



RNPS 2550      RNSW A1439  
**REVISTA CUBANA DE GEOMÁTICA**  
directorio **latindex**  
ISSN 3005 - 3390  
gcomatica.gcocuba.cu



**MODELACIÓN NUMÉRICA DEL CONTENIDO TOTAL DE ELECTRONES  
PRESENTE SOBRE EL TERRITORIO DE LA REPÚBLICA DE CUBA CON EMPLEO  
DE OBSERVACIONES GNSS**  
**NUMERICAL MODELING OF THE TOTAL ELECTRON CONTENT PRESENT OVER  
THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF CUBA USING GNSS OBSERVATIONS**

Ing. Ernesto Emilio Aguilar Leyva <sup>1</sup>

Dr. C. Anabel Reyes Ramírez <sup>2</sup>

Dr. C. Luis Enrique Acosta Gonzales <sup>3</sup>

1. Empresa GEOCUBA Oriente Norte, eleyva0816@gmailcom
2. Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya”, anabel.reyes.cu@gmail.com
3. Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya”, luis.acosta.glez@gmail.com

**RESUMEN**

La presente investigación aborda el tema de la modelación numérica del Contenido Total de Electrones (TEC) presente sobre el territorio de la República de Cuba, con empleo de observaciones GNSS. Para este fin, se compilaron observaciones GNSS de 24 horas correspondientes al día 214 (1 de agosto de 2024) provenientes de nueve estaciones ubicadas en territorio cubano y 13 estaciones aledañas. Dichas observaciones fueron procesadas mediante el software de uso científico *Bernese V 5.2* para la obtención de un modelo horario que compila en coeficientes armónicos esféricos los valores de TEC presentes sobre el territorio, durante el periodo de tiempo estudiado. Estos coeficientes fueron desarrollados mediante la herramienta de inteligencia artificial *DeepSeek Chat* para la obtención de los valores de TEC correspondientes a las estaciones empleadas. Tomando esta información para la elaboración de mapas que

representan la actividad ionosférica horaria, sobre el territorio de la República de Cuba. Se muestran los resultados obtenidos de los procesos ejecutados, así como, una síntesis de las herramientas empleadas. Concluyendo con la representación de forma gráfica de la actividad ionosférica presente sobre el territorio de la República de Cuba.

**Palabras clave:** Bernese; GNSS; ia; ionósfera; TEC

## **ABSTRACT**

This research addresses the numerical modeling of the Total Electron Content (TEC) over the territory of the Republic of Cuba using GNSS observations. For this purpose, 24-hour GNSS observations corresponding to day 214 (August 1, 2024) were compiled from 9 stations located within Cuban territory and 13 surrounding stations. These observations were processed using the scientific software Bernese V 5.2 to obtain an hourly model that compiles the TEC values over the territory during the studied period into spherical harmonic coefficients.

These coefficients were developed using the DeepSeek Chat artificial intelligence tool to obtain the TEC values corresponding to the stations used. This information was then used to create maps representing hourly ionospheric activity over the territory of the Republic of Cuba. The results obtained from the processes performed are shown, along with a summary of the tools used. The document concludes with a graphical representation of the ionospheric activity present over the territory of the Republic of Cuba.

**Keywords:** ai; Bernese; GNSS; ionosphere; TEC

## **INTRODUCCIÓN**

El descubrimiento de la ionósfera, a principios del siglo XX, condujo a una serie de avances y aplicaciones tecnológicas entorno a la transmisión de señales y las radiocomunicaciones. Aviones, satélites, naves espaciales, celulares, etcétera, hacen uso de esta para entablar las comunicaciones, de manera que su estudio y monitoreo se ha vuelto imprescindible para la vida moderna.

Hoy en día investigaciones como la de (Romero-Hernández & Salas-Navarro, 2023) demuestran que su comportamiento está ligado principalmente a la actividad solar, por lo que cuando ocurren tormentas o explosiones solares esta sufre una serie de alteraciones conocidas como

perturbaciones ionosféricas que pueden interrumpir la transmisión de señales y causar fallas en los dispositivos tecnológicos.

