

**PROCESAMIENTO DE DATOS DE POSICIONAMIENTO CON RECEPTORES
GNSS MONOFRECUENCIA EN OBSERVABLE CÓDIGO Y CUANTIFICACIÓN
DE LA PRECISIÓN PARA DIFERENTES COMBINACIONES DE ALGORITMOS**

BREINER PEÑARANDA ANGULO.
WILDEMAR PINEDA AGUDELO.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
SANTIAGO DE CALI
2018.

**PROCESAMIENTO DE DATOS DE POSICIONAMIENTO CON RECEPTORES
GNSS MONOFRECUENCIA EN OBSERVABLE CÓDIGO Y CUANTIFICACIÓN
DE LA PRECISIÓN PARA DIFERENTES COMBINACIONES DE ALGORITMOS**

BREINER PEÑARANDA ANGULO.
WILDEMAR PINEDA AGUDELO.

Trabajo de tesis para optar el título de:
Ingeniero Topográfico

Director:
Ph.D, JHON JAIRÓ BARONA.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
SANTIAGO DE CALI
2018.

NOTA DE APROBACIÓN

El trabajo de grado titulado “PROCESAMIENTO DE DATOS DE POSICIONAMIENTO CON RECEPTORES GNSS MONOFRECUENCIA EN OBSERVABLE CÓDIGO Y CUANTIFICACIÓN DE LA PRECISIÓN PARA DIFERENTES COMBINACIONES DE ALGORITMOS.”, presentado por los estudiantes Wildemar Pineda Agudelo y Breiner Peñaranda Angulo como requisito parcial para optar el título de Ingeniera Topográfica, fue aprobado por:

Director de Tesis.

Jurado 1.

Jurado 2.

Santiago de Cali, julio de 2018

Dedicación

*Queremos dedicar este trabajo de grado A
nuestras familias ya que fueron el motor
incondicional para la culminación de este
proyecto, a nuestros compañeros y Seres
queridos.*

Agradecimientos

Como agradecimiento especial a Dios por permitirnos culminar con este proyecto de la mejor manera.

Agradecimiento a la familia de Wildemar Pineda (esposa e hija) y a la pareja de Breiner Peñaranda, como a nuestras familias por estar siempre a nuestro lado y brindarnos el apoyo necesario para cumplir esta meta, hasta en los momentos más difíciles. A nuestras madres, Clementina Angulo y Teresa Agudelo por siempre confiar, estar pendiente de nosotros y darnos su amor para culminar este pregrado de forma exitosa. A nuestros hermanos que nos apoyaron y animaban cada vez que terminaba cada semestre y amigos que me sirvieron como base de conocimiento para superar cada etapa de la carrera. Agradecemos a la Universidad de Valle; a nuestros profesores que guiaron nuestro camino

A los evaluadores por sus revisiones y la dedicación de su tiempo para realizarlas

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.	10
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	11
3. OBJETIVOS.	12
3.1. OBJETIVO PRINCIPAL.	12
3.2. Objetivo Específicos.	12
4. JUSTIFICACIÓN.	13
5. CONCEPTOS GENERALES.	13
5.1 ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS.	13
5.1.1 Espectro Electromagnético.	14
5.1.2 Ondas de Radio.	14
5.1.3 Ondas Infrarrojas.	14
5.1.4 Luz Visible.	14
5.1.5 Ondas Ultravioleta.	14
5.1.6 Rayos X.	14
5.1.7 Rayos Gamma.	14
5.1.8 Microondas.	15
5.1.9 Banda L.	15
5.2 SISTEMA GLOBAL DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE (GNSS).	15
5.2.1 Pseudodistancia.	15
5.2.2 Observable Código.	15
5.2.3 Observable Fase.	15
5.2.4 Receptor.	16
5.2.5 Monofrecuencia.	16
5.3 Atmósfera.	16
5.3.1 Troposfera.	16
5.3.2 Ionosfera.	16
6. GENERALIDADES DEL POSICIONAMIENTO GNSS.	16
6.1 ERRORES ASOCIADOS A LAS OBSERVACIONES GNSS.	16
6.1.1 Errores Dependientes de Satélite.	17
6.1.1.1 Errores de Reloj.	17

6.1.1.2 Efecto Relativista.....	18
6.1.1.3 Errores en los Parámetros Orbitales del Satélite.	18
6.1.2 Errores Dependientes a la Propagación de la Señal.	19
6.1.2.1 Ionosfera.	19
6.1.2.1.1 Modelos Ionosféricos.....	19
6.1.2.2 Tropósfera.....	22
6.1.2.2.1 Modelos Troposféricos.	24
6.1.3 Otros Errores del Equipo.....	27
6.2 MODELOS DE POSICIONAMIENTO.	27
6.2.1 Modelo de Pseudo-distancia.	27
6.2.2 Modelo de Simples Diferencias.	29
6.2.2.1 Modelo de Simples Diferencias (entre satélites).	29
7. REFERENCIA.	30
8. MATERIALES Y SOFTWARE.....	31
8.1 ARCHIVOS RINEX.	31
8.2 SOFTWARE.....	36
9. METODOLOGÍA.....	36
9.1 REVISIÓN DE ALGORITMOS DE PROCESAMIENTO Y SELECCIÓN DE ALGORITMOS SEGÚN LAS CARACTERÍSTICAS DEL ESTUDIO.	37
9.2 PROGRAMACIÓN DE ALGORITMOS.	38
9.2.1 Modelo de Posicionamiento.	41
9.2.2 Modelos de Atmosféricos.	41
9.3 COMBINACIÓN DE DIFERENTES ALGORITMOS.	43
9.4 VALIDACIÓN.....	45
10. RESULTADOS.....	49
11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	57
12. CONCLUSIONES.	72
13. BIBLIOGRAFÍA.....	74
ANEXOS.....	77

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Errores dependientes a la propagación de la señal.....	19
Ilustración 2 Diagrama IPP.....	20
Ilustración 3 Altura de cada región atmosférica.	22
Ilustración 4 STEC	31
Ilustración 5 formato RINEX archivo de Observación.	32
Ilustración 6 Formato RINEX Archivo de Navegación.....	33
Ilustración 7 Fuente de descarga de datos GNSS del IGAC	34
Ilustración 8 Representación de las Estaciones del IGAC.....	35
Ilustración 9 Esquema metodológico.	36
Ilustración 10 Representación del programa para cargar Archivos RINEX.....	43
Ilustración 11 Representación del programa para cargar variables meteorológicas.....	44
Ilustración 12 Representación de las coordenadas por medio del programa.	44
Ilustración 13 Representación del punto procesado en el software y mostrado por Google Earth.....	45
Ilustración 14 Error horizontal en el posicionamiento.....	59
Ilustración 15 Error vertical en el posicionamiento.	60
Ilustración 16 Error total en el posicionamiento.....	61
Ilustración 17 Errores totales en el posicionamiento por modelo, con respecto a cada estación de referencia.....	66
Ilustración 18 Comportamiento de datos por cada modelo.	70

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1 Estaciones del IGAC.....	35
Tabla 2 Actualización de coordenadas.	45
Tabla 3 Coordenadas actualizadas para los datos del 2 de abril y 5 de marzo del 2018.	46
Tabla 4 Error medio cuadrático Datos 5 marzo del 2018	47
Tabla 5 Error medio cuadrático Datos 2 de abril del 2018.....	48
Tabla 6 Resultado de las coordenadas por los modelos implementados datos 2 abril.	49
Tabla 7 Resultado de las coordenadas por los modelos implementados datos 5 de marzo	52
Tabla 8 Análisis cuantitativo de las estaciones de monitoreo promedio en el error de posicionamiento en Colombia.	57
Tabla 9 Mejores resultados obtenidos por la herramienta.....	67
Tabla 10 Promedio en el error de posicionamiento de los municipios con similares condiciones climáticas.	68
Tabla 11 Promedio en el error de posicionamiento de los municipios con similares condiciones climáticas.	69
Tabla 12 Identificación del mejor modelo por estación.....	71
Tabla 13 Clasificación cualitativa de los modelos.....	72

RESUMEN

Este proyecto consiste en la aplicación de una metodología comparativa en la cual se combinan modelos atmosféricos (ionosférico y troposférico) y modelos de posicionamiento, para determinar cuál es la mejor combinación para el posicionamiento absoluto y en tiempo real con un equipo monofrecuencia con observable código C/A. Este proyecto permitirá conocer la precisión que se puede lograr con la aplicación de modelos matemáticos y abre un camino para futuras líneas de investigación.

El trabajo consta de tres fases: la recolección de datos, la creación y ejecución de una herramienta y la validación de los datos obtenidos. La primera incluye la recopilación utilización de datos de posicionamiento satelital --archivos RINEX (observación y navegación) para dos épocas diferentes obtenidos de las estaciones GNSS de monitoreo MAGNA-ECO del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. La segunda consta de la aplicación de una herramienta realizada para este trabajo por medio del software Matlab, que calcula las coordenadas del punto aplicando los modelos atmosféricos y de posicionamiento. Por último, la tercera consiste en un proceso de validación en el cual se calcula el error medio cuadrático entre las coordenadas actualizadas de las estaciones de monitoreo y las coordenadas obtenidas a través de la herramienta creada en la segunda fase.

Al final de este estudio se determinó que la mejor combinación fue la que se obtuvo entre los modelos Klobuchar, Goad y Goodman y el de posicionamiento de pseudo-distancia. Ya que, en comparación con las coordenadas actualizadas de las estaciones del IGAC, la combinación escogida presenta un error total en promedio de 4,255 +/- 0,838 metros, error horizontal de 3,679 +/-0,873 metros y un error vertical de 1,951 +/- 0,880 metros.

1. INTRODUCCIÓN.

Los inicios de la tecnología GNSS se remontan a los años 70 del siglo pasado, cuando se desarrolló el sistema militar estadounidense GPS (Global Positioning System) para el direccionamiento de misiles, la localización de objetivos y de tropas, entre otros. Esta tecnología se basa en una red de satélites y un receptor de GNSS, el cual es capaz de determinar su posición en cuatro dimensiones (longitud, latitud, altitud, y tiempo), por lo cual es útil en diferentes campos de aplicación, tanto civiles como militares volviéndose una tecnología multidisciplinar (Ruggieri y Prasad, 2005).

En la actualidad, la tecnología GNSS está siendo implementada en diferentes campos, utilizando desde navegadores hasta equipos de alta precisión. La diferencia radica en los altos costos que estos equipos tienen (Kang, 2016) ya que, la precisión de las coordenadas requeridas depende del uso y del enfoque que se le esté dando (finalidad del trabajo y escala en la que se maneje el proyecto).

Así, teniendo en cuenta los factores mencionados, no es necesario equipos de alta precisión y alto costo para todos los enfoques aplicativos de esta tecnología. De allí que este trabajo proponga alcanzar mejores resultados con herramientas de bajo costo: observable código y monofrecuencia.

En la tecnología GNSS el cálculo de las coordenadas se basa en la distancia entre los satélites y el receptor. Existen dos formas para calcular la distancia a partir de la señal emitida, la primera es en código, ya que calcula la pseudodistancia por medio de la diferencia del tiempo entre los relojes del satélite y del receptor y; la segunda es en fase portadora, que calcula la pseudodistancia con la diferencia de fase existente entre el satélite y el receptor. Debido a que los equipos con observable código son de baja precisión, estos son de menor precio en el mercado en comparación a los que trabajan con observables fase.

Por otra parte, los equipos que trabajan con monofrecuencia no eliminan el error de la ionosfera cómo lo hacen los doblefrecuencia, de allí que resulte tan pertinente el desarrollo de modelos matemáticos para mejorar los resultados en los equipos GNSS que trabajan con una sola frecuencia (Ningbo Wang *et al.*, 2016).

En este sentido, la herramienta creada para este trabajo integra modelos de bajo costo que mitigan los efectos creados por distintas fuentes de error cómo el multicamino, las efemérides, el reloj, la relatividad y la atmosfera (ionosfera y tropósfera), esta última una de las causas más significativas de error al posicionamiento. Muchos usuarios corrigen la pérdida de la señal por causa de la ionosfera, pero por lo general quedan residuos dependiendo del orden de eliminación y de aplicación (Zhimin *et al.*, 2016).

La base de este estudio son archivos Rinex para dos épocas diferentes (generados por las estaciones de monitoreo que conforman la red MAGNA ECO del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)), que fueron procesados en una aplicación creada para este

trabajo por medio del software matemático MatLab. Dicha aplicación integra diferentes funciones que contienen los modelos troposféricos de Hopfield modificado, Saastamoinen y Collins (UNB), el modelo ionosférico Klobuchar y los modelos de posicionamiento simples diferencias entre satélites y pseudo-distancia. Los resultados de este estudio identifican como mejor opción, la combinación entre los modelos Klobuchar y Hopfield modificado (Goad y Goodman) en la parte atmosférica y el modelo de pseudo-distancia en la parte de posicionamiento.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En la actualidad, el uso del Sistema de Posicionamiento Global por Satélite (GNSS) es aplicado en diferentes campos militares o civiles: aviación, marina, geodesia, transporte entre otros (*Mohinder S et al., 2007*). Algunos lo han calificado como un servicio público del futuro, debido a sus diversas aplicaciones y al requerimiento habitual que tendrá. (*French, 1996*).

El posicionamiento por medio de GNSS se basa en el viaje que tiene la señal electromagnética desde el satélite hasta el receptor, en este viaje la señal se afecta por diferentes condiciones que disminuyen la exactitud y la precisión del posicionamiento. Estos errores en el posicionamiento, según sus características, se pueden dividir en corregibles y no corregibles. Entre los corregibles se encuentran los de los relojes del satélite y del receptor, la troposfera, la órbita y el de la ionosfera (*Mosavi y Azarbad, 2013*). Lo anterior explica la necesidad de aplicar sistemas de corrección para disminuir los errores en el posicionamiento, tal como lo expresa (*Kaivosoja y Linkolehto 2015*) cuando dicen que los resultados en el posicionamiento GNSS sin la aplicación de sistemas de corrección que disminuyan o eliminen errores en la señal, suelen tener poca fiabilidad en la exactitud para ciertas aplicaciones.

Hoy, los receptores GNSS se pueden dividir en dos grandes grupos, al primero pertenecen aquellos equipos que gracias a su bajo costo en el mercado pueden ser utilizados a gran escala, aunque con bajas precisiones, en el segundo, los que ofrecen altas precisiones, aunque no son utilizados a gran escala debido a su alto costo monetario (*Kang, 2016*). El receptor GPS con observable código C/A (perteneciente al primer grupo) es un dispositivo manual de posicionamiento y navegación, que calcula la pseudodistancia entre el satélite y el receptor a partir de medidas de tiempo de la señal portadora L1, (*Sanchez, 2010*). Estos dispositivos deben ser utilizados al aire libre y son capaces de captar las señales de cuatro o más satélites GPS que permiten calcular las distancias a los cuatro satélites, y con esos datos, se obtiene la posición sobre la superficie de la Tierra en términos de latitud, longitud y altura. Debido a las limitaciones de este tipo de receptores es común que se utilicen hardwares y aplicaciones de software para reducir los errores que afectan la señal tanto en modo estático como modo relativo (*Mosavi y Azarbad, 2013*).

En consecuencia, la corrección de la perturbación de la señal en equipos de monofrecuencia es un reto para mejorar la precisión en el posicionamiento GNSS (*Mosavi y Azarbad, 2013*), que puede alcanzarse a través de algoritmos o modelos que aporten mayor precisión de los resultados (*Zhimin et al., 2016*) ya que, según (*Rovira et al., 2015*) la utilización de equipos de bajo costo en el mercado (de una sola frecuencia) generan una menor precisión en los resultados de posicionamiento en modo cinemático. Sin embargo, aunque muchos usuarios corrigen la pérdida de la señal causada por diferentes variables durante su el trayecto desde el satélite hasta el receptor, quedan residuos que dependen del orden de eliminación y de aplicación (*Zhimin et al., 2016*).

La presentación realizada en el Taller Regional “Cartografía Censal con Miras a la Ronda de Censos 2010 en Latinoamérica” por la ingeniera civil (*Gina, 2008*) afirma que la precisión de los datos GNSS depende de la aplicación y las necesidades que requiere el usuario. Así, teniendo en cuenta que las precisiones que se obtienen por medio de los receptores GNSS monofrecuencia a bajo costo no son las más adecuadas para ciertos tipos de levantamiento y que los equipos que ofrecen mayores presiones métricas son de alto costo, surge un interrogante ¿Cómo mejorar la precisión de posicionamiento en los receptores GNSS de monofrecuencia con observable código por medio de una solución a bajo costo?

3. OBJETIVOS.

3.1. OBJETIVO PRINCIPAL.

Cuantificar la variación en la precisión de datos GNSS obtenidos mediante observable de código en receptores monofrecuencia, a partir de los resultados obtenidos, tras aplicar modelos matemáticos de corrección de errores de ionosfera, troposfera y de reloj, sin el uso de una estación de referencia.

3.2. Objetivo Específicos.

- ✓ Valorar la bondad de los modelos matemáticos, identificados en la investigación de los errores asociados a la propagación de la señal.
- ✓ Desarrollar una herramienta que aplique correcciones a los datos recibidos en los receptores GNSS monofrecuencia para obtener una mejor precisión en la posición absoluta.
- ✓ Validar los resultados obtenidos.

4. JUSTIFICACIÓN.

Desde las primeras civilizaciones ha existido la necesidad de representar la ubicación de todo lo que nos rodea. Bajo esta preocupación nacen las disciplinas científicas encargadas del estudio geométrico de la superficie de la Tierra: la geodesia y la topografía.

La precisión y exactitud del posicionamiento GNSS depende del tipo de observable, el número de satélites, los modelos de corrección aplicados, entre otros factores que pueden afectarlas. En el mercado existen equipos con altas precisiones, incluso sub-métricas, aunque con altos costos, por lo que no se pueden aplicar a proyectos a gran escala en el muestreo espacial. Sin embargo, una solución económica en la adquisición de equipos no brinda la suficiente precisión requerida para el estudio.

Por lo anteriormente expuesto, la metodología propuesta en este proyecto tiene dos utilidades, por un lado, sirve de base para futuros estudios sobre la corrección de errores o ruidos en la señal utilizada en el posicionamiento GNSS monofrecuencia. Por el otro se instala en la parte práctica ya que, la herramienta creada puede calcular coordenadas con la misma precisión (o hasta mayor) a un menor costo monetario, en comparación de equipos con observable código monofrecuencia ofrecidos en el mercado.

En consecuencia, la practicidad que representa la herramienta creada tiene como mayores cualidades la económica y la obtención de coordenadas precisas en proyectos a gran escala a nivel espacial, puesto que da solución a las restricciones de precisión que tienen los equipos de bajo costo utilizados en ciertos levantamientos de información espacial.

5. CONCEPTOS GENERALES.

Para facilitar la comprensión del documento de proyecto de grado, a continuación, se definen los términos específicos en el contexto trabajado, los cuales abarcan el GNSS y su funcionamiento.

5.1 ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS.

En física, una onda se define como la propagación de energía sin desplazamiento de materia. Las ondas electromagnéticas se propagan mediante una oscilación de campos eléctricos y magnéticos sin la necesidad de un medio físico a la velocidad aproximada de 300 000 km/s en el vacío.

5.1.1 Espectro Electromagnético.

El espectro electromagnético es el conjunto de longitudes de ondas de todas las radiaciones electromagnéticas. Hay una gran variedad de ondas que se pueden identificar en el espectro electromagnético, desde frecuencias de radio hasta los rayos gamma.

5.1.2 Ondas de Radio.

Las ondas de radio se pueden identificar en una longitud de 10^4 m hasta 0.1 m , esto, gracias a las cargas que se aceleran en los alambres conductores. Este tipo de ondas son producidas o generadas por instrumentos electrónicos, como radio y televisión.

5.1.3 Ondas Infrarrojas.

Las ondas infrarrojas tienen una longitud entre los 10^{-3} m hasta 10^{-7} m , son emitidas por moléculas a temperatura ambiente y se absorben con mayor facilidad por los materiales. Esta energía se produce por la agitación de los átomos del objeto cuando hay un incremento vibratorio, dando como resultado un incremento en la temperatura.

5.1.4 Luz Visible.

La luz visible se encuentra entre las longitudes de $4 * 10^{-3} \text{ m}$ y los $8 * 10^{-3} \text{ m}$. Es la más común ya que, es la que los sensores que se encuentran en los ojos de los seres humanos pueden identificar con mayor facilidad, es generada por la acomodación de los electrones en los átomos y moléculas. Estas ondas tienen diferentes colores que van desde el azul hasta el rojo.

5.1.5 Ondas Ultravioleta.

Las ondas ultravioletas se encuentran en una longitud de $4 * 10^{-7} \text{ m}$ hasta $6 * 10^{-10}$. El sol es una de las mayores fuentes de ondas ultravioleta, esta luz es la que más afecta la salud humana porque ocasiona quemaduras en la piel de forma irreversible.

5.1.6 Rayos X.

Estas ondas tienen una longitud que va desde los 10^{-8} m hasta 10^{-12} m , una de las principales fuentes de estos tipos de ondas es el choque o frenado de electrones con alta energía con un objeto metálico. Estas ondas son muy comunes en el área de la medicina y se usan como herramienta para la cura de ciertas enfermedades. También son utilizadas en ciertos estudios de estructuras de cristal ya que su longitud de onda es detectable en la separación de los átomos en sólidos alrededor de los 0.1 nm .

5.1.7 Rayos Gamma.

Los rayos gamma son componentes de ciertos rayos cósmicos que pasan la atmósfera de la Tierra, tienen longitudes alrededor de los 10^{-10} m hasta 10^{-14} m , son emitidas por

núcleos radiactivos y por algunas reacciones nucleares. Causan daños irreversibles si son absorbidos por los tejidos de los seres vivos.

5.1.8 Microondas.

Son generadas por instrumentos electrónicos y tienen una longitud corta de 0.3 m hasta 10^{-4} m . Se utilizan para sistemas de radar, estudios atómicos, transmisión de datos, hornos microondas y para el sistema de navegación por satélite.

5.1.9 Banda L.

La banda L se encuentra en la frecuencia 1 y 2 GHz, adecuada para operaciones tácticas y móviles. Brinda cobertura global sin interrupciones, por lo cual se utiliza en la comunicación de banda ancha de usuarios móviles en cualquier parte del mundo. Es utilizada en los sistemas de navegación por satélite, en servicios de voz móvil, videos y datos (terrestres, aéreos marítimos).

5.2 SISTEMA GLOBAL DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE (GNSS).

GNSS son las siglas en inglés de Sistema Global de Navegación por Satélite, capaz de calcular las coordenadas geográficas de cualquier punto de la superficie de la Tierra a partir de rangos de señales enviadas por satélites artificiales colocados en la órbita terrestre. Se utiliza en las fuerzas aéreas militares marinas y terrestres, además de aplicaciones cívicas como navegación marítima, agricultura, geodesia y geofísica.

El GNSS calcula una posición sobre la superficie terrestre a partir de mínimo cuatro satélites con posición conocida. La precisión de las mediciones de distancia determina la exactitud de la ubicación final.

5.2.1 Pseudodistancia.

Es el cálculo preliminar de la distancia existente entre el satélite y el receptor. Se puede obtener a partir de medidas de tiempo o de diferencias de fase basadas en la diferencia entre la señal transmitida por el satélite y la réplica de la señal generada por el receptor.

5.2.2 Observable Código.

Observable código es el cálculo de la distancia derivada del tiempo que tarda la señal desde el receptor hasta el satélite, teniendo en cuenta que la señal viaja a la velocidad de la luz.

5.2.3 Observable Fase.

Observable de fase es el cálculo de la distancia derivada del desfase existente entre la señal transmitida por el satélite y la réplica de la señal generada por el receptor.

5.2.4 Receptor.

Es un equipo o instrumento ubicado en la superficie terrestre, capaz de captar los rangos de señal que contienen la información de la posición del satélite (efemérides) emitida por los satélites en órbita. Los receptores pueden trabajar con una frecuencia L1 o dos frecuencias L1 y L2.

5.2.5 Monofrecuencia.

Hace referencia a los receptores que trabajan con una sola frecuencia o señal, es decir, una onda microondas conocida como L1 (señal primaria). Esta señal se transmite a una frecuencia de 1575,42 Mhz y contiene la información de navegación de los satélites.

5.3 Atmósfera.

La atmósfera es la capa conformada por gases que cubren un cuerpo celeste como los planetas. Está compuesta principalmente por nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, ozono y vapor de agua, gases que se mantienen cerca de los cuerpos por la atracción de la gravedad. Sus capas ionosfera y troposfera son las que causan mayores retardos en las señales GNSS.

5.3.1 Troposfera.

Es la capa más baja de la atmósfera, contiene vapor de agua y su índice de refracción está en función de la temperatura, presión y vapor de agua. Cuando las ondas electromagnéticas pasan por la parte inferior la capa son más propensas a la refracción porque es en la parte donde aumenta la temperatura.

5.3.2 Ionosfera.

Es una capa ubicada en la parte superior de la Tierra. Está cargada de electrones que varían según la actividad solar registrada en la zona, por lo que se tienen en cuenta factores como la latitud y la época del año. Por ser una carga eléctrica afecta a todas las ondas electromagnéticas que la atraviesan, tales como las señales emitidas por los satélites para el posicionamiento terrestre.

6. GENERALIDADES DEL POSICIONAMIENTO GNSS.

6.1 ERRORES ASOCIADOS A LAS OBSERVACIONES GNSS.

Los errores asociados a las observaciones realizadas con GNSS se dividen en tres causas: las de satélite, las de la propagación de la señal y las de los receptores. Muchos de estos errores pueden ser modelados y eliminados con dos equipos trabajando en modo diferencial.

El modelo para determinar la distancia P entre el satélite j y el receptor i está representado en la siguiente ecuación: (Sobrino, 2010).

$$P1_i^j = \rho_i^j + c (dt_i - dt^j) + rel_i^j + T_i^j + \alpha_1 I_i^j + K1_i^j + M_{P1}^j + \varepsilon_{P1}^j \quad (1)$$

Donde:

ρ_i^j = Distancia euclídea sat-receptor.

$c (dt_i - dt^j)$ = Corrección por diferencia de estados de reloj.

rel_i^j = Corrección relativista.

T_i^j = Retardo Troposférico.

$\alpha_1 I_i^j$ = Retardo ionosférico.

$K1_i^j$ = Retardos instrumentales.

M_{P1}^j = Multipath.

ε_{P1}^j = Ruido.

