

ESTUDIANDO LA IONÓSFERA TERRESTRE MEDIANTE EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

DOI: <https://doi.org/10.29105/cienciauanl26.118-4>

Esmeralda Romero Hernández (ORCID: 0000-0001-9228-4087)*
Amanda Salas Navarro (ORCID: 0000-0003-2223-5487)**

* Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México.
Contacto: esmeralda.romerohdz@uanl.edu.mx, amanda.salasnr@gmail.com

El descubrimiento de la ionósfera a principios del siglo XX condujo a una serie de avances y aplicaciones tecnológicas en torno a la transmisión de señales y las radiocomunicaciones. Aviones, satélites, naves espaciales, celulares, etcétera, hacen uso de ésta para entablar las comunicaciones, de manera que su estudio y monitoreo

se ha vuelto imprescindible para la vida moderna. Hoy en día sabemos que su comportamiento está ligado principalmente a la actividad solar, y cuando ocurren las tormentas o explosiones solares sufre una serie de alteraciones conocidas como perturbaciones ionosféricas que pueden interrumpir la transmisión de señales y causar fallas en los dispositivos tecnológicos.

¿QUÉ ES LA IONÓSFERA Y CUÁL ES LA IMPORTANCIA DE SU ESTUDIO?

Ubicada aproximadamente entre los 60 y los 1,000 km de altitud sobre el nivel 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 bosqueja su configuración, ahí podemos ver 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.

La ionósfera se origina, principalmente, por la incidencia de la radiación solar, específicamente rayos ultravioleta extremos (UVE) y rayos X, por lo cual es muy susceptible a sufrir fluctuaciones originadas por las variaciones del flujo de radiación solar. Básicamente, hay cuatro tipos de variaciones que influyen en ella: 1) la diurna, asociada con la rotación terrestre (día y noche); 2) la estacional, causada por el movimiento de traslación terrestre; 3) la causada por los fenómenos climatológicos y procesos dinámicos en la troposfera y 4) la súbi-

ta, causada por la actividad solar (tormentas solares). Las primeras dos están asociadas con una variación regular o cíclica y son fáciles de caracterizar, mientras que el tercer tipo puede rápidamente identificarse monitoreando las condiciones meteorológicas. El cuarto tipo se relaciona con los eventos de actividad solar, fulguraciones y eyecciones de masa coronal (EMC) y es más difícil de caracterizar. Las fulguraciones solares son liberaciones súbitas de radiación electromagnética de muy alta energía (UVE y rayos X), la cual provoca un incremento casi inmediato en la densidad de electrones. Por otra parte, las EMC son erupciones de material solar (básicamente protones y electrones), que pueden impactar la magnetósfera terrestre y generar perturbaciones ionosféricas.

Hoy en día, como resultado del avance tecnológico y la era espacial, somos más vulnerables a sufrir afectaciones relacionadas con las explosiones solares. A pesar de que la magnetósfera nos protege de las partículas cargadas, los astronautas a bordo de la estación espacial, personas en vuelos a través de los polos, la electrónica de los satélites y misiones espaciales, y muchos dispositivos tecnológicos están expuestos a una gran

cantidad de radiación muy dañina. Por lo cual, el estudio y monitoreo de la actividad solar y las condiciones en el entorno terrestre se ha vuelto imprescindible a nivel mundial, campo de estudio conocido como clima espacial. Cabe resaltar que México se ha unido a los esfuerzos para monitorear el clima espacial, creando, en 2017, el Laboratorio Nacional de Clima Espacial (Lance), que se encarga de instalar redes de instrumentos, recopilar datos y establecer las condiciones que hay sobre el territorio nacional.

Debido a que la ionósfera se ve afectada tanto por la radiación solar como por las partículas cargadas, puede ser usada como un indicador indirecto de la actividad solar para inferir el estado del clima espacial.

Para monitorear su estado existen diferentes técnicas, entre ellas destaca la estimación del contenido total de electrones (TEC, por sus siglas en inglés), calculado a partir de los datos generados por los receptores de los sistemas satelitales para la navegación global (GNSS), como el GPS. Esta técnica nos permite monitorear las perturbaciones ionosféricas y ver el nivel de afectación durante las tormentas solares.

