crítica de las diferentes regiones de la ionosfera (foF₂, foF₁, ftEs) y la máxima frecuencia usable (MUF).

La ionosonda AIS-INGV de Bahía Blanca está compuesta por tres componentes principales. El transmisor emite señales electromagnéticas codificadas hacia la ionosfera mediante un barrido de frecuencias (1-20 MHz), donde las ondas interactúan con las capas ionizadas. El receptor se encarga de captar las señales reflejadas, permitiendo el análisis de las propiedades de la ionosfera. Finalmente, el sistema de procesamiento convierte estas señales en ionogramas, gráficos que muestran la relación entre la altura virtual y la frecuencia, a partir de los cuales se calculan los parámetros ionosféricos. En particular, la ionosonda instalada en Bahía Blanca cuenta con un escalado automático, cuya ventaja resulta en la optimización del tiempo tanto del operador para procesar los datos, como de la obtención de los mismos por parte de los usuarios. Además, los parámetros obtenidos mediante el programa de escalado automático minimizan el error de medición del operador. Presenta una resolución de sondeo de 10 minutos, opera las 24 horas del día y comparte sus datos con redes internacionales de estaciones ionosféricas (Figura 1).



Figura 1: Radar ionosférico ubicado en FRBB sede Montevideo.



Desarrollo

Aplicaciones de los Datos

Los datos obtenidos por la ionosonda se emplean semanalmente para la elaboración de reportes de clima espacial. Estos informes incluyen el estado solar, donde se analiza el número de manchas solares, flujo de electrones, protones, rayos X y la actividad solar reciente; el medio interplanetario, que abarca la velocidad, temperatura y densidad del viento solar, así como el comportamiento del campo magnético interplanetario. Además, se examina el entorno terrestre, monitoreando índices geomagnéticos como K_p y K_{sa}, los cuales nos dan cuenta del grado de perturbación magnética tanto a escala global como sudamericana respectivamente, medidos en niveles que van del 0 (para nula actividad magnética) hasta 9 (máxima perturbación magnética) (Matzka et. al., 2021). Otro índice geomagnético reportado es el D_{st} el cual describe la intensidad de la corriente anillo en la región ecuatorial. También se reporta el campo magnético terrestre registrado en estaciones ubicadas en Pilar (Córdoba) y Tucumán. Finalmente, se evalúa la ionosfera local a través del análisis de parámetros como f₀E, f₀F₁, f₀F₂, M(3000)F₂ y MUF(3000)F₂, junto con la detección de eventos ionosféricos significativos, tales como absorción ionosférica (relacionada con posibles tormentas geomagnéticas) y el fenómeno de Spread-F. En la actualidad, estos reportes se realizan on-demand para quienes lo requieran, siendo solicitados a través de mail (tswc@herrera.unt.edu.ar). Entre los usuarios beneficiados por dichos reportes se encuentran principalmente científicos y radioaficionados. Además, estamos aguardando la inauguración de un centro latinoamericano de clima espacial, que nos permitirá unirnos a una red de reportes que dará mayor alcance a nuestro trabajo.

En las Figuras 2, 3, 4, y 5 se observan, respectivamente, diferentes parámetros críticos de la ionosfera. La Figura 1 muestra la f₀E, que es la frecuencia crítica de la capa E esporádica, la cual indica la máxima frecuencia a la que una onda de radio puede ser reflejada por la capa E sin atravesar. La Figura 2 presenta la f₀F₁, que corresponde a la frecuencia crítica de la capa F₁, una capa intermedia de la ionosfera que aparece durante el día y es crucial para la propagación de ondas de radio a media distancia. En la Figura 3, se observa la f₀F₂, la frecuencia crítica de la capa F₂, la capa más alta y densa, fundamental para las comunicaciones a larga distancia. Por último, la Figura 4 muestra el MUF(3000)F₂, la máxima frecuencia usable para comunicaciones de 3000 km a través de la capa F₂. Durante la noche las capas F₁ y F₂ se recombinan en una única capa F, la capa E también desaparece. Sólo la capa esporádica E puede aparecer transitoriamente junto a la F durante la noche.