6.1.1 Errores Dependientes de Satélite.

6.1.1.1 Errores de Reloj.

Este error es causado por el desfase existente entre los relojes del satélite con el tiempo GPS, debido a que los relojes ubicados en el espacio suelen adelantarse como consecuencia de su campo gravitacional más débil. Este error se soluciona mediante el cálculo y las actualizaciones hechas por los relojes de las estaciones terrestres, a partir de las correcciones enviadas desde el satélite hasta receptor en la señal.

Aunque con este recurso el error es casi anulado, pueden identificarse diferencias de hasta 10 ns, lo cual es igual a 30m en la pseudodistancia. El offset de los relojes del satélite (dt_i) a partir de la siguiente ecuación (Sobrino, 2010).

$$dt_i = a0 + a1 (t - t0) + a2 (t - t0)^2 \quad (2)$$

Donde:

$a0$ = Deriva del reloj (clock drift).

$a1$ = Evolución de la deriva (clock drift rate).

$t0$ = tiempo del reloj satélite.

Siendo los valores $a0$, $a1$ y $t0$ datos enviados en el mensaje de navegación.

6.1.1.2 Efecto Relativista.

El efecto relativista que está relacionado con el estado del reloj se debe al campo gravitacional más débil en el que está ubicado el satélite y a la velocidad relativa.

Para modelar el efecto relativista se deben tener en cuenta dos componentes:

1. Una componente constante que depende del valor del semieje mayor de la órbita.
2. Una componente periódica debida a la excentricidad de la órbita (Sobrino, 2010).

$$rel = 2 \frac{\vec{r} \cdot \vec{v}}{c} \text{ Metros} \quad (3)$$

Donde :

r = distancia del punto a analizar al centro de la tierra.

v = velocidad tangencial del punto a analizar.

c = velocidad de la luz.

6.1.1.3 Errores en los Parámetros Orbitales del Satélite.

Las estaciones de seguimiento y control son las encargadas de enviar al receptor (efemérides) los cálculos de las posiciones futuras de los satélites, basándose en datos de pseudodistancia y medidas de fase. Sin embargo los satélites no realizan exactamente el movimiento descrito debido a las diferencias en el campo gravitacional, la presión por la radiación solar y la fricción de las moléculas libres. Este fenómeno ocurre porque la Tierra no tiene una distribución de masa homogénea, lo cual perturba la posición Kepleriana del satélite.

Las otras dos causas de error en los parámetros orbitales están asociadas a la atracción gravitacional generada por el Sol y la Luna y a la perturbación del movimiento ocasionada por los fotones derivados de la luz solar, la dimensión de esta última depende de la superficie de reflectividad, la luminosidad y distancia al sol. La principal diferencia entre las dos causas es que la primera está modelada por cálculos de predicción de error validados, mientras la segunda es la principal fuente de error en la órbita de los satélites, debido a la dificultad para modelarla.

Todos los errores de estos parámetros pueden ser eliminados usando efemérides precisas y trabajando en modo diferencial, aunque el modo diferencial no es muy efectivo para líneas bases mayores a 10 km, por lo que se recomienda trabajar con líneas bases menores de 10 km.

6.1.2 Errores Dependientes a la Propagación de la Señal.

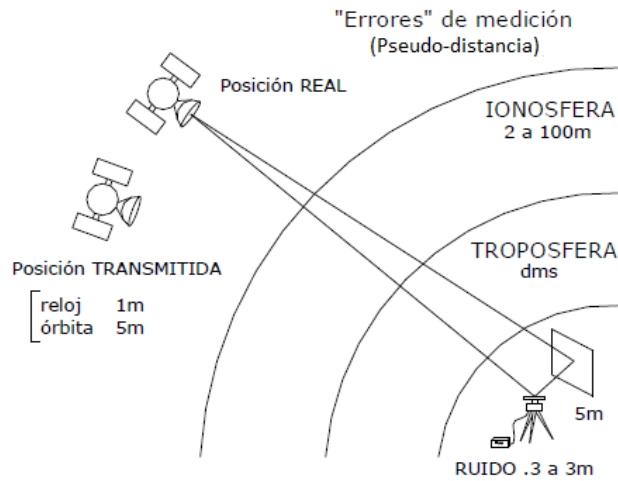


Ilustración 1 Errores dependientes a la propagación de la señal.

Fuente: G. Seeber - 1994

6.1.2.1 Ionosfera.

La ionosfera es una zona o parte de la atmósfera en la cual se concentra la mayor parte de electrones, esta característica es una fuente de error importante en las señales GNSS. Dadas sus particularidades se trata de un magnetoplasma, es decir un gas que presenta una baja densidad y está conformado por cargas individuales, pero en conjunto es eléctricamente neutro. Aunque sus dimensiones superiores no están bien definidas, se sabe que la inferior comprende una longitud de unos 50 a 60 km sobre la superficie de la Tierra. Algunos autores consideran que la ionosfera está comprendida por todo el entorno de la Tierra hasta la magnetopausa (*Ratcliffe, 1972*), y otros separan la magnetosfera de la ionosfera y sitúan como frontera a la plasma pausa (*Gold, 1959*). Lo que sí es claro es que la mayor concentración del campo ionizado está comprendida entre los 300 y 400 km.

6.1.2.1.1 Modelos Ionosféricos.

- **Modelo Klobuchar** (*Klobuchar, 1987*)

Este modelo de difusión de corrección ionosférico reduce cerca de un 50% en el MRS a nivel global. Entendiendo que el contenido total de electrones (TEC) se centra en una capa de alrededor de unos 350 Km de altura y desde allí se calcula la pérdida por efecto de la inclinación debido al retardo vertical en el punto donde choca la señal con la ionosfera es conocido como IPP (*Subirana et al., 2011*), tal como se muestra en la Ilustración 2.

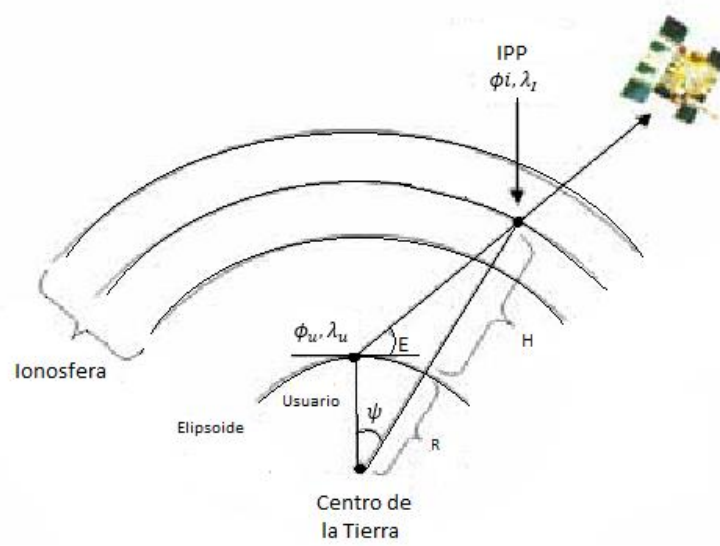


Ilustración 2 Diagrama IPP.

Fuente: modificado de Jong, 2004.

Para que el algoritmo Klobuchar funcione en un receptor monofrecuencia hay que tener en cuenta la latitud geodésica aproximada del usuario ϕ_u , el ángulo de elevación E_y , la longitud λ_u , el azimut A del satélite observado y los coeficientes enviados como mensajes de navegación por el satélite α_n y β_n . Tal como se muestra en las siguientes instrucciones:

1. Primer paso es calcular el ángulo geocéntrico.

$$1. \quad \psi = \frac{0.0137}{E+0.11} - 0.22 \quad (4)$$

2. Cálculo del punto de choque de la señal con la capa ionosférico.

$$\begin{aligned} \phi_i &= \phi_u + \cos A \\ \text{Si } \phi_i &> +0.416 \text{ el } \phi_i = +0.416 \\ \text{Si } \phi_i &< -0.416 \text{ el } \phi_i = -0.416. \end{aligned} \quad (5)$$

3. Cálculo de la longitud del punto de choque IPP

$$\lambda_I = \lambda_u + \frac{\psi \sin A}{\cos \phi_I} \quad (6)$$

4. Cálculo de la latitud geomagnética de la IPP.

$$\phi_m = \phi_I + 0.064 \cos(\lambda_I - 1.617) \quad (7)$$

5. Cálculo de la hora local del IPP.

$$t = 43200 \lambda_I + t_{GPS}(\text{segundo}) \quad (8)$$

donde $t < 86400s$

Por consiguiente, si $t > 86400s$, se resta 86400s.
Si $t < 0$, se suma 86400ss.

6. Cálculo de la amplitud de la pérdida ionosférico.

$$A_I = \sum_{n=0}^3 \alpha_n \phi_m^n \text{segundos} \quad (9)$$

Si $A_I < 0$, entonces $A_I = 0$

7. Cálculo del periodo de retardo ionosférico en semicírculos.

$$P_I = \sum_{n=0}^3 \beta_n \phi_m^n \text{segundos} \quad (40)$$

Si $P_I < 72000$, entonces $P_I = 72000$.

8. Cálculo de la fase de retardo ionosférico en semicírculos.

$$X_i = \frac{2\pi(t - 50400)}{P_i} (\text{radianes}). \quad (11)$$

9. Cálculo del factor de oblicuidad "elevación E en semicírculos".

$$F = 1.0 + 16.0(0.53 - E)^3 \quad (12)$$

10. Cálculo del tiempo de retardo ionosférico.

$$I_{L1GPS} = \begin{cases} [5 * 10^{-9} + A_I * (1 - \frac{x_i^2}{2} + \frac{x_i^4}{24})] * F; & |x_i| < 1.57 \\ 5 * 10^{-9} * F & ; |x_i| \geq 1.57 \end{cases} \quad (53)$$

α_n y β_n ($n = 0,1,2,3$) = Coeficientes de difusión en mensaje de navegación GPS.

11. La pérdida o retardo I_{L1GPS} se da en segundos.

Este modelo permite calcular dos pérdidas causadas por el efecto ionosférico: la señal en la frecuencia GPS L1 y la del tiempo en la frecuencia L2.

La pérdida en la frecuencia para cualquier señal GNSS está dada por (Subirana et al., 2011).

$$I_f = \left(\frac{f_{L1GPS}}{f}\right)^2 I_{L1GPS} \quad (14)$$

6.1.2.2 Tropósfera.

La troposfera es la última capa de la atmosfera, su longitud está estimada en unos 80 Km. Su espesor heterogéneo contiene moléculas y átomos neutros que inciden sobre las señales electromagnéticas. El índice de refracción está en función de la temperatura (que varía en los últimos 40 Km), la presión, el vapor de agua y los gases secos. Como la tropósfera no es un medio dispersivo no permite la eliminación del error que sí se corrige para la ionósfera con las frecuencias L1 y L2.

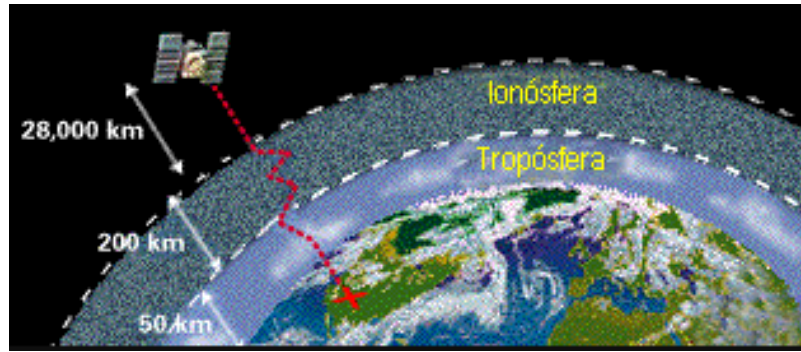


Ilustración 3 Altura de cada región atmosférica.

Fuente: Trimble, 1996

El retardo de la señal causado por la troposfera se puede expresar aproximadamente a partir de la siguiente expresión matemática:

$$\Delta^{trop} = \int_R^{hd} (n - 1) ds \quad (156)$$

Donde:

Δ^{trop} = Retardo Troposférico.

n = Refracción de la tropósfera

Generalmente se utiliza la refractividad (N) en lugar del índice de refracción (n).

$$N^{trop} = 10^6(n - 1) \quad (16)$$

De esta manera la primera aproximación al retardo se calcula por la siguiente expresión.

$$\Delta^{trop} = 10^{-6} \int_R^{hw} N^{trop} ds \quad (277)$$

Los modelos atmosféricos más utilizados son los modelos simplificados como el de Hopfield (1969), Saastamoinen (1972), Hopfield modificado, Goad y Goodman (1974).

Para las componentes secas y húmedas de la troposfera por lo general son calculadas por separadas a partir de medidas de GPS.

$$N^{trop} = N_d^{trop} + N_w^{trop} \quad (18)$$

Donde

N_d^{trop} = Refractividad en la parte seca.

N_w^{trop} = Refractividad en la parte humedad.

Se realiza el cálculo del retardo atmosférico en la parte seca y en la parte humedad.

$$\Delta_d^{trop} = 10^{-6} \int_R^{hd} N_d^{trop} ds \quad (19)$$

$$\Delta_w^{trop} = 10^{-6} \int_R^{hw} N_w^{trop} ds \quad (80)$$

De esta manera se puede calcular el retardo troposférico total (Δ^{trop}).

$$\Delta^{trop} = \Delta_w^{trop} + \Delta_d^{trop} = 10^{-6} \int N_w^{trop} ds + 10^{-6} \int N_d^{trop} ds \quad (91)$$

La troposfera se divide en la componente seca y la componente húmeda. La componente seca es conocida también como hidrostática y está compuesta por gases (78% N, 21% O, 0.9% Ar ...). Las ondas electromagnéticas son absorbidas selectivamente por los gases, debido a esto la componente seca contribuye con un 90% de la refracción total, lo que representa aproximadamente 2,3 m de error en la dirección del Zenit. Su efecto varía con la temperatura local y la presión atmosférica y es fácil de modelar basándose en la ley de los gases ideales.

La componente húmeda es conocida como componente No hidrostática y está compuesta por vapor de agua y agua condensada en las nubes, es difícil de predecir debido a la distribución irregular del vapor de agua, aunque solo contribuye con un 10% de la refracción total.

Los modelos más comunes para el cálculo de las componentes seca y húmeda son los de Essen y Frome del año de 1951 (*Sobrino, 2010*).

La componente seca se obtiene por medio del siguiente modelo:

$$N_{d,o}^{trop} = c_1 \frac{P}{T} \quad (102)$$

$$c_1 = 77.64 K_{mb^{-1}}$$

Donde:

P = es la presión atmosférica en milibares (mb)

T = es la temperatura en grados kelvin ($^{\circ}\text{K}$).

La componente humedad es calculada de la siguiente manera:

$$N_{w,o}^{trop} = c_2 \frac{e}{T} + c_3 \frac{e}{T^2} \quad (23)$$

Donde:

$$c_2 = -12.96 \text{ K}_{mb}^{-1}$$

$$c_3 = 3.71810^5 \text{ K}^2 \text{ mb}^{-1}$$

Donde e es la presión parcial de vapor de agua [mb] y T es la temperatura [$^{\circ}\text{K}$], los valores de c_1 , c_2 y c_3 se determinan empíricamente.

6.1.2.2.1 Modelos Troposféricos.

- **Modelo de Hopfield** (Hopfield, 1969)

Se desarrolló en el año 1969 a partir de datos empíricos, dando una refractividad seca como función de la altura (Hopfield, 1969).

$$N_d^{trop}(h) = N_{d,0}^{trop} \left[\frac{h_d - h}{h_d} \right]^4 \quad (114)$$

Donde h es la altura y h_d está representada por la siguiente ecuación:

$$h_d = 40136 + 148.72(T - 273.16) \text{ metros} \quad (2512)$$

Donde T , es la temperatura expresada en grados Kelvin.

$$\Delta_d^{trop} = \frac{10^{-6}}{5} N_{d,0}^{trop} \cdot h_d \quad (2613)$$

Donde:

Δ_d^{trop} = Retardo causado por las troposferas en partes secas

$$\begin{aligned} N_w^{trop}(h) &= N_{w,0}^{trop} \left[\frac{h_w - h}{h_w} \right]^4 \\ h_w &= 11000 \\ \Delta_w^{trop} &= \frac{10^{-6}}{5} N_{w,0}^{trop} \cdot h_w \end{aligned} \quad (27)$$

Donde:

Δ_d^{trop} = Retardo causado por las troposferas en partes húmedas

$$\Delta^{trop} = \frac{10^{-6}}{5} [N_{w,0}^{trop} \cdot h_w + N_{d,0}^{trop} \cdot h_d] \quad (28)$$

Donde:

Δ^{trop} = Retardo causado por la troposfera total.

Este modelo muestra el retardo por la troposfera en el cenit, por lo que hay que tener en cuenta la trayectoria del ángulo cenital del satélite, conocido como función de mapeo $m(E)$

$$\Delta^{trop} = \frac{10^{-6}}{5} [N_{w,0}^{trop} \cdot h_w \cdot m_w(E) + N_{d,0}^{trop} \cdot h_d \cdot m_d(E)] \quad (29)$$

$$m_d(E) = \frac{1}{\sin \sqrt{E^2 + 6.25}} \quad (140)$$

$$m_w(E) = \frac{1}{\sin \sqrt{E^2 + 2.25}} \quad (31)$$

Siendo:

E = la altura del satélite.

Aunque el modelo de Hofield es bastante completo, la complementariedad con la función de mapeo creada por Niell en 1996 brinda más exactitud y precisión, en comparación con otras funciones que utilizan mediciones meteorológicas.

$$m(z) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\cos z + \frac{a}{\cos z + \frac{b}{\cos z + c}}} + h \text{ (km)} \left[\frac{1}{\cos z} - \frac{1 + \frac{a_h}{1 + \frac{b_h}{1 + c_h}}}{\cos z + \frac{a_h}{\cos z + \frac{b_h}{\cos z + c_h}}} \right] \quad (152)$$

Los coeficientes a, b y c son listados en función de la latitud y se divide en componentes secas y húmedas.

- **Modelo de Saastamoinen** (Saastamoinen, 1972).

En este modelo la refractividad se deduce de las leyes de gases y el total se calcula por la siguiente expresión (Saastamoinen, 1972).

$$\Delta^{trop} = \frac{0.00227}{\cos z} \left[p + \frac{1255}{T} + 0.05 \right] e - \tan^2 z \quad (33)$$

Dónde:

z = el ángulo cenital del satélite.

p = presión atmosférica en m.

T = temperatura en grados °K.

e = presión parcial de vapor de agua en mb.

El retardo troposférico causa un error de 1.9 a 2.5 metros en dirección cenital que aumenta cuando disminuye el ángulo alcanzando valores de 20 y 28 metros respectivamente a unos 5°. Con la aplicación del modelo de Saastamoinen estos errores pueden reducir los errores en un margen de 1 a 5 cm.

- **Modelo troposférico UNB Collins (Collins, 1999)**

Este es un modelo híbrido de atmósfera neutral diseñado para ciertos tipos de usuarios del sistema WAAS y EGNOS. Presenta un algoritmo basado en la predicción de cinco parámetros meteorológicos que sirven para calcular los valores de la hidrostática, los retrasos cenitales y las demoras oblicuas mediante la función del mapeo de Niell (Niell, 1996): presión ($P_{(mbar)}$), temperatura ($T(K)$), presión de vapor de agua (e_{mbar}), temperatura “lapse” ($\beta(K/m)$) y vapor de agua “tasa caída” (λ). Este modelo es válido para ángulos de elevación de satélite de más de 5 grados.

La fórmula general de este modelo es la siguiente:

$$T(E) = (T_{Z,dry} + T_{Z,wet})M(E) \quad (3416)$$

Donde $T_{Z,dry}$ y $T_{Z,wet}$ se calculan a partir de la altura del receptor y las estimaciones de los 5 parámetros meteorológicos.

$$M(E) = \frac{1.001}{\sqrt{0.002001 + \sin^2(E)}} \quad (3517)$$

Una de las características distintiva de este modelo es que no es necesario ingresar las variables climatológicas, basta con la latitud (ϕ) del receptor y el día del año D en el que se tomó la observación. El valor de cada parámetro meteorológico se calcula a partir de los parámetros obtenidos de la siguiente fórmula:

$$\varepsilon(\phi, D) = \varepsilon_o(\phi) - \Delta\varepsilon(\phi)\cos\left[\frac{2\pi(D - D_{min})}{365,25}\right] \quad (36)$$

Donde $D_{min} = 28$ para las latitudes del norte y $D_{min} = 211$ para las latitudes del sur. El $\varepsilon_o(\phi)$ y $\Delta\varepsilon(\phi)$ son los valores de variación promedio y estacional linealmente interpolados en la latitud (ϕ) del receptor.

Los términos de retraso vertical de altitud cero $T_{Z,dry}$ y $T_{Z,wet}$ están dados por:

$$T_{z0,dry} = \frac{10^{-6}k_1R_dP}{g_m}; \quad (37)$$

$$T_{z0,wet} = \frac{10^{-6}k_2R_d}{(\lambda + 1)g_m - \beta R_d} \frac{e}{T} \quad (38)$$

El retraso vertical $T_{z,dry}$, $T_{z,wet}$ y la altura del receptor se calculan así:

$$T_{z,dry} \left[1 - \frac{\beta H}{T} \right]^{\frac{g}{R_d \beta}} * T_{z0,dry}; \quad (39)$$

$$T_{z,wet} \left[1 - \frac{\beta H}{T} \right]^{\frac{(\lambda+1)g}{R_d \beta} - 1} * T_{z0,wet} \quad (40)$$

Donde

H = altura en metros medida sobre el nivel del mar.

$K_1 = 77,604K/mbar$.

$K_2 = 382000k^2/mbar$.

$R_d = 287,054J/Kg/K$.

$g_m = 9.784m/s^2$.

$g = 9.80665m/s^2$.

6.1.3 Otros Errores del Equipo.

Otros errores comunes en el posicionamiento están directamente relacionados con el uso de los equipos por parte del operador, entre los más frecuentes se encuentran: desconocimiento de las coordenadas de la estación más cercana, iniciar la toma antes de sincronizar los equipos, inadecuado el estacionamiento y medida de la antena, entre otros.

6.2 MODELOS DE POSICIONAMIENTO.

6.2.1 Modelo de Pseudo-distancia.

El modelo de Pseudo-distancia o de navegación es un modelo estándar en el posicionamiento GNSS. Se basa en la fórmula para determinar la distancia P entre el satélite j y el receptor i , tal como se representa en la siguiente ecuación: (Sobrino, 2010).

$$P_i^j + cdt^j - \delta^j \cong \sqrt{(x - x^j)^2 + (y - y^j)^2 + (z - z^j)^2} + c(dt_i) \quad (181)$$

Donde:

ρ_i^j = Distancia euclídea sat-receptor.

$c(dt_i - dt^j)$ = Corrección por diferencia de estados de reloj.

rel_i^j = Corrección relativista.

T_i^j = Retardo troposférico.

$\alpha_1 I_i^j$ = Retardo ionosférico.

$K1_i^j$ = Retardos instrumentales.

M_{P1}^j = Multipath.

ε_{P1}^j = Ruido.

A partir de la ec.1 se plantea un sistema de ecuaciones con 4 incógnitas (dx, dy, dz, dt) en el cual las tres primeras representan las correcciones estimadas para la posición del receptor y el reloj en la época t y la última el delta del tiempo asociado al receptor.

$$P_i^j + cdt^j - \delta^j \cong \sqrt{(x - x^j)^2 + (y - y^j)^2 + (z - z^j)^2} + c(dt_i) \quad (192)$$

El sistema debe contener mínimo 4 ecuaciones para poder resolver las 4 incógnitas, donde δ^j representa $rel_i^j + T_i^j + \alpha_1 I_i^j + K1_i^j + M_{P1}^j + \varepsilon_{P1}^j$.

Al no ser una función linealizada, se aplica derivadas parciales dando como resultado la siguiente ecuación:

$$P_i^j = \rho_o^j + \frac{x_o - x^j}{\rho_o^j} dx + \frac{y_o - y^j}{\rho_o^j} dy + \frac{z_o - z^j}{\rho_o^j} dz + c(dt_i - dt^j) + \delta^j \quad (203)$$

Donde:

$$dx = x - x_o; dy = y - y_o; dz = z - z_o$$

Una vez linealizada, se aplica el siguiente sistema matricial de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} P_i^1 - \rho_o^1 + cdt^1 - \delta^1 \\ \vdots \\ P_i^n - \rho_o^n + cdt^n - \delta^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_o - x^1}{\rho_o^1} & \frac{y_o - y^1}{\rho_o^1} & \frac{z_o - z^1}{\rho_o^1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_o - x^n}{\rho_o^n} & \frac{y_o - y^n}{\rho_o^n} & \frac{z_o - z^n}{\rho_o^n} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ cdt_i \end{bmatrix} \quad (4421)$$

El cual también se puede representar como:

$$Y = AX \quad (45)$$

Dónde Y es la diferencia entre la pseudodistancia medida y la distancia euclidiana, A es la matriz de diseño y X la matriz de corrección para el posicionamiento del receptor en una época t . El sistema matricial se resuelve con la aplicación de mínimos cuadrados.

Este sistema de ajustes matemáticos proporciona una solución para diferentes problemas en los que se presentan una serie de medidas u observaciones redundantes y el sistema de ecuaciones lineales es inconsistente.

Los son inherentes a los procesos de observación puesto que las medidas están sujetas a variaciones. Estas variaciones reciben el nombre de fluctuaciones probabilísticas que por lo general ocasionan o proporcionan valores diferentes en otros subconjuntos. La solución más práctica para esta serie de errores es el método de mínimos cuadrados desarrollado por Gauss en 1795 y Legendre en 1805 (Altamirano, 2009).

$$X = (A^t A)^{-1} A^t Y \quad (46)$$

6.2.2 Modelo de Simples Diferencias.

La diferenciación de observaciones se puede agrupar en tres tipos: simples diferencias, dobles diferencias y triples diferencias. A su vez el modelo de simples diferencias se divide en tres, simples diferencias entre receptores, entre satélites y entre épocas. La combinación de dos simples diferencias da como resultado el modelo de dobles diferencias y la combinación de las tres es el modelo de triples diferencias.