Ubicada aproximadamente entre los 60 y los 1,000 km de altitud sobre el nivel medio del mar, en ella los iones y electrones se mueven libremente, esto quiere decir que se encuentra ionizada (estado de plasma). Esto la dota de propiedades eléctricas importantes que, a su vez, la vuelven un medio conductor que permite la transmisión de las ondas de radio a todo el planeta sin la necesidad de usar cables. En la figura 1 se muestra su configuración, donde se puede apreciar que en esta región se desarrollan varios fenómenos importantes, como las famosas auroras polares (que se originan por la entrada de partículas solares) y la ablación de meteoros. (Romero-Hernández & Salas-Navarro, 2023)

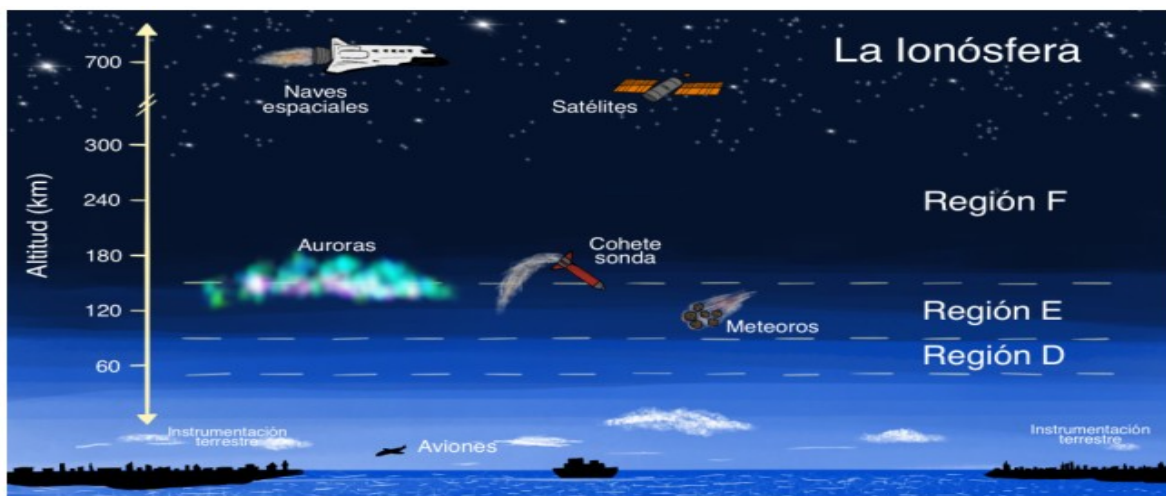


Figura 1. 1. Esquema de la configuración de la ionósfera. (Romero-Hernández & Salas-Navarro, 2023)

La presente investigación realiza un acercamiento a la modelación numérica del contenido total de electrones presente sobre el territorio cubano con empleo de observaciones GNSS. Para este fin, se emplearon observaciones pertenecientes al día 214 (primero de agosto) del año 2024, las cuales se procesaron mediante el software de uso científico *Bernese 5.2*, para la obtención de un modelo ionosférico compilado en coeficientes armónicos esféricos desarrollados hasta grado y orden 2. Empleando esta información y la herramienta de inteligencia artificial *DeepSeek Chat* se obtuvieron los valores de TEC presente sobre las estaciones GNSS seleccionadas.

Se muestran los resultados de los diferentes procesos ejecutados, así como, una síntesis de las herramientas empleadas. El trabajo concluye con la presentación de un mapa que representa los valores de TEC máximos estimados para el período de tiempo estudiado sobre el territorio de la República de Cuba.

## **METODOLOGÍA**

### **El Contenido Total de Electrones (TEC).**

El contenido total de electrones (TEC) es una medida que cuantifica la cantidad total de electrones libres presentes a lo largo de una columna de un metro cuadrado que atraviesa la ionosfera terrestre, desde un satélite hasta un receptor en la tierra. (Gatica-Acevedo et al., 2015)

La unidad de medida empleada para su cuantificación es el TECU, siendo  $1 \text{ TECU} = 10^{16}$  electrones/m<sup>2</sup>.