En cada uno de estos gráficos, los valores observados se comparan con la mediana de los últimos 27 días y con la mediana de los últimos 5 días, lo que permite identificar desviaciones o anomalías en las condiciones ionosféricas recientes y pasadas, importantes para la predicción de la propagación de ondas de radio.

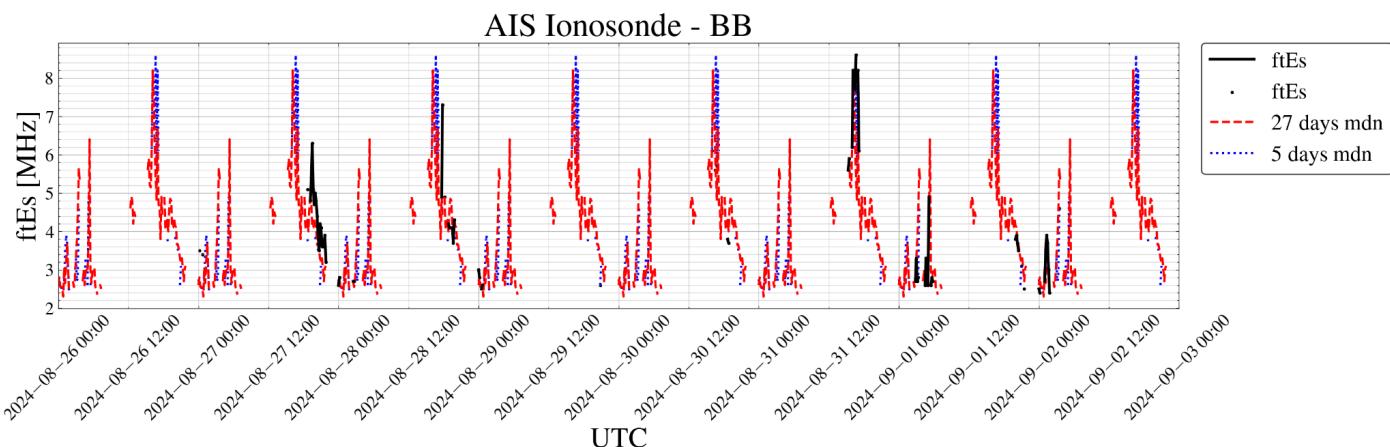


Figura 2: Parámetro ionosférico foEs

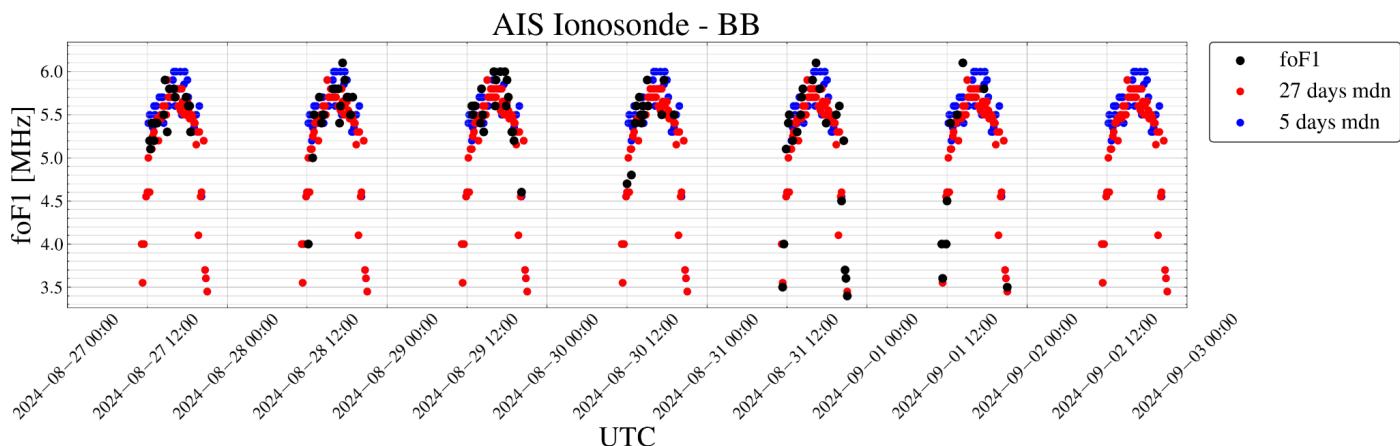


Figura 3: Parámetro ionosférico foF1

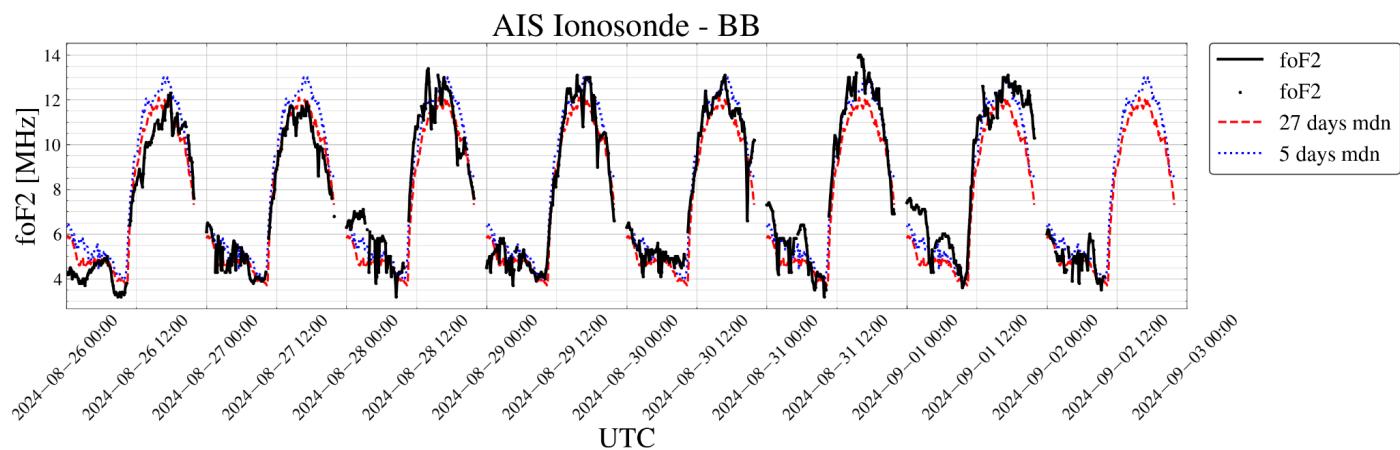


Figura 4: Parámetro ionosférico foF2

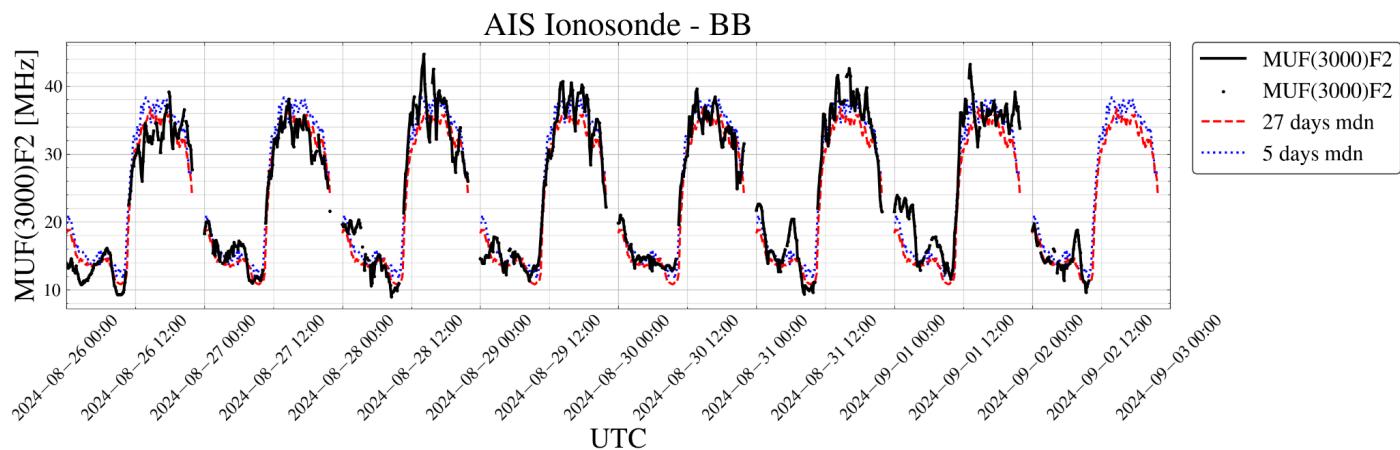


Figura 5: Parámetro ionosférico MUF(3000)F2