6.2.2.1 Modelo de Simples Diferencias (entre satélites).

El modelo de simples diferencias entre satélites es la aplicación de la ecuación 1 desde dos satélites (j, k) para el mismo receptor (i). La resta de las dos ecuaciones da como resultado la ecuación siguiente:

$$P_i^j - P_i^k = [\rho_i^j + c(dt_i - dt^j) + rel_i^j + T_i^j + \alpha_1 I_i^j + K1_i^j + M_{P1}^j + \varepsilon_{P1}^j - P_i^j] - [\rho_i^k + c(dt_i - dt^k) + rel_i^k + T_i^k + \alpha_1 I_i^k + K1_i^k + M_{P1}^k + \varepsilon_{P1}^k] \quad (47)$$

Al ser el mismo receptor en las dos ecuaciones se cancela el término cdt_i , referente al tiempo en el receptor, por lo cual se convierte un sistema de ecuaciones con 3 incógnitas (dx, dy, dz) el cual se puede resolver con mínimo 3 ecuaciones. Tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [P_i^j - \rho_o^j + cdt^j - \delta^j] - [P_i^k - \rho_o^k + cdt^k - \delta^k] \\ \vdots \\ [P_i^j - \rho_o^j + cdt^j - \delta^j] - [P_i^n - \rho_o^n + cdt^n - \delta^n] \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{x_o - x^j}{\rho_o^j} - \frac{x_o - x^k}{\rho_o^k}; \frac{y_o - y^j}{\rho_o^j} - \frac{y_o - y^k}{\rho_o^k}; \frac{z_o - z^j}{\rho_o^j} - \frac{z_o - z^k}{\rho_o^k} \\ \vdots \\ \frac{x_o - x^j}{\rho_o^j} - \frac{x_o - x^n}{\rho_o^n}; \frac{y_o - y^j}{\rho_o^j} - \frac{y_o - y^n}{\rho_o^n}; \frac{z_o - z^j}{\rho_o^j} - \frac{z_o - z^n}{\rho_o^n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \quad (48) \end{aligned}$$

Con el sistema de ecuaciones linealizado se aplica el modelo de mínimos cuadrados, como lo muestran las ecuaciones 47 y 48.

7. REFERENCIA.

En la actualidad, la tecnología GNSS es la principal manera de obtener el posicionamiento de un punto en la superficie terrestre, sin embargo, esta herramienta aún presenta desafíos que la limitan, pues los simuladores de GPS basados en hardware y softwares comerciales procesan la información de forma lenta y tienen altos costos económicos (Elango y Sudha, 2016). Debido a esto, diferentes líneas investigativas estudian receptores GPS de bajo costo (Thompson *et al.*, 2012) enfocándose en softwares y algoritmos que mejoren y optimicen los procesos (Huang *et al.*, 2017) (Riba *et al.*, 2105).

La precisión y exactitud del posicionamiento GNSS se afectan significativamente como consecuencia del viaje que realiza la señal a través de la ionosfera y troposfera. Por esta razón cada una de estas capas atmosféricas exige, por separado, la utilización de modelos de corrección que mitiguen los errores de los datos obtenidos.

Al ser la ionosfera la zona de la atmosfera que contiene la mayor concentración de gases ionizados, como consecuencia de la radiación solar (Budden, 1988), esta capa se convierte en la principal fuente de error ya que, afecta la amplitud y fase de las señales basadas en la comunicación GNSS. Por estas razones debe ser corregida lo mejor posible (Feynman y Gabriel, 2000).

El parámetro base para la mitigación del error causado por la ionosfera consiste en determinar el contenido total de electrones (TEC) en una ruta que atraviesa la ionosfera teniendo en cuenta su ubicación.

Existen diferentes modelos para mitigar los efectos causados por la ionosfera, entre los más conocidos tenemos el IRI, el Klobuchar, el NeQuick y el DGR. El más común es el IRI (ionosfera internacional de referencia) con el que cual se obtiene la densidad de la columna de electrones presentes en la señal en intervalos de una hora para la ubicación deseada (Bilitza *et al.*, 2011). El modelo Klobuchar, reduce cerca de un 50% el retardo a nivel global, debido a que calcula la pérdida de la señal en la frecuencia GPS L1 (Subirana, 2011). El NeQuick, por su parte, fundamentado en el modelo de corrección DGR (Di Giovanni *et al.*, 1990), está diseñado para utilizarse con receptores monofrecuencia, realizar correcciones ionosféricas y calcular la paridad de tiempo o retraso (TEC o STEC) en la señal emitida desde el satélite hasta el receptor (Coisson *et al.*, 2008). El último, el DGR, es un modelo de densidad de electrones ionosférico tridimensional y proporciona la densidad de electrones en la ionosfera como una función de la posición y del tiempo.

El segundo error que afecta significativamente la señal es producido por la troposfera (Zapata, 2012), parte inferior de la atmosfera cerca de la superficie terrestre que alcanza hasta 16 km de altura (Lutgens y Tarbuck, 1989). Estos errores son clasificados como retardos secos y retardos húmedos, dependiendo de la parte de la tropósfera los cause: parte seca (gases inherentes a la atmosfera) y parte húmeda (que tiene en cuenta el vapor del agua). El seco representa del 80-90% de retardo total (Abdelfataha *et al.*, 2015) y se calcula de manera aceptable por modelos empíricos (Hopfield, 1971). El húmedo es difícil de modelar y no puede ser representado por ningún modelo empírico (Díaz, 2013).

Por su importancia y alto grado de afectación en la señal GNSS, los retardos ocasionados por la tropósfera requieren de estudios y aplicación de modelos troposféricos que corrijan los efectos causado en la señal (Díaz, 2013).

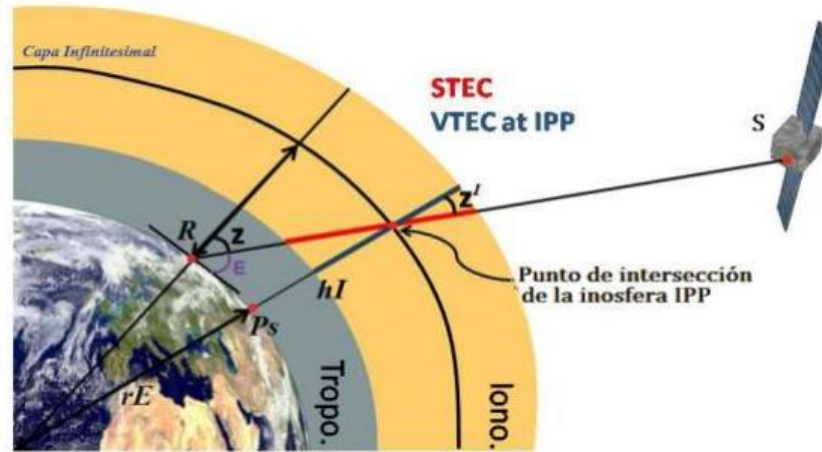


Ilustración 4 STEC

Fuente: Nasa, 2016.

8. MATERIALES Y SOFTWARE

La metodología y la solución del problema planteadas a lo largo de este trabajo requieren del uso y adquisición de materiales y softwares. Este apartado menciona y explica cada una de las herramientas utilizadas, sus características y aplicación en función del objetivo propuesto.

8.1 ARCHIVOS RINEX.

RINEX en sus siglas en inglés “Receiver INdependent EXchange” es un formato estándar para la organización y almacenamiento de la información referente a medidas generadas por receptores de los sistemas de navegación por satélite (GNSS).

Los archivos Rinex están conformado por dos archivos, el archivo de navegación que contiene la información sobre las efemérides satelitales y el otro es el archivo de observación el cual contiene la información referente a las observaciones realizadas en una época por el receptor. La estructura de los nombres de los formatos se explica a continuación.

CALI0640.18N

Dónde:

- CALI = Nombre de la Estación
- 64 = Día juliano del año

- 18 = Las dos últimas cifras del año
- N/O = Tipo de archivo, O para observación y N para navegación
- Mensaje de Observación.

En el archivo de observación contenido en el almanaque de datos transmitidos se encuentran las pseudodistancias, las diferencias de fase y las observaciones Doppler. En el caso de las estaciones de la red GPS del IGAC, tenemos que las observaciones son cada 15 segundos, sin embargo, este intervalo dependerá del operador de la estación. A continuación, se presenta el encabezado de un archivo de observación para analizar sus elementos y un bloque de observaciones para una época determinada:

1	2.11	OBSERVATION DATA				M (MIXED)	RINEX VERSION / TYPE				
2	teqc	2012Jun6					20180403 16:24:37UTCGM / RUN BY / DATE				
3	Linux2.6.22.18 i686 gcc Win32-mingw32 =						COMMENT				
4	teqc	2012Jun6					20180403 16:17:03UTC				
5	2.10	OBSERVATION DATA				M (MIXED)	COMMENT				
6	VRSNet 1.4						01-APR-18 23:59				
7							COMMENT				
8							COMMENT				
9							COMMENT				
10	ANDS						MARKER NAME				
11	41908S001						MARKER NUMBER				
12		Instituto Geografico Agustin Codazzi					OBSERVER / AGENCY				
13	5144K79419	TRIMBLE NET9S					REC # / TYPE / VERS				
14	5131354228	TRM59800.00				SCIS	ANT # / TYPE				
15	898664.0358	-6160668.0652				1380782.8751	APPROX POSITION XYZ				
16		0.0490				0.0000	0.0000	ANTENNA: DELTA H/E/N			
17	1						WAVELENGTH FACT L1/2				
18	6	C1	L1	S1	P2	L2	S2	# / TYPES OF OBSERV			
19	15.0000							INTERVAL			
20	0							RCV CLOCK OFFS APPL			
21	18							LEAP SECONDS			
22	Forced Module Decimation to 15 seconds										
23	2018	4	2	0	0	0.00000000	GPS	TIME OF FIRST OBS			
24	END OF HEADER										
25	18	4	2	0	0	0.00000000	0	6G02G06G09G19G22G28			
26	23934854.125	125778559.302				4	38.400	23934862.738	98009363.564	6	
27	22.800										
28	21145428.594	111120048.315				7	49.100	21145438.398	86587238.246	9	
29	41.500										
30	25331770.906	133119290.368				2	34.700	25331782.504	103729468.896	5	
31	16.900										
32	22682320.617	119196534.840				6	46.200	22682325.418	92880591.182	7	
33	32.900										
34	25091753.922	131858142.828				4	38.300	25091758.559	102746776.662	6	
35	19.300										

Ilustración 5 formato RINEX archivo de Observación.

Fuente: IGAC.

Cada renglón del formato mostrado en la Ilustración 5 contiene la información referente al archivo de observación. En el primero se encuentra la versión del archivo Rinox, el tipo de archivo que se está leyendo y el sistema satelital que se está usando. En el renglón 2, el nombre del programa, la agencia y la fecha en la cuales se creó el archivo de observación. El renglón 3 indica el sistema operativo en donde corre el teqc. En el 4 se encuentra el número de serie, el modelo y la versión del software interno que tiene el receptor. El renglón 6 describe la fecha de la primera lectura de señal, en el 12 se encuentra el nombre de la agencia de observación, el 13 describe el modelo del equipo con el que se hizo la toma, en el 14 el tipo de antena y en el 15 la posición absoluta aproximada del punto de la última época. El reglón 16 posee datos de altura y excentricidades relativas de la antena. En el número 18 se encuentran el número de observables grabados, los tipos de observables y las unidades de medida: fase, pseudodistancia, doppler y transit. El renglón 19 contiene el intervalo de observación en segundos, el 23 el tiempo de la primera época de grabación y el sistema de tiempo (GPS y GLONAS). El renglón 24 es el fin del encabezado.

Después del encabezado, el renglón más importante es el primero. En él se encuentran los datos correspondientes a la fecha y la hora de la observación (estimados en año, mes,

día, horas, minutos, segundos, (aa mm dd hh mm ss.ssssss)), un número que indica si ocurrió algún error durante la observación (0 indica que no lo hubo, 1 que sí. En caso de que así sea es mejor no tomar en cuenta las observaciones de esa época), el número de satélites observados por el receptor en esa época, y por último la descripción de las observaciones hechas por cada satélite en una época.

- Mensaje de Navegación

El mensaje de navegación contiene efemérides que fueron calculadas por la Estación de Control Maestra para que a su vez fuesen enviadas a los satélites, los cuales se encargarán de reenviarlas al usuario. Este mensaje contiene los parámetros Keplerianos para corregir el argumento de la latitud (Cuc, Cus), la inclinación de la órbita (Cic, Cis), la distancia geocéntrica (Crc, Crs), y el error en el reloj del satélite (a0,a1,a2). A continuación, se presenta el encabezado de un archivo Rinex y un grupo de efemérides, con el objeto de localizar a cada uno de los elementos que nos permitirán calcular la posición del satélite para una hora determinada.

```

1 | 2.10 N: GPS NAV DATA RINEX VERSION / TYPE
2 | teqc 2012Jun6 20180403 16:17:23UTC CPGM / RUN BY / DATE
3 | Linux2.6.22.18|i686|gcc|Win32-mingw32|= COMMENT
4 | VRSNet 1.4 2018-04-01 23:59:42 COMMENT
5 | COMMENT
6 | COMMENT
7 | COMMENT
8 | 1.1180D-08 7.4510D-09 -5.9600D-08 -5.9600D-08 ION ALPHA
9 | 9.0110D+04 0.0000D+00 -1.9660D+05 -6.5540D+04 ION BETA
10 | 0.000000000000D+00-1.776356839400D-15 233472 1993 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
11 | 18 LEAP SECONDS
12 | END OF HEADER
13 | 2 18 4 2 0 0 0.0 1.569804735480D-04-1.114131009670D-11 0.000000000000D+00
14 | 8.100000000000D+01 4.959375000000D+01 5.186644616000D-09 1.216840023510D+00
15 | 2.397224307060D-06 1.788069820030D-02 6.258487701420D-06 5.153704774860D+03
16 | 8.640000000000D+04-4.172325134280D-07-1.805101256730D+00-1.005828380580D-07
17 | 9.493200315840D-01 2.598750000000D+02-1.872388185490D+00-8.682147360570D-09
18 | 2.717970357230D-10 1.000000000000D+00 1.995000000000D+03 0.000000000000D+00
19 | 2.000000000000D+00 0.000000000000D+00-2.048909664150D-08 8.100000000000D+01
20 | 8.290800000000D+04
21 | 8 18 4 2 0 0 0.0-9.635509923100D-05-1.250555214940D-12 0.000000000000D+00
22 | 8.800000000000D+01-1.975000000000D+01 4.143386874410D-09-2.958226791570D+00
23 | -9.387731552120D-07 3.440745291300D-03 1.369044184680D-05 5.153794261930D+03
24 | 8.640000000000D+04-6.146728992460D-08-2.809560192160D+00 6.519258022310D-08
25 | 9.692200740320D-01 1.197187500000D+02-4.777230436770D-01-7.702463695670D-09
26 | 1.614352958570D-10 1.000000000000D+00 1.995000000000D+03 0.000000000000D+00
27 | 2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 5.587935447690D-09 8.800000000000D+01
28 | 7.921800000000D+04
29 | 10 18 4 1 18 0 0.0 1.755123957990D-04 3.183231456210D-12 0.000000000000D+00
30 | 2.900000000000D+01-6.793750000000D+01 4.698767151080D-09 1.891446135720D+00
31 | -3.490597009660D-06 3.409681026820D-03 6.746500730510D-06 5.153665048600D+03
32 | 6.480000000000D+04-3.352761268620D-08-7.051707221280D-01 1.862645149230D-09
33 | 9.610007185430D-01 2.485000000000D+02-2.770847842440D+00-8.244629136180D-09
34 | -4.760912596830D-10 1.000000000000D+00 1.995000000000D+03 0.000000000000D+00
35 | 2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 1.862645149230D-09 2.900000000000D+01

```

Ilustración 6 Formato RINEX Archivo de Navegación

Fuente: IGAC

La Ilustración 6 nos muestra un tipo de archivo RINEX de navegación versión 2.1, descritos en su encabezado. En los renglones siguientes se describen los datos de la navegación. El segundo renglón contiene el nombre, la agencia y día de creación del archivo, los renglones del 4 al 7 son un espacio para comentarios. En el octavo y el noveno renglón se encuentran los parámetros ionosféricos alpha y beta para calcular el efecto ionosférico. El renglón 10 contiene el parámetro del almanaque para calcular el

tiempo en el sistema UTC y el 11 el error en el tiempo por en saltos de ciclo. El último renglón, el número doce, contiene el cierre del encabezado.

De manera general, la estructura del fichero de navegación está dividida en dos grupos, el primero contiene el número PRN (año, mes, día, hora, minutos y segundos), el error del reloj del satélite, la deriva del reloj del satélite y el periodo de deriva. El grupo dos, por su parte, contiene la edad de las efemérides, la corrección Crs (m), la diferencia medida de movimiento (RAD/s) y las anomalías medidas.

Los archivos Rinex de la ilustración 7 fueron adquiridos de la Red Magna Eco del Geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) de Colombia, por medio del siguiente link <https://tramites.igac.gov.co/rinex>. La Red Magna Eco es una red de toma continua, conformada por 46 estaciones GNSS ubicadas a lo largo del territorio colombiano. De la información proporcionada por el IGAC se utilizaron 30 puntos de referencia los cuales, tras su actualización de coordenadas, permitieron realizar las pruebas necesarias para verificar la exactitud de los modelos implementados.

Índice de /110/18o/

 [directorio principal]

Nombre	Tamaño	Fecha de modificación
 abcc1100.18o.gz	1.6 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 abpd1100.18o.gz	1.5 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 abpw1100.18o.gz	686 kB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 ANDS1100.18O.gz	2.5 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 APTO1100.18O.gz	1.7 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 ARCA1100.18O.gz	2.5 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 BEJA1100.18O.gz	3.4 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 BNGA1100.18O.gz	3.3 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 bogt1100.18o.Z	1016 kB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 BUEN1100.18O.gz	3.1 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 CALI1100.18O.gz	3.3 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 CART1100.18O.gz	4.0 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 CASI1100.18O.gz	1.7 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 CUCU1100.18O.gz	3.2 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 DORA1100.18O.gz	3.2 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 FQNE1100.18O.gz	4.0 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 GARA1100.18O.gz	3.0 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 IBAG1100.18O.gz	3.0 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 LETA1100.18O.gz	3.2 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 MEDE1100.18O.gz	3.0 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 QUIB1100.18O.gz	1.8 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 SAMA1100.18O.gz	3.2 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 SINC1100.18O.gz	3.3 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 SNSN1100.18O.gz	3.4 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 TUNA1100.18O.gz	3.3 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.
 VIVI1100.18O.gz	2.7 MB	22/04/18, 7:00:00 p. m.

Ilustración 7 Fuente de descarga de datos GNSS del IGAC

Fuente: IGAC

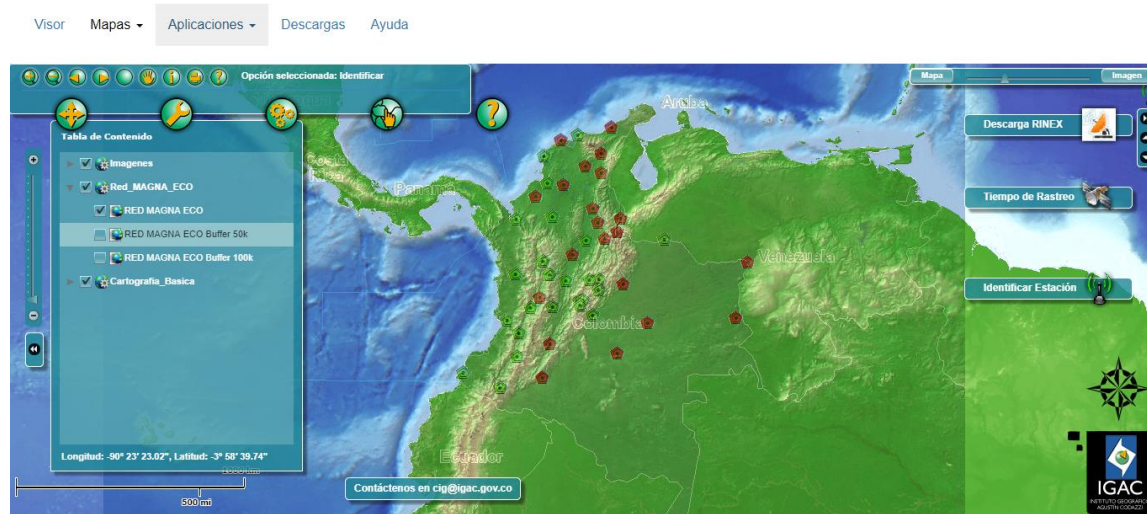


Ilustración 8 Representación de las Estaciones del IGAC

Fuente: IGAC

Para poder tener un número suficiente de datos y realizar un análisis sobre los resultados obtenidos, los archivos Rinex del IGAC fueron descargados para dos épocas (5 de marzo y 2 de abril del 2018) de diferentes estaciones como lo muestra la siguiente tabla:

Tabla 1 Estaciones del IGAC

ESTACIONES 5 DE MARZO	ESTACIONES 2 DE ABRIL
ABCC-BOGOTÁ	BEJA-BARRANCA BERMEJA
ABDP-BOGOTÁ	BOGA-BOGOTÁ
ABPW-BOGOTÁ	APTO-APARTADÓ
BEJA-BARRANCA BERMEJA	BUEN-BUENAVENTURA
BOGA-BOGOTÁ	DORA-LA DORADA
CALI-CALI	GARA-GARAGOA
APTO-APARTADÓ	MEDE-MEDELLIN
BUEN-BUENAVENTURA	QUIB-QUIBDO
DORA-LA DORADA	SAMA-SANTA MARTA
GARA-GARAGOA	SINC-SINCELEJO
IBAG-IBAGUÉ	TUNA-TUNJA
MEDE-MEDELLIN	AND-SAN ANDRÉS
QUIB-QUIBDO	
SAMA-SANTA MARTA	
SINC-SINCELEJO	
TUNA-TUNJA	
AND-SAN ANDRÉS	

Fuente: Propia

8.2 SOFTWARE

Teniendo en cuenta las necesidades para el desarrollo de esta parte del proyecto, se utilizó el software matemático Matlab, que proviene de sus siglas en inglés MATrix LABoratory, con el fin de realizar cálculos matemáticos que permitan la ejecución de órdenes en modo interactivo. Esta herramienta está orientada al análisis matricial y otorga la posibilidad de generar interfaces y simulaciones.

9. METODOLOGÍA.

En este capítulo se explica de manera detallada la metodología utilizada para dar solución al problema y objetivos planteados en el documento, aplicando los modelos de posicionamiento (pseudo-distancia y simples diferencias entre satélites) y los modelos atmosféricos (Klobuchar, Saastamoinen, Hopfield modificado y Collins UNB). A continuación, se muestra el esquema metodológico de esta investigación:

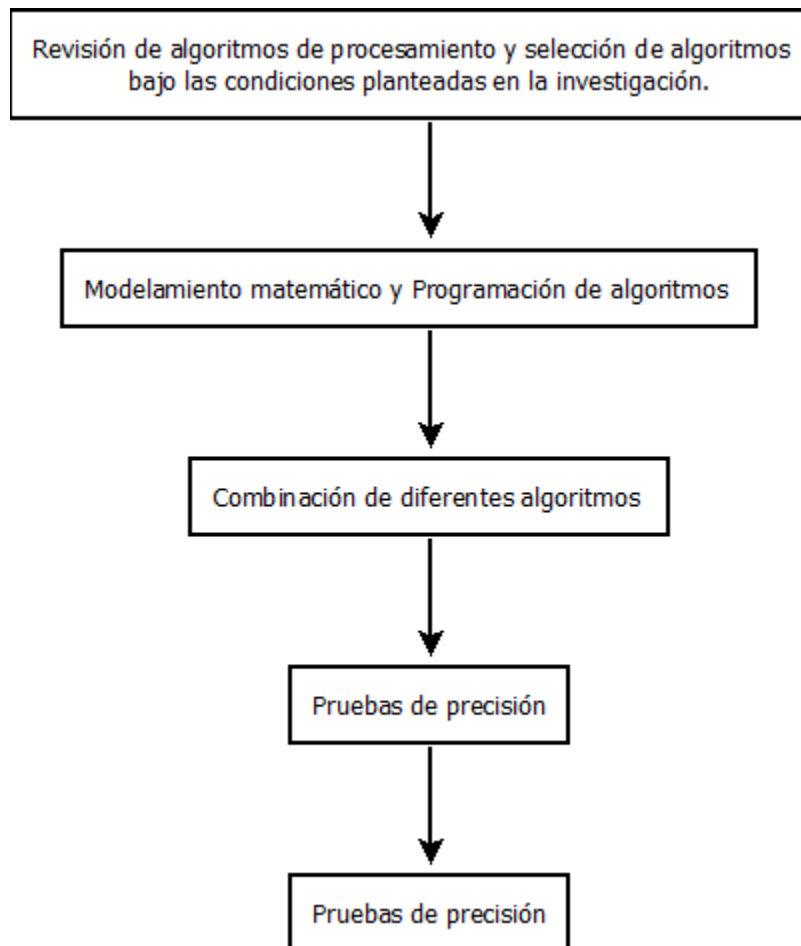


Ilustración 9 Esquema metodológico.

9.1 REVISIÓN DE ALGORITMOS DE PROCESAMIENTO Y SELECCIÓN DE ALGORITMOS SEGÚN LAS CARACTERÍSTICAS DEL ESTUDIO.

Dentro del proceso de revisión se identificaron distintas fuentes de error que afectan la señal emitida desde el satélite hasta el receptor. Entre los errores más comunes se encuentran aquellos que son causados por el desfase existente entre los relojes de los satélites y los de los receptores: errores de reloj, los errores en los parámetros orbitales del satélite y los errores por radiación solar, por moléculas libres, por efecto relativista y por disponibilidad selectiva. Existe también un error inducido, creado por el gobierno de los Estados Unidos para generar ruido en la señal y disminuirla precisión del posicionamiento de manera horizontal entre 20 y 100 metros.

- Errores dependientes de la propagación de la señal.

Los errores dependientes de la propagación de la señal son el ionosférico, el troposférico y el multipath, sin embargo, para cada uno existe un grupo de modelos de corrección que aminoran el error. A continuación, se enuncian cada error y se presentan posibilidades de mejoramiento para los dos primeros.

Ionosfera.

- Modelo Klobuchar (Klobuchar, Ionospheric Time-Delay Algorithms for Single-Frequency GPS Users, 1987)
- Modelo DGR.
- Modelo NeQuick (*Di Giovanni y Radicella, 1990*)
- Modelo de Chapman (*Gende M. A., 2002*)
- La Combinación Lineal Libre De Geometría (*Gende et al., 1996*)

Troposfera.

- Modelo de Hopfield (*Hopfield, 1969*).
- Modelo de Saastamoinen (*Saastamoinen, 1972*).
- Modelo Goad y Goodman (*Goad y Goodman, 1974*)
- Modelo Neil (*Neil, 1996*).
- Modelo Black (*Black, 1996*).
- Modelo Collins UNB (*Collins y Langley, 1997*).

Multipath.

