

DISEÑO DE UN MAPA IONOSFÉRICO COMO SOPORTE AL DESARROLLO Y LA IMPLEMENTACIÓN DE GBAS, PRECISIÓN DE APROXIMACIÓN CATEGORÍA I EN COLOMBIA

Design of an ionospheric map as a support for development and implementation of GBAS, precision approach category I in Colombia

Marcela Reyes Quintana^{1*}, *Nathalie Ramírez Sánchez*^{2†}, *Omar David Bolívar Fonseca*^{3†}
y *Andrés Cárdenas Contreras*^{4‡}

¹ Procalcúlo, ² Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), ³ Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC),

⁴ Universidad Distrital "Francisco José de Caldas".

Correspondencia: * nreyes@procalculo.com † nathalie.ramirez@igac.gov.co ‡ obolivar@igac.gov.co † acardenas@udistrital.edu.co

Recibido: 2 de agosto de 2011 Aceptado: 13 de octubre de 2011

Resumen

El estudio y modelamiento regional de la ionosfera es fundamental en el diseño de Sistemas de Aumentación Basados en Tierra (GBAS), considerando que esta capa de la atmósfera afecta la precisión de las posiciones geográficas obtenidas mediante los sistemas Global Navigation Satellite Systems (GNSS), por lo que la ionosfera es un elemento crítico en el segmento de aproximación de aeronaves a tierra.

La investigación define los lineamientos generales que se deben tener en cuenta para la implementación de un sistema GBAS en el territorio colombiano, localizado en zona geográfica de gran interés para el estudio de la ionosfera, en particular al encontrarse afectada por la anomalía ecuatorial. Se analizó el comportamiento de la actividad solar local mediante el uso de datos Rz_{12} ¹ para uno de los episodios de mayor actividad magnética registrada en Colombia el 12 de abril de 2010, así como las variaciones del contenido total de electrones (TEC, Total Electron Content) mediante el procesamiento de la información de las estaciones de funcionamiento continuo de la red Magnaeco y Sirgas-CON, obteniéndose como resultados las regiones de mayor y menor impacto ionosférico para la implementación de GBAS en los aeropuertos de alto tráfico aéreo nacional.

Palabras clave: ionósfera, GBAS, Rz12, TEC, VTEC.

Abstract

The study and regional modeling of ionosphere is fundamental for designing of a Ground Based Augmentation System (GBAS) because that atmosphere's layer affects the precision of the geographic positions obtained with GNSS systems, so that the ionosphere is a critic element in the aircraft approaching to land segment.

The investigation defines general guidelines to keep in mind for implementing a GBAS system on colombian territory, located in a very interesting geographic zone to ionosphere study because it is affected by the equatorial anomaly. The

¹ Rz12 es el promedio anual de los valores medios mensuales del número de Wolf. Este número es el índice de actividad solar que se obtiene de multiplicar el número de grupos de manchas solares por 10 y sumarlo al número total de manchas solares.

behavior of the local solar activity was analyzed with Rz_{12} data for one of the highest activity episodes registered in Colombia on April 12th 2010, as well as the Total Electron Content variations (TEC) with the processing of the continuous operation stations information of the Magnaeco and Sirgas-CON networks, obtaining as a result the higher and lower ionospheric impact zones, to GBAS implementation in the high traffic national airports.

Key words: Ionosphere, GBAS, Rz_{12} , TEC, VTEC.

Introducción

Para el desarrollo de la investigación se consultaron algunos trabajos previos realizados en el continente americano, por ejemplo Brunini *et al.* (2006) habían mencionado los cambios en el tiempo que tarda la señal GPS para llegar al receptor a medida que viaja por la atmósfera de la Tierra. Por otra parte, para Gende *et al.* (2005) los científicos pueden obtener una sorprendente cantidad de información acerca de la ionosfera de la tierra; un turbulento manto de partículas cargadas que, cuando son estimuladas por energía solar pueden interrumpir las comunicaciones en todo el mundo. Esta contribución presenta una metodología para obtener imágenes de alta resolución temporal del contenido de electrones ionosférico.

En Suramérica, Valladares y Villalobos (2008) describen las características técnicas y presentan recientes mediciones realizadas por el primer observatorio para estudiar la ionosfera y la alta atmósfera ecuatorial. El observatorio distribuido llamado LISN (Low-latitude Ionospheric Sensor Network) está constituido por 70 receptores GPS con capacidad para medir parámetros de la ionosfera como: el Contenido Electrónico Total (TEC, Total Electron Content), centelleos de amplitud y fase y perturbaciones ionosféricas más conocidas como Traveling Ionospheric Disturbances (TID).

Recientemente, Brunini y Azpilicueta (2010) demostraron que a través de observaciones GPS de doble frecuencia es posible estimar de forma precisa los STEC (inclinación del contenido total de electrones, que corresponde con la integral lineal de la densidad de electrones a lo largo de un rayo). Su contribución fue evaluar la exactitud de las técnicas de estimación basados en el modelo de una sola capa para diferentes regiones ionosféricas (bajas, medias y altas latitudes magnéticas) en diferentes estaciones, diversos niveles de actividad solar y distintas condiciones geomagnéticas.

El sistema de aumentación basado en tierra (GBAS) tiene como finalidad complementar y mejorar el componente operacional de aproximación a tierra de aeronaves mediante instrumentos, corrigiendo y aumentando la señal de los GNSS mediante la cuantificación del contenido total de electrones (VTEC) y su transmisión en las bandas VHF y UHF, por medio de la instalación de estaciones de control terrestres localizadas en cercanía a las pistas aéreas (OACI, 2006).

Basados en estos estudios, se decidió realizar una investigación que estimará los errores de las coordenadas de las estaciones de funcionamiento continuo de Colombia (Magnaeco) y de la red Sirgas-CON-D para cada uno de los componentes: latitud, longitud y altura elipsoidal, según los máximos y mínimos niveles de VTEC calculados para las semanas GPS 1576 a 1582. La metodología adoptada para el cálculo del TEC se basa inicialmente en la determinación y solución de ambigüedades y saltos de ciclos de las señales GNSS, para la generación de coordenadas finales de alta precisión de cada una de las 48 estaciones analizadas; el TEC se determina en función de un modelo de armónicos esféricos con intervalos de estimación de 2 horas, desde el día 21 de marzo hasta el 8 de mayo de 2010.

Para el análisis de la ionosfera se tuvo en cuenta la actividad solar, las variaciones de VTEC y los valores de la actividad geomagnética regional, de donde se seleccionó un día tranquilo y uno perturbado, utilizados para la generación de los mapas ionosféricos del VTEC para Colombia.

Sistema de aumentación basado en tierra (GBAS)

GBAS es un sistema de aumentación local de los Global Navigation Satellite Systems (GNSS) (Seeber *et al.*, 2003), basado en la difusión a los usuarios de correcciones diferenciales, datos de integridad y datos del segmento final de aproximación a través de una estación de tierra. Este sistema

es preciso en las inmediaciones de un aeropuerto entre 50 a 60 km, permitiendo la ejecución de aproximaciones de precisión categorías (CAT) I, II y III (OACI, 2006).