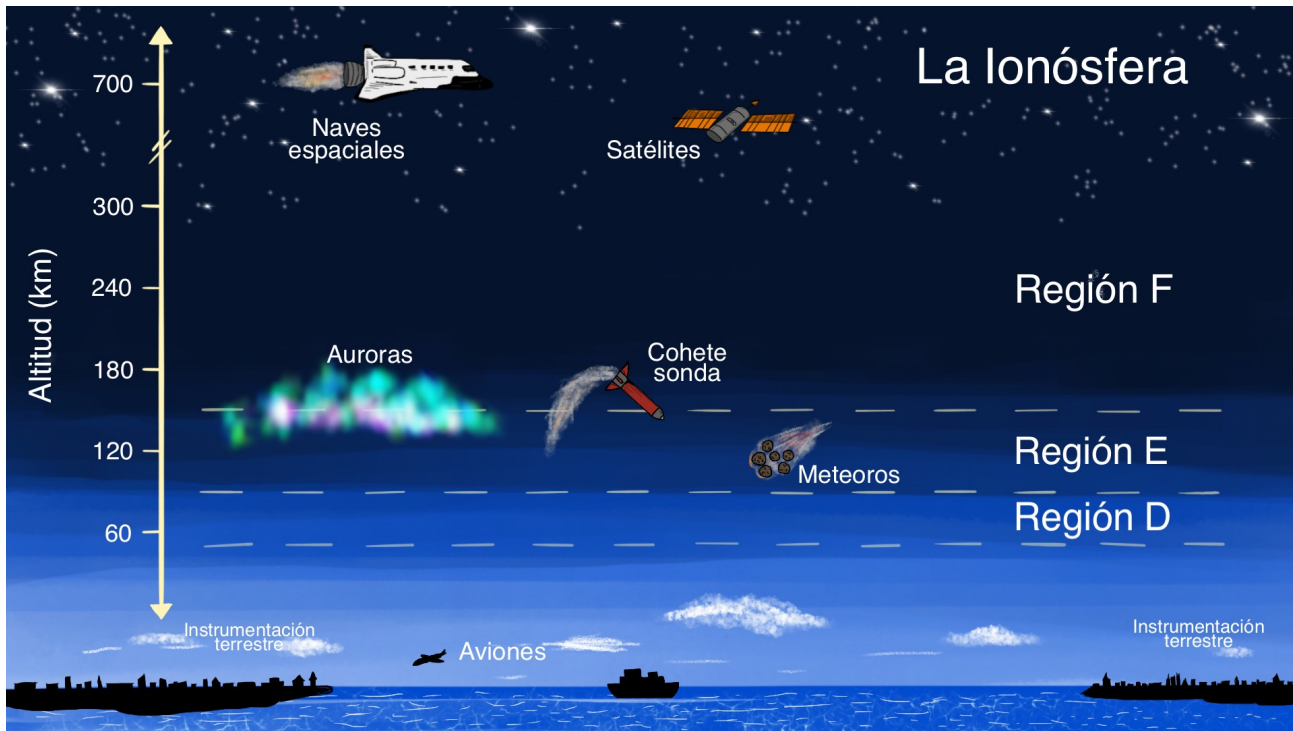


Figura 1. Esquema de la configuración de la ionósfera. Las líneas punteadas delimitan las distintas capas, de las cuales, la F presenta la mayor densidad electrónica (fuente: elaboración propia).

EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

El Sistema Satelital de Navegación Global (GNSS, por sus siglas en inglés) es un conjunto de flotillas satelitales con diferentes propósitos. Está conformado por el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de Estados Unidos, el Sistema Global de Navegación por Satélite (GLONASS) de Rusia, el Sistema Europeo de Navegación por Satélite (GALILEO),

entre otros. En este caso, nos centraremos en el GPS, el cual se compone de una flotilla de 32 satélites orbitando alrededor de la Tierra y múltiples receptores a nivel de suelo, los que llamaremos estaciones. Los satélites se encuentran en órbitas medias a una altura de aproximadamente 20,180 km sobre el nivel del mar, y transmiten en dos frecuencias:

$L1 = 1575.42$ MHz y $L2 = 1227.6$ MHz. México cuenta con dos redes de estaciones que reciben las señales del GPS, una por parte del Servicio Sismológico Nacional y la otra del *Trans-boundary, Land and Atmosphere Long-term Observational and Collaborative Network (TLALOCNet)* (Cabal-Cano et al., 2018; GSAC services, s.f.; GAGE, s.f.).