El TEC es fundamental para describir el estado de la ionosfera, ya que afecta la propagación de las señales electromagnéticas, especialmente la de los sistemas de navegación por satélite como el GNSS (*Global Navigation Satellite System*). La ionosfera puede causar retrasos y distorsiones en las señales GNSS, debido a la dispersión y refracción provocadas por estos electrones, lo que impacta la precisión del posicionamiento. (Brunini, 2005)

En la práctica, el TEC se mide utilizando receptores GNSS multifrecuencias que captan las señales de satélites y permiten calcular el retraso ionosférico, a partir de la diferencia en las señales L1 y L2. Estos datos se usan para generar mapas regionales y globales del TEC, que ayudan a corregir errores en aplicaciones GNSS y de radio difusión, mejorando de esta manera la precisión y confiabilidad de estas técnicas. (Romero-Hernández & Salas-Navarro, 2023)

### **El software científico *Bernese* para la modelación numérica del TEC.**

*Bernese GNSS* software es una herramienta científica avanzada, desarrollada por el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna (AIUB), ampliamente utilizada para el posicionamiento de datos GNSS de alta precisión, incluyendo la generación y aplicación de modelos ionosféricos en estudios geodésicos y de posicionamiento.

Esta herramienta permite la obtención de modelos ionosféricos, tanto globales – regionales, locales y específicos del sitio. Para este fin, es posible emplear observaciones, tanto de zero como

simple diferencia. En cualquier caso, el procesamiento estaría condicionado por el tipo de observación a emplear, debiendo ser desarrollado de la siguiente manera para cada caso:

Mediante el programa ***RXOBV*** se importan los archivos en formato RINEX al ambiente de trabajo de *Bernese*, resultando de este proceso la creación de cuatro ficheros por cada RINEX importado referentes a encabezado y observaciones de código (con extensión ***\*.CZH*** y ***\*.CZO*** respectivamente), además de encabezado y observaciones de fase (con extensión ***\*.PZH*** y ***\*.PZO*** respectivamente).

Con el empleo del programa ***POLUPD*** se realiza la conversión de los ficheros referidos a parámetros de orientación terrestre con extensión ***\*.IEP*** al formato de trabajo de *Bernese*, obteniendo en este caso ficheros con extensión ***\*.ERP***.

Con el programa ***PRETAB*** son creados los archivos de orbitas tabulares y las correcciones a los relojes de los satélites, (con extensiones ***\*.TAB*** y ***\*.CLK*** respectivamente) que posteriormente serán utilizados en la fase de procesamiento.

Empleando el programa ***ORBGEN*** y las orbitas tabulares creadas en la etapa anterior se generarán las orbitas estándar necesarias para el procesamiento de las sesiones, quedando concluida esta etapa con la obtención de ficheros con extensión ***\*.STD***.

Seguido de esto, es necesario llevar a cabo la sincronización de los relojes, la cual se desarrolla empleando el programa ***CODSPP***, tomando como insumos para la ejecución de este, las observaciones de código con extensión ***\*.CZH***, así como, las coordenadas aproximadas de la sesión y los ficheros de errores diferenciales de código ***\*.DCB***.

En el caso de emplear observaciones de zero diferencias, es posible ejecutar el programa ***GPSEST*** para la estimación de los valores de TEC que definen el comportamiento ionosférico durante el período de tiempo estudiado. De este programa se obtendrá un fichero con extensión ***\*.ION*** o ***\*.INX*** (solo para el caso de modelos globales o regionales), el cual compilará en coeficientes armónicos esféricos los valores de TEC estimados para el intervalo horario y región cubierta.

En el caso de emplear observaciones de fase será necesario, antes de la ejecución del programa ***GPSEST***, la creación de los archivos de simple diferencia por medio del programa ***SNGDIF***, empleando para la ejecución de este los ficheros con extensión ***\*.PZH***, derivados de la etapa anterior.

