

ESTUDIO DE LOS EFECTOS TROPOSFÉRICOS EN LA PRECISIÓN DE
MEDICIONES GPS EN EL SUROCCIDENTE COLOMBIANO

LINA MARCELA ESPINAL ZAPATA

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
SANTIAGO DE CALI
2012

ESTUDIO DE LOS EFECTOS TROPOSFÉRICOS EN LA PRECISIÓN DE
MEDICIONES GPS EN EL SUROCCIDENTE COLOMBIANO

LINA MARCELA ESPINAL ZAPATA

Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniera Topográfica

DIRECTORA DE TRABAJO DE GRADO
OLGA LUCIA BAQUERO
Msc. GEOFÍSICA

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
SANTIAGO DE CALI
2012

NOTA DE APROBACIÓN

El trabajo de grado titulado “ESTUDIO DE LOS EFECTOS TROPOSFÉRICOS EN LA PRECISIÓN DE MEDICIONES GPS EN EL SUROCCIDENTE COLOMBIANO”, presentado por la estudiante Lina Marcela Espinal Zapata como requisito parcial para optar el título de Ingeniera Topográfica, fue aprobado por:

Jurado 1.

Jurado 2.

Santiago de Cali, Enero de 2012.

Dedico este trabajo a:

*Mi familia,
Que se son el motor de mi vida y me enseñaron con su ejemplo
que en todo hay que perseverar y hacerlo con amor,*

*Mis hermanos,
Que llenaron de alegrías, optimismo y preocupaciones cada
una de estas páginas,*

*Jefferson, mi novio,
Mi gran compañero de vivencias en esta vocación de mi vida.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar deseo expresar mi más sincero agradecimiento a la profesora Olga Lucia Baquero y al profesor Jhon Jairo Barona, quienes me brindaron total acompañamiento durante el tiempo que demandó esta tarea con su excelencia profesional y calidad humana.

A mi familia que en todo momento creyó en mí, y con su unidad y amor me llenaron de paciencia y optimismo para cada día continuar con la elaboración de este trabajo.

A mis hermanos Carlos Mario y Jorge Luis, que siempre estuvieron dispuestos a colaborarme con su conocimiento en el desarrollo del proyecto.

Finalmente agradezco a Jefferson, mi novio, por su apoyo constante y su paciencia la cual me fortaleció en el desarrollo del proyecto.

¡Muchas Gracias!

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	13
2. OBJETIVOS	13
2.1 GENERAL	13
2.2 ESPECIFICOS	13
3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	14
4. MARCO TEÓRICO	16
4.1 EL SISTEMA GPS	16
4.1.1 Arquitectura del sistema GPS	16
4.1.2 Principios de funcionamiento del sistema GPS	16
4.2 Trayectoria de la Señal GPS	18
4.3 La Señal Electromagnética GPS	21
4.4 Desviaciones ("biases")	21
4.5 La Troposfera: Fuente de Desviación en la Señal GPS	23
4.6 Modelos Troposféricos para el modelamiento de las desviaciones de la Señal GPS	24
4.6.2 Retardo Troposférico	24
4.6.2.1 Modelo de Hopfield	27
4.6.2.2 Modelo de Saastamoinen	29

5. DESARROLLO DEL PROYECTO	32
5.2 Procesamiento de Datos GPS	33
5.3 Adquisición y Obtención De Los Datos Meteorológicos	34
5.3.1 Temperatura	34
5.3.1.1 Modelo de Parton y Logan	35
5.3.2 Presión Atmosférica	37
5.3.3 Humedad Relativa	37
6. RESULTADOS	41
6.1 Sin Corrección Troposférica	41
6.1 Corrección Troposférica realizada con los valores en los modelos que el software trae	46
6.2 Corrección Troposférica realizada con datos ingresados por el usuario en los modelos	53
7. CONCLUSIONES	72
8. RECOMENDACIONES	74
9. BIBLIOGRAFÍA	74
GLOSARIO	76
ANEXOS	76