MONITOREO DE LA IONÓSFERA CON SISTEMAS SATELITALES

Como habíamos mencionado, su estado se puede monitorear usando la estimación del TEC, el cual nos indica la cantidad de electrones presentes en cierta región. Para entender qué es, imaginemos que tenemos un cilindro de 1m^2 de base, que conecta al satélite con la estación en la Tierra. Dentro de éste van a quedar encerrados los electrones que afectan el tránsito de la señal del satélite, de manera que es posible aproximar

ese número de electrones usando las características de la señal (frecuencia, distancia entre el satélite y el receptor, tiempo de recorrido, etc.). La base de la estimación radica en el hecho de que las ondas de radio se desvían de su trayectoria en mayor o menor medida dependiendo de la cantidad de electrones que encuentren a su paso. De manera que si tiene muchos electrones (muy densa), entonces las ondas se van a des-

viar más de la trayectoria recta que esperaban mantener.

En la figura 2 se bosqueja la trayectoria de las señales emitidas desde el satélite GPS hacia la estación en tierra. En ella podemos notar que cuando las señales entran en la ionósfera son dispersadas y su trayectoria es más larga comparada con la distancia que hay entre el satélite y la estación, lo que se traduce en un retraso

temporal de la señal. Entonces, el tiempo que una señal de GPS tarda en atravesarla define su grado de afectación. Por ejemplo, una señal que viaja desde el horizonte hacia alguna estación presenta un mayor desfase comparado con el que tendría si la señal fuese enviada desde el cenit (es decir, el punto en el cielo que se encuentra encima de la cabeza del observador), debido a que el espesor en esa región es mayor.

Cabe destacar que este retraso de la señal también afecta los cálculos de posicionamiento, por lo cual, cuando está muy densa o muy perturbada hay un mayor error en la estimación de la posición que da el GPS. Se ha encontrado que la señal puede ser dispersada hasta diez metros de su posición que da el GPS debido al efecto de la ionósfera (Tolosa, Acosta y De-Giusti, 2012).

Usando las diferencias entre las señales L1 y L2, y las diferencias entre las distancias que recorren las señales desde el satélite hasta la estación (pseudorranos), es posible aproximar la cantidad de electrones que la señal encuentra a su paso (Mannucci et al., 1998). Actualmente existen distintos códigos computacionales para la estimación del TEC. En este caso haremos referencia al código desarrollado por el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales de Brasil (INPE), como parte de su programa para el estudio y monitoreo del clima espacial (*Estudo e monitoramento Brasileiro de clima espacial [Embrace]*), que aquí llamaremos TECMAP. En esta aproximación es modelada como una capa de espesor finito que se ubica entre los 250 y 450

km, y el valor del TEC o densidad electrónica estimada se asocia a un área sobre el cenit de la estación a manera de proyección.

Calculando el valor del TEC con los datos de estaciones en distintas posiciones geográficas es posible construir mapas bidimensionales que muestran la configuración de la ionósfera sobre cierta región (Romero-Hernández et al., 2020; Takahashi et al., 2016). Por ejemplo, la figura 3 muestra dos mapas obtenidos por TECMAP para el 21 y 22 de junio de 2015, a las 20:20 horas de tiempo universal (UT). Aquí, los valores del TEC están indicados con distintos colores (azul = TEC más bajo; rojo = TEC más alto), y en unidades de TEC, siendo 1 TECu igual a $10^{16} \frac{\text{electrones}}{\text{m}^2}$.

Al comparar estos mapas podemos notar que la configuración de la ionósfera puede cambiar

drásticamente de un día para otro. En este caso, el 21 de junio estaba en calma o en su estado promedio, y horas después, el 22, ocurrió una fulguración solar que provocó un incremento importante del TEC. Éste, así como los muchos otros eventos de perturbación que han ocurrido a lo largo de los años, nos muestra la relevancia que tiene su estudio y monitoreo. Además, la construcción de estos mapas nos ayuda a visualizar su estado y estudiar la variación del TEC en distintas posiciones geográficas, facilitando la identificación de las zonas con mayor afectación, en términos de radiocomunicaciones. Esto permite emitir alertas a la sociedad, acompañadas de un informe completo sobre las condiciones del clima espacial y posibles escenarios en los que se vean afectadas las radiocomunicaciones, la distribución de energía eléctrica y los errores en los sistemas de posicionamiento GPS.