Este efecto o fenómeno es causado por la interferencia de objetos cercanos al receptor en el paso de la señal desde el satélite hasta el receptor causando reflexiones, que obligan a la señal a recorrer una mayor distancia, hecho que distorsiona la amplitud y la forma de la onda. El efecto Multipath depende de la frecuencia y causa variaciones métricas, por esta razón afecta más las medidas de código C/A que las que están en fase, ya que las ondas de esta última son un tamaño mayor y sufren menores variaciones al impacto. Errores dependientes del receptor.

- Errores dependientes del receptor.

Los errores dependientes del receptor se asocian al estado de reloj de receptor, la variación del centro de fase de la antena, los retardos instrumentales y otros errores del equipo. Para mitigar el impacto de estos errores pueden utilizarse el Modelo de Simples Diferencias y el Modelo de Pseudodistancia.

- Modelo de Simples Diferencias (Entre Satélites).

El modelo de Simples Diferencias (entre satélites) es un modelo de posicionamiento GNSS que elimina el error asociado al reloj del receptor, calculando las coordenadas del receptor a partir de la pseudodistancia entre un satélite referencia-receptor y otro satélite con el mismo receptor.

- Modelo de Pseudo-distancia.

El modelo de Pseudo-distancia es un modelo estándar en el posicionamiento GNSS, que es conocido también como modelo de navegación. Se basa en la fórmula para determinar la distancia P entre el satélite j y el receptor i , (*Sobrino, 2010*).

Teniendo en cuenta los antecedentes descritos anteriormente y las condiciones establecidas para el desarrollo de este estudio (observable código, monofrecuencia, tiempo real y posicionamiento absoluto), en la herramienta creada se introdujeron algunos modelos útiles para el cálculo de coordenadas. Para comprobar la precisión obtenida a partir de estos modelos, sus resultados fueron comparados con las coordenadas de las estaciones de monitoreo actualizadas. A continuación se mencionan los modelos de utilizados durante el proceso.

Ionosfera.

- Modelo Klobuchar (Klobuchar, Ionospheric Time-Delay Algorithms for Single-Frequency GPS Users, 1987)

Troposfera.

- Modelo de Hopfield (*Hopfield, 1969*).
- Modelo de Saastamoinen (*Saastamoinen, 1972*).
- Modelo Goad y Goodman (*Goad y Goodman, 1974*)
- Modelo Collins UNB (*Collins and Langley, 1997*).

Posicionamiento.

- Modelo de Simples Diferencias (Entre Satélites)
- Modelo de Pseudo-distancia.

9.2 PROGRAMACIÓN DE ALGORITMOS.

Para la creación del software base de este trabajo se utilizó el curso de acceso libre en internet, “*The GPS Easy Suite_Matlab code for the GPS newcomer*”, elaborado por Kai

Borre, tal como se puede comprobar en el siguiente link: <http://kom.aau.dk/~borre/easy/>. El curso de Borre facilitó la utilización de la herramienta Matlab ya que en él se encuentran unas funciones para procesamiento de los archivos Rinex.

Para complementar la información del curso de acceso libre, se utiliza el documento de *“Ejercicios Prácticos Para El Procesado De Datos GNSS– PBGNSS”* (Perez, 2012), el cual ayuda a entender las funciones del curso Borre, a comprender cuándo es necesario realizar modificaciones y, por último, a crear la herramienta para el cálculo de coordenadas a partir de archivos Rinex.

En el siguiente esquema se muestra el paso a paso de la utilización de la herramienta desarrollada.

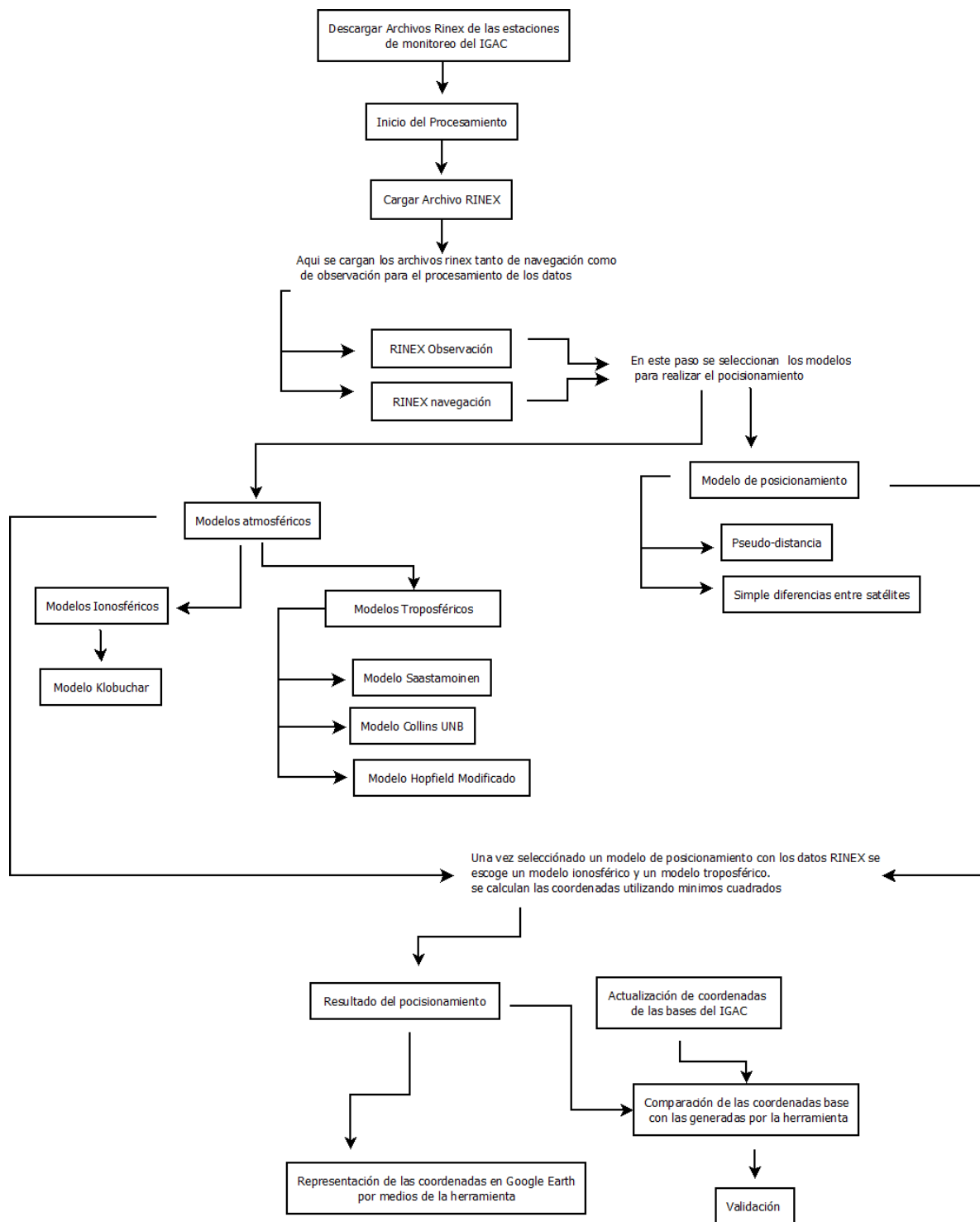


Ilustración 9 Esquema metodológico de la herramienta desarrollada.

Fuente: Propia.

Dentro de la herramienta se integraron los siguientes modelos:

9.2.1 Modelo de Posicionamiento.

En la herramienta se integran dos modelos de posicionamiento: el de Pseudo-distancia y de Simples Diferencias (entre satélites).

- Modelo de pseudo-distancia.

Para este modelo se utiliza una función de Matlab integrada en el curso de Kai Borre, la cual fue modificada para la utilización de la observación código en el cálculo de las coordenadas y el cálculo de la época para toma posterior al año 2009.

Para su funcionamiento, el modelo descrito necesita de las siguientes variables: matriz de observación (obs), matriz de satélites (sats), época (time), matriz de efemérides (Eph) y los parámetros ionosféricos (Alpha y Beta). Las 3 primeras son extraídas del archivo de observación y las siguientes del archivo de navegación. Alpha y beta sólo son necesarias si se va aplicar el modelo ionosférico de Klobuchar.

El modelo da como resultado la variable de salida pos, que contiene las coordenadas geocéntricas del receptor al momento de la toma.

- Modelo de Simples Diferencias (entre satélites).

Para este modelo se utiliza como base la función de Pseudo-distancia, modificando el sistema de ecuaciones y su solución mediante el método de mínimos cuadrados para el cálculo de las coordenadas del receptor. El modelo necesita las mismas variables del modelo de Pseudo-distancia: Obs, sats, time, Eph, Alpha y Beta.

De la matriz de obs y sats se extrae la información de un satélite, que es el satélite de referencia para ejecutar este modelo de simples diferencias. El modelo da como resultado la variable de salida pos, que contiene las coordenadas geocéntricas del receptor al momento de la toma.

9.2.2 Modelos de Atmosféricos.

- Modelo de inosférico.

La aplicación de un modelo ionosférico es necesario para la mitigación del error en el que la concentración de electrones de la ionósfera influye negativamente en las señales GNSS.

- Modelo de Klobuchar.

Para este modelo se utiliza una función de Matlab integrada en el curso de Kai Borre, la cual necesita 7 variables de entrada que son:

- Latitud y Longitud, que son las coordenadas geográficas del receptor en una época específica
- el y az, que son la elevación y azimut del satélite

- tgps, que es el tiempo GPS
- Alpha y Beta, que representan los parámetros ionosféricos y se encuentran en el archivo de navegación de los archivos Rinex.

La aplicación de la función da como resultado una variable de salida, que representa el error asociado a la ionosfera en metros.

- Modelo troposférico.

La señal GNSS tiene un retardo causado por los gases inertes presentes en la atmosfera y por el vapor de agua, estos dos componentes son los que conforman la capa atmosférica conocida como troposfera. La aplicación de un modelo troposférico es necesaria si se desea eliminar ruidos en la señal y mejorar el posicionamiento de las coordenadas.

- Modelo de Saastamoinen.

Para este modelo se utiliza una función de Matlab integrada en el curso de Kai Borre que necesita 2 variables de entrada: la elevación de satélite (el) y la altura del receptor (h).

La aplicación de la función da como resultado una variable de salida, que representa el error asociado en a la troposfera en metros.

- Modelo de Hopfield modificado (Goad y Goodman).

Para este modelo se utiliza una función integrada en el documento de Karmele Artano Pérez, que necesita 8 variables de entrada:

- sinel, seno del ángulo de elevación del satélite.
- hsta altura de la estación en km.
- p, presión atmosférica en mb.
- tkel, temperatura superficial en grados Kelvin.
- hum, humedad relativa en %.
- hp, altura de medición de presión en km.
- htkel, altura de medición de temperatura en km.
- hhum, altura de medición de la humedad en km.

La aplicación de la función da como resultado una variable de salida, que representa el error asociado a la troposfera en metros.

- Modelo de Collins UNB.

Para este modelo se crea la función a partir de la información teórica, que necesita 3 variables de entrada: coordenada en latitud (lat), elevación del satélite (elevation), época de toma (day).

La aplicación de la función da como resultado una variable de salida, que representa el error asociado a la troposfera en metros.

9.3 COMBINACIÓN DE DIFERENTES ALGORITMOS.

Se realiza la combinación de los modelos de posicionamiento y atmosférico generando el siguiente resultado de combinaciones:

- Pseudo-distancia-Kobuchar-Saastamoinen.
- Pseudo-distancia-Kobluchar-Hopfield Modificado.
- Pseudo-distancia-Kobluchar-Collins UNB.
- Simples diferencias-Kobuchar-Saastamoinen.

Con la información organizada se continúa con la elaboración de una interfaz que contiene un panel en donde se incluye la opción de cargar los archivos Rinex (de navegación y observación), la selección del modelo de posicionamiento y de los modelos atmosféricos. Tal como lo muestra la ilustración 10.

The screenshot shows a software window titled 'Tesis' with a standard Windows title bar. The main content area is titled 'SINGLE POSITIONING POINT'. It is divided into three main sections: 'Datos Rinex', 'Modelo Posicionamiento', and 'Modelos Atmosféricos'. The 'Datos Rinex' section contains two columns of buttons: 'SUBIR OBS' and 'SUBIR NAV' on the left, and 'Archivo de Observación' and 'Archivo de Navegación' on the right. The 'Modelo Posicionamiento' section has a 'MODELO' button and a dropdown menu labeled '--Seleccionar Modelo--'. The 'Modelos Atmosféricos' section has two rows, each with a button ('MODELO IONOSFÉRICO' and 'MODELO TROPOSFÉRICO') and a dropdown menu labeled '--Seleccionar Modelo--'. At the bottom of the window is a large button labeled 'CALCULAR POSICIONAMIENTO'.

Ilustración 10 Representación del programa para cargar Archivos RINEX.

Fuente: Propia.

Para la opción modelo troposférico de Hopfield modificado, la interfaz incluye un panel distinto, se abre una nueva pestaña que requiere la información de las variables de entrada. Tal como se muestra a continuación en la ilustración 11.

The screenshot shows a window titled 'Resultados' with a tab labeled 'VARIABLES CLIMATICAS'. Below the tab is the text 'Modelo Hopfield_Modificado'. There are six input fields with the following labels and values:

Variable	Value
Presión Atmosférica [mb]:	893
Temperatura Superficial [K*]:	293.15
Humedad Relativa [%]:	60
Altura de la medición de la Presión [Km]:	0
Altura de la medición de la Temperatura [Km]:	0
Altura de la medición de la Humedad [Km]:	0

At the bottom of the window is an 'Aceptar' button.

Ilustración 11 Representación del programa para cargar variables meteorológicas.

Fuente: Propia.

Con los archivos Rinex, los modelos de posicionamiento y modelos atmosféricos seleccionados, la herramienta calcula las coordenadas geocéntricas, las cuales se muestran en un panel como se indica en la ilustración 12.

The screenshot shows the same 'Resultados' window, but the tab is now labeled 'COORDENADAS'. Below the tab is the text 'RESULTADOS'. There are three input fields showing the calculated geocentric coordinates:

Coordinate	Value
X:	1739433.525830
Y:	-6117250.676024
Z:	515067.389716

Ilustración 12 Representación de las coordenadas por medio del programa.

Fuente: Propia.

Al final la herramienta genera un archivo KML, que se puede abrir en diferentes programas como es el caso de Google Earth.

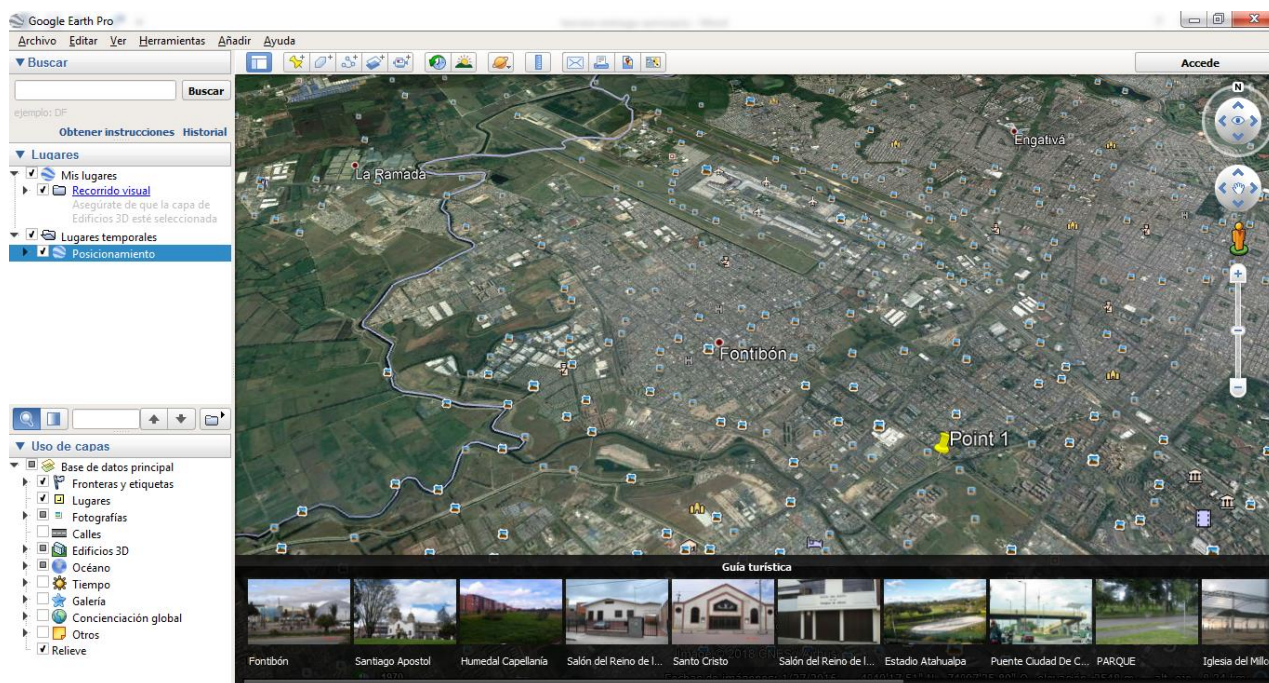


Ilustración 13 Representación del punto procesado en el software y mostrado por Google Earth.

Fuente: Propia.

9.4 VALIDACIÓN

La validación de los datos utilizados en el proyecto se realiza en dos momentos: primero en se actualizan las coordenadas de las estaciones para las dos fechas establecidas y, en un segundo momento se calcula el error medio cuadrático de los modelos.

- Actualización de las coordenadas.

Para la actualización de las coordenadas se solicitaron las fichas técnicas de cada estación. Los datos proporcionados por las fichas, coordenadas en una época y la velocidad del punto por año, se determina la diferencia (tiempo) entre las épocas utilizadas y la época del proyecto, lo que permite el calcula de la distancia y posteriormete actualizar las coordenadas.

Tabla 2 Actualización de coordenadas.

ÉPOCA OFICIAL	FECHA ACTUALIZADA	DÍA JULIANO	FRACCIÓN DE ÉPOCA ACTUALIZADA	ÉPOCA ACTUALIZADA	DIFERENCIA DE ÉPOCAS
2005	5 DE MARZO DEL 2018	64	0,177777778	2018,1	13,1
COORDENADAS OFICIALES		VELOCIDADES	DIFERENCIA	DESPLAZAMIENTO	COORDENADAS

		[m/año]	DE ÉPOCAS	POR AÑO	ACTUALIZADAS
X	898663,994	-0,0118	13,1	-0,15458	898663,839
Y	-6160668,079	0,0261	13,1	0,34191	-6160667,737
Z	1380782,862	0,0129	13,1	0,16899	1380783,031

Fuente: Propia

Tabla 3 Coordenadas actualizadas para los datos del 2 de abril y 5 de marzo del 2018.

NOMBRE DE LA ESTACIÓN DE LA RED MAGNA-ECO	COORDENADAS ÉPOCA 2013			COORDENADAS ACTUALIZADAS		
				2018,1 (5 de marzo)		
	X=	Y=	Z=	X=	Y=	Z=
ABCC-BOGOTÁ	1739438,042	-6117252,575	515065,006	1739437,981	-6117252,441	515065,071
ABDP-BOGOTÁ	1742983,248	-6118331,500	494730,655	1742983,188	-6118331,367	494730,721
ABPW-BOGOTÁ	1753507,213	-6113239,050	518210,520	1753507,153	-6113238,917	518210,586
BEJA-BARRANCA BERMEJA	1758043,020	-6081158,674	778801,054	1758042,960	-6081158,541	778801,120
BOGA-BOGOTÁ	1744517,233	-6116051,209	512581,036	1744517,173	-6116051,076	512581,101
BUCARAMANGA	1837762,101	-6057811,151	783764,860	1837762,041	-6057811,017	783764,926
CALI-CALI	1483099,961	-6193060,186	373124,165	1483099,900	-6193060,053	373124,230
APTO-APARTADÓ	1460797,908	-6147200,762	868399,530	1460797,848	-6147200,628	868399,596
BUEN-BUENAVENTURA	1430383,887	-6200818,159	428934,089	1430383,827	-6200818,026	428934,155
DORA-LA DORADA	1679425,238	-6123536,854	602182,363	1679425,178	-6123536,721	602182,428
GARA-GARAGOA	1819791,607	-6088854,581	561298,358	1819791,547	-6088854,448	561298,424
IBAG-IBAGUÉ	1623166,642	-6149837,650	489244,295	1623166,581	-6149837,517	489244,360
MEDE-MEDELLIN	1579608,469	-6142783,870	684352,419	1579608,408	-6142783,737	684352,485
QUIB-QUIBDO	1464760,415	-6175537,234	629220,899	1464760,355	-6175537,101	629220,965
SAMA-SANTA MARTA	1704996,244	-6020152,280	1233459,300	1704996,184	-6020152,147	1233459,365
SINC-SINCELEJO	1588028,239	-6091166,347	1025655,054	1588028,179	-6091166,213	1025655,120
TUNA-TUNJA	1818373,169	-6085596,893	610965,096	1818373,109	-6085596,760	610965,162
NOMBRE DE LA ESTACIÓN DE LA RED MAGNA-ECO	COORDENADAS ÉPOCA 2005			COORDENADAS ACTUALIZADAS		
				2018,1		
AND-SAN ANDRÉS	898663,994	-6160668,079	1380782,862	898663,839	-6160667,737	1380783,031
NOMBRE DE LA ESTACIÓN DE LA RED MAGNA-ECO	COORDENADAS ÉPOCA 2013			COORDENADAS ACTUALIZADAS		
				2018,2 (2 de abril)		
	X=	Y=	Z=	X=	Y=	Z=
BEJA-BARRANCA BERMEJA	1758043,02	-6081158,674	778801,054	1758042,959	-6081158,539	778801,1214
BOGA-BOGOTÁ	1744517,233	-6116051,209	512581,036	1744517,172	-6116051,074	512581,1028
APTO-APARTADÓ	1460797,908	-6147200,762	868399,53	1460797,847	-6147200,626	868399,5971

BUEN-BUENAVENTURA	1430383,887	-6200818,159	428934,089	1430383,826	-6200818,023	428934,1563
DORA-LA DORADA	1679425,238	-6123536,854	602182,363	1679425,177	-6123536,718	602182,4298

ESTACIÓN	KLOBUCHAR	KLOBUCHAR-	KLOBUCHAR-	SIMPLES DIFERENCIAS
----------	-----------	------------	------------	---------------------

GARA-GARAGOA	1819791,607	-6088854,581	561298,358	1819791,545	-6088854,445	561298,425
IBAG-IBAGUÉ	1623166,642	-6149837,65	489244,295	1623166,58	-6149837,515	489244,3618
MEDE-MEDELLIN	1579608,469	-6142783,87	684352,419	1579608,407	-6142783,734	684352,486
QUIB-QUIBDO	1464760,415	-6175537,234	629220,899	1464760,354	-6175537,098	629220,966
SAMA-SANTA MARTA	1704996,244	-6020152,28	1233459,3	1704996,183	-6020152,145	1233459,367
SINC-SINCELEJO	1588028,239	-6091166,347	1025655,054	1588028,178	-6091166,211	1025655,121
TUNA-TUNJA	1818373,169	-6085596,893	610965,096	1818373,108	-6085596,758	610965,1629
NOMBRE DE LA ESTACIÓN DE LA RED MAGNA-ECO	COORDENADAS ÉPOCA 2005			COORDENADAS ACTUALIZADAS 2018,2		
AND-SAN ANDRÉS	898663,994	-6160668,079	1380782,862	898663,8377	-6160667,735	1380783,032

Fuente: Propia

- Cálculo del Error Medio Cuadrático EMC

Para el cálculo del EMC se utilizó la siguiente formula:

$$EMC = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_{real})^2} \quad (49)$$

Donde:

X_i = es la coordenada generada por el software

X_{real} = Es la coordenada oficial actualizada

Tabla 4 Error medio cuadrático Datos 5 marzo del 2018

	- SAASTAMOINEN			GOAD Y GOODMAN			UNB			ENTRE SATELITES		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
ABCC-BOGOTÁ	-4,450	1,744	2,318	-4,204	0,854	2,337	-4,433	1,709	2,329	-3,503	2,051	3,062
ABDP-BOGOTÁ	-4,560	2,670	2,071	-4,314	1,776	2,084	-4,542	2,638	2,082	-3,385	2,557	2,895
ABPW-BOGOTÁ	-4,339	-3,068	1,417	-4,242	-3,438	1,469	-4,328	-3,112	1,423	-2,467	-10,379	1,049
BEJA-BARRANCA BERMEJA	-2,760	-3,444	2,891	-3,081	-2,496	2,738	-2,759	-3,482	2,883	-2,634	-2,919	3,597
BOGA-BOGOTÁ	-3,896	0,864	2,289	-3,699	0,037	2,261	-3,877	0,827	2,302	-2,522	0,595	3,388
CALI-CALI	-2,679	-1,552	1,991	-2,584	-1,399	1,900	-2,666	-1,407	2,055	-2,362	-1,061	2,941
APTO-APARTADÓ	-4,315	-3,464	2,272	-4,448	-2,876	2,134	-4,302	-3,522	2,281	-2,587	-5,539	3,075
BUEN- BUENAVENTURA	-2,470	-3,430	1,858	-2,664	-1,992	2,022	-2,458	-3,311	1,917	-2,077	-3,495	2,938
DORA-LA DORADA	-2,419	-3,296	2,314	-2,629	-2,475	2,287	-2,405	-3,335	2,322	-2,146	-3,061	3,181
GARA-GARAGOA	-3,008	0,954	2,556	-3,251	1,759	2,523	-2,993	0,910	2,560	-2,629	1,076	3,435
IBAG-IBAGUÉ	-2,356	-0,946	1,830	-2,128	-2,088	1,770	-2,339	-0,957	1,850	-2,015	-0,683	2,963
MEDE-MEDELLIN	-3,083	0,416	2,714	-2,753	-0,941	2,806	-3,071	0,376	2,722	-2,530	0,068	3,649
QUIB-QUIBDO	-3,673	-2,700	2,401	-3,803	-1,767	2,456	-3,659	-2,718	2,421	-2,217	-3,214	3,573
SAMA-SANTA MARTA	-1,468	-4,199	4,283	-2,417	-2,502	3,352	-1,864	-3,741	3,900	-1,892	-2,742	4,604
SINC-SINCELEJO	-1,792	-3,291	3,785	-2,119	-2,548	3,557	-1,849	-3,280	3,749	-2,859	-2,767	4,343
TUNA-TUNJA	-4,051	1,101	1,999	-3,165	-1,732	2,188	-4,038	1,055	2,001	-3,570	1,020	2,885
AND-SAN ANDRÉS	-2,897	1,831	-0,945	-3,043	3,102	-1,155	-2,889	1,760	-0,926	1,209	-6,945	5,715
EMC	3,323	2,561	2,471	3,296	2,157	2,370	3,324	2,510	2,441	2,573	3,889	3,497

Fuente: Propia

Tabla 5 Error medio cuadrático Datos 2 de abril del 2018

ESTACIÓN	KLOBUCHAR - SAASTAMOINEN			KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN			KLOBUCHAR- UNB			SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
BEJA-BARRANCA BERMEJA	-0,931	-4,369	2,146	-1,162	-3,128	2,036	-0,916	-4,346	2,164	0,653	0,362	3,332
BOGA-BOGOTÁ	-2,439	-0,570	2,058	-2,268	-1,046	2,148	-2,456	-0,019	2,112	-0,047	3,794	2,901
CALI-CALI	0,450	- 35,007	-1,733	-1,533	-1,819	0,660	-1,465	-3,331	0,522	1,067	-8,195	7,830
APTO-APARTADÓ	-0,926	-4,133	3,098	-1,075	-3,151	2,921	-0,910	-4,201	3,108	1,244	1,212	3,608
BUEN- BUENAVENTURA	-1,772	-3,495	1,471	-1,882	-2,378	1,469	-1,756	-3,518	1,488	0,161	0,126	2,512
DORA-LA DORADA	-1,287	-2,897	1,773	-1,434	-2,155	1,708	-1,267	-2,966	1,783	0,474	0,975	2,615
IBAG-IBAGUÉ	-3,075	- 24,969	11,160	-1,887	-1,446	0,994	-2,110	-1,054	1,234	-2,065	-14,601	16,769
MEDE-MEDELLIN	-2,291	-0,260	1,405	-2,045	-1,608	1,565	-2,273	-0,329	1,416	-0,597	4,334	2,368

QUIB-QUIBDO	-1,800	-3,354	2,375	-1,918	-2,452	2,301	-1,783	-3,415	2,387	0,614	0,638	2,787
SAMA-SANTA MARTA	-1,433	-4,550	3,391	-1,705	-3,338	3,038	-1,414	-4,597	3,393	-0,098	-0,080	4,055
SINC-SINCELEJO	-0,938	-4,500	2,833	-1,081	-3,630	2,685	-0,923	-4,514	2,846	0,583	-0,414	3,570
TUNA-TUNJA	-2,658	-1,113	2,645	-1,781	-2,180	1,659	-2,421	2,536	0,821	-1,055	1,737	4,594
AND-SAN ANDRÉS	-4,829	-3,395	5,240	-3,925	-2,097	3,606	-4,375	-3,220	4,514	-4,645	4,924	5,180
EMC	2,035	2,959	2,497	1,853	2,286	2,141	1,931	3,028	2,308	1,364	2,398	3,189

Fuente: Propia

10. RESULTADOS.

El presente capítulo se muestran las coordenadas obtenidas por la implementación de la herramienta para una epoca (1 segundo) y las coordenadas actualizadas de las estaciones de monitoreo del IGAC. Para los análisis horizontales y verticales se realizaron transformaciones de las coordenadas a través de la aplicación Magna-Sirgas Pro: de geocentricas a Gauss Krueger con su respectivo origen Gauss.