Fundamentación para la determinación del TEC

Una de las magnitudes físicas de la ionosfera, de gran interés, es el contenido total de electrones (TEC) que hace referencia al grado de ionización en la ionosfera; esta es un medio dispersivo para ondas de radio, por lo que su índice de refracción es función de la frecuencia de la onda. El STEC depende de la longitud de la ruta de la señal de modo que es un factor que varía con respecto a la elevación del satélite. Para corregir este efecto se estima el TEC vertical (VTEC) que toma la ionosfera como una capa delgada por encima de un punto dado de la superficie de la Tierra, generalmente a 300 o 400 km (Rolf *et al.*, 2007) que corresponde a la siguiente ecuación:

$$VTEC = \frac{1}{F} * TEC. \quad (1)$$

Donde $F = \frac{1}{\cos Z'}$. La unidad de medida es el TECU (Unidad del Contenido Electrónico Total): $1 TECU = 1 * 10^{16} \text{electrones/m}^2$. En esta capa, P_I es el punto de intersección de la ionosfera y la trayectoria de la señal de un receptor R al satélite S , r_E es el radio de la Tierra, y z el ángulo cenital de S para un observador R . Z' es el ángulo cenital entre la ruta de señal y un plano horizontal medio en el P_I (Campbell, 2003).

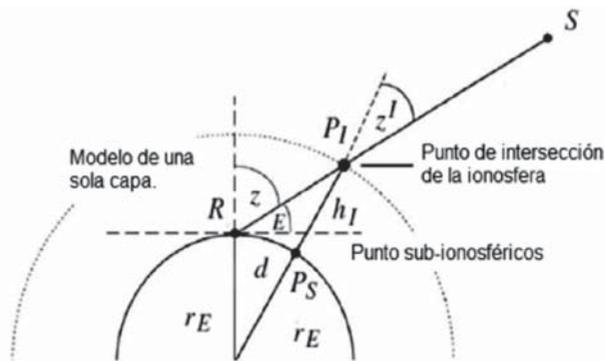


Figura 1. Modelo de la capa de la ionosfera

$$Z' = \arcsin \left(\frac{rE}{rE+h_I} * \sin Z \right) \quad (2)$$

Basados en Brunini *et al.* (2006), para el cálculo del STEC y VTEC se utilizó la fórmula que se presenta a continuación:

$$STEC(\gamma, \varphi) = \kappa * \tilde{P}_{nm}(\sin \varphi) * \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n (a_{nm} \cos(2\pi \frac{m\gamma}{24}) + b_{nm} \sin(2\pi \frac{m\gamma}{24})) + \tau_R + \tau_S \quad (3)$$

El VTEC está definido por la siguiente expresión:

$$\kappa * \frac{1}{\cos Z'} * \tilde{P}_{nm}(\sin \varphi) * \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n (a_{nm} \cos(2\pi \frac{m\gamma}{24}) + b_{nm} \sin(2\pi \frac{m\gamma}{24})) + \tau_R + \tau_S \quad (4)$$

Donde:

- $STEC(\gamma, \varphi)$ = Contenido inclinado total de electrones.
- $VTEC(\gamma, \varphi)$ = Contenido vertical total de electrones.
- $\frac{1}{\cos(Z')}$ = Función de mapeo.
- $k = -a * \left(\frac{1}{f^2} - \frac{1}{f_0^2} \right)$
- Z' = Distancia cenital.
- γ, φ = Ángulo horario al sistema solar, longitud del punto ionosférico.
- n_{max} = Es el grado máximo de la expansión armónica esférica.
- $\tilde{P}_{nm} = \Delta(n, m) P_{nm}$ = Son las funciones asociadas de Legendre normalizadas de grado n y orden, basados en la función de normalización y función de Legendre ,
- a_{nm}, b_{nm} = Son los coeficientes TEC de los esféricos armónicos.
- τ_R, τ_S = Los retrasos producidos en el hardware del receptor y el satélite, respectivamente.

Metodología

Parámetros del área de estudio

La zona de estudio comprende todo el territorio colombiano incluyendo la zona marítima e insular, delimitada al NE 90°W 20°N, al NW 60°W 20°N, al SE 90°W 10°S, y al SW 60°W 10°S.

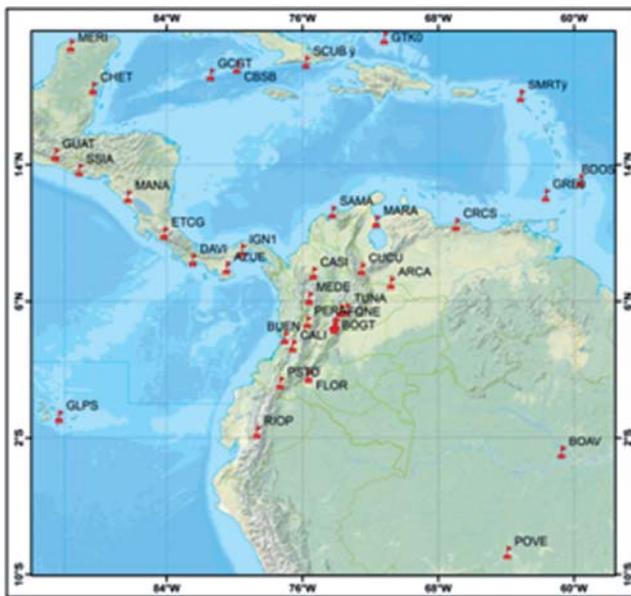


Figura 2. Mapa de las estaciones, rastreo continuo de la zona de estudio

Para el procesamiento de la información se tomaron los archivos de observación de 17 estaciones de la red Magnaeco distribuidas en el territorio colombiano, y 31 estaciones en las zonas fronterizas pertenecientes a la red Sirgas, cuyos datos fueron suministrados por la división de geodesia de la Subdirección de Geografía y Cartografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Determinación del contenido total de electrones (TEC) a partir de estaciones permanentes GPS

El cálculo del VTEC y la generación de los mapas ionosféricos fueron definidos a través de los tres procesos, en el primero se determinaron las ambigüedades de las observaciones corrigiendo las coordenadas de las estaciones de funcionamiento continuo, en el segundo se procedió al cálculo del VTEC y, por último, se elaboraron los mapas ionosféricos del VTEC para Colombia.

Corrección de coordenadas de las estaciones permanentes

El proceso de solución de saltos de ciclos, ambigüedades y corrección de las coordenadas finales de las estaciones de estudio fue desarrollado mediante el software de procesa-

miento científico de datos GNSS Bernese versión 5.0, en el cual se involucraron los archivos de órbitas satelitales precisos (SP3), los parámetros de orientación terrestre (EOP), los modelos ionosféricos globales (ION) y los archivos de observación de las estaciones de estudio (Rinex), de los cuales se obtienen las coordenadas estimadas de alta precisión de las estaciones GNSS, y se definen los parámetros estocásticos para modelar la ionósfera (Drewes, 2006).