En la Figura 6 se muestra un ionograma capturado durante las horas del día, donde se puede observar una mayor ionización en las capas superiores de la ionosfera debido a la radiación solar, lo que genera reflexiones más intensas y frecuentes. En la Figura 7, correspondiente a las horas de la noche, se observa una disminución en la ionización, especialmente en las capas más bajas, debido a la ausencia de radiación solar directa, lo que provoca una reducción en las reflexiones de alta frecuencia.



En la Figura 8, se presenta el fenómeno de Spread F, que se caracteriza por una dispersión en las reflexiones ionosféricas, lo que indica una irregularidad en la distribución de electrones en la capa F2 (Materassi M. et al, 2019). Este fenómeno suele estar asociado a burbujas de plasma y puede afectar las comunicaciones de radio de alta frecuencia, ya que provoca una distorsión en la propagación de las señales.

Finalmente, en la Figura 9, se observa un ionograma que muestra absorción total de las señales, causada por una tormenta geomagnética extrema ($K_p=9$) la cual comenzó el 10 de mayo de 2024 prolongándose por más de 24 hs. Durante este tipo de eventos, el aumento en la actividad geomagnética genera perturbaciones en la ionosfera, lo que provoca que las señales de alta frecuencia no se reflejen adecuadamente, siendo completamente absorbidas en capas inferiores, lo que interrumpe las comunicaciones trans-ionosféricas.