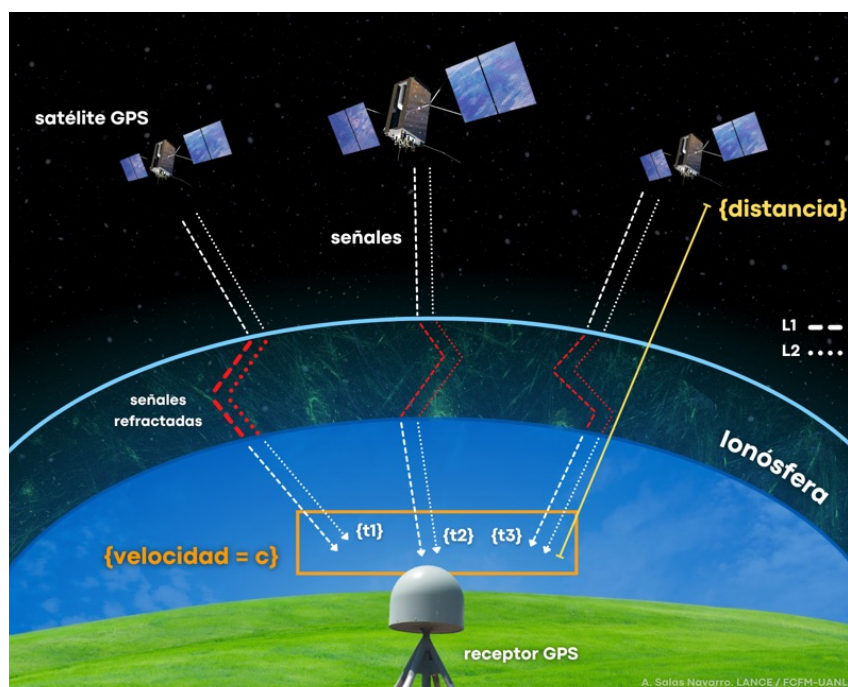


Figura 2. Diagrama del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y su interacción con la ionósfera terrestre. Las líneas punteadas indican las señales L1 y L2, enviadas por los satélites (fuente: elaboración propia).