Determinación del VTEC

Para la determinación del STEC y VTEC se empleó un modelo ionosférico global implementado a través del modelo GPSEST de Bernese, el cual involucra las ecuaciones (3) y (4) respectivamente, y en donde el error debido a la ionósfera es proporcional a la densidad de electrones (TEC) a lo largo del camino seguido por la señal GNSS.

El modelo ionosférico global, basado en armónicos esféricos, desarrollado durante la investigación, utilizó los siguientes parámetros: grado 4 y orden 12, ángulo de elevación de los satélites superiores a 10° sobre el horizonte, frecuencia L_4 , marco de referencia geomagnético. Dado que la zona de estudio es bastante amplia fue necesario utilizar un número considerable de estaciones permanentes dentro y fuera del territorio colombiano, cuyas condiciones de rastreos en gran medida involucran pseudodistancias de 31 satélites para el cálculo del STEC y VTEC. Para este último se consideró una altura de 350 km, puesto que a dicha altura se obtiene la mayor densidad electrónica. Se usó la función de mapeo $\cos Z'$, y se obtuvo un RMS menor a 0,7 TECU en su toma.

Estudio del comportamiento de la zona de interés

A fin de estudiar el comportamiento de la ionósfera en Colombia se seleccionaron tres puntos de muestreo a lo largo de las latitudes de $2,5^\circ$ sur, $5,0^\circ$ norte y $12,5^\circ$ norte, todas sobre el meridiano de longitud 75° W. Adicionalmente, en la definición de las condiciones temporales de la investigación se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

Analizar el comportamiento ionosférico en un año de alta actividad en el ciclo solar, para lo cual se evaluó la actividad solar por medio del Rz_{12} , entre los años 2006 hasta 2010, y se determinó que el año 2010 era el de mayor actividad solar, con un valor de Rz_{12} de 15,7 (tabla 1).

Tabla 1. Rz_{12} para los años del análisis

Año	Actividad solar Rz_{12}
2006	15,2
2007	7,5
2008	2,9
2009	3,1
2010	16,5

Una vez identificado el año de mayor actividad solar, se calcula el VTEC para siete semanas consecutivas, y a partir de este estimativo se identifican los días de mayor y menor actividad ionosférica, así como algunas tormentas geomagnéticas de las cuales se destacan las ocurridas el 5, 6 y 12 de abril de 2010, cuando la magnetosfera terrestre se vio afectada por la radiación proveniente de fulguraciones y huecos coronales asociados a la mancha solar 1060 ya desaparecida, y en la cual se produjeron tormentas geomagnéticas fuertes de magnitud G3 y G2 asociadas al

índice K_p 7 y 6, cuyo potencial puede afectar ligeramente los sistemas eléctricos y las comunicaciones en general.

De acuerdo con el comportamiento geomagnético y de VTEC evaluado para el año 2010, se seleccionaron algunas semanas antes y después de la ocurrencia de la mayor tormenta geomagnética, dando como resultado la elección de las semanas de estudio desde el día 21 de marzo y hasta el 8 de mayo de 2010, correspondiente a las semanas GPS 1576 a 1582.

Resultados

Comportamiento teórico de los datos IRI con respecto a los datos calculados

El siguiente es un análisis comparativo y cualitativo entre los datos teórico-empíricos del modelo Ionosférico de Referencia Internacional (2001) con los datos tomados por estaciones de funcionamiento continuo GNSS para los tres puntos de estudio ($12,5^\circ$ N; 5° N; $2,5^\circ$ S) sobre el meridiano 75° W.

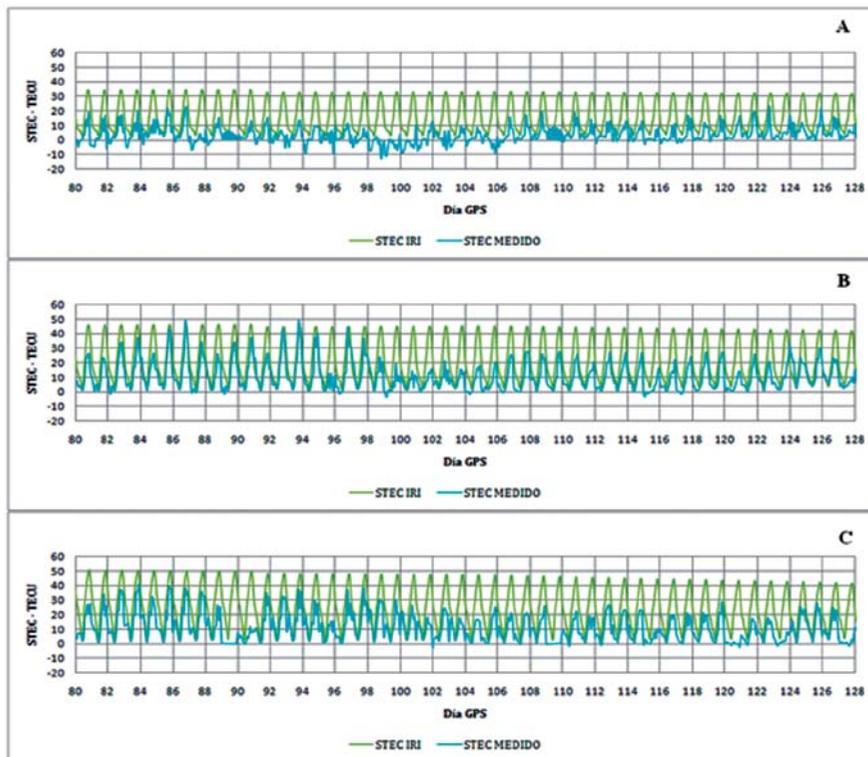


Figura 3. STEC teórico frente al calculado de los días GPS del 80 al 128 en la longitud 75° frente a valores tomados del modelo IRI-2001. **A.** Punto norte. **B.** Punto centro. **C.** Punto sur

En estas gráficas se observa que las mediciones reales difieren ampliamente del modelo IRI, dado que este último asume parámetros ideales, algo que no es muy acertado para la zona ecuatorial; por esta razón, el modelo IRI tiene un comportamiento periódico, situación que no se observa en la tendencia de los datos analizados en este estudio; adicionalmente, la resolución de los datos del modelo IRI es inferior al modelo calculado, ya que uno es de carácter global y el otro de tipo local. Sin embargo, el periodo de la señal en todos los casos es preciso entre los modelos calculado y teórico. El modelo IRI presenta ciertas limitaciones, especialmente en latitudes bajas y en zonas de alta actividad solar.