Tabla 6 Resultado de las coordenadas por los modelos implementados datos 2 abril.

BOGA-BOGOTÁ							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1744517,172	-6116051,074	512581,1028	1004697,7400	999729,0850	2609,8440	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1744514,733	-6116051,643	512583,1608	1004699,8000	999726,5840	2609,8890	
KLOBUCHAR- GOAD AND GOODMAN	1744514,904	-6116052,119	512583,2503	1004699,8490	999726,6180	2610,4000	
KLOBUCHAR- UNB	1744514,717	-6116051,093	512583,2143	1004699,8970	999726,7200	2609,3620	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1744517,125	-6116047,28	512584,0041	1004700,9270	999730,0800	2606,4300	
AND-SAN ANDRÉS							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	898663,838	-6160667,735	1380783,032	1884108,364	1149615,803	15,918	INSULAR
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	898659,009	-6160671,130	1380788,272	1884112,872	1149610,510	19,659	
KLOBUCHAR- GOAD AND GOODMAN	898659,913	-6160669,832	1380786,638	1884111,534	1149611,599	18,176	
KLOBUCHAR- UNB	898659,462	-6160670,955	1380787,546	1884112,189	1149610,988	19,395	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	898659,193	-6160662,811	1380788,212	1884114,609	1149611,884	11,637	
APTO-APARTADÓ							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			

MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1460797,847	-6147200,626	868399,5971	1362929,357	1049086,154	45,036	OESTE
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1460796,921	-6147204,759	868402,6946	1362931,901	1049084,295	49,232	
KLOBUCHAR- GOAD AND GOODMAN	1460796,771	-6147203,777	868402,5184	1362931,862	1049084,376	48,227	
KLOBUCHAR- UNB	1460796,937	-6147204,827	868402,705	1362931,902	1049084,294	49,302	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1460799,091	-6147199,414	868403,2048	1362933,054	1049087,64	44,647	
BEJA-BARRANCA BERMEJA							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1758042,959	-6081158,539	778801,1214	1272536,697	1022307,895	93,402	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1758042,028	-6081162,907	778803,2671	1272538,341	1022305,787	97,574	
KLOBUCHAR- GOAD AND GOODMAN	1758041,797	-6081161,667	778803,1579	1272538,387	1022305,91	96,314	
KLOBUCHAR- UNB	1758042,043	-6081162,885	778803,2854	1272538,361	1022305,808	97,559	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1758043,611	-6081158,177	778804,4538	1272540,025	1022308,621	93,646	
BUEN-BUENAVENTURA							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1430383,826	-6200818,023	428934,1563	921026,441	1007451,118	57,612	OESTE
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1430382,053	-6200821,518	428935,6275	921027,705	1007448,605	60,712	
KLOBUCHAR- GOAD AND GOODMAN	1430381,944	-6200820,401	428935,6251	921027,778	1007448,75	59,601	
KLOBUCHAR- UNB	1430382,07	-6200821,542	428935,6447	921027,721	1007448,616	60,74	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1430383,987	-6200817,898	428936,6678	921028,953	1007451,303	57,696	
DORA-LA DORADA							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1679425,177	-6123536,718	602182,4298	1094872,404	935080,562	204,349	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1679423,89	-6123539,615	602184,2025	1094873,937	935078,556	206,96	
KLOBUCHAR- GOAD AND GOODMAN	1679423,743	-6123538,873	602184,1374	1094873,944	935078,611	206,202	
KLOBUCHAR- UNB	1679423,91	-6123539,684	602184,2126	1094873,94	935078,557	207,032	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1679425,652	-6123535,743	602185,0445	1094875,083	935081,281	203,786	
GARA-GARAGOA							

	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1819791,545	-6088854,445	561298,425	1053691,288	1079558,684	1750,803	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1819789,616	-6088855,105	561299,833	1053692,681	1079556,646	1751,007	
KLOBUCHAR- GOAD AND GOODMAN	1819789,472	-6088854,51	561299,7844	1053692,686	1079556,678	1750,394	
KLOBUCHAR- UNB	1819789,638	-6088855,177	561299,8422	1053692,683	1079556,646	1751,083	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1819791,312	-6088850,329	561300,9139	1053694,123	1079559,636	1747,028	
MEDE-MEDELLIN							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1579608,407	-6142783,734	684352,486	1177523,425	1165871,912	1553,325	OESTE
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1579606,116	-6142783,994	684353,8911	1177524,85	1165869,625	1553,159	
KLOBUCHAR- GOAD AND GOODMAN	1579606,363	-6142785,342	684354,0505	1177524,86	1165869,528	1554,536	
KLOBUCHAR- UNB	1579606,134	-6142784,063	684353,9019	1177524,853	1165869,625	1553,232	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1579607,811	-6142779,4	684354,8538	1177526,25	1165872,407	1549,26	
QUIB-QUIBDO							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1464760,354	-6175537,098	629220,966	1122038,748	1046611,126	57,779	OESTE
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1464758,554	-6175540,452	629223,3408	1122040,827	1046608,599	60,849	
KLOBUCHAR- GOAD AND GOODMAN	1464758,436	-6175539,55	629223,2667	1122040,843	1046608,692	59,941	
KLOBUCHAR- UNB	1464758,571	-6175540,513	629223,3525	1122040,832	1046608,601	60,913	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1464760,967	-6175536,461	629223,7526	1122041,569	1046611,867	57,58	
SAMA-SANTA MARTA							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1704996,183	-6020152,145	1233459,367	1733151,784	988032,887	22,564	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1704994,75	-6020156,694	1233462,757	1733154,334	988030,27	27,134	
KLOBUCHAR- GOAD AND GOODMAN	1704994,478	-6020155,483	1233462,405	1733154,23	988030,338	25,85	
KLOBUCHAR- UNB	1704994,769	-6020156,741	1233462,759	1733154,327	988030,275	27,184	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1704996,085	-6020152,225	1233463,421	1733155,751	988032,773	23,403	

SINC-SINCELEJO							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1588028,178	-6091166,211	1025655,121	1522189,528	856050,744	201,126	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1588027,24	-6091170,711	1025657,954	1522191,665	856048,708	205,648	
KLOBUCHAR- GOAD AND GOODMAN	1588027,097	-6091169,841	1025657,806	1522191,66	856048,789	204,757	
KLOBUCHAR- UNB	1588027,255	-6091170,725	1025657,967	1522191,675	856048,719	205,667	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1588028,761	-6091166,625	1025658,691	1522192,961	856051,216	202,244	
TUNA-TUNJA							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1818373,108	-6085596,758	610965,1629	1103456,878	1079075,028	2831,71	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1818370,45	-6085597,871	610967,8075	1103459,476	1079072,161	2832,269	
KLOBUCHAR- GOAD AND GOODMAN	1818371,327	-6085598,938	610966,8217	1103458,373	1079072,697	2833,441	
KLOBUCHAR- UNB	1818370,687	-6085594,221	610965,9838	1103457,993	1079073,434	2828,68	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1818372,053	-6085595,021	610969,7569	1103461,637	1079074,509	2830,195	

Fuente: Propia

Tabla 7 Resultado de las coordenadas por los modelos implementados datos 5 de marzo

ABCC-BOGOTÁ							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1739437,981	-6117252,441	515065,0715	1007191,818	994517,287	2576,217	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1739433,532	-6117250,698	515067,3899	1007194,363	994513,486	2573,521	
KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	1739433,777	-6117251,587	515067,4087	1007194,307	994513,478	2574,442	
KLOBUCHAR- UNB	1739433,548	-6117250,732	515067,4	1007194,37	994513,492	2573,559	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1739434,478	-6117250,39	515068,1331	1007195,106	994514,48	2573,544	
ABDP-BOGOTÁ							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1742983,188	-6118331,367	494730,7211	986770,869	997629,375	2958,233	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1742978,628	-6118328,697	494732,7921	986773,231	997625,722	2954,589	
KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	1742978,874	-6118329,591	494732,8047	986773,171	997625,714	2955,515	
KLOBUCHAR- UNB	1742978,645	-6118328,729	494732,8032	986773,239	997625,73	2954,626	

SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1742979,802	-6118328,81	494733,6162	986774,018	997626,82	2955,083	
ABPW-BOGOTÁ							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1753507,153	-6113238,917	518210,5859	1010325,517	1009141,461	2836,956	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1753502,813	-6113241,985	518212,0028	1010326,784	1009136,445	2838,819	
KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	1753502,91	-6113242,355	518212,0548	1010326,805	1009136,437	2839,204	
KLOBUCHAR- UNB	1753502,825	-6113242,029	518212,0088	1010326,787	1009136,445	2838,865	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1753504,685	-6113249,296	518211,6351	1010325,802	1009136,229	2846,307	
BEJA-BARRANCA BERMEJA							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1758042,96	-6081158,541	778801,1201	1272536,695	1022307,896	93,404	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1758040,2	-6081161,985	778804,0112	1272539,25	1022304,287	96,282	
KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	1758039,878	-6081161,037	778803,8577	1272539,221	1022304,241	95,271	
KLOBUCHAR- UNB	1758040,201	-6081162,024	778804,0031	1272539,238	1022304,277	96,319	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1758040,326	-6081161,46	778804,7175	1272540,009	1022304,553	95,903	
BOGA-BOGOTÁ							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1744517,173	-6116051,076	512581,1015	1004697,739	999729,085	2609,846	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1744513,277	-6116050,212	512583,391	1004700,173	999725,577	2608,138	
KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	1744513,474	-6116051,039	512583,362	1004700,076	999725,54	2608,983	
KLOBUCHAR- UNB	1744513,296	-6116050,25	512583,4031	1004700,182	999725,585	2608,181	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1744514,651	-6116050,482	512584,4893	1004701,216	999726,824	2608,862	
CALI-CALI							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1483099,9	-6193060,053	373124,2305	865064,16	1060559,15	1027,362	OESTE
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1483097,222	-6193061,605	373126,2215	865066,093	1060556,183	1028,363	
KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	1483097,316	-6193061,452	373126,1308	865066,01	1060556,31	1028,231	

KLOBUCHAR- UNB	1483097,234	-6193061,46	373126,2857	865066,165	1060556,228	1028,229	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1483097,538	-6193061,114	373127,1712	865067,065	1060556,604	1028,016	
APTO-APARTADÓ							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1460797,848	-6147200,629	868399,5958	1362929,355	1049086,154	45,039	OESTE
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1460793,533	-6147204,093	868401,8674	1362931,275	1049081,153	47,7	
KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	1460793,4	-6147203,504	868401,7295	1362931,221	1049081,16	47,083	
KLOBUCHAR- UNB	1460793,546	-6147204,151	868401,8771	1362931,276	1049081,152	47,761	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1460795,261	-6147206,168	868402,6711	1362931,74	1049082,354	50,206	
BUEN-BUENAVENTURA							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1430383,827	-6200818,026	428934,155	921026,44	1007451,119	57,615	OESTE
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1430381,357	-6200821,456	428936,0131	921028,105	1007447,941	60,521	
KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	1430381,163	-6200820,018	428936,1768	921028,366	1007448,075	59,091	
KLOBUCHAR- UNB	1430381,368	-6200821,337	428936,0722	921028,171	1007447,978	60,412	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1430381,75	-6200821,521	428937,0933	921029,172	1007448,309	60,746	
DORA-LA DORADA							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1679425,178	-6123536,721	602182,4285	1094872,402	935080,562	204,352	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1679422,759	-6123540,016	602184,7421	1094874,467	935077,36	207,098	
KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	1679422,549	-6123539,195	602184,7158	1094874,521	935077,375	206,252	
KLOBUCHAR- UNB	1679422,774	-6123540,056	602184,7503	1094874,471	935077,364	207,141	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1679423,032	-6123539,781	602185,6098	1094875,345	935077,686	207,027	
GARA-GARAGOA							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1819791,547	-6088854,448	561298,4237	1053691,286	1079558,685	1750,806	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1819788,539	-6088853,493	561300,9801	1053693,986	1079556,074	1749,263	

KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	1819788,296	-6088852,689	561300,9465	1053694,027	1079556,071	1748,423	
KLOBUCHAR- UNB	1819788,554	-6088853,537	561300,9839	1053693,986	1079556,076	1749,31	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1819788,918	-6088853,372	561301,8592	1053694,863	1079556,471	1749,333	
IBAG-IBAGUÉ							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1623166,581	-6149837,517	489244,3605	981502,022	873772,824	1215,956	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1623164,226	-6149838,464	489246,1901	981503,826	873770,308	1216,411	
KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	1623164,453	-6149839,606	489246,1304	981503,677	873770,236	1217,565	
KLOBUCHAR- UNB	1623164,243	-6149838,474	489246,2102	981503,845	873770,322	1216,426	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1623164,566	-6149838,201	489247,323	981504,968	873770,706	1216,331	
MEDE-MEDELLIN							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1579608,408	-6142783,737	684352,4847	1177523,423	1165871,913	1553,328	OESTE
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1579605,326	-6142783,321	684355,1985	1177526,24	1165869,023	1552,457	
KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	1579605,655	-6142785,251	684355,2911	1177526,121	1165868,861	1554,407	
KLOBUCHAR- UNB	1579605,337	-6142783,361	684355,207	1177526,244	1165869,024	1552,499	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1579605,878	-6142783,669	684356,1341	1177527,12	1165869,469	1553,03	
QUIB-QUIBDO							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1464760,355	-6175537,101	629220,9647	1122038,747	1046611,126	57,782	OESTE
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1464756,682	-6175539,801	629223,3656	1122040,956	1046606,927	59,791	
KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	1464756,552	-6175538,868	629223,4211	1122041,104	1046607,016	58,863	
KLOBUCHAR- UNB	1464756,696	-6175539,819	629223,3855	1122040,974	1046606,937	59,814	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1464758,138	-6175540,315	629224,538	1122042,04	1046608,225	60,739	
SAMA-SANTA MARTA							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1704996,184	-6020152,147	1233459,365	1733151,782	988032,888	22,566	CENTRAL

KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1704994,716	-6020156,346	1233463,648	1733155,275	988030,332	26,97	
KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	1704993,767	-6020154,649	1233462,717	1733154,731	988029,881	24,934	
KLOBUCHAR- UNB	1704994,32	-6020155,888	1233463,266	1733155,008	988030,076	26,358	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1704994,292	-6020154,889	1233463,969	1733155,886	988030,322	25,544	
SINC-SINCELEJO							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1588028,179	-6091166,213	1025655,12	1522189,526	856050,744	201,128	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1588026,387	-6091169,505	1025658,905	1522192,829	856048,191	204,438	
KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	1588026,06	-6091168,762	1025658,676	1522192,733	856048,062	203,61	
KLOBUCHAR- UNB	1588026,33	-6091169,494	1025658,869	1522192,798	856048,139	204,407	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1588025,32	-6091168,98	1025659,463	1522193,509	856047,293	203,761	
TUNA-TUNJA							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	1818373,109	-6085596,76	610965,1616	1103456,876	1079075,029	2831,712	CENTRAL
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	1818369,058	-6085595,659	610967,161	1103459,075	1079071,461	2829,7	
KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	1818369,943	-6085598,492	610967,3493	1103458,976	1079071,498	2832,672	
KLOBUCHAR- UNB	1818369,07	-6085595,705	610967,1621	1103459,071	1079071,459	2829,748	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	1818369,539	-6085595,74	610968,0471	1103459,936	1079071,898	2830	
AND-SAN ANDRÉS							
	GEOCENTRICAS			GAUSS-KRUEGER			
MODELOS	X	Y	Z	NORTE	ESTE	ALTURA	ORIGEN GAUSS
COORDENADAS ACTUALIZADAS	898663,8389	-6160667,737	1380783,031	1884108,363	1149615,804	15,92	INSULAR
KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	898660,9424	-6160665,906	1380782,086	1884107,913	1149613,204	13,538	
KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	898660,7964	-6160664,635	1380781,875	1884107,986	1149613,243	12,244	
KLOBUCHAR- UNB	898660,9502	-6160665,978	1380782,105	1884107,915	1149613,201	13,613	
SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES	898665,0484	-6160674,683	1380788,745	1884112,406	1149615,978	24,044	

Fuente: Propia

11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se representa el análisis y discusión teniendo en cuenta los resultados generados por la aplicación en comparación de las coordenadas actualizadas a la época del estudio. Se calcula el error asociado a la toma mediante la siguiente ecuación:

$$Error\ total = \sqrt{(x_{sof} - x_{ac})^2 + (y_{sof} - y_{ac})^2 + (z_{sof} - z_{ac})^2} \quad (50)$$

Donde:

$x_{sof}, y_{sof}, z_{sof}$, Coordenadas geocéntricas calculadas con la herramienta.

x_{ac}, y_{ac}, z_{ac} , Coordenadas geocéntricas actualizadas.

Además, se calcula el error horizontal y vertical del posicionamiento gracias a las coordenadas Gauss Krueger

$$Error\ horizontal = \sqrt{(Norte_{sofG} - Norte_{acG})^2 + (Este_{sofG} - Este_{acG})^2} \quad (51)$$

Donde:

$Norte_{sofG}, Este_{sofG}$, Coordenadas Gauss Krueger transformadas a partir de las coordenadas geocéntricas calculadas con la herramienta.

$Norte_{acG}, Este_{acG}$, Coordenadas Gauss Krueger transformadas a partir de las coordenadas geocéntricas actualizadas de las estaciones del IGAC.

$$Error\ Vertical = abs(Altura_{sofG} - Altura_{acG}) \quad (222)$$

Donde:

$Altura_{sofG}$, Coordenadas Gauss Krueger transformadas a partir de las coordenadas geocéntricas calculadas con la herramienta.

$Altura_{acG}$, Coordenadas Gauss Krueger transformadas a partir de las coordenadas geocéntricas actualizadas de las estaciones del IGAC.

El cálculo del error por toma u observación, se promedia aritméticamente con el número de registro de las estaciones. A la anterior actividad se le adjunta la información del número de satélites para enriquecer la discusión referente al error asociado obtenido por cada modelo, como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 8 Análisis cuantitativo de las estaciones de monitoreo promedio en el error de posicionamiento en Colombia.

ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO
PROMEDIO EN EL ERROR DE POSICIONAMIENTO EN COLOMBIA

NOMBRE DE LAS ESTACIONES	NOMBRE DE LOS MODELOS IMPLEMENTADOS												
	KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN			KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN			KLOBUCHAR-COLLINS UNB			SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES			NÚMERO DE SATELITES POR TOMA
	Error Horizontal	Error Vertical	Error Total	Error Horizontal	Error Vertical	Error Total	Error Horizontal	Error Vertical	Error Total	Error Horizontal	Error Vertical	Error Total	
BOGA-BOGOTÁ	3,240	0,045	3,242	3,246	0,556	3,294	3,201	0,482	3,239	3,339	3,414	4,776	12
AND-SAN ANDRÉS	6,953	3,741	7,893	5,265	2,258	5,728	6,149	3,477	7,063	7,373	4,281	8,523	6
APTO-APARTADÓ	3,151	4,196	5,247	3,072	3,191	4,429	3,152	4,266	5,305	3,984	0,389	4,004	11
BEJA-BARRANCA BERMEJA	2,673	4,172	4,955	2,607	2,912	3,909	2,669	4,157	4,940	3,406	0,244	3,415	12
BUEN-BUENAVENTURA	2,813	3,100	4,186	2,719	1,989	3,369	2,810	3,128	4,204	2,519	0,084	2,520	11
DORA-LA DORADA	2,525	2,611	3,632	2,486	1,853	3,101	2,526	2,683	3,685	2,774	0,563	2,831	11
GARA-GARAGOA	2,469	0,204	2,478	2,445	0,409	2,480	2,470	0,280	2,486	2,991	3,775	4,815	11
MEDE-MEDELLIN	2,695	0,166	2,700	2,783	1,211	3,035	2,696	0,093	2,698	2,868	4,065	4,975	11
QUIB-QUIBDO	3,272	3,07	4,486	3,211	2,162	3,871	3,274	3,134	4,531	2,917	0,199	2,924	11
SAMA-SANTA MARTA	3,654	4,57	5,853	3,533	3,286	4,825	3,645	4,620	5,886	3,969	0,839	4,056	12
SINC-SINCELEJO	2,952	4,522	5,400	2,893	3,631	4,643	2,951	4,541	5,416	3,465	1,118	3,641	12
TUNA-TUNJA	3,869	0,559	3,911	2,769	1,731	3,268	1,945	3,030	3,601	4,787	1,515	5,023	13
ABCC-BOGOTÁ	4,574	2,696	5,312	4,550	1,775	4,885	4,573	2,658	5,291	4,323	2,673	5,084	13
ABDP-BOGOTÁ	4,350	3,644	5,675	4,325	2,718	5,109	4,348	3,607	5,651	4,055	3,150	5,136	13
ABPW-BOGOTÁ	5,174	1,863	5,500	5,186	2,248	5,655	5,174	1,909	5,517	5,240	9,351	10,719	7
BEJA-BARRANCA BERMEJA	4,422	2,878	5,276	4,443	1,867	4,819	4,423	2,915	5,296	4,707	2,499	5,329	13
BOGA-BOGOTÁ	4,270	1,708	4,601	4,246	0,863	4,335	4,268	1,665	4,584	4,147	0,984	4,265	12
CALI-CALI	3,541	1,001	3,680	3,389	0,869	3,500	3,544	0,867	3,648	3,863	0,654	3,918	13
APTO-APARTADÓ	5,357	2,661	5,982	5,331	2,044	5,710	5,358	2,722	6,010	4,486	5,167	6,844	11
BUEN-BUENAVENTURA	3,588	2,906	4,617	3,602	1,476	3,893	3,586	2,797	4,548	3,919	3,131	5,016	13
DORA-LA DORADA	3,810	2,746	4,698	3,827	1,900	4,274	3,809	2,789	4,722	4,115	2,675	4,909	13
GARA-GARAGOA	3,756	1,543	4,061	3,788	2,383	4,475	3,755	1,496	4,042	4,207	1,473	4,458	13
IBAG-IBAGUÉ	3,096	0,455	3,129	3,072	1,609	3,467	3,096	0,470	3,132	3,628	0,375	3,647	12
MEDE-MEDELLIN	4,036	0,871	4,128	4,074	1,079	4,042	4,038	0,829	4,121	4,432	0,298	4,441	13
QUIB-QUIBDO	4,745	2,009	5,152	4,738	1,081	4,860	4,744	2,032	5,161	4,389	2,957	5,293	12
SAMA-SANTA MARTA	4,328	4,404	6,175	4,212	2,368	4,831	4,280	3,792	5,717	4,840	2,978	5,683	13
SINC-SINCELEJO	4,175	3,31	5,327	4,181	2,482	4,861	4,182	3,279	5,314	5,270	2,633	5,890	12
TUNA-TUNJA	4,191	2,012	4,650	4,108	0,960	4,220	4,191	1,964	4,629	4,378	1,712	4,702	13
AND-SAN ANDRÉS	2,639	2,382	3,555	2,589	3,676	4,496	2,641	2,307	3,507	4,047	8,124	9,075	6
PROMEDIO ARITMÉTICO	3,804	2,415	4,672	3,679	1,951	4,255	3,707	2,482	4,619	4,084	2,459	5,032	
INCERTIDUMBRE (+/-)	0,998	1,390	1,162	0,873	0,880	0,838	0,975	1,302	1,081	0,954	2,251	1,816	

Con las siguientes gráficas (Ilustración 14, Ilustración 15, Ilustración 16) se representa las diferencias en el posicionamiento (errores horizontales, verticales y totales) generados por los modelos implementados en comparación con las estaciones de referencia “IGAC”

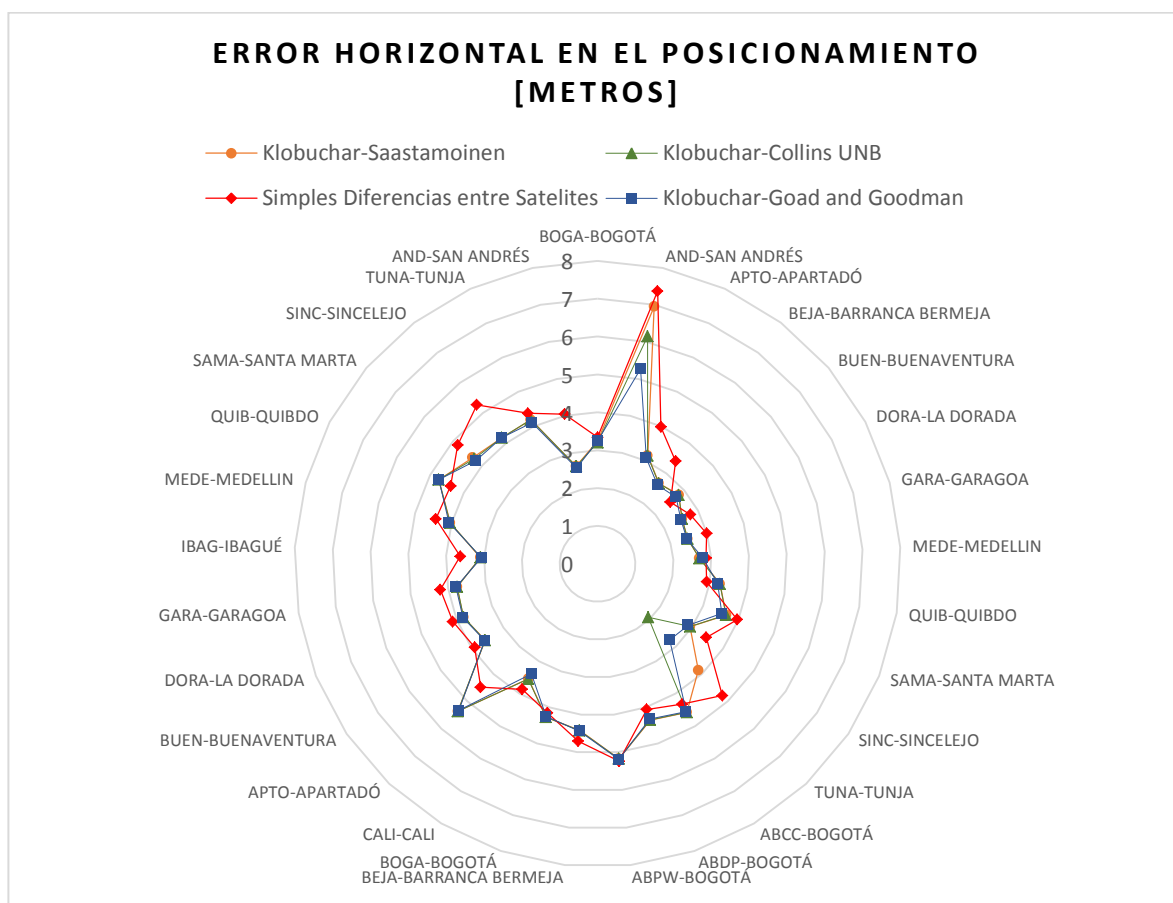


Ilustración 14 Error horizontal en el posicionamiento.