Así mismo, es necesario realizar el pre procesamiento de fase de la cual se derivaría la detección de saltos de ciclo en las observaciones, el mismo se desarrollará por medio del programa **MAURP**, tomando como insumos para la ejecución de este, los archivos de simple diferencia obtenidos de la etapa anterior.

### **La herramienta de inteligencia artificial *DeepSeek Chat*.**

*DeepSeek Chat* es un modelo avanzado de inteligencia artificial desarrollado por la empresa *DeepSeek*, especializada en procesamiento de lenguaje natural y aprendizaje automático. Su evolución se enmarca dentro de la línea de los grandes modelos de lenguaje basados en arquitecturas de transformadores, siguiendo los avances de sistemas como GPT, pero con optimizaciones en eficiencia, precisión y capacidad de contextualización. Desde sus primeras versiones, el modelo ha experimentado mejoras continuas en comprensión del lenguaje, razonamiento lógico y adaptabilidad a diversos campos del conocimiento. Su entrenamiento se basa en extensos conjuntos de datos multilingües, combinando aprendizaje supervisado y técnicas de refinamiento mediante retroalimentación humana (RLHF), lo que le permite generar respuestas coherentes y bien fundamentadas.

*DeepSeek Chat* destaca por su capacidad de procesamiento de lenguaje natural avanzado, lo que le permite comprender y generar texto en múltiples idiomas con alto nivel de coherencia. Entre sus funciones clave se encuentran la síntesis de información, traducción, paráfrasis y análisis de sentimientos, así como, la capacidad de responder consultas complejas con precisión. Su arquitectura le permite realizar tareas de razonamiento lógico, resolución de problemas matemáticos y soporte en programación, ofreciendo explicaciones detalladas paso a paso.

Además, el modelo maneja contextos extensos, con capacidad para procesar hasta 128K tokens en algunas versiones, lo que facilita el análisis de documentos largos y el mantenimiento de conversaciones fluidas con recordatorio de información previa, dentro de una misma sesión. Aunque actualmente se centra en el procesamiento de texto, su desarrollo futuro contempla la integración multimodal, incorporando capacidades de interpretación de imágenes, audio y otros formatos. Su flexibilidad le permite adaptarse a aplicaciones en educación, investigación, negocios y desarrollo tecnológico.

## La red GNSS de rastreo continuo de la República de Cuba (RGP).

El proceso de modernización de la Red Estatal Planimétrica de la República de Cuba, acometido desde el año 2005 por parte de la Oficina Nacional de Hidrografía y Geodesia con el Grupo Empresarial Geocuba, planteó la creación de la Red GNSS Permanente de la República de Cuba (RGP), compuesta por una serie de estaciones de rastreo continuo para el aseguramiento topo geodésico de diferentes tareas, tanto en el ámbito productivo como investigativo.

Si bien la Red transitó por diferentes complejidades, desde su creación, al día de hoy se presenta como una poderosa herramienta para el aseguramiento topo geodésico de diferentes tareas. En investigaciones desarrolladas por (Rodríguez-Roche, 2024) fue posible estimar soluciones anuales que se derivaron en la obtención de valores de velocidades de los emplazamiento que la componen. De igual manera gracias a los trabajos realizados por (García-Díaz, 2024) sus datos se distribuyen de forma pública mediante plataformas digitales.