Comparación del comportamiento del VTEC

El comportamiento del VTEC presente en los tres puntos de estudio es comparado a través de las gráficas Tiempo frente a VTEC, en donde se observan las fluctuaciones presentes en la ionosfera a través del tiempo. Adicionalmente, se corroboró que el país está afectado considerablemente por las variaciones ionosféricas, donde el punto norte tiene una

menor influencia y va aumentando progresivamente hasta ser mayor en el punto centro y sur, es decir, a medida que se acerca a la anomalía ecuatorial. A partir del análisis de los VTEC se seleccionaron tres días de alta actividad ionosférica (86, 93 y 96) y tres de baja actividad (80, 115, 127).

Como es bien sabido y de acuerdo con Campbell (2003), la ionosfera se ve afectada por la actividad solar descrita por el número de manchas solares y por la actividad geomagnética, es por ello que durante todo el ciclo solar las estaciones de funcionamiento continuo (CORS) estudiadas pueden presentar épocas de baja y alta actividad denominadas días tranquilos y perturbados respectivamente, por tanto, se escogió un día en particular de las semanas analizadas con alta actividad y otro con baja actividad solar de acuerdo con el índice geomagnético K_p (tomados NOAA) y las condiciones teóricas del VTEC estimadas en la investigación:

Para el análisis del *día tranquilo* se seleccionó el día GPS 115 de la semana 1581 del año 2010, ya que en esta fecha hubo una baja actividad geomagnética durante todo el día, y según el índice, no se presentó tormenta solar.

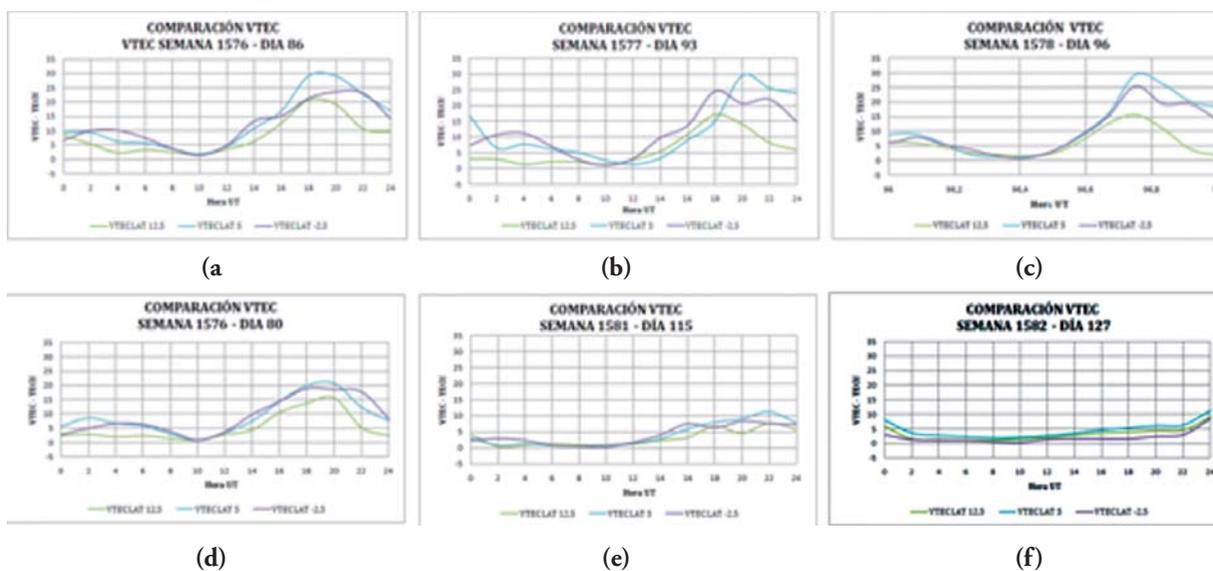


Figura 4. Variación en la longitud 75° del VTEC de los días GPS de alta actividad: (a) 86, (b) 93, (c) 96, y de bajas actividad (d) 80, (e) 115 y (f) 127

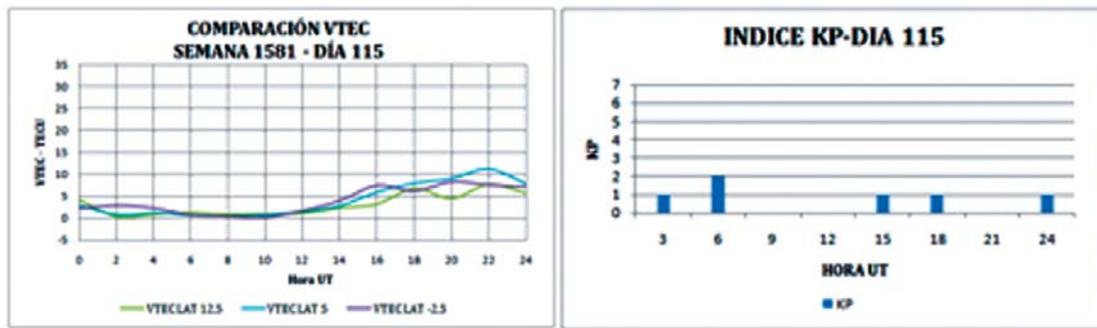


Figura 5. Variación en la longitud 75° del índice K_p de los días de baja actividad geomagnética

Con respecto al análisis del *día perturbado* se seleccionó el día GPS 96 de la semana 1578 del año 2010, periodo en el cual se presenta una alta actividad geomagnética durante todo el día, determinada por el factor de escala G2

(moderada); los valores de VTEC teóricos registrados son altos y el índice de actividad solar es $K_p = 6$ considerado como tormenta solar.

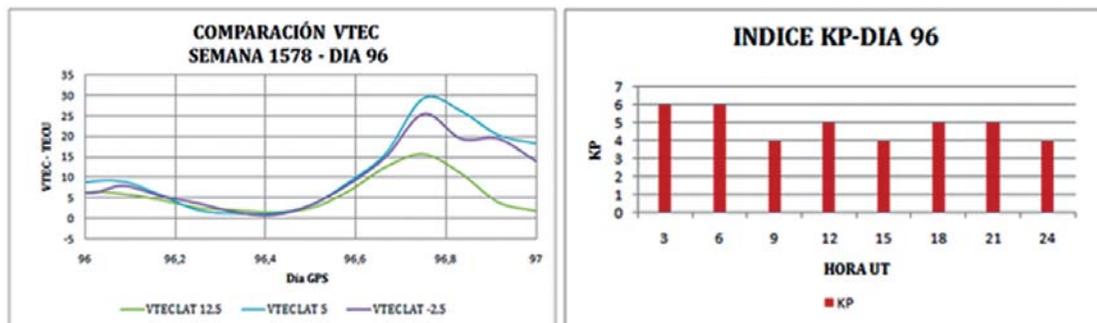


Figura 6. Variación en la longitud 75° del índice K_p de los días de alta actividad geomagnética

Comportamiento del VTEC cada dos horas para Colombia

Como resultado del procesamiento de los datos GNSS con el software científico Bernese versión 5.0, se obtuvieron los valores del VTEC estimados para cada estación de monitoreo, los cuales se representaron en mapas horarios cada 2 horas para los datos obtenidos del día tranquilo y del día

perturbado, empleando para ello una grilla de 2,5° de latitud x 10 longitud y el uso de un procedimiento geoestadístico de interpolación para modelar los datos de todo el país a partir de los puntos muestrales. El interpolador escogido fue Kriging Ordinario cada 0,1 TECU, los mapas realizados tienen proyección cartesiana de Gauss Krüger en el origen Central-Magna, con datum Magna-Sirgas (GRS-80).