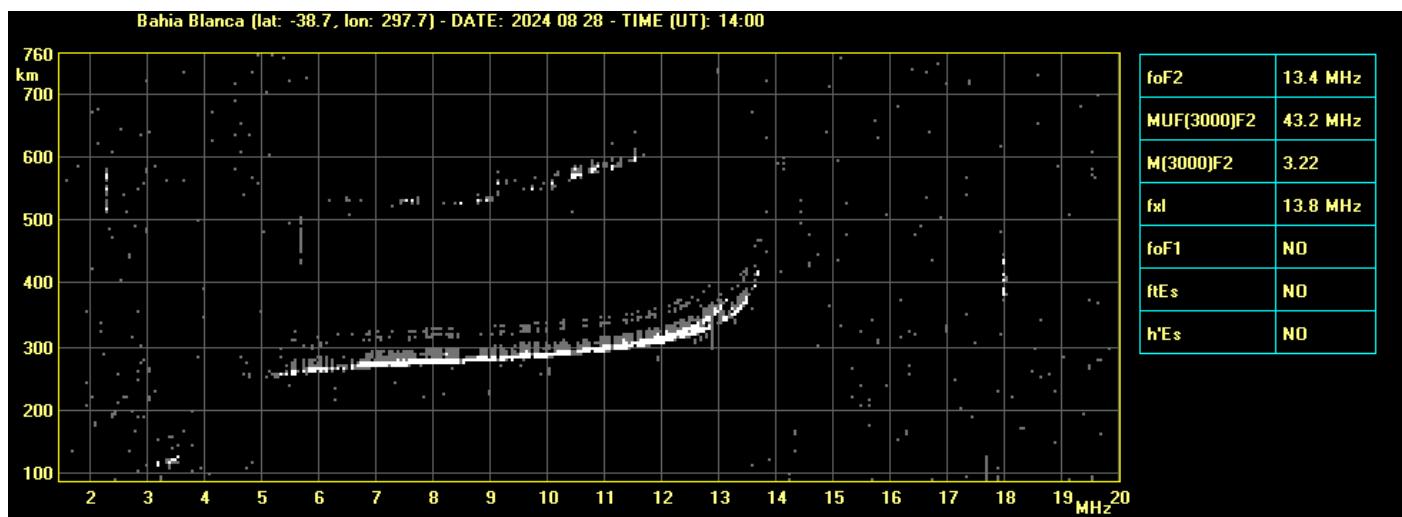


Figura 6: Ionograma en horas del día

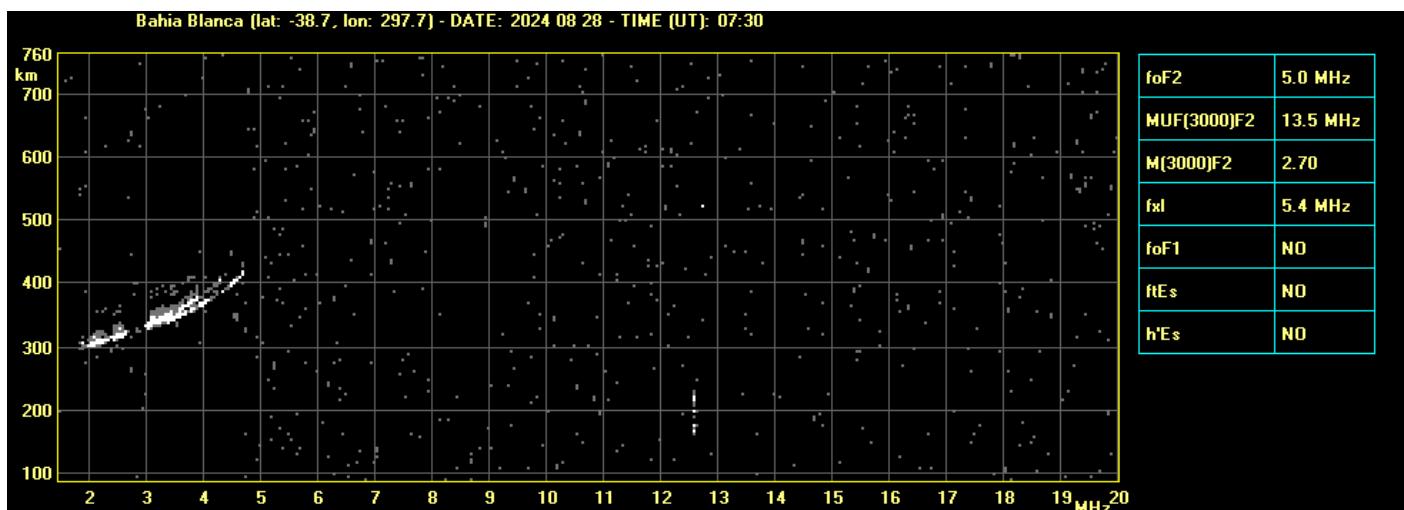