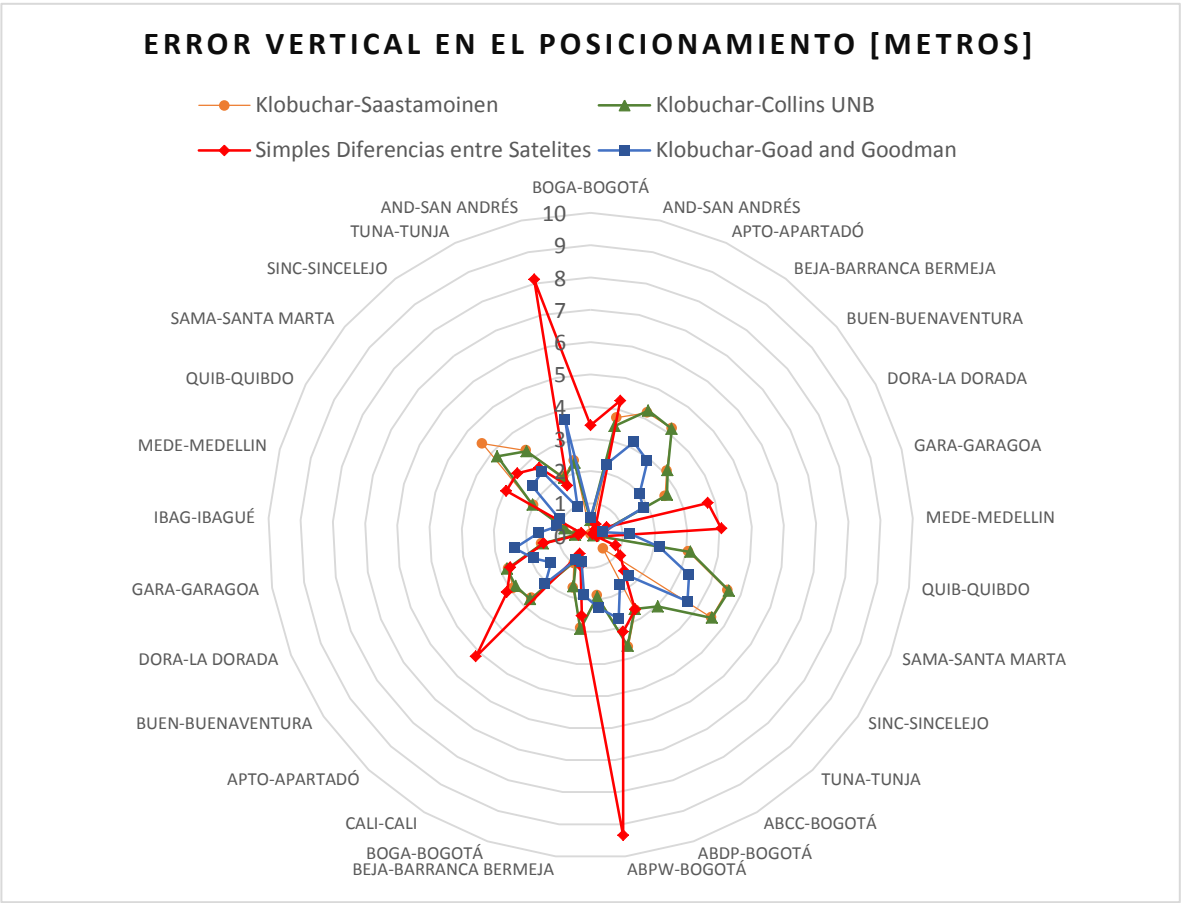


Ilustración 15 Error vertical en el posicionamiento.

Fuente: Propia

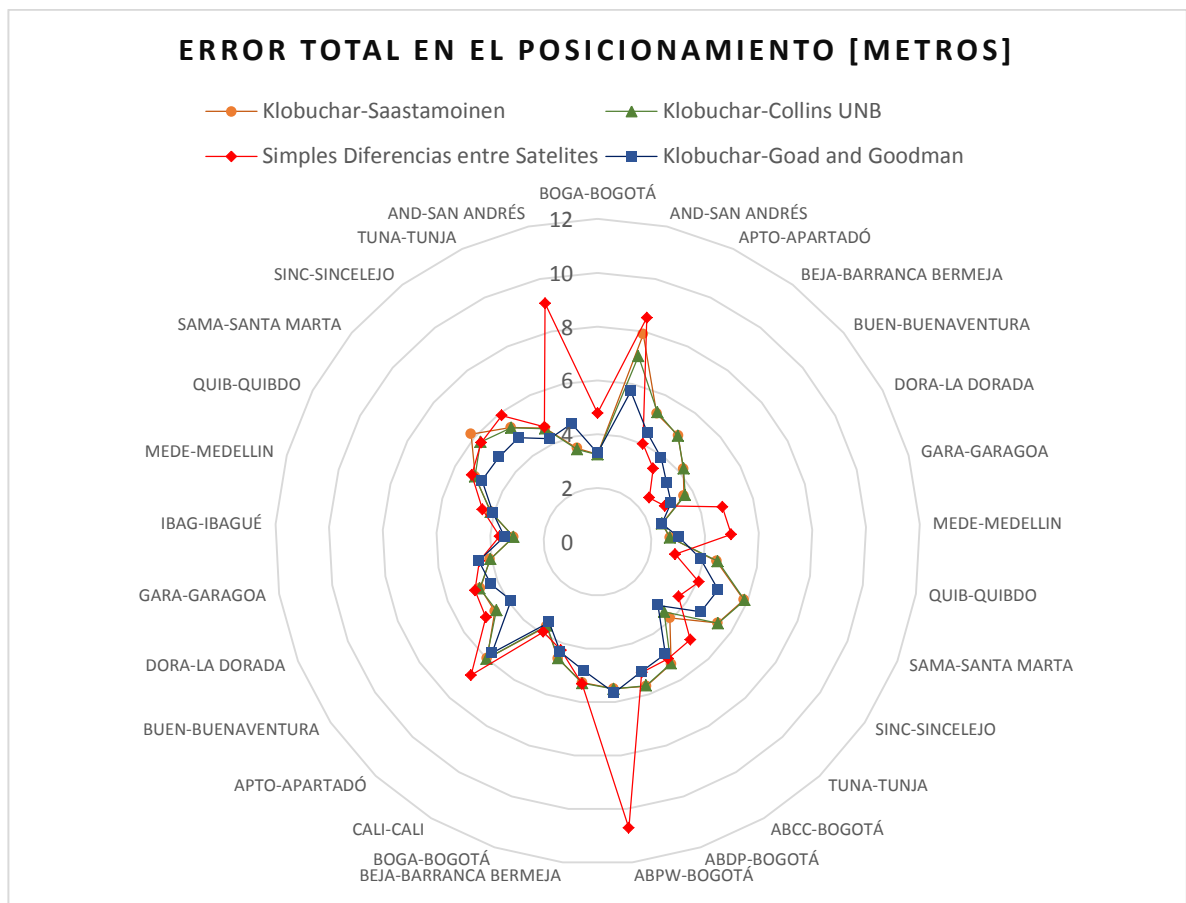
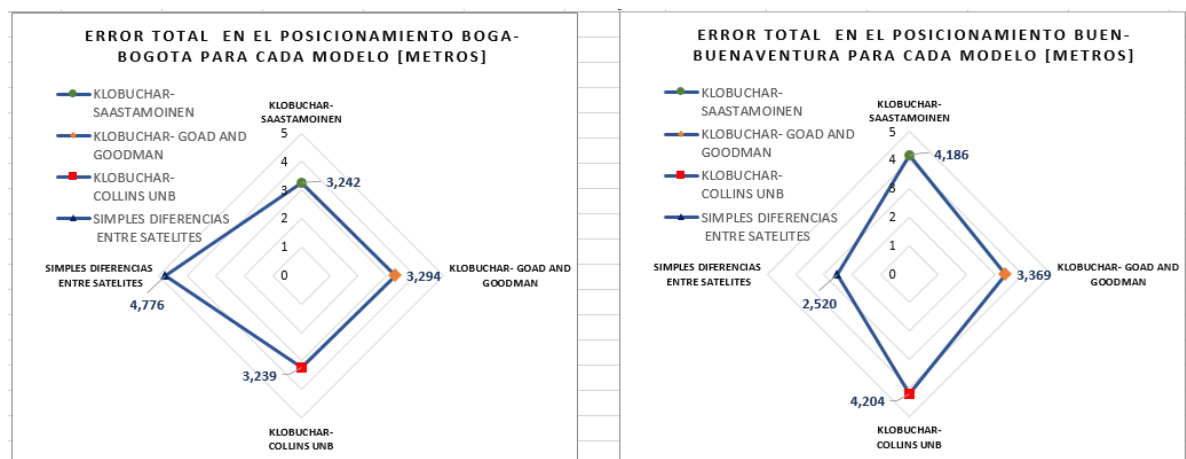
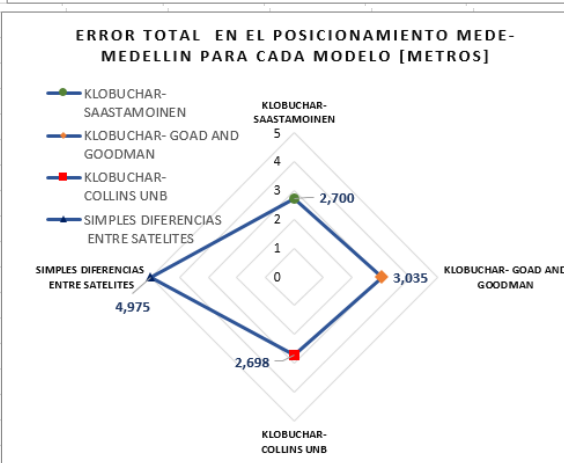
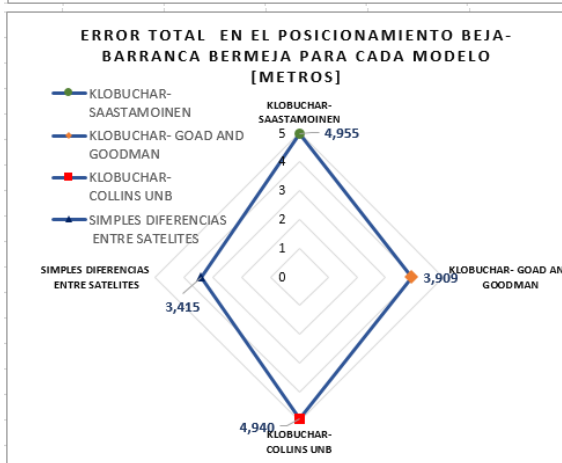
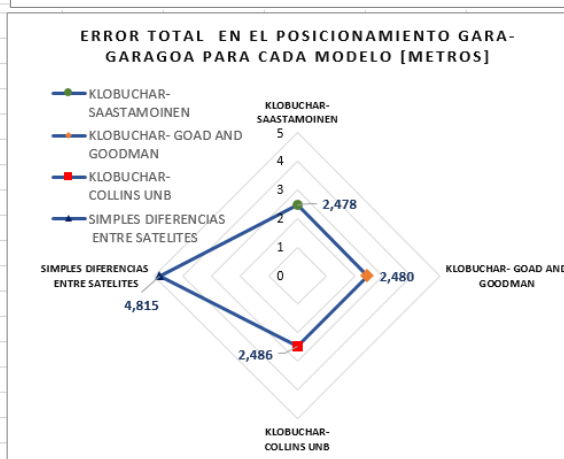
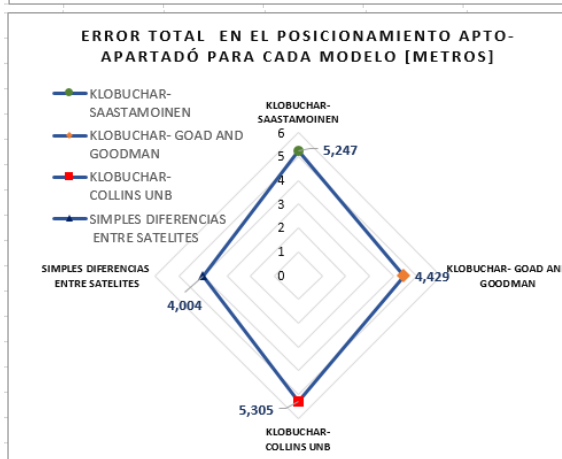
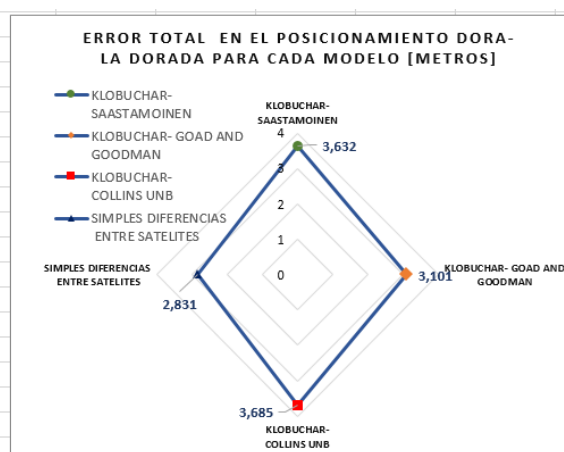
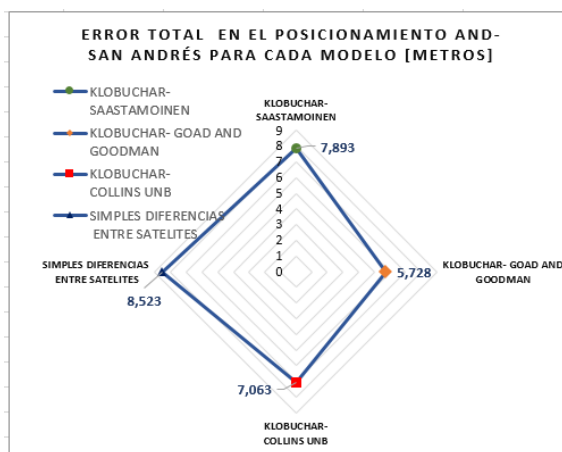


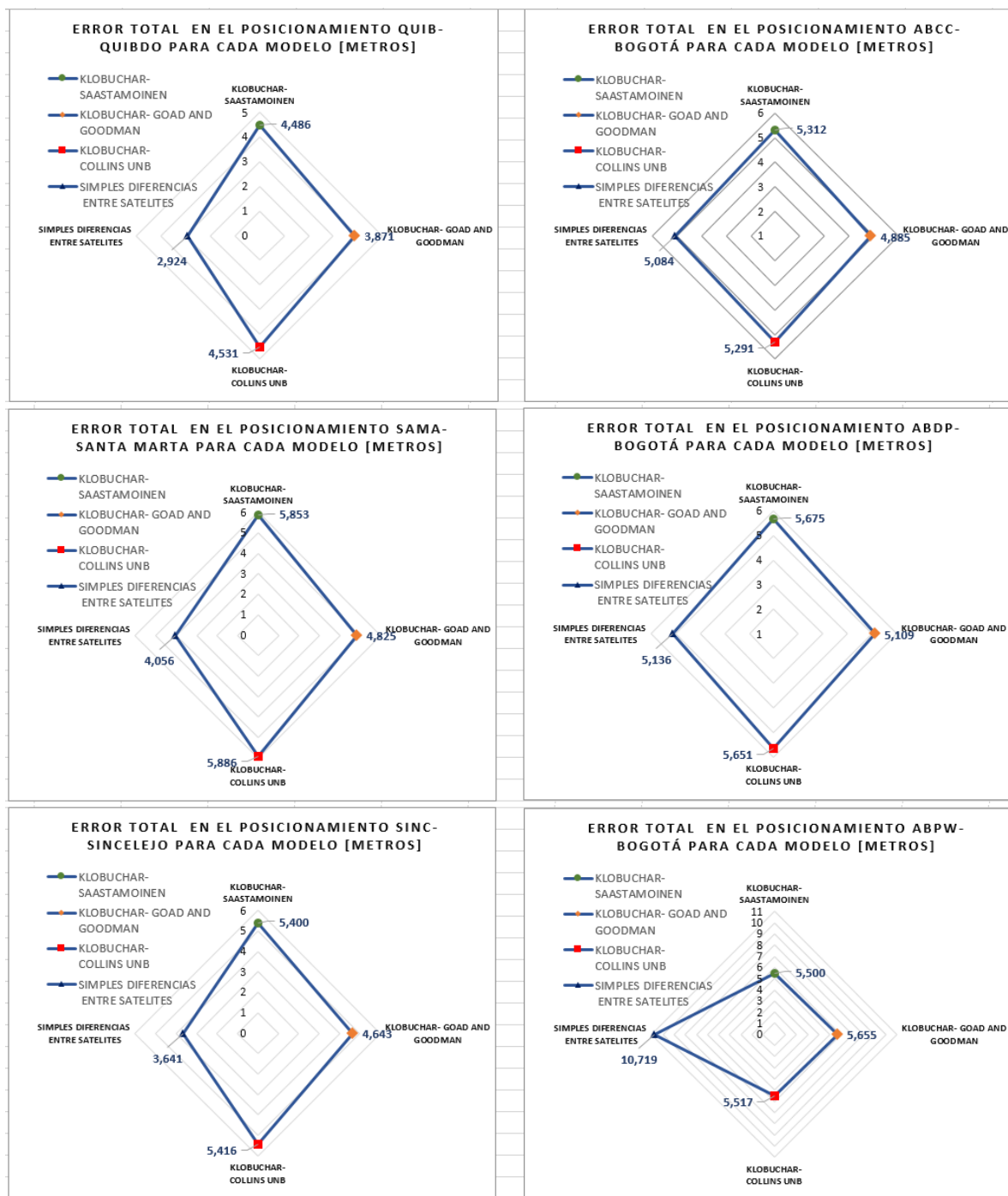
Ilustración 16 Error total en el posicionamiento.

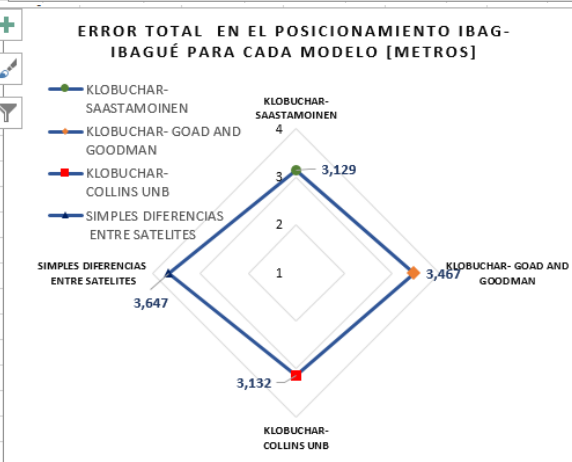
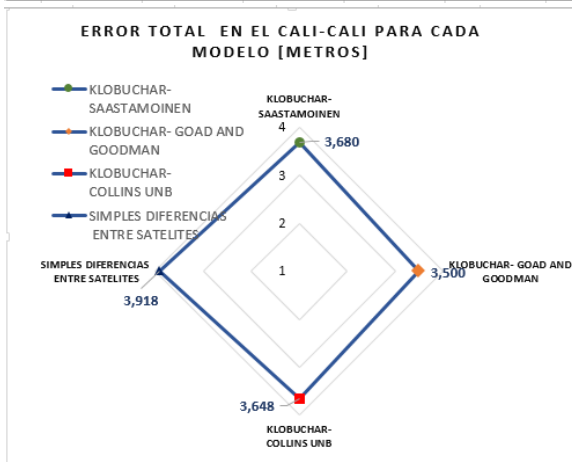
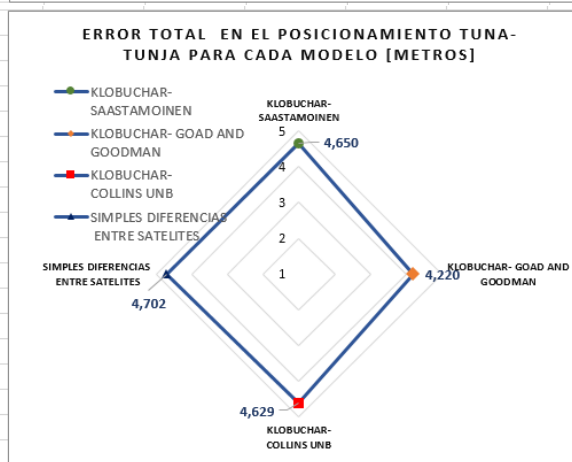
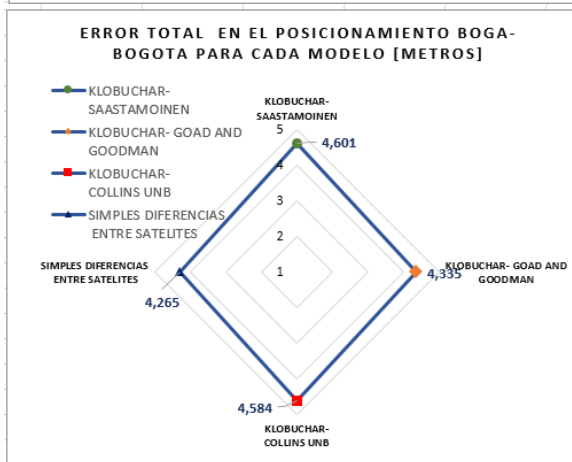
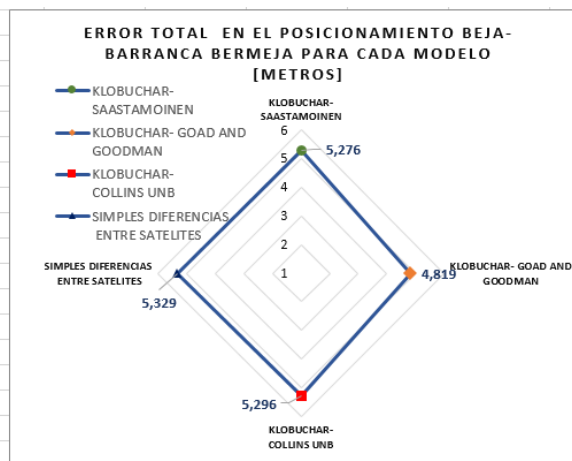
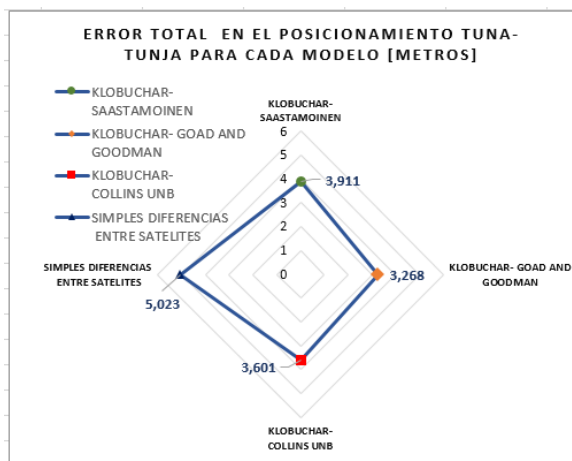
Fuente: Propia.