Mapa de Día tranquilo – Semana GPS 1581 y día 115

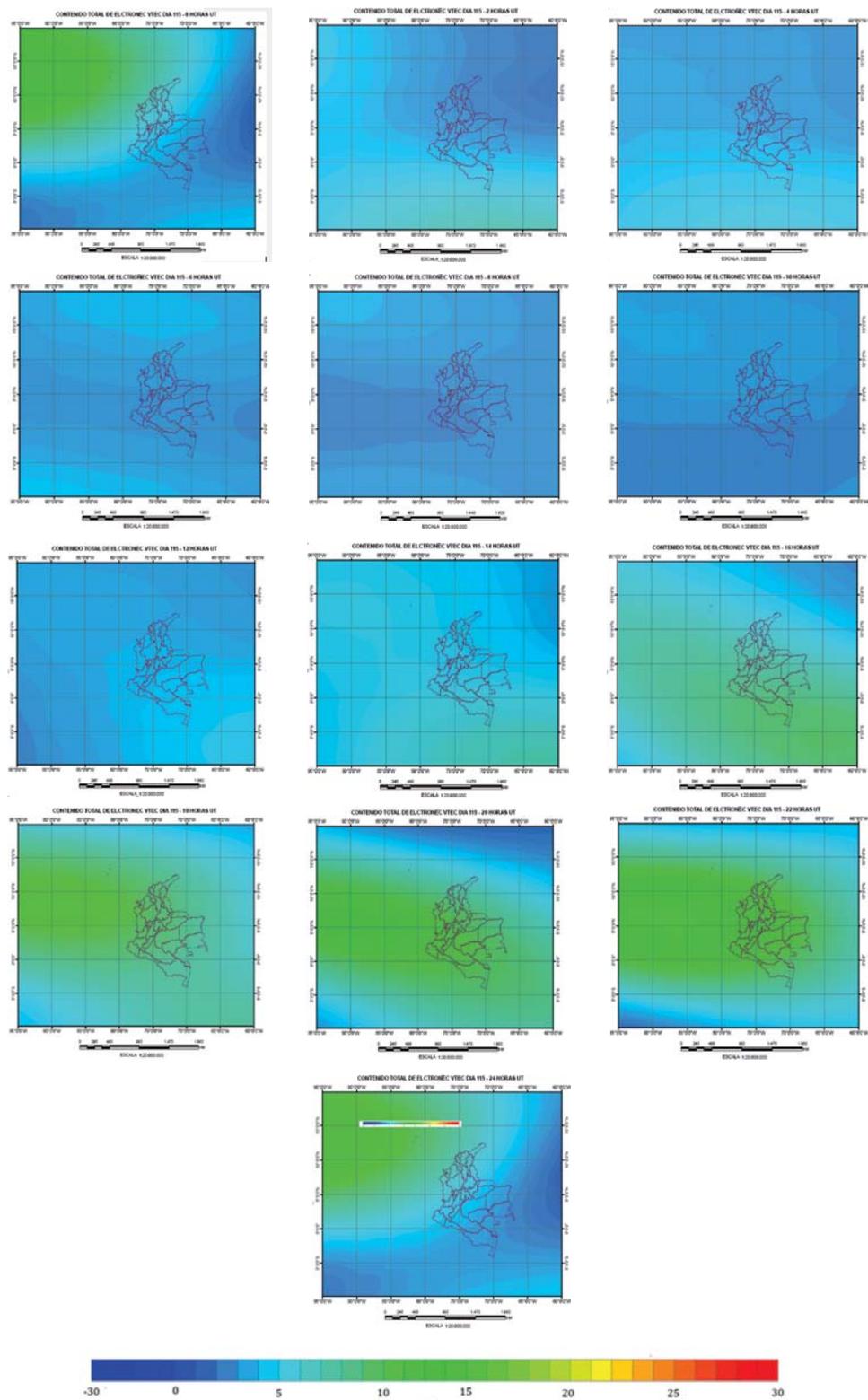


Figura 7. Mapa VTEC del día GPS 115 cada 2 horas

Mapa de Día de perturbado - Semana GPS 1578 y día 96

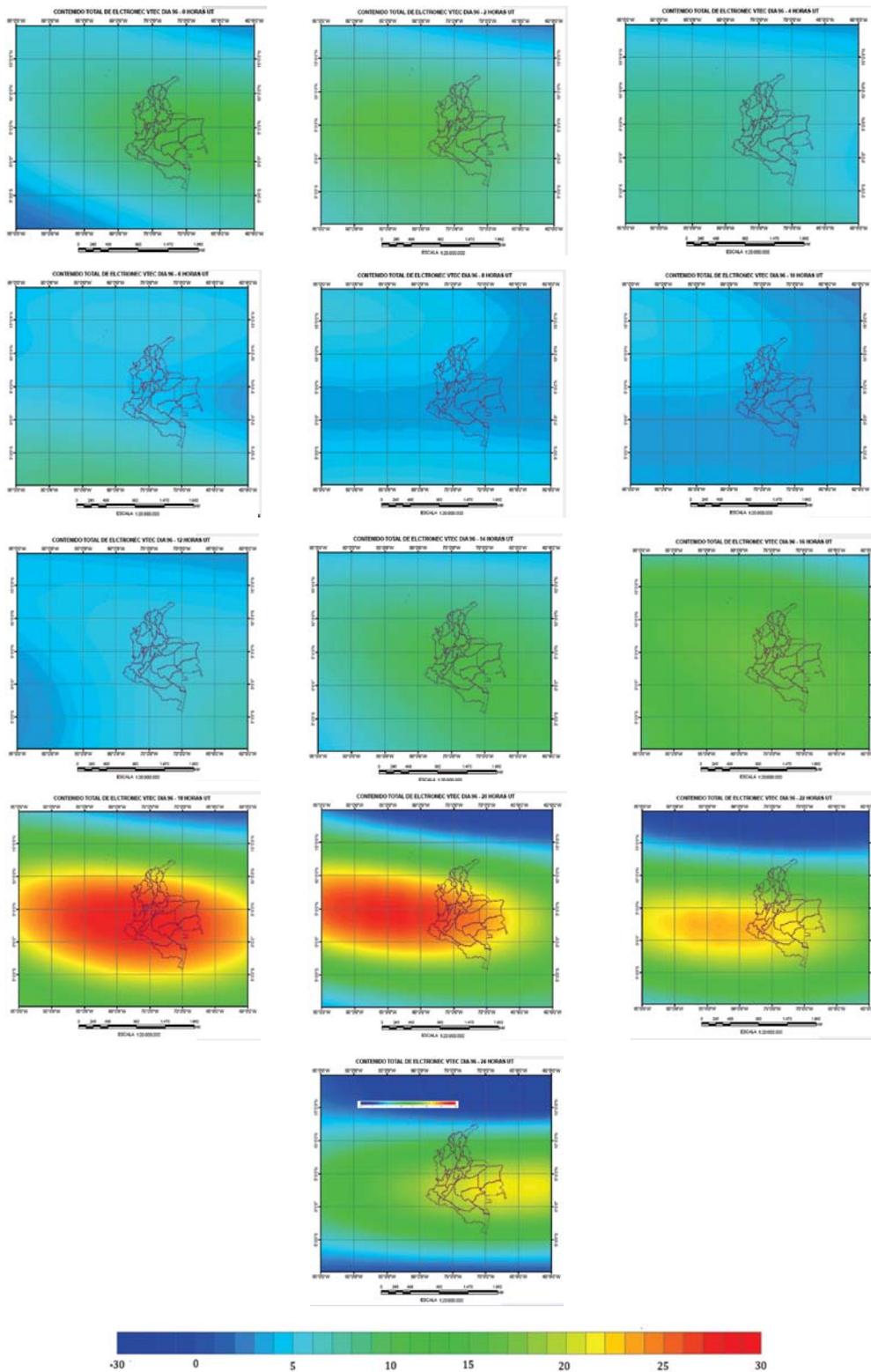


Figura 8. Mapa VTEC de día GPS 96 cada 2 horas

Validación de los resultados

La validación del estudio se estableció a través de la comparación de los valores estimados de VTEC con los datos del modelo ionosférico de la Plata (LPIN) desarrollados por la Universidad Nacional de La Plata, Argentina, Centro de Análisis Ionosférico de Sirgas, los cuales están calculados a una altura aproximada de 400 km (Ezquer *et al.*, 2008) sobre la superficie de la Tierra utilizando satélites de la constelación GPS; por el contrario, en el presente estudio la altura seleccionada fue de 350 km. Aunque la tendencia

es similar, no se pueden comparar los valores directamente dado que este modelo solo utiliza dos estaciones de funcionamiento continuo en el área de estudio de este trabajo, BOGT y RIOP, como se observó en la página oficial del Centro de Procesamiento La Plata (<http://cplat.fcaglp.unlp.edu.ar/iono/index.shtml>).

En los mapas de CPLAT se muestra que la anomalía ionosférica pasa por todo el territorio colombiano, mientras que en este estudio se observa en detalle el comportamiento ionosférico para Colombia.

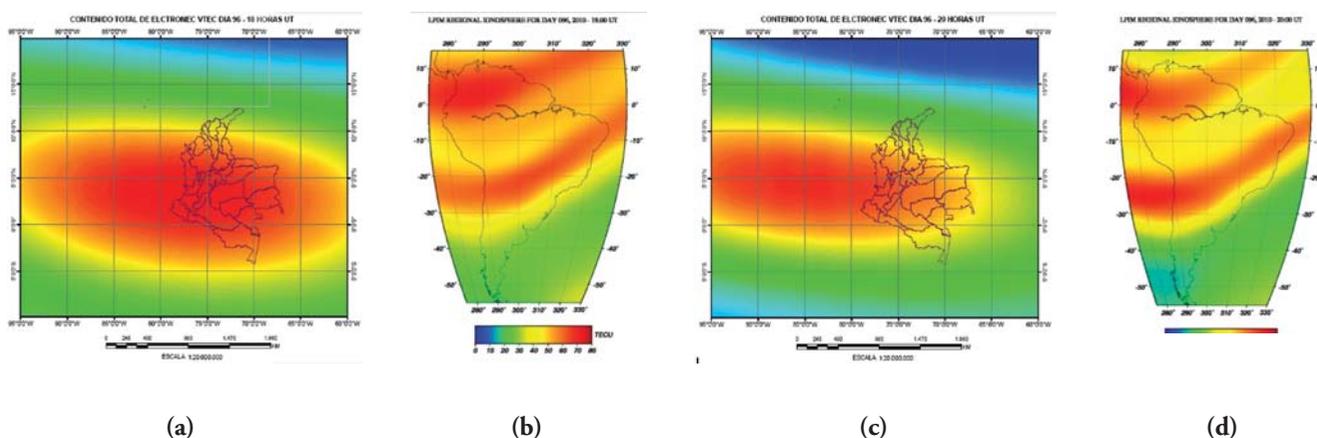