Figura 7: Ionograma en horas de la noche

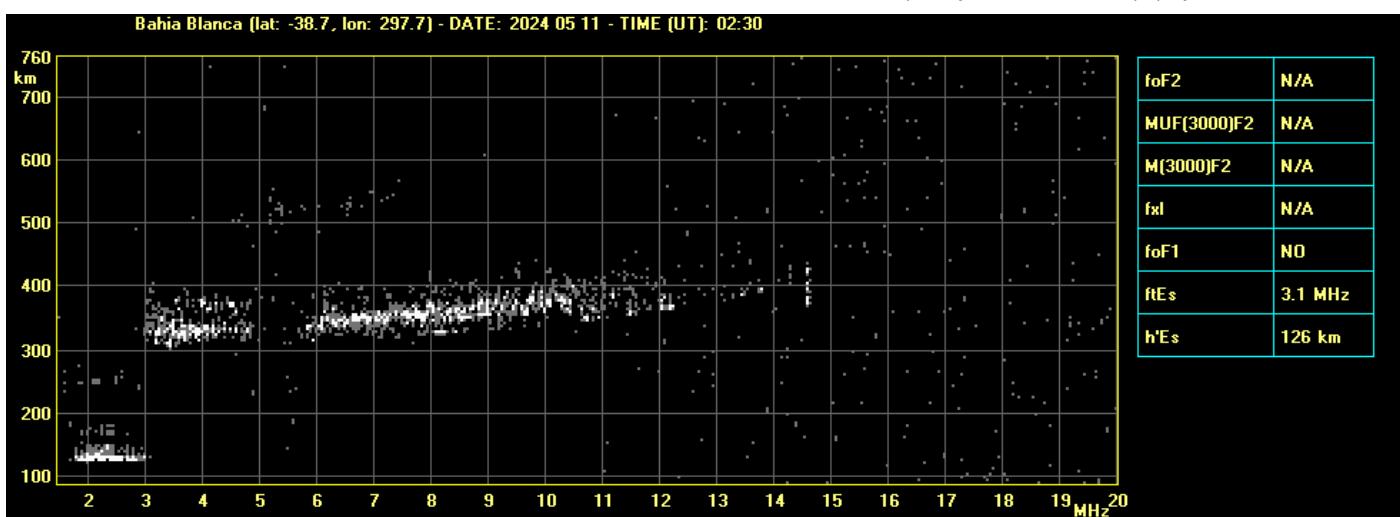


Figura 8: Ionograma con fenómeno de Spread-F.