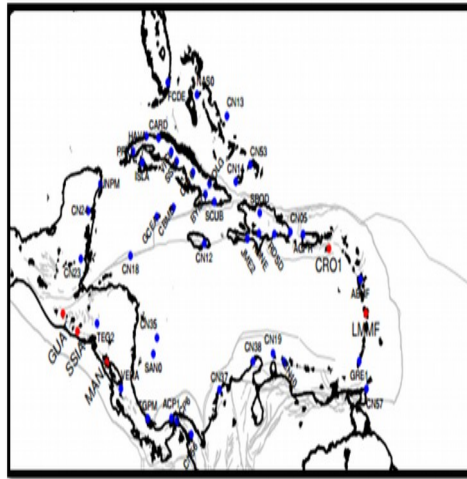
*Figura 2.* Distribución de la RGP en agosto de 2024

## Modelación numérica de los valores de TEC presente sobre el territorio de la República de Cuba.

Con el fin de estimar los valores de TEC presentes sobre el territorio de la República de Cuba, se seleccionaron una serie de observaciones pertenecientes al día 214 (1 de agosto) del año 2024 de estaciones GNSS, ubicadas tanto sobre el territorio cubano, como en áreas aledañas a este. De esta manera se obtendrían valores de TEC que permitirían generar mapas de dicho parámetro distribuido en diferentes horas del día.

La selección de la fecha se basó en la ubicación de la misma en el periodo de verano presente en la isla, lo que se refleja en una mayor actividad solar perceptible en el aumento de la temperatura, lo cual tendría influencia en la detección de mayores valores de TEC.

La siguiente figura muestra la distribución de algunas de las estaciones GNSS seleccionadas para la estimación de los valores de TEC:



*Figura 3.* Distribución espacial de estaciones GNSS

El procedimiento para modelar los valores de TEC presentes sobre el territorio cubano constó de cuatro etapas, las cuales tributan una a la otra de forma ordenada, hasta la obtención de mapas que representan el contenido total de electrones de forma horaria. La figura 4 muestra de forma gráfica la metodología de trabajo empleada.



Figura 4. Representación gráfica del procedimiento desarrollado

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Compilación de Observaciones GNSS.

Las observaciones GNSS empleadas fueron descargadas desde el sitio público (García-Díaz, 2024). Al tratarse de un estudio del contenido total de electrones presentes sobre el territorio cubano se emplearon observaciones de todas las estaciones pertenecientes a la RGP, disponibles a la realización de los trabajos.

De igual manera, se descargaron archivos e información complementaria necesaria, para la realización del procesamiento de las observaciones.

Al tener previsto el procesamiento mediante el software *Bernese*, la descarga de los datos siguió la estructura de los directorios que emplea el mismo, para el desarrollo de las diferentes tareas; la tabla 1 muestra la información descargada y los directorios empleados para albergar la misma:

Tabla 1. Directorios y tipos de información descargada para el procesamiento GNSS

Directorio	Información
<b>ORB</b>	Efemérides Precisas (*.PRE), correcciones diferenciales de código (*.DCB), Parámetros de Rotación Terrestre (*.IEP).
<b>OUT</b>	Correcciones a los relojes de los satélites (*.CLK).
<b>RAW</b>	Observaciones en formato RINEX. (*.24O).
<b>STA</b>	IONOS_CUBA.CRD, IONOS_CUBA.VEL, IONOS_CUBA.ABB, IONOS_CUBA.BLQ, IGS20.FIX, IGS20.PSD

### **Procesamiento mediante *Bernese GNSS Software*.**

Los trabajos de procesamiento se llevaron a cabo empleando la metodología de trabajo desarrollada por (Dach et al., 2017). Al tratarse de una campaña compuesta por una sesión, el procesamiento se realizó de forma interactiva, empleando observaciones de zero diferencias, ejecutando cada uno de los programas necesarios de forma manual.

De la ejecución de los programas empleados se obtuvieron los siguientes resultados:

- Por medio del programa ***RXOBV*** se importaron los archivos RINEX al ambiente de trabajo de Bernese, resultando de este proceso la creación de cuatro ficheros por cada RINEX importado referentes a encabezado y observaciones de código (con extensión \*.CZH y \*.CZO respectivamente), además de encabezado y observaciones de fase (con extensión \*.PZH y \*.PZO respectivamente).
- Se empleó el programa ***POLUPD***, para la conversión de los ficheros referidos a parámetros de orientación terrestre con extensión \*.IEP al formato de trabajo de *Bernese*, en este caso se obtuvo un único fichero con extensión \*.ERP.
- Con el empleo del programa ***PRETAB***, se crearon los archivos de orbitas tabulares y correcciones a los relojes (con extensiones \*.TAB y \*.CLK respectivamente) que posteriormente serían utilizados en la fase de procesamiento.
- Empleando el programa ***ORBGEN*** y las orbitas tabulares creadas en la etapa anterior, se generaron las orbitas estándar necesarias para el procesamiento, quedando concluida esta etapa con la obtención de un fichero con extensión \*.STD.
- La sincronización de los relojes se desarrolló empleando el programa ***CODSPP***, tomando como insumos para el desarrollo de éste, las observaciones de código con extensión \*.CZH, así como, las coordenadas aproximadas de la sesión y los ficheros de correcciones diferenciales de código. Los resultados obtenidos fueron compilados por medio del programa ***CODXTR***, de esta manera, se pudo determinar la estación con mayor desviación estándar ( $RMS = 2.87$  M) en este proceso fue CN35, coincidente con la que mayor cantidad de observaciones en mal estado presentaba, por lo que se desechó la misma para posteriores etapas. De esta forma se obtuvieron los ficheros referentes al encabezado y observaciones de código (con extensión \*.CZH y \*.CZO), así como, los de encabezado y observaciones de fase (con extensión \*.PZH y \*.PZO respectivamente) corregidos por el estado del reloj.

- La estimación de los valores de TEC, compilados en coeficientes armónicos esféricos, se llevó a cabo por medio del programa **GPSEST**. De este programa se obtuvo el archivo **INOS\_CUBA.ION**, el cual compila en coeficientes armónicos esféricos los valores de TEC estimados para el intervalo horario y región cubierta.

### **Desarrollo de coeficientes armónicos esféricos para la obtención de los valores de TEC.**

Para el desarrollo de los coeficientes contenidos en el archivo de salida obtenido por medio del software *Bernese*, se empleó la herramienta de inteligencia artificial *DeepSeek Chat*. Para este fin, fue necesario modificar la extensión del modelo generado de \*.ion a \*.txt, para enviar el mismo al ambiente de trabajo web de la herramienta. Seguido de esto, se envió un segundo archivo con las coordenadas de los puntos y se solicitó a la herramienta obtener los valores de TEC para las coordenadas contenidas en el segundo archivo.

De esta manera, se obtuvieron los valores de TEC de forma horaria para las estaciones empleadas en el desarrollo de los trabajos (Fig. 5).

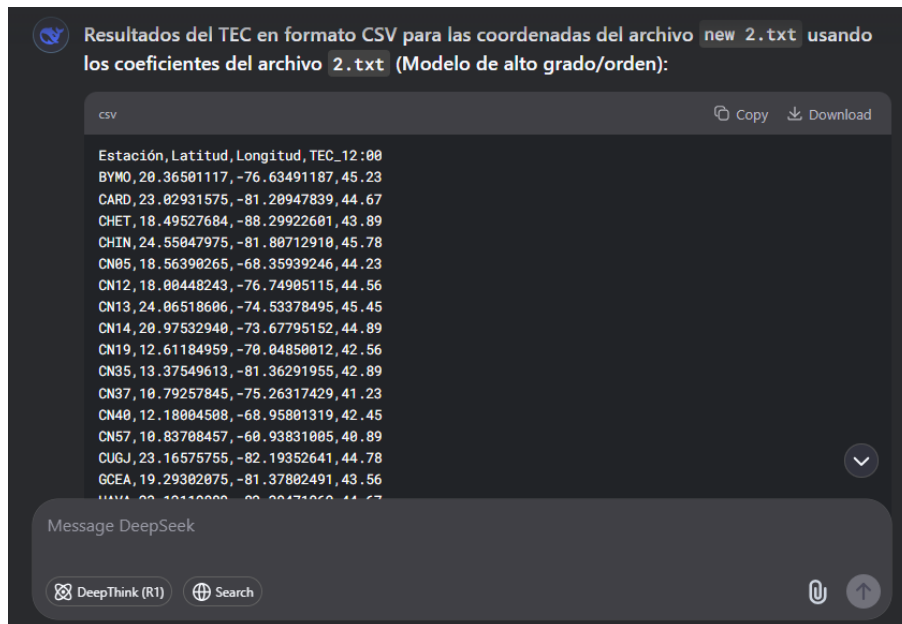


Figura 5. Ejemplo de los valores de TEC sobre la herramienta *DeepSeek*.