Figura 9. Comparación de los mapas del día GPS 96 del presente estudio frente a LPIM a las 18 horas UT (a) y (b), y de las 20 horas UT (c) y (d) respectivamente

Cálculo del error en las coordenadas de las estaciones GNSS debido al efecto ionosférico

La cuantificación del error en las coordenadas finales de las estaciones de funcionamiento continuo GNSS a causa del efecto ionosférico se determinó a través de la corrección de las coordenadas a partir de la aplicación del procesamiento por el método diferencial, y la aplicación de varios módulos del software GPSTk para obtener los errores en cada uno de los componentes X, Y y Z de las coordenadas de las estaciones debido al efecto ionosférico.

Dado que el software GPSTk proporciona los valores de corrección en coordenadas geocéntricas (X, Y, Z) en metros, se realizó la diferencia con las coordenadas de las estaciones de estudio en este mismo formato y luego, mediante el manejo del software Magna-Sirgas versión 3.0, se convirtieron los datos a latitud, longitud y altura elipsoidal. A continuación se presentan las gráficas de Tiempo frente a Error en metros de los componentes latitud, longitud y altura para tres estaciones en particular ubicadas una al norte SAMA, otra en el centro BOGA, y la última al sur del área de estudio denominada RIOP. Recuérdese que un segundo de arco en el Ecuador equivale aproximadamente a 30 m de longitud lineal.