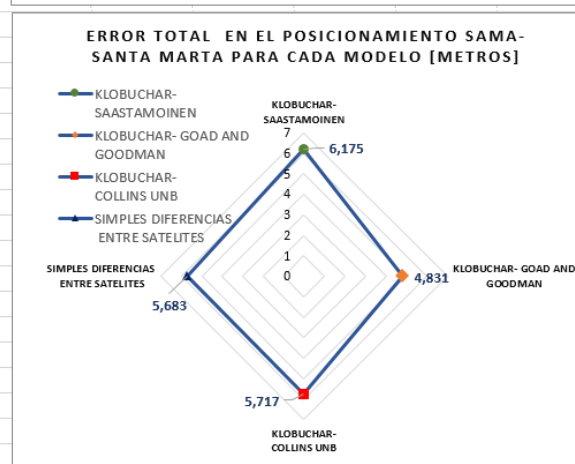
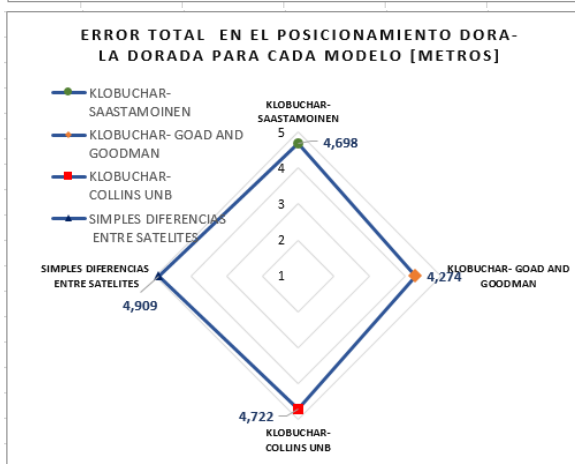
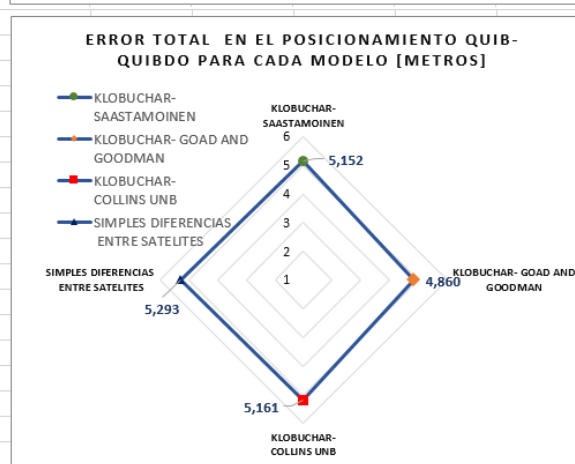
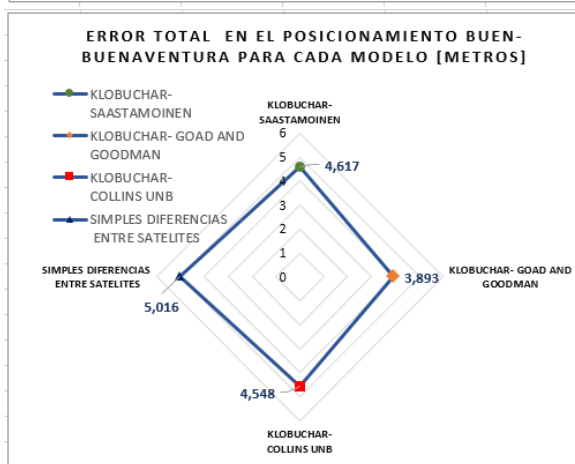
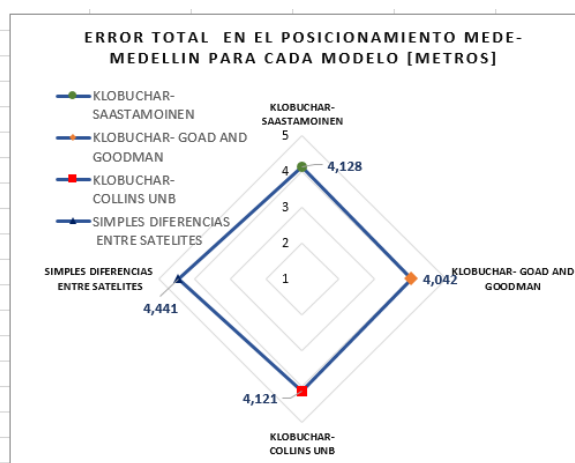
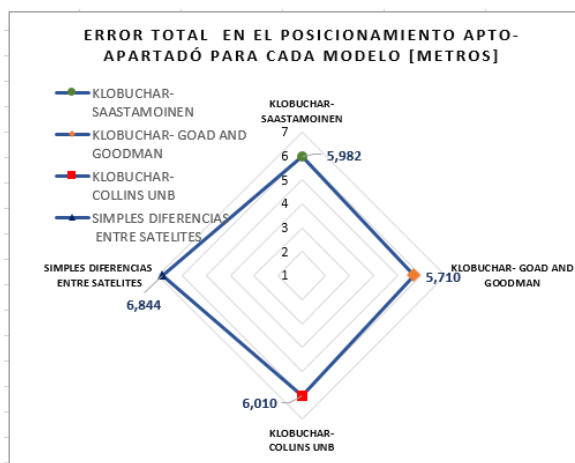
En la siguiente gráfica (**Ilustración 17**) se representa las diferencias en el posicionamiento (errores totales) generados por los modelos implementados en comparación de cada estación de referencia “IGAC”.











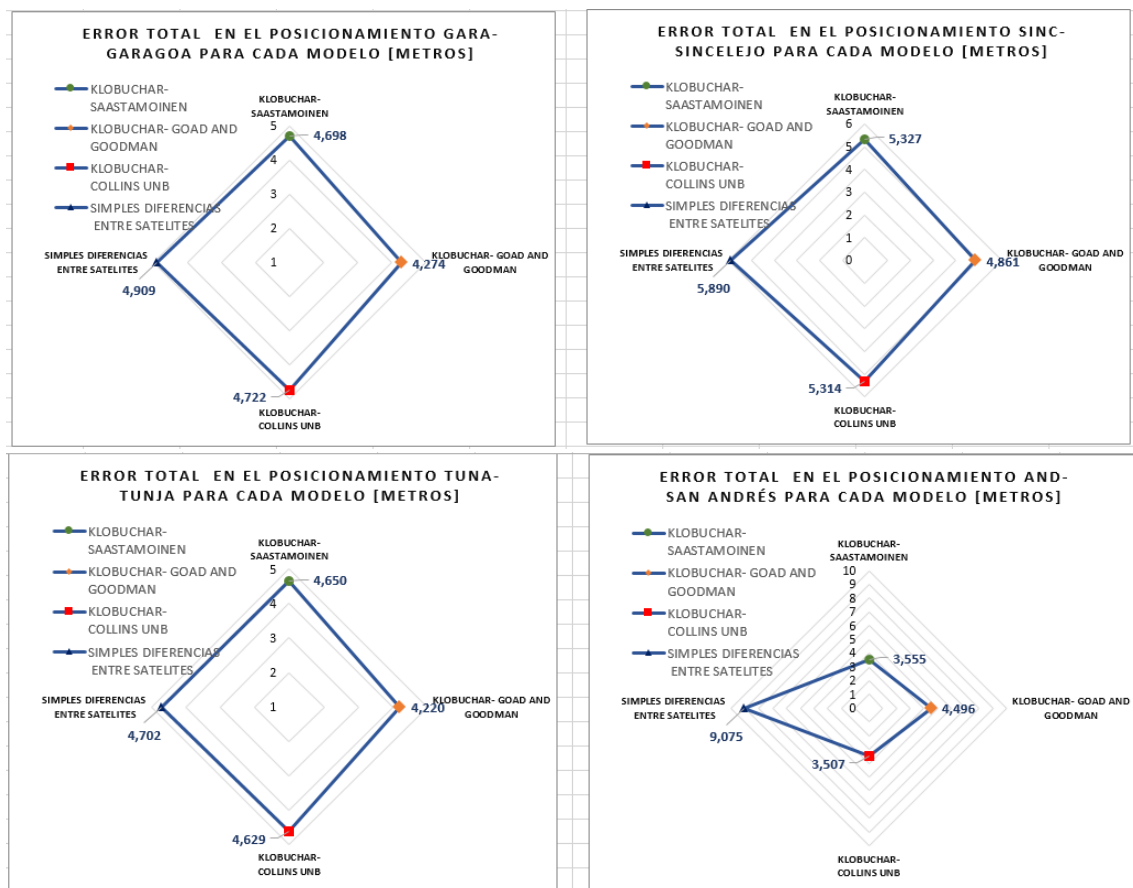


Ilustración 17 Errores totales en el posicionamiento por modelo, con respecto a cada estación de referencia.

Fuente: Propia

Los análisis anteriores permiten afirmar que el mejor resultado en posicionamiento fue la combinación de los modelos atmosféricos de **Klobuchar- Goad y Goodman** junto al modelo de posicionamiento de pseudo-distancia. Esta combinación presenta un error total en promedio de $4,255 \pm 0,838$ metros, un error horizontal de $3,679 \pm 0,873$ metros y un error vertical de $1,951 \pm 0,880$ metros, en comparación con las coordenadas actualizadas de las estaciones del IGAC. Un segundo lugar lo ocuparía la combinación del modelo **Klobuchar- Collins (UNB)** con el de posicionamiento de pseudo-distancia, este presenta un error de $4,619 \pm 1,080$ metros, un error horizontal de $3,707 \pm 0,975$ metros y un error vertical de $2,482 \pm 1,302$ metros, en comparación con las coordenadas actualizadas de las estaciones del IGAC. En un tercer lugar está la combinación entre los modelos **Klobuchar-Saastamoinen** y el de posicionamiento de pseudo-distancia con un error en promedio de $4,672 \pm 1,162$ metros, un error horizontal de $3,804 \pm 0,998$ metros y un error vertical de $2,415 \pm 1,390$ metros, en comparación con las coordenadas actualizadas de las estaciones del IGAC. Por último, la combinación que más errores presentó fue la del modelo de posicionamiento **Simple Diferencias Entre Satélites** con los modelos atmosféricos **Klobuchar-Saastamoinen**, el cual presenta un error promedio de $5,032 \pm 1,816$ metros, un error horizontal de $4,084 \pm 0,954$ metros y un error vertical

de 2,459+/- 2,251 metros, en comparación con las coordenadas actualizadas de las estaciones del IGAC.

La Ilustración 16 muestra cómo los resultados asociados al modelo **Klobuchar- Goad y Goodman** se encuentran más cercanos al origen en la mayoría de los datos, a diferencia de los demás resultados de los procesamientos en los que se utilizaron otros modelos.

El modelo de simples diferencias entre satélites (promedio de error total 5,032 +/- 1,816m) genera menor precisión en el posicionamiento del punto en comparación del modelo de pseudo-distancia (Promedio de error total 4,672 +/- 1,162 m) utilizando los mismos modelos atmosféricos, Klobuchar y Saastamoinen. Este hallazgo es contradictorio al obtenido por (Elhatab, 2002) en el que explica que la aplicación del modelo de Simples Diferencias entre satélites muestra una mejora en el estimado de las coordenadas. Sin embargo, el estudio de Tomas (Beran et al., 2004), confirma el hallazgo de este estudio, concluyendo que la eliminación del error del reloj del receptor puede absorber algunos sesgos no modelados (como, ionosférico residual) y disminuir la precisión en el posicionamiento.

Para el caso de la estación de **And-San Andres** en las dos épocas (2 de abril y 5 de marzo) y la estación **Abpw-Bogota** en el 5 de marzo, el error asociado con el modelo de Simples Diferencias entre satélites es de 8,523; 9,075 y 10,719 respectivamente. Los errores en el posicionamiento son muy elevados en comparación de los demás datos, esto se debe al número de satélites en la toma, que para los tres casos es menor de 7. La anterior afirmación concuerda con Tomas (Beran et al., 2004) cuando afirma que el número de satélites en la toma afecta de manera directa en los resultados.

El efecto troposférico ha sido calculado mediante los modelos **Saastamoinen, Hopfield modificado Y Collins UNB**; estos modelos dependen exclusivamente de los parámetros de temperatura, presión atmosférica y humedad relativa. Los promedios obtenidos en el procesamiento de los datos (tabla 9) nos indican que los resultados presentados son mejores en la combinación atmosférica Klobuchar y Hopfield modificado con el modelo de pseudo-distancia ya que, en este modelo se ingresaron las condiciones climáticas de cada punto, hecho que llevo a obtener un mejor resultado en este posicionamiento.

Entre las ventajas del modelo Klobuchar es que es un modelo ionosférico que, a pesar de ser un modelo simple, puede reducir el error que se produce en la ionósfera hasta en un 50% en latitudes medias. Su simplicidad y utilidad en el procesamiento en tiempo real de equipos monofrecuencia le da un gran protagonismo en el mercado y en este trabajo de investigación aquí presentado.

Tabla 9 Mejores resultados obtenidos por la herramienta.

NOMBRE DE LAS ESTACIONES	MODELO	ERROR ASOCIADO	NUMERO DE SATELITES
GARAGOA	KLOBUCHAR- SAASTAMOINEN	2,478262636	11
GARAGOA	KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	2,480142344	11
GARAGOA	KLOBUCHAR- UNB	2,486377539	11

BUENAVENTURA	SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATÉLITES	2,519815685	11
LA DORADA	KLOBUCHAR- GOAD Y GOODMAN	2,561842893	11
MEDELLIN	KLOBUCHAR- SAASTAMOINEN	2,698201417	11

Fuente: Propia

La tabla 9 muestra los 6 mejores resultados en el posicionamiento. En esta muestra todos los datos presentan un patrón en la cantidad de satélites observados, un total de 11 por toma. Para las tomas con pocos satélites (inferior a 8) el error aumenta considerablemente.

Tabla 10 Promedio en el error de posicionamiento de los municipios con similares condiciones climáticas.

PROMEDIO EN EL ERROR DE POSICIONAMIENTO DE LOS MUNICIPIOS CON SIMILAR CONDICIONES CLIMATICAS				
NOMBRE DE LAS ESTACIONES	NOMBRE DE LOS MODELOS IMPLEMENTADOS			
	KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	KLOBUCHAR-GOAD Y GOODMAN	KLOBUCHAR-UNB	SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES
BOGOTÁ	3,242	3,294	3,239	4,776
MEDELLIN	2,700	3,035	2,698	4,975
TUNJA	3,911	3,268	3,601	5,023
GARAGOA	2,478	2,480	2,486	4,815
ABCC-BOGOTÁ	5,312	4,885	5,291	5,084
ABDP-BOGOTÁ	5,675	5,109	5,651	5,136
ABPW-BOGOTÁ	5,500	5,655	5,517	10,719
BOGA-BOGOTÁ	4,601	4,335	4,584	4,265
GARA-GARAGOA	4,061	4,475	4,042	4,458
MEDE-MEDELLIN	4,128	4,042	4,121	4,441
TUNA-TUNJA	4,650	4,220	4,629	4,702
PROMEDIO	4,205	4,073	4,169	5,309
INCERTIDUMBRE	1,082	0,967	1,089	1,817

Fuente: Propia

Más tarde se realizó un análisis teniendo en cuenta las condiciones climáticas de las regiones donde se encontraban instaladas las estaciones. Estas variables cambian los resultados, lo que evidencia que los modelos son muy susceptibles a las condiciones climáticas. Así, la combinación **Klobuchar- Goad y Goodman** presenta un error en promedio de 4,073 +/- 0,967 metros, seguido del modelo **Klobuchar- Collins UNB** que presenta un error en promedio de 4,169 +/- 1,089 metros, lo que representa una mejoría debido a su composición y estructura de cálculo del efecto troposférico presenta unas variables de humedad y temperatura. Seguido está el modelo **Klobuchar-Saastamoinen** con un error de 4,205 +/- 1,082 metros y, en cuarto lugar el modelo **Simple Diferencias entre Satélites** con un error de 5,309 +/- 1,817 metros.

Tabla 11 Promedio en el error de posicionamiento de los municipios con similares condiciones climáticas.

PROMEDIO EN EL ERROR DE POSICIONAMIENTO DE LOS MUNICIPIOS CON SIMILAR CONDICIONES CLIMATICAS				
NOMBRE DE LAS ESTACIONES	NOMBRE DE LOS MODELOS IMPLEMENTADOS			
	KLOBUCHAR-SAASTAMOINEN	KLOBUCHAR-GOAD Y GOODMAN	KLOBUCHAR-UNB	SIMPLES DIFERENCIAS ENTRE SATELITES
SAN ANDRES	7,893	5,728	7,063	8,523
APARTADÓ	5,247	4,429	5,305	4,004
BARRANCA BERMEJA	4,955	3,909	4,940	3,415
BUENAVENTURA	4,186	3,369	4,204	2,520
LA DORADA	3,632	3,101	3,685	2,831
QUIBDO	4,486	3,871	4,531	2,924
SANTA MARTA	5,853	4,825	5,886	4,056
SINCELEJO	5,400	4,643	5,416	3,641
BEJA-BARRANCA BERMEJA	5,276	4,819	5,296	5,329
CALI-CALI	3,680	3,500	3,648	3,918
BUEN-BUENAVENTURA	4,617	3,893	4,548	5,016
DORA-LA DORADA	4,698	4,274	4,722	4,909
IBAG-IBAGUÉ	3,129	3,467	3,132	3,647
QUIB-QUIBDO	5,152	4,860	5,161	5,293
SAMA-SANTA MARTA	6,175	4,831	5,717	5,683
SINC-SINCELEJO	5,327	4,861	5,314	5,890
AND-SAN ANDRÉS	3,555	4,496	3,507	9,075
PROMEDIO	4,898	4,287	4,828	4,746
INCERTIDUMBRE	0,967	0,557	0,911	1,575

Fuente: Propia

Para el caso donde las condiciones climáticas era más altas se presentó una variación en los promedios cambiando el panorama de los resultados indicando que los mejores modelos fueron **Klobuchar- Goad y Goodman** con un error en promedio de 4,287 +/- 0,557 metros esto se puede presentar gracias a que en zonas donde la temperatura es alta el efecto ionosférico es mayor dando como resultado una alteración en el modelo los otros tres modelos se comportaron de una manera similar dando como resultado en promedios de modelo **Simple Diferencias Entre Satélites** un error de 4,746 +/- 1,575 Metros, el modelo **Klobuchar- Collins UNB** un error de 4,828 +/- 0,911 metros y por último el modelo **Klobuchar-Saastamoinen** con un error de 4,898 +/- 0,967 metros.

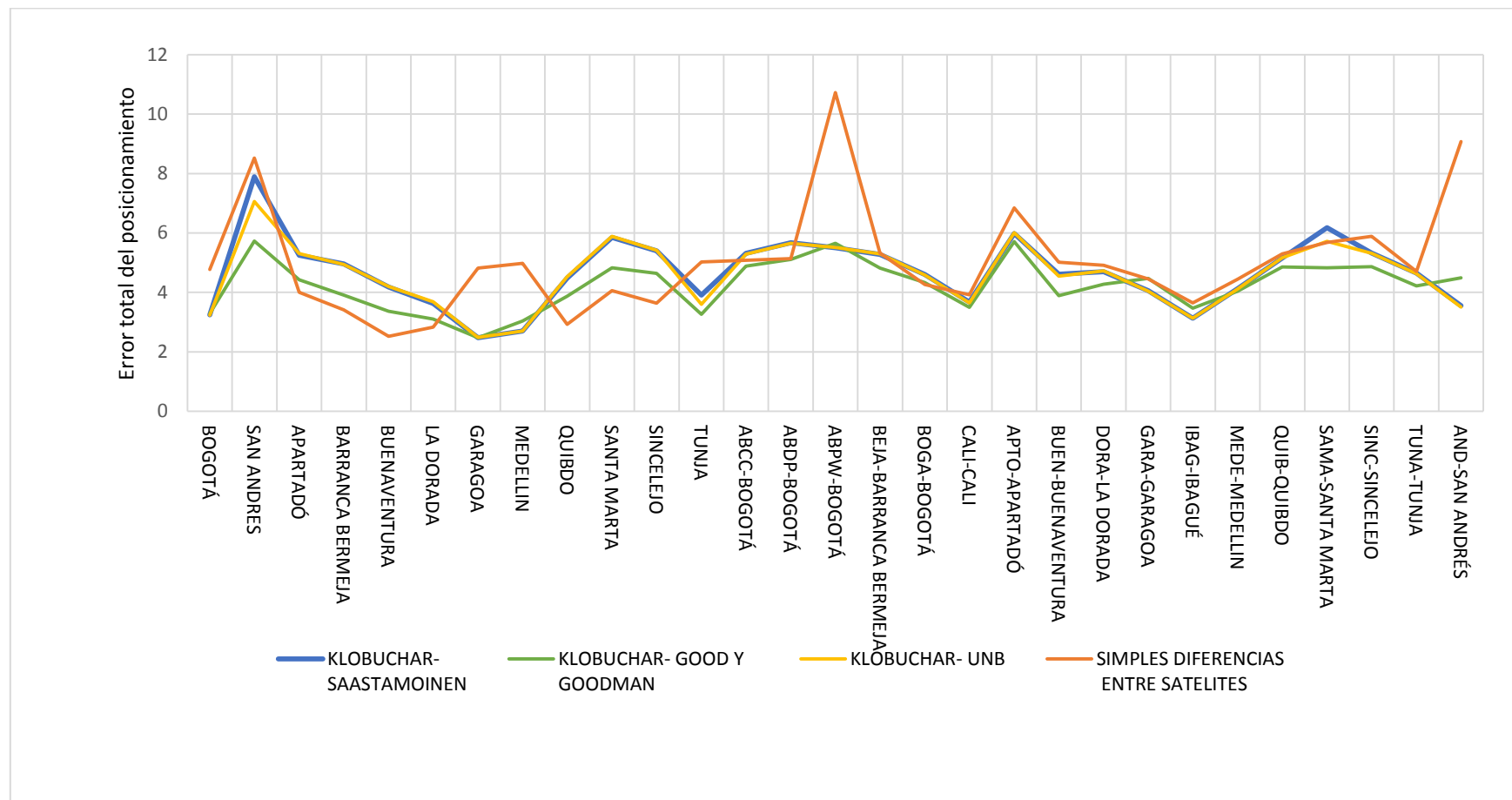


Ilustración 18 Comportamiento de datos por cada modelo.

Fuente: Propia

En la ilustración 18 se muestra cómo los datos tomados en las diferentes estaciones presentan un comportamiento similar entre los modelos **Klobuchar-Saastamoinen**, **Klobuchar- Goad y Goodman** y **Klobuchar- Collins UNB**. A su vez, advierte que el modelo de **Simples Diferencias entre Satélites** es más susceptible a la falta de número de satélites, afectando directamente el posicionamiento y obtención de coordenadas, como es el caso de ABPW-BOGOTÁ y SAN ANDRES, que poseen un número menor de satélites, 6 y 7 satélites respectivamente.

Tabla 12 Identificación del mejor modelo por estación.

BOGOTÁ		BUENAVENTURA		QUIBDO	
KLO-UNB	3,238	SIMPLES	2,519	SIMPLES	2,923
KLO-SAS	3,241	KLO-SAS	2,832	KLO-SAS	3,352
KLO-GOOD	3,294	KLO-GOOD	3,369	KLO-GOOD	3,870
SIMPLES	4,776	KLO-UNB	4,185	KLO-UNB	4,486
SAN ANDRES		LA DORADA		SANTA MARTA	
KLO-SAS	4,789	KLO-SAS	2,561	SIMPLES	4,056
KLO-GOOD	5,728	SIMPLES	2,830	KLO-SAS	4,137
KLO-UNB	7,893	KLO-GOOD	3,101	KLO-GOOD	4,825
SIMPLES	8,523	KLO-UNB	3,631	KLO-UNB	5,852
APARTADÓ		GARAGOA		SINCELEJO	
SIMPLES	4,004	KLO-UNB	2,47826264	KLO-SAS	3,53735746
KLO-GOOD	4,429	KLO-GOOD	2,48014234	SIMPLES	3,64142871
KLO-SAS	5,247	KLO-SAS	2,87687958	KLO-GOOD	4,64303036
KLO-UNB	5,304	SIMPLES	4,81540271	KLO-UNB	5,3998389
BARRANCA BERMEJA		MEDELLIN		TUNJA	
SIMPLES	3,120	KLO-UNB	2,700	KLO-GOOD	3,267
KLO-UNB	3,414	KLO-GOOD	3,035	KLO-UNB	3,911
KLO-GOOD	3,909	KLO-SAS	3,260	SIMPLES	5,023
KLO-SAS	4,940	SIMPLES	4,974	KLO-SAS	7,250
ABCC-BOGOTÁ		APTO-APARTADÓ		MEDE-MEDELLIN	
KLO-GOOD	4,885	KLO-GOOD	5,710	KLO-GOOD	4,042
SIMPLES	5,084	KLO-SAS	5,981	KLO-UNB	4,121
KLO-UNB	5,291	KLO-UNB	6,009	KLO-SAS	4,128
KLO-SAS	5,311	SIMPLES	6,843	SIMPLES	4,441
ABDP-BOGOTÁ		BUEN-BUENAVENTURA		QUIB-QUIBDO	
KLO-GOOD	5,109	KLO-GOOD	3,892	KLO-GOOD	4,859
SIMPLES	5,136	KLO-UNB	4,547	KLO-SAS	5,152
KLO-UNB	5,650	KLO-SAS	4,616	KLO-UNB	5,161
KLO-SAS	5,675	SIMPLES	5,0164	SIMPLES	5,292
BEJA-BARRANCA BERMEJA		DORA-LA DORADA		SAMA-SANTA MARTA	
KLO-GOOD	4,818	KLO-GOOD	4,274	KLO-GOOD	4,830
KLO-SAS	5,275	KLO-SAS	4,697	SIMPLES	5,682
KLO-UNB	5,296	KLO-UNB	4,721	KLO-UNB	5,716
SIMPLES	5,329	SIMPLES	4,908	KLO-SAS	6,175
BOGA-BOGOTÁ		GARA-GARAGOA		SINC-SINCELEJO	
SIMPLES	4,265	KLO-UNB	4,042	KLO-GOOD	4,861
KLO-GOOD	4,335	KLO-SAS	4,061	KLO-UNB	5,313
KLO-UNB	4,583	SIMPLES	4,457	KLO-SAS	5,326
KLO-SAS	4,600	KLO-GOOD	4,475	SIMPLES	5,890
CALI-CALI		IBAG-IBAGUÉ		TUNA-TUNJA	
KLO-GOOD	3,499	KLO-SAS	3,129	KLO-GOOD	4,219
KLO-UNB	3,641	KLO-UNB	3,131	KLO-UNB	4,628
KLO-SAS	3,680	KLO-GOOD	3,467	KLO-SAS	4,649
SIMPLES	3,918	SIMPLES	3,647	SIMPLES	4,702

AND-SAN ANDRÉS		ABPW-BOGOTÁ	
KLO-UNB	3,506	KLO-SAS	5,500
KLO-SAS	3,554	KLO-UNB	5,517
KLO-GOOD	4,495	KLO-GOOD	5,654
SIMPLES	9,075	SIMPLES	10,719

Fuente: Propia

En los cuadros anteriores se representan jerárquicamente (de menor a mayor) los resultados obtenidos en cada estación aplicando los diferentes modelos atmosféricos y de posicionamiento.