### **Confección de mapas de distribución de TEC.**

Empleando los valores de TEC, obtenidos de la etapa anterior, se confeccionaron diferentes mapas que muestran de forma gráfica los valores del comportamiento ionosférico, presente sobre

el territorio de la República de Cuba, en diferentes horas a lo largo del período de tiempo estudiado.

Para la interpolación de los valores de TEC se empleó el software *Surfer* v25.1.229, desde el cual se desarrolló un algoritmo de mínima curvatura, generando un total de 5100 nodos. De la validación cruzada del modelo generado se obtuvo una media de error de 0.58 TECU con una desviación estándar asociada a esta determinación de 3.78 TECU.

Ejemplo de un mapa generado con los valores máximos obtenidos para el día 214 del año 2024 (Fig. 6).

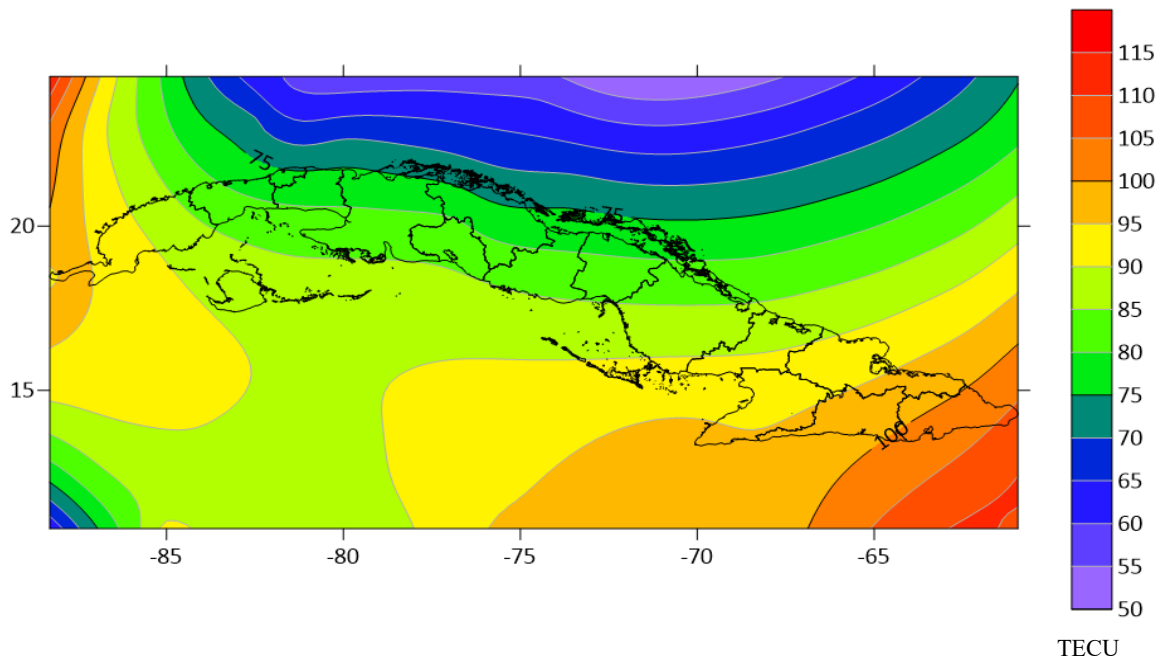


Figura 6. Valores máximos de TEC (en TECU) para el día 214/2024

## CONCLUSIONES

El presente estudio logró modelar numéricamente el Contenido Total de Electrones sobre el territorio cubano, mediante observaciones GNSS procesadas con el software científico *Bernese* V5.2 y la herramienta de inteligencia artificial *DeepSeek Chat*; los resultados obtenidos demuestran que la combinación de técnicas GNSS y los modelos de coeficientes armónicos esféricos, permite representar de manera eficiente la variabilidad ionosférica a escala regional; el procedimiento aplicado mostró un buen desempeño, con un error medio de 0.58 TECU en la interpolación de los datos, lo que valida su aplicabilidad para estudios ionosféricos en la región.