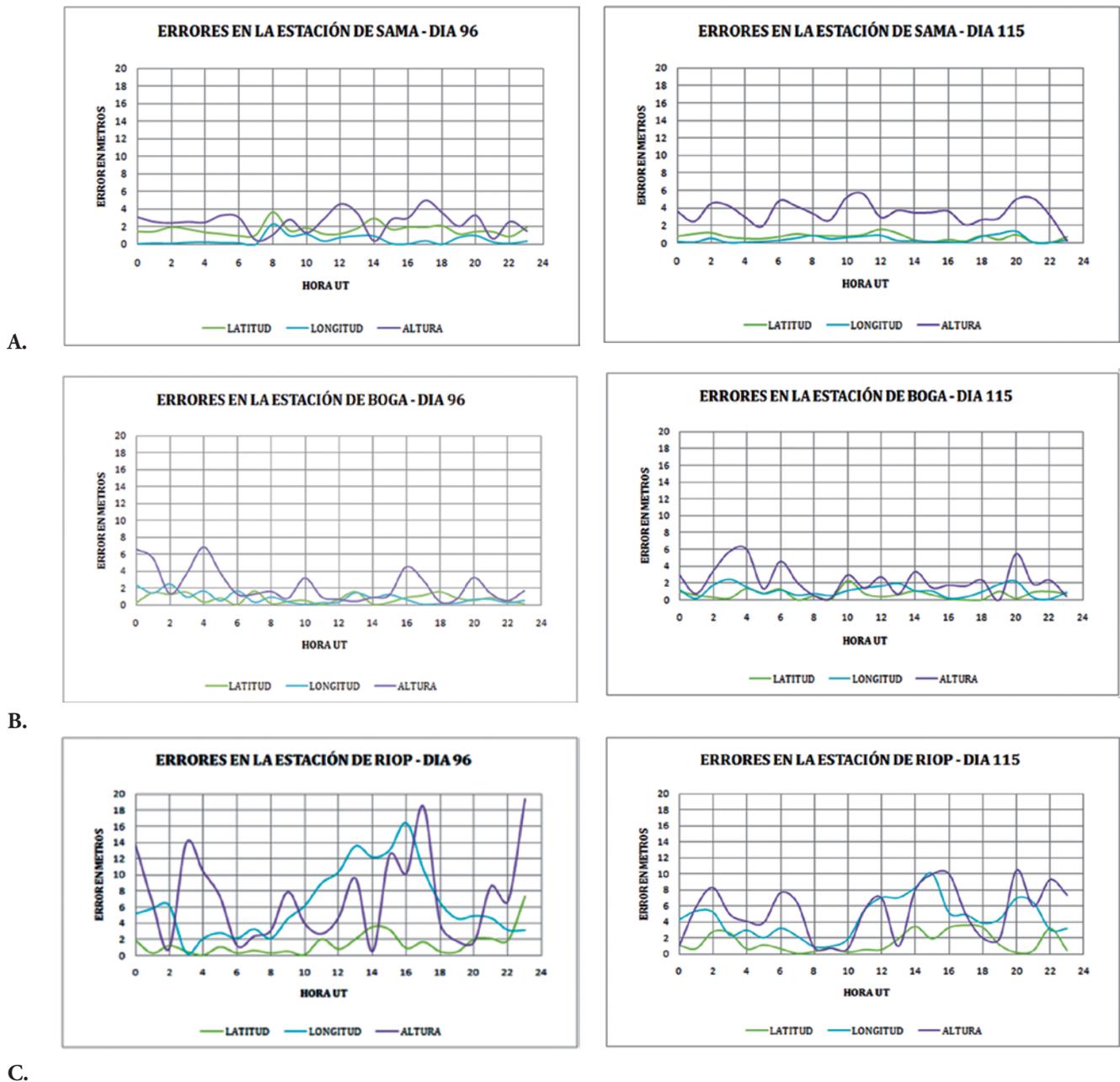


Figura 10. Errores en metros por componente en el espacio

En las gráficas se observa que la estación de SAMA, tanto para el día de mayor como para el de menor actividad, tiene valores bajos de error lo que coincide con la representación de VTEC en esta región. Los errores van aumentando a medida que nos desplazamos hacia

la zona centro en la estación de BOGA, pero el cambio significativo se observa en la estación de RIOP, ya que en esta zona el análisis global difiere de los mapas de análisis puntual, mostrando los mayores errores generados por el VTEC en la señal GNSS.

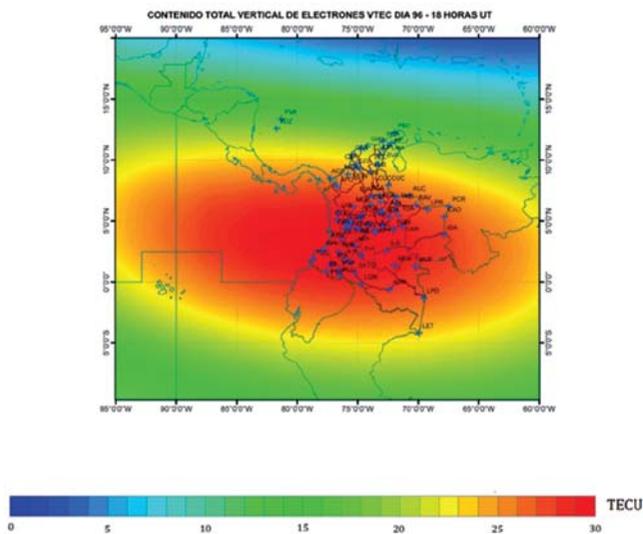


Figura 10. Mapa de aeropuertos y estaciones de estudio con el VTEC de día GPS 96-18 horas UT

De acuerdo con el anterior análisis, los aeropuertos en los que se presenta un menor grado de influencia ionosférica son: PVA, ADZ, PBO, BAQ, SMR, BVA, MCJ y RCH, ya que las correcciones a las coordenadas son menores en estas zonas, lo cual se desprende del análisis realizado para la estación SAMA. Los principales candidatos para una primera implementación de GBAS en Colombia serían los aeropuertos de PVA, ADZ y PBO, entre los cuales se destaca San Andrés pues, de los tres, es el que mayor tráfico aéreo tiene y, adicionalmente, hoy en día no cuenta con el sistema ILS porque no cumple con las características geométricas necesarias exigidas por la OACI.

Según los requerimientos definidos por la OACI (2006), para la implementación de un sistema de GBAS categoría I los máximos errores tolerables para los componentes vertical y horizontal de las coordenadas GNSS son: vertical 0,8 a 7,7 m y horizontal de 3,9 a 16 m.

Al observar los errores típicos existentes en los datos analizados se establece la necesidad de desarrollar un modelo de predicción ionosférica específico para Colombia, y un mecanismo de alerta que permita determinar el grado de confiabilidad en la utilización de GBAS en una operación determinada, cuando se sobrepasen los estándares establecidos por la OACI para la categoría I. Lo anterior toma mayor relevancia en la zona centro y sur del país, debido

a que los errores de cálculo de posición en estas zonas sobrepasan los límites permitidos para GBAS.

Cálculo de la altura ortométrica para Bogotá como complemento del sistema de GBAS

GBAS es un sistema que corrige la posición (X, Y, Z o latitud, longitud y altura) sobre la superficie de referencia denominada elipsoide, y debido a que las aeronaves necesitan para su aterrizaje una altura sobre la superficie topográfica (geoide), se aplicó una nivelación teniendo en cuenta dos NP (puntos de referencia de nivelación de precisión) y dos estaciones ubicadas en la ciudad de Bogotá, con el fin de obtener sus alturas ortométricas. Para el aeropuerto Eldorado se realizó una nivelación empleando las estaciones BOGT y ABCC, cuyas coordenadas están definidas; puntos de nivelación denominados Bogotá-8 y CD-37 (NP de precisión geométrica) y el modelo geoidal Geocol 2004 para la determinación de las ondulaciones.