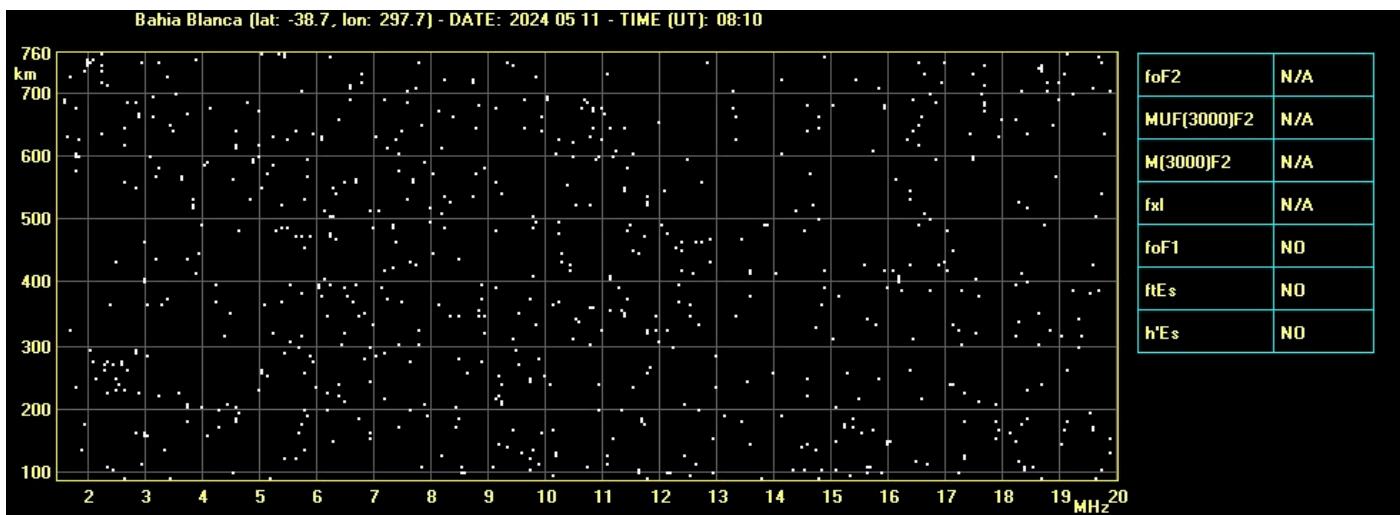


Figura 9: Ionograma con absorción total debido a tormenta geomagnética

Conclusiones

La ionosonda AIS-INGV instalada en la UTN-FRBB ha demostrado ser una herramienta fundamental para el monitoreo continuo y en tiempo real de la ionosfera sobre Bahía Blanca. A través de este estudio, hemos logrado establecer una base de datos ionosféricos consistente desde 2016, permitiendo análisis de las variaciones ionosféricas en la región. Además, hemos desarrollado un sistema de reportes semanales que integra datos solares, interplanetarios y terrestres, proporcionando una visión holística del clima espacial y su impacto en la ionosfera local.

Este trabajo ha permitido identificar y caracterizar fenómenos ionosféricos específicos como el Spread-F y las perturbaciones durante tormentas geomagnéticas, contribuyendo a una mejor comprensión de la dinámica ionosférica en latitudes medias. Asimismo, hemos establecido colaboraciones nacionales e internacionales, particularmente con el Tucumán Space Weather Center (TSWC) y el Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología (INGV) de Roma, fortaleciendo la red global de monitoreo ionosférico.

Estos logros tienen implicaciones significativas para diversos campos. En primer lugar, contribuyen a la mejora de las predicciones de propagación de ondas de radio HF, beneficiando directamente a los sistemas de comunicación. También representan un avance en la comprensión de la respuesta ionosférica a eventos de clima espacial en la región de Bahía Blanca. Además, nuestros datos aportan a los modelos globales de la ionosfera, mejorando su precisión en latitudes medias del hemisferio sur.

Mirando hacia el futuro, buscamos expandir nuestra red de colaboración para incluir más estaciones en Sudamérica, lo que permitirá un análisis regional más completo.



En conclusión, este trabajo no solo contribuye al conocimiento científico de la ionosfera, sino que también sienta las bases para aplicaciones prácticas que pueden mejorar significativamente las tecnologías dependientes de la propagación de ondas de radio. La continua operación y mejora de la ionosonda en Bahía Blanca promete seguir aportando valiosos datos e insights para la comunidad científica y tecnológica en los años venideros.

Agradecimientos

Los estudios presentados en este trabajo forman parte del Proyecto de Investigación y Desarrollo PID 10131. El grupo responsable de este proyecto pertenece a la UTN-FRBB y cuenta con la colaboración de diversas instituciones, como el Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología (INGV) de Roma, la Universidad Nacional del Sur (UNS), el Tucumán Space Weather Center (TSWC) y la Facultad Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán (FACET-UNT). Expresamos nuestro agradecimiento a estas instituciones por su apoyo y valiosas contribuciones, que han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- Materassi, M., Coster, A. J., Forte, B., & Skone, S. (2019). The dynamical ionosphere: A systems approach to ionospheric irregularity. Elsevier Masson. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01069-8>
- Matzka J., Stolle C., Yamazaki Y., Bronkalla O., and Morschhauser A., The Geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity, Space Weather. (2021) 19, no. 5, article e2020SW002641, <https://doi.org/10.1029/2020SW002641>.
- Rishbeth, H., & Garriott, O. K. (1969). Introduction to Ionospheric Physics. Academic Press.
- Zolesi, B., & Cander, L. R. (2014). Ionospheric prediction and forecasting. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38430-1>