Tabla 13 Clasificación cualitativa de los modelos.

PRIMER LUGAR	
KLO-GOOD	13
SIMPLES	6
KLO-SAS	5
KLO-UNB	5

Fuente: Propia

En la tabla 13 se puede apreciar cuantas veces se repite cada modelo en cada punto proporcionando el error mínimo en cada estación. La información contenida en el cuadro permite inferir que en las combinaciones de los modelos el que obtuvo mejores resultados fue el **Klobuchar- Goad y Goodman** ya que los errores fueron mínimos, y el de peor rendimiento fue el modelo de **Klobuchar- Collins UNB**. El éxito del modelo **Klobuchar- Goad y Goodman** está dado porque durante el procedimiento de los datos se ingresaban también los datos de humedad relativa, temperatura y de presión del sitio de toma, lo cual mejora los resultados de posicionamiento.

12.CONCLUSIONES.

- Para el posicionamiento GPS cinemático con observable código utilizando un solo receptor monofrecuencia, integrando los algoritmos utilizados, no es posible obtener posicionamiento a nivel de decímetro, se hace necesaria la investigación del Precise Point Positioning (PPP) que está enfocada en el posicionamiento de un punto con un solo receptor; en la actualidad se viene adelantando estudios sobre PPP que integran modelos para receptores doble frecuencia y las observaciones de la fase portadora.
- El modelo de simples diferencias entre satélites se debe aplicar en zonas donde haya una alta cobertura de la señal de los satélites, debido a que una cantidad inferior a 8 satélites por toma genera errores considerables al posicionamiento del punto entregando resultados poco confiables.
- Para identificar el comportamiento de las variables atmosféricas en los modelos Saastamoinen, Hopfield y Collins UNB se debe realizar un análisis por cada uno para determinar cuál es el impacto directamente de cada modelo sobre el posicionamiento en cada punto.
- Para trabajos futuros se puede aplicar el modelo Klobuchar con diez variables de acuerdo con (Ningbo et al., 2014), agregando dos parámetros adicionales para modelar el retraso nocturno vertical como una función lineal de la latitud geomagnética. El modelo propuesto de diez parámetros de tipo Klobuchar es aceptable para aplicaciones de navegación y posición de una sola frecuencia GNSS en tiempo real ya que, no aumentará la complejidad de cálculo en comparación con el modelo Klobuchar de ocho parámetros original. El modelo de 10 parámetros de Klobuchar puede reducir el retraso ionosférico en un 68.4%.
- Los modelos implementados en este estudio presentaron unos resultados aceptables puesto que solo se trabajan en una sola frecuencia, con observable código y con una sola época de toma, donde las precisiones se encuentran en un rango de 4-10 metros y el promedio general del estudio esta sobre los 4,644 +/- 1,289 metros dando un resultado aceptable para trabajos que se realicen a gran escala sin la exigencia de

altas precisiones, evitando la necesidad de utilizar equipos doble frecuencia donde los costos son mucho más elevados encareciendo todo tipo de proyectos.

- El modelo de Hopfield modificado (Goad y Goodman) se ve como una opción para el procesamiento en tiempo real ya que se pueden ingresar las variables climáticas aproximadas del sitio antes de la toma y obtener buenos resultados en el posicionamiento teniendo en cuenta las limitaciones del proyecto (dispositivo monofrecuencia con observable código C/A y cinemático)
- para lograr un mejor posicionamiento por medio de los parámetros climáticos, lo ideal es contar con estaciones de monitoreo cerca de la zona de estudio ya que proporcionarían el valor del efecto troposférico único del sector durante el día, cambiando solamente con la elevación del satélite; Se podría recomendar para trabajos futuros utilizar el modelo empírico GPT (Global Pressure and Temperature) (Boehu *et al.*, 2007) el cual proporciona los valores de los parámetros utilizado por los modelos troposféricos, considerando las variaciones climáticas, en este modelo solo se necesita conocer las coordenadas de los puntos y la fecha de toma de los datos.

13. BIBLIOGRAFÍA.

- Arika, F., Erol, C., & Arikan, O. (2003). Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data. *Journal Geophysical Research*, Pages. 50-62.
- Antonini, M., Ruggieri, M., Prasad, R., Guida, U., & Corini, G. (2005). Vehicular remote tolling services using EGNOS. *IEEE*, 80.
- Abdelfataha, M. A., E.Mousab, A., & S.El-Fikya, G. (2015). Precise troposphere delay model for Egypt, as derived from radiosonde data. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, Vol. 4, Pages.16-24.
- Altamirano, J. A. (Diciembre de 2009). "generación del modelo matemático ionosférico local, mediante medidas de falsa distancia a partir de estaciones de monitoreo continuo gps".
- alexandra, i. (2012). posicionamiento por satelites. *universidade federal de campina grande centro de tecnologia e recursos humanos unidade academica de engenharia civil*.
- Sangolquí.
- berne, garrido, & anquela. (9 de septiembre de 2014). *slide share*. (u. d. GPS, Editor) Obtenido de <http://es.slideshare.net/nataliagarrido2012/observables-gnss>
- Black. (1996). An Easily Implemented Algorithm for the Tropospheric Range. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 83, Pages.1825-1828.
- Bilitza, D. (2001). referencia internacional ionosfera 2000 *Radio Sci.* Vol. 36, Pages.261-275.
- Bilitza, D., McKinnell, L., Reinisch, B., & Fuller-Rowell, T. (2011). La ionosfera Referencia Internacional (IRI). *Journal Geod*, Vol. 85, Pages. 909-920.
- Budden, K. (1988). The ionosphere and magnetosphere The propagation of radio waves (1st ed.). *Cambridge University Press, Cambridge*, 1-20.
- B.Nava, P.Coisson, & S.M.Radicella. (December de 2008). A new version of the NeQuick ionosphere electron density model. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 70, Pages. 1856-1862.
- Borré, k. (2003). The GPS Easy Suite–Matlab code for the GPS newcomer. *GPS solution vol.7*, Pages. 47-51. Obtenido de <http://www.springerlink.com/content/2ndtxgvrnu89utm/>
- Beran, T., Bisnath, S. B., & Langley, R. B. (2004). Evaluation of High-Precision, Single-Frequency. *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, Massachusetts, USA* , 9.
- Boehm, j., heinkelmann, r., & schuh, h. (2007). A global model of pressure and temperature for geodetic application. *journal of Geodesy*.
- Computers and Elctronics in Agriculture, Vol. 119, Pages. 166-177.
- Collins, J. P. (September de 1999). ASSESSMENT AND DEVELOPMENT OF A TROPOSPHERIC DELAY MODEL FOR AIRCRAFT USERS OF THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM. *Department of Geodesy and Geomatics Engineering*.
- Cruz, m. (2011). *triangulaciion*. scribd. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/98472977/Metodo-de-Triangulacion>
- Davies, K., & Hartmann, G. K. (1997). Studying the ionosphere with the Global Positioning System *Radio Sci.* 32, pp. Pages.1695–1703. Obtenido de <http://dx.doi.org.bd.univalle.edu.co/10.1029/97RS00451>
- Díaz, M. B. (enero de 2013). estimación de movimientos de la corteza terrestre con técnicas gps en la región de castilla y león. valladolid: universidad de salamanca.
- Di giovanni, g., & radicella, S. (1990). An Analytical. *Adv. Space Res*, Vol. 10, Pages. 27-30.

- Elango, G. A., & GF.Sudha. (September de 2016,). Design of complete software GPS signal simulator with low complexity and precise multipath channel model. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, Vol. 3 , Pages.161-180.
- Feynman, J., & Gabriel, S. (2000). On space weather consequences and predictions J Geophys. pp. Pages. 10543–10564. Obtenido de <http://dx.doi.org.bd.univalle.edu.co/10.1029/1999JA000141>
- french, G. T. (1996). *understanding the GPS*. GeoResearch.
- From, F., & wellenhof, H. (2009). theory and practice, curso avanzado de posicionamiento por satélite madrid.
- Garrido, N. (11 de Abril de 2016). Errores atmosféricos en GNSS. Error troposférico y error ionosférico. spatial geodesy.
- Gulyaeva, T., Bilitza, D., IZMIRAN, RAS, Troitsk, Region, M., . . . others, a. (2012). Towards ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model. Pages. 1-48.
- G. Beutler, W. G., Wild, U., & Frei, E. (1989). Relative Static Positioning with the Global Positioning System: Basic Technical Considerations. *Springer Link*, Vol. 102, Pages. 1-23.
- Gende, M. A. (Febrero de 2002). *Mapas ionosféricos derivados de observaciones GPS para aplicaciones geodesicas e investigaciones geoficas*. La Plata. Obtenido de http://www.dae.inpe.br/LISNworkshop2011/abstracts/07_November/gende/presentacion/_etc/Mapas_ionof%EDricos_derivados_de_observaciones_GPS_para_aplicaciones_geod%EDsicas_e_investigaciones_geof%EDsicas.pdf
- Gende, M., Brunin, C., & Brunin, C. (s.f.). Aplicación de un modelo ionosférico regional para mejorar el posicionamiento GPS. *conicet*. Obtenido de http://www.dae.inpe.br/LISNworkshop2011/abstracts/07_November/gende/presentacion/_etc/Aplicaci%F3n_de_un_modelo_ionof%EDrico_regional_para_mejorar_el_posicionamiento_gps.pdf
- Gina, G. M. (2008). Cartografía Censal con Miras a la Ronda de Censos 2010 en Latinoamérica. chile: CEPAL.z
- gisiberica.com. (2016). *gisiberica.com*. Obtenido de <http://www.gisiberica.com/gpstopograficos.pdf>
- Goad, C., & Goodman, L. (1974). A modified Hopfield tropospheric refraction correction model. *Reunión anual de otoño de la unión geofísica americana*. San Francisco, California.
- Gold, T. (1959). Motions in the magnetosphere of the earth. *Journal of Geophysical*, Vol. 64, Pages. 1219–1224.
- Hopfield, H. S. (20 de August de 1969). Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. Vol. 74, Pages. 4487-4499.
- Huang, J., Su, Y., Liu, W., & Wang, F. (15 de December de 2017). Optimization design of inter-satellite link (ISL) assignment parameters in GNSS based on genetic algorithm. *el sevier*, Vol. 60, Pages. 2574-2580.
- Jin, S., Occhipinti, G., & Jin, R. (2015). GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences. *Earth-Science Reviews*, Pages. 54–64.
- Jong, U., ParkByung-Kyu, & Park, C. H. (2004). Near-Real Time Modelling of Total Electron Content over South Korea using a Regional GPS Network Hyung-Chul Lim. *Research Gate*, Pages. 1-10.
- Kang, C. (2016). A Differential Dynamic Positioning Algorithm Based on. *el Sevier*, Pages. 590-598.
- Kaivosoha, J., & Linkolehto, R. (2015). GNSS error for farm machiney navigation development.
- Klobuchar, J. (1987). Ionospheric Time-Delay Algorithms for Single-Frequency GPS Users. pp. Pages. 325-331.
- leitingner, r., zhang, m., & radicella, S. (2005). An improved bottomsides for the ionospheric electron. *Annals of Geophysics*, Vol. 48, Pages. 525-534.

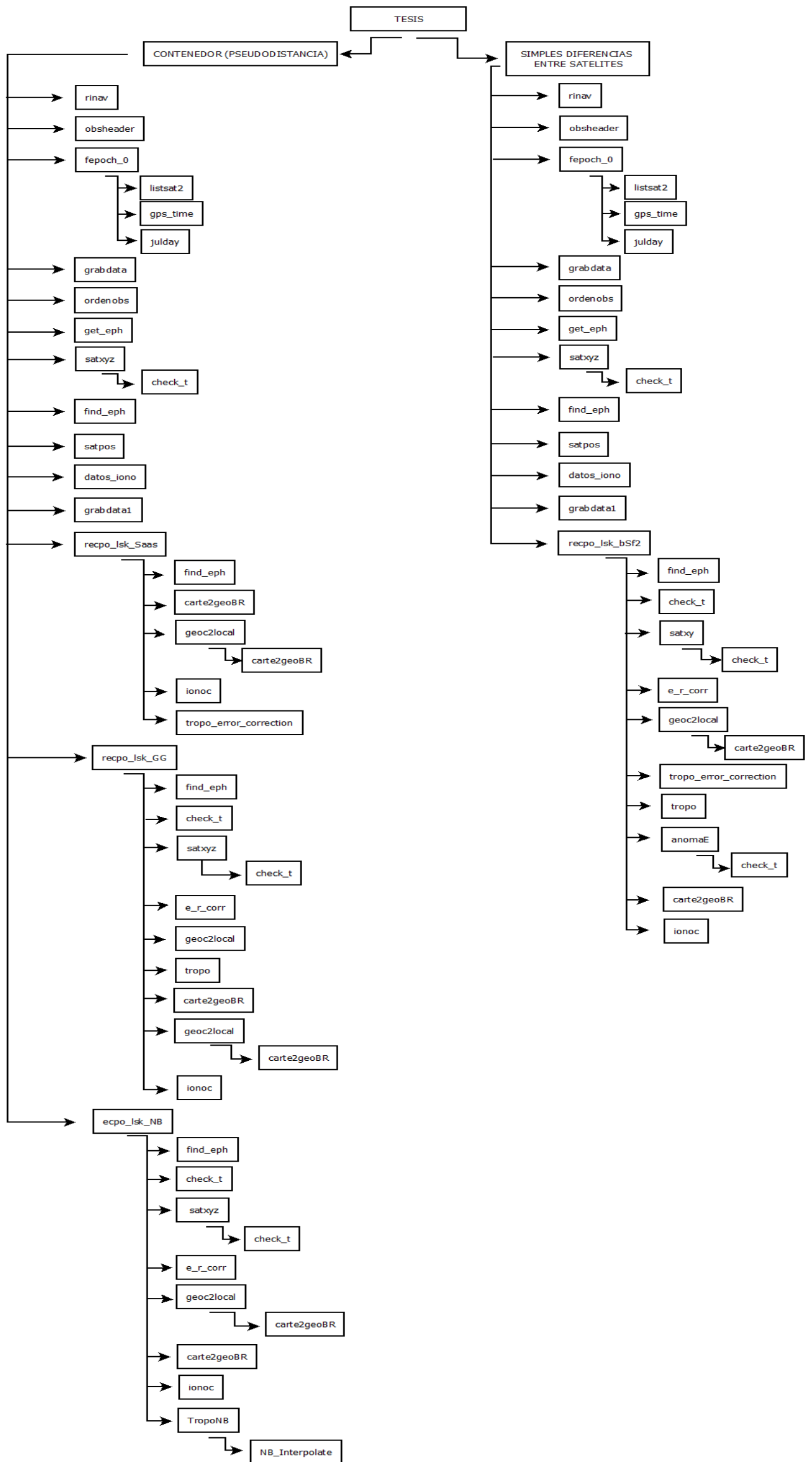
- Lutgens, F. K., & Tarbuck, E. J. (1989). *The atmosphere : an introduction to meteorology*. Merrill.
- Mohinder, S., Grewal, L. R. W., Angus, P., & Andrews, W. (2007). *Global positioning systems, inertial navigation, and integration mohinder*. interscience .
- Mosavi, M. R., & Azarbad, M. R. (October de 2013). Multipath error mitigation based on wavelet transform in L1 GPS receivers for kinematic applications. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 67, Pages 875–884.
- Niell, (1996). Global Mapping for the Atmospheric Delay at Radio Wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, Pages. 3227-3246.
- Ningbo, W., Yunbin, Y., Zishen, L., & Xingliang, H. (1 de abril de 2016). Improvement of Klobuchar model for GNSS single-frequency ionospheric delay corrections. *Advances in Space Research*, Vol. 57, Pages. 1555-1569.
- Pérez, K. A. (Septiembre de 2012). ejercicios prácticos para el procesado de datos gnss - pbgnss.
- Radicella, S., & Leitinger, R. (1990). The evolution of the DGR approach to model electron density profiles. *El servier*, Vol. 2, Pages. 35-40.
- Ramjee, P., & Ruggieri, M. (2005). *Applied Satellite Navigation Using GPS*. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data.
- Ratcliffe, J. A. (1972). An introduction to the ionosphere and magnetosphere. *Cambridge*.
- Rawer, K. (1956). The ionosphere: its significance for geophysics and radio communications. Pages. 216.
- Riba, A. E., Acosta, N., Toloza, J. M., Fernando, Tejada, J., & Kornuta, C. (2015). Mejora de la precisión posicional utilizando receptores GPS de bajo costo Pages. 1-4.
- Rovira, F., Chatterjeeb, M. I., & Sáiz-Rubioa, V. (March de 2015). The role of GNSS in the navigation strategies of cost-effective agricultural robots. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol 112, Pages 172–183.
- Saastamoinen, J. (September de 1972). Contributions to the theory of atmospheric refraction. Pages. 279–298.
- Sanchez, J. (2010). Observables GPS. *Centro de observacion Geodesica- instituto geografico nacional*, (Pages. 1-86). Montevideo.
- Schaer, s. (1999). Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the global positioning system Univ of Bern, Bern Switzerland [PhD thesis].
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (s.f.). *fisica para ciencias e ingenieria con fisica moderna* (septima ed., Vol. 2). cengage learning.
- Sobrino, J. a. (2010). OBSERVABLES GPS. *X curso de GPS en geodesia y cartografia*, (Pages. 1-86). monteideo.
- Subirana, J. S., Zornoza, J. J., & Hernández-Pajares, M. (2011). Tropospheric Delay. *Navipedia Technical University of Catalonia, Spain*.
- Thompson, E. A., NathanClem, IsaacRenninger, & TimothyLoosb. (4 de july de 2012). Software-defined GPS receiver on USRP-platform. *el sevier*, Vol. 35, Pages. 1352-1360.
- trimble. (1996). Error Correction. https://www.trimble.com/gps_tutorial/howgps-error.aspx
- Wang, N., Yuan, Y., Li, Z., & Huo, X. (2014). Improvement of Klobuchar model for GNSS single-frequency ionospheric delay corrections.
- Zapata, L. M. (2012). estudio de los efectos troposféricos en la precisión de mediciones gps en el suroccidente colombiano. Cali, Colombia.

ANEXOS

El presente anexo contiene la información asociada al desarrollo de la herramienta:

- Estructura jerárquica de las funciones utilizadas en la herramienta desarrollada.
- Nombre, descripción y variables de cada función.

ESTRUCTURA GERARQUICA DE LAS FUNCIONES UTILIZADAS EN LA HERRAMIENTA DESARROLLADA



FUNCIONES UTILIZADAS PARA LA CREACIÓN DE LA HERRAMIENTA			
Nombre dela funcion	Variables		Descripción
	Entrada	Salida	
anomaE.m	Eph: matriz de efemérides k: número de la columna de datos de efemérides seleccionados time: época(sow) correspondiente	E: anomalía excéntrica	Es la función encargada de calcular la anomalía excéntrica
cal2jd.m	yr: año mn: mes dy: día ut: tiempo	jd: Fecha en formato juliano	Es la función encargada de calcular la fecha en formato Juliano
carte2geoBR.m	X,Y,Z: Coordenadas geocéntricas a, df: Elipsoide. Semieje mayor y denominador del aplanamiento	Lat: latitud Lon: longitud h: altitud	Es la función encargada de transformar las coordenadas geocéntricas a geodésicas
check_t.m	t: Incremento de tiempo	tt: incremento de tiempo corregido si estuviera fuera de rango	Es la función encargada de controlar que el tiempo GPS no se encuentre fuera del rango
contenedor.m			Función donde se integra todo lo necesario con el fin de calcular las coordenadas
datos_iono.m	file: Archivo de navegación.	alpha y beta: Parámetros de corrección ionosférica	Función encargada de extraer los parámetros de corrección ionosférica del archivo de navegación
e_r_corr.m	traveltime: Tiempo de tránsito de la señal X_sat: Coordenadas del satélite	X_sat_rot: Coordenadas del satélite giradas	Función encargada de la corrección del efecto de la rotación terrestre.
fepoch_0.m	file: Archivo de observación.	Obs_types: Tipos de observables ant_delta: altura de antena (delta) ifound_types: tipos de observaciones encontradas eof: fin del fichero (1/0) Id_name: Identificador de la estación Id_number: Número de la estación year2: dato año con dos dígitos int: intervalo de registro conte: contador de épocas	Función encargada de extraer la información de las dos primeras líneas de cada época
find_eph.m	file: Archivo de observación.	sow: época sow dt: offset del reloj de satélite sats: Lista de satélites observados datee; Época [año, mes, día, hora, minuto, segundo] NoSv: Número de satélites observados y almacenados	La función encuentra la columna adecuada de la matriz de efemérides

geoc2local.m	POSXYZi : Coordenadas XYZ del punto inicial del vector a transformar POSXYZ : Coordenadas XYZ del punto final del vector a transformar	POSENh : Coordenadas cartesianas locales geodésicas (este, norte altura elipsoidal) POSalfabetaD : Coordenadas polares locales geodésicas (alfa: acimut, beta: elevación, D:distancia Espacial)	Es la función encargada de transformar las coordenadas geocéntricas a locales
get_eph.m	ephemeridesfile : Archivo de efemérides	eph : Matriz de efemérides	Función encargada de remodelar las efemérides contenidas en el archivo de navegación en una matriz con 21 filas
gps_time.m	julday : día juliano	week : semana GPS sec_of_week : segundo de semana	Función encargada de convertir el número del día Juliano a la semana GPS y segundo de semana GPS
grabdata.m	fid : identificador del fichero de observación abierto NoSv : Número de satélites observados NoObs : Número observables	Obs : Matriz de observación	Función encargada de almacenar los datos de observación
ionoc.m	lat : latitud lon : longitud el : elevación az : azimuth tgps : tiempo gps alpha y beta : Parámetros de corrección ionosférica	ionocorr : retardo ionosférico.	Función encargada de la corrección del efecto ionosférico (Modelo Klobuchar)
julday.m	yr : año mn : mes dy : día h : hora	jd : Fecha en formato juliano	Función encargada de convertir la fecha a día juliano
listsat2.m	fid : nº de fichero abierto lin : línea de satélites leído NoSv : Número de satélites seguido	satsG : lista de satélites GPS satsR : Lista de satélites GLONASS dT : corrección reloj de receptor	Función encargada de generar una lista de satélites.
Modelo_NB_Collins.m	lat : latitud elevation : elevación day : día	trop : retardo troposférico	Función encargada de la corrección del efecto de troposférico. (Modelo Collins)
NB_Interpolate.m	lat : latitud day : día	ret : variable climatológicas	Función encargada de la interpolación de las variables climáticas en el modelo de Collins
obsheader.m	fid : identificador del fichero de observación abierto	Obs_types : Tipos de observables ant_delta : altura de antena (delta) ifound_types : tipos de observaciones encontradas eof : fin del fichero (1/0) Id_name : Identificador de la estación Id_number : Número de la estación year2 : dato año con dos dígitos int : intervalo de registro conte : contador de épocas	Esta función analiza la cabecera del fichero de observación RINEX.

ordenobs.m	Obs_types: Lista de tipos de observables registrados	OBSO: Matriz de observaciones	Función para ordenar las observables.
reco_pos_Lsk_GG.m	obs: matriz de observaciones sats: lista de satélites observados time: época Eph: matriz de datos de efemérides alpha y beta: Parámetros de corrección ionosférica pr: presión tem: temperatura hum: humedad hpr: altura presión htem: altura de temperatura hhum: altura de humedad	pos: posicionamiento XYZ ajustado por MMCC EI: elevación del satélite GDOP: GDOP obtenido basic_obs: coordenadas satélites y pseudodistancias corregida	Función encargada del cálculo de la posición del receptor de forma absoluta, utilizando el modelo de Goad y Goodman y Klobuchar
reco_pos_Lsk_NB.m	obs: matriz de observaciones sats: lista de satélites observados time: época Eph: matriz de datos de efemérides alpha y beta: Parámetros de corrección ionosférica datee: fecha.	pos: posicionamiento XYZ ajustado por MMCC EI: elevación del satélite GDOP: GDOP obtenido basic_obs: coordenadas satélites y pseudodistancias corregida	Función encargada del cálculo de la posición del receptor de forma absoluta, utilizando el modelo de UNB y Klobuchar
reco_pos_Lsk_Saas.m	obs: matriz de observaciones sats: lista de satélites observados time: época Eph: matriz de datos de efemérides alpha y beta: Parámetros de corrección ionosférica datee: fecha.	pos: posicionamiento XYZ ajustado por MMCC EI: elevación del satélite GDOP: GDOP obtenido basic_obs: coordenadas satélites y pseudodistancias corregida	Función encargada del cálculo de la posición del receptor de forma absoluta, utilizando el modelo de Saastamoinen y Klobuchar
reco_pos_Lsk_bSf2.m	obs: matriz de observaciones sats: lista de satélites observados time: época Eph: matriz de datos de efemérides alpha y beta: Parámetros de corrección ionosférica datee: fecha.	pos: posicionamiento XYZ ajustado por MMCC EI: elevación del satélite GDOP: GDOP obtenido basic_obs: coordenadas satélites y pseudodistancias corregida	Función encargada del cálculo de la posición del receptor de forma absoluta, utilizando el modelo de simples diferencias
rinav.m	NAV: Archivo de navegación Rinex	eph: Matriz de efemérides	La función lee un fichero de Navegación RINEX y genera una matriz con 22 columnas
satpos.m	t: tiempo eph: matriz de efemérides	satp: Posición de los satélites	La función calcula las coordenadas X, Y, Z de los satélites en el tiempo t para efemérides eph dadas.
satxyz.m	sow: tiempo eph: matriz de efemérides	Xsat: Posición de los satélites	La función calcula las coordenadas X, Y, Z de los satélites en el tiempo t para efemérides eph dadas.

tropo.m	sinel: seno del Angulo de elevación del satélite hsta: altura de la estación en kilómetros p: presión atmosférica en mb tkel: temperatura superficial en grados kelvin hum: humedad en % hp: altura de la presión medida en kilómetros htkel: altura de la temperatura medida en kilometros hhum: altura de la humedad medida en kilómetros	ddr: Retardo troposférico	Función encargada de la corrección del efecto troposférico (Modelo de Goad y Goodman)
TropoNB.m	lat: latitud elevation: elevación day: día	tropo: Retardo troposférico	Función encargada de la corrección del efecto troposférico (Modelo UNB)
tropo_error_correction.m	el: Elevación h: Altura	corr: Retardo troposférico	Función encargada de la corrección del efecto troposférico (Modelo de Goad y Goodman)