La tabla 2 muestra los valores obtenidos mediante la nivelación Geocol y las diferencias entre la altura ortométrica y la elipsoidal en donde las variaciones están por el orden de 20 metros, aspecto que mejoraría la exactitud en el componente vertical durante la aproximación de los aviones a tierra. En consecuencia, es necesario tener puntos de nivelación cercanos a la pista de aterrizaje para obtener datos de altura sobre la superficie topográfica de alta precisión y no sobre la superficie matemática.

Conclusiones

El comportamiento de los datos obtenidos con el modelo ionosférico internacional de referencia (IRI) no son similares en magnitud a los datos obtenidos en el presente estudio ya que al ser un modelo teórico asume condiciones ideales. Aunque es conveniente para latitudes medias y altas donde las condiciones ionosféricas son estables y no se ven afectadas por la anomalía ecuatorial, es un buen referente para determinar la calidad de los datos obtenidos en los estudios regionales de baja latitud.

Del análisis puntual, estación por estación (SAMA – Norte, BOGA – Centro, RIOP – Sur, de la región de estudio), se obtuvo un comportamiento más cercano a la realidad, dado que los errores en el cálculo de la posición en la zona sur fueron mucho mayores que en las zonas norte y centro debido a los efectos de la anomalía ionosférica presente en estas latitudes.

Tabla 2. Cálculo de la altura ortométrica

Punto	Altura elipsoidal (h)	Altura geoidal	Altura nivelada	Dhi = hri-hBase	DNi = NRi-NBase	DHGPSi = Dhi-DNi	H°GPSi = Hbase+DHi
Bogotá-8	2571,804	25,33	2548,769	0,0000	0,0000	0,0000	
ABCC	2576,444	25,07		4,6401	-0,2600	4,9001	2553,6691
BOGT	2576,496	25,13		4,6922	-0,2000	4,8922	2553,6612
CD-37	2569,878	25,34	2546,850	-1,9260	0,0100	-1,9360	2546,8330

$DH_{GPS}^{\circ} = DH_i - DH_{i-1}$	DH_{GPS} corregido	H_{GPS} final	Diferencia altura elipsoidal y altura ortométrica	Diferencia alturas ortométricas
		2548,769	23,035	0,0000
4,9001	4,9058	2553,675	22,769	-4,9058
-0,0079	-0,0022	2553,673	22,824	-4,9035
-6,8282	-6,8225	2546,850	23,028	1,9190

Los mapas de VTEC elaborados reflejan que Colombia se encuentra bastante afectada por la ionosfera, principalmente en la zona centro y sur del país, lo cual se ve plasmado en los errores de coordenadas obtenidas por medio de GNSS en estas zonas del país.

Al observar los errores típicos en el cálculo de las coordenadas, se hace necesario desarrollar un modelo de predicción ionosférico para Colombia con ayuda de un monitoreo constante de la ionósfera y un mecanismo de alerta que permita decidir si es prudente utilizar GBAS cuando se sobrepasen los estándares establecidos para la categoría I; en este caso deberán utilizarse los mecanismos de navegación tradicionales. Para esto, es indispensable realizar una base de datos de STEC y VTEC construyendo un historial del comportamiento de la ionósfera, identificando las variaciones estacionales y determinando los cambios en ciclos solares.

Existe una relación directa entre las tormentas geomagnéticas, su efecto sobre la ionósfera y el correspondiente error en la posición (latitud, longitud y altura, siendo en esta última en donde se presenta el mayor error). Esto se observó de modo cualitativo al relacionar los valores de los índices K_p con los errores en el cálculo de la posición y en la definición de los días calmados y de tormenta definidos en la obtención de los mapas de VTEC.

El cálculo de la altura ortométrica a partir de información GNSS es una variable adicional muy importante para la implementación de GBAS, ya que las correcciones a las coordenadas finales de las estaciones de control que se realizan mediante la aplicación de un modelo ionosférico son realizadas sobre la superficie de referencia del elipsoide (WGS84 o GRS80), y para realizar el aterrizaje de una aeronave se requiere información de la altura sobre el nivel medio del mar, la cual no la proporciona ningún sistema GNSS por sí sola; en virtud de esto, el presente estudio determina y analiza en detalle el cálculo de la altura ortométrica para las estaciones de prueba como ejemplo para seguir nuevos estudios de GBAS.

Agradecimientos

Agradecemos al Instituto Geográfico Agustín Codazzi la colaboración prestada a través de la Subdirección de Geografía y Cartografía quien nos autorizó el manejo del software de procesamiento científico de datos GNSS Bernese versión 5.0, y el uso de los datos de observación de las estaciones de funcionamiento continuo Magnaeco para la realización de dicha investigación. Adicionalmente, agradecemos a Ingeominas y a la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (UAEAC) por el apoyo suministrado al proyecto.

Referencias bibliográficas

- Brunini, C., Meza, A., Azpilicueta, F., van-Zele, M., van-Zele, A., Gende, M. y Díaz, A. (2006). A new Ionosphere Monitoring Technology based on GPS. *Astrophysics and Space Science*, 290 (3-4), 415-429.
- Brunini, C. y Azpilicueta, F. (2010). GPS slant total electron content accuracy using the single layer model under different geomagnetic regions and ionospheric conditions. Original Article. *Journal of Geodesy*, 84 (5), 293-304, doi: 10.1007/s00190-010-0367-5.
- Campbell, W. H. (2003). *Introduction to Geomagnetic Fields*. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Drewes, H. (2006). *Geodetic Reference Frames; International Association of Geodesy Simposia*. Munich: Springer.
- Ezquer, R. G. y Radicella, S. M. (2008). Ionósfera de bajas latitudes: efectos sobre señales de satélites recibidas en Tucumán. *Física de la Tierra*, 20, 61-81.
- Gende, M., Mohino-Harris, E., Brunini, C., Radicella S. y Herraiz M. (2005). Ionospheric biases correction for coordinates derived from GPS single point positioning. *Annals of Geophysics*, 48 (3), 439-444.
- OACI (2006). Convención sobre aviación internacional civil. Radioayudas para la navegación (Anexo 10-Volumen). Chicago
- Rolf, D., Urs, H., Pierre, &. y Meindl, M. (2007). Bernese GPSVversion 5.) [Software de Navegación]. Berne: Astronomical Institute, University of Bern.
- Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy*. Berlín: Walter de Gruyter.
- Valladares, rC. y villalobos, eJ. (2008). LISN: una red para la caracterización del estado actual y pronóstico de la ionosfera en América del Sur. *Física de la Tierra*, 21 (20), 199-213.
- Nacional Geophysical Data Center (2001). <http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/strutsresults?t=102827&s=5&d=8,430,9>.