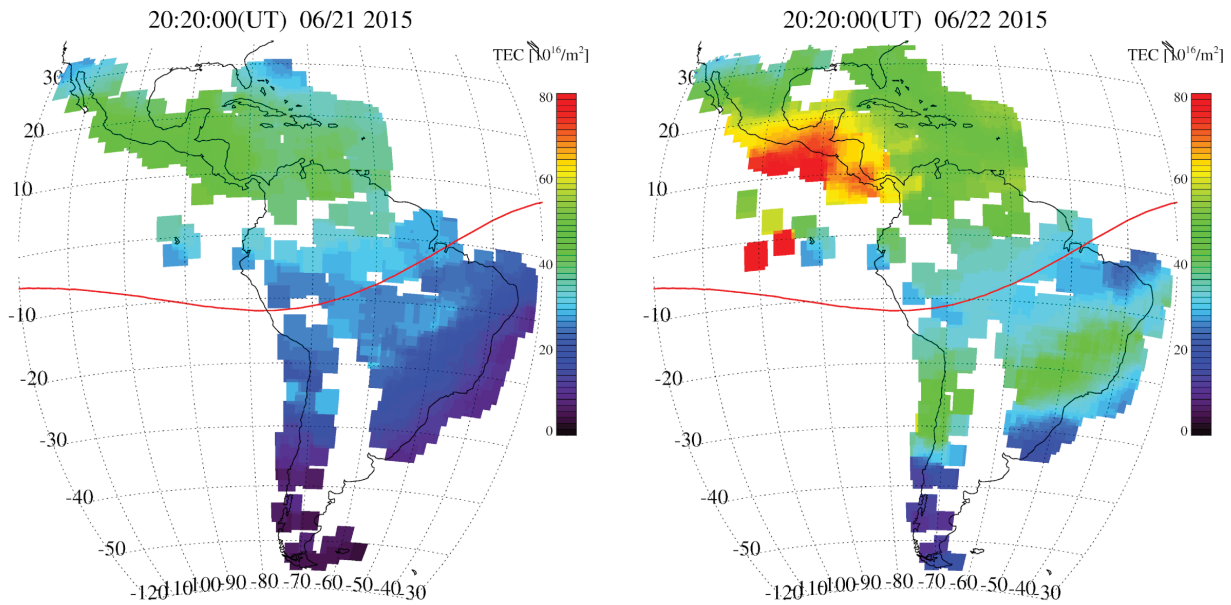


Figura 3. Comparación de mapas TEC durante un día quieto (mapa del lado izquierdo) y un día perturbado (mapa de lado derecho). El color rojo representa las zonas con mayor TEC, mientras que el azul oscuro indica las zonas con menor TEC (fuente: elaboración propia).

¿Y QUÉ APRENDIMOS DE ESTO?

Que gracias a la ionósfera podemos hacer uso de las radiocomunicaciones sin necesidad de cables. También reflexionamos sobre la importancia de monitorearla para identificar cuando hay perturbaciones ionosféricas que puedan entorpecer la transmisión de ondas de radio y causar afectaciones en los sistemas de telecomunicaciones y sistemas

de posicionamiento global empleados para la navegación aérea, marítima y terrestre, como el GPS. En este contexto, el estudio y monitoreo de estas perturbaciones tiene una relevancia global, y está contenido dentro de los propósitos del Lance.

Actualmente, el desarrollo de mapas TEC usando datos de las es-

taciones de GPS es una técnica muy empleada para el estudio de dichas perturbaciones. En particular, queremos destacar que los mapas TEC de Latinoamérica son una herramienta de gran relevancia para monitorear el estado de la ionósfera a nivel regional, con ellos se pueden emitir reportes para informar a la población sobre posibles fallos en las radiocomunicaciones.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio Nacional de Clima Espacial (Lance) y a los responsables del proyecto, doctores Eduardo Pérez Tijerina y Américo González, por la infraestructura y datos para desarrollar estudios ionosféricos. Al Dr. Clezio

Marcos de Nardin y al Embrace de Brasil por compartir los códigos para el cálculo del TEC. El Lance es parcialmente financiado por el Programa Cátedras Conacyt, proyecto 1045, y el Fondo Sectorial AEM-Conacyt, proyecto

2014-01-247722. Este material y sus resultados se basan, en parte, en observaciones de la red GPS TLALOCNet (Cabral-Cano et al., 2018) operada por el servicio de geodesia satelital (SGS) en colaboración con UNAVCO Inc.

REFERENCIAS

Cabral-Cano, E.X., Pérez-Campos, B., Márquez-Azúa, M.A. et al. (2018). TLALOCNet: A Continuous GPS-Met Backbone in Mexico for Seismotectonic and Atmospheric Research. *Seismological Research Letters*. 89 (2A):373-381. Doi: <https://doi.org/10.1785/0220170190>
GSAC services. (s.f.). TLALOCNet. Disponible en: <http://tlalocnet.udg.mx/tlalocnetgsac/>
Geodetic Facility for the Advancement of Geosciences (GAGE). (s.f.). UNAVCO. Disponible en: <https://www.unavco.org/data/dai/>

Mannucci, A. J., Wilson, B.D., Yuan, D.N., et al. (1998). A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Advancing Earth and Space Sciences: Radio Science*. 33:565-582.

Otsuka, Y., Ogawa, T., Saito, A., et al. (2002). A new technique for mapping of total electron content using GPS network. *Springer: Earth, Planets and Space*. 54:63-70.

Romero-Hernández, E., Denardini, C.M., Jonah, O.F., et al. (2020). Night-time Ionospheric TEC Study Over Latin America During Moderate

and High Solar Activity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 125:5-6.

Takahashi, H., Wrasse, C.M., Denardini, C.M., et al. (2016). Ionospheric TEC weather map over South America. *Space Weather. Advancing Earth and Space Sciences: Space Weather*. 14:937-949.

Tolozá, J., Acosta, N., De-Giusti, A. (2012). Techniques to determine the magnitude and direction error of GPS system. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/23814>

Descarga aquí nuestra versión digital