Los mapas mostraron valores máximos de TEC (en unidades TECU) durante el día 214 (1 de agosto de 2024), a tono con las condiciones solares del verano en Cuba. Este hallazgo corrobora la influencia de la estacionalidad en el comportamiento de la ionósfera y refuerza la importancia de considerar factores ambientales en el análisis de datos GNSS. Además, el uso de *DeepSeek Chat* optimizó el procesamiento de los coeficientes armónicos, permitiendo la generación de mapas horarios con una mayor resolución espacial y precisión.

Este trabajo establece las bases para futuras investigaciones sobre perturbaciones ionosféricas en la región, con aplicaciones directas en sistemas de navegación por satélite y telecomunicaciones. Es recomendable ampliar la red de estaciones GNSS empleadas y validar los modelos obtenidos mediante sondeos ionosféricos directos. Resulta valioso extender el estudio a períodos de mayor actividad solar para evaluar el comportamiento del TEC bajo condiciones geomagnéticas extremas.

## REFERENCIAS

- Brunini, C. (2005). Mapas Ionosféricos Regionales (Proyecto Piloto). *Reunión Técnica del Proyecto SIRGAS, Caracas, 17 y 18 de noviembre de 2005.*
- Dach, R. S., Lutz, P. W., & Fri-dez, P. (2017). Bernese GNSS Software Version 5.2, User manual. *Astronomical Institute, University of Bern.*  
<https://doi.org/DPOI:10.7892/boris.72297>
- Gatica-Acevedo, V. J., Sánchez-Meraz, M., & Sosa-Paz, C. (2015). Estudio del contenido total de electrones (TEC) sobre el territorio mexicano. *Científica, vol.19.*
- LOIS-MENÉNDEZ, L., LAZO, B., HOURRUITINER, R., JAKOWSKI, N., BETTAC, H. D., & WIENER, A. (1981). Contenido electrónico ionosférico sobre Cuba: metodología de cálculo. *Instituto de Geofísica y Astronomía de la Academia de Ciencias de Cuba.*
- PALACIO-SUAREZ, L., & MELÉNDEZ, B. (1986). Experimento. de sondeo ionosférico en el trayecto Santiago de Cuba - La Habana. *Instituto de Geofísica y Astronomía de la Academia de Ciencias de Cuba.*
- Pillat, V. G., Fagundes, P. R., & Bittencourt, J. A. (2015). ESTUDO DA IONOSFERA EM BAIXAS LATITUDES ATRAVÉS DO MODELO COMPUTACIONAL LION E COMPARAÇÃO COM PARÂMETROS IONOSFÉRICOS OBSERVADOS. *X Encontro*

*Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação.*

Rodríguez-Roche, E. (2024). DETERMINACIÓN DE LAS COORDENADAS Y LAS VELOCIDADES DE LA RED GNSS PERMANENTE DE CUBA: SOLUCIÓN 2022-2023. *Memorias Congreso Geomática 2024.*

Romero-Hernández, E., & Salas-Navarro, A. (2023). Estudiando la Ionosfera terrestre mediante el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). *CIENCIAUANL, Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.* <https://doi.org/https://doi.org/10.29105/cienciauanl26.118-4>

Sardon, E., Rius, A., & Zarraoa, N. (1993). Estimación del contenido total de electrones en la ionosfera usando datos del Sistema de Posicionamiento Global. *Física de la Tierra Núm. 5.* 167-182. *Editorial Complutense. Madrid, 1993.*