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Posicionamiento de un observador en tierra mediante GPS	16
Figura 2. Capas de la atmosfera.	18
Figura 3. Estructura de la ionosfera.	19
Figura 4. Modelo politrópico de la atmosfera.	27
Figura 5. Esquema del modelo de Saastamoinen, capas esféricas de la troposfera y estratosfera de la atmosfera seca.	29
Figura 6. Coeficiente Ω para el modelo de Saastamoinen Versus Altura.	30
Figura 7. Ubicación geográfica estaciones Magna Eco CALI y BUEN.	33
Figura 8. Variación Total vs Día GPS. BUEN_CALI. Sin Modelo.	42
Figura 9. Variación Total vs Día GPS. CAL_ BUEN. Sin Modelo.	42
Figura 10. Variación Promedios vs Día GPS. BUEN_CALI. Sin Modelo.	42
Figura 11. Variación Promedios vs Día GPS. CALI_ BUEN Sin Modelo	42
Figura 12 - 17. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. BUEN_CALI. Sin Modelo.	43
Figura 18 - 23. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. Sin Modelo.	44
Figura 24 - 29. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. Sin Modelo.	45
Figura 30. Variación Total vs Día GPS, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Saastamoinen.	47
Figura 31. Variación Total vs Día GPS, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Hopfield.	47

Figura 32. Variación Total vs Día GPS, valores sin calibrar. CALI_ BUEN. Saastamoinen	47
Figura 33. Variación Total vs Día GPS, valores sin calibrar. CALI_ BUEN. Hopfield.	47
Figura 34 - 35. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Hopfield.(día 172)	47
Figura 36 - 41. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. Hopfield.	48
Figura 42 - 47. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. Hopfield.	49
Figura 48 - 53. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. Hopfield.	50
Figura 54 - 59. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. Saastamoinen.	51
Figura 60 - 65. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. Saastamoinen.	52
Figura 66 - 69. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. Hopfield.	53
Figura 70-75. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. Hopfield.	54
Figura 76 - 81. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión.Hopfield.	55
Figura 82 - 87. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. Saastamoinen.	56
Figura 88 – 93 . Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión.Saastamoinen.	57
Figura 94 - 97. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. Saastamoinen.	58
Figura 98. Variación Total vs Día GPS.BUEN_CALI. Saastamoinen- Hopfield.	59
Figura 99. Variación Total vs Día GPS. CALI_ BUEN. Saastamoinen- Hopfield.	59
Figura 100. Error Posicional vs Día GPS, BUEN_CALI. Hopfield	59

Figura 101. Error Posicional vs Día GPS, BUEN_CALI. Saaastamoinen.	59
Figura 102. Error Posicional vs Día GPS, CALI_ BUEN. Hopfield	59
Figura 103. Error Posicional vs Día GPS, CALI_ BUEN. Saastamoinen.	59
Figura 104 107- . Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. Hopfield.	60
Figura 108 - 113. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. Hopfield.	61
Figura 114 - 119. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. Hopfield.	62
Figura 120 - 125. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. Saastamoinen.	63
Figura 126 - 131. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad.Saastamoinen.	64
Figura 132 - 135. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. Saastamoinen.	65
Figura 136 - 141. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. Hopfield.	66
Figura 142 - 147. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. Hopfield.	67
Figura 148 - 153. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. Hopfield.	68
Figura 154 - 159. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. Saastamoinen.	69
Figura 160- 165. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 176)	70
Figura 166. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 195)	71
Figura 167 - 169. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. Saastamoinen.	71

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Rangos desviados por tipo de desviación.	22
Tabla 2. Uso frecuente de las constantes de refractividad.	26
Tabla 3. Procesamientos de datos GPS.	32
Tabla 4. Cálculo de temperaturas (°C) para la estación UNIVALLE en Cali.	36
Tabla 5. Cálculo de temperaturas (°C) para la estación La Misión en Buenaventura	36

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan los resultados de la investigación orientada en el área de la geodesia satelital, dentro del procesamiento de datos GPS, teniendo como tema el efecto troposférico en la señal GPS, con el objetivo de determinar el comportamiento de las precisiones obtenidas en el procesamiento de datos con software comercial, asociadas a los efectos troposféricos y a los modelos de corrección Saastamoinen y Hopfield.

Las técnicas de posicionamiento preciso GPS se han convertido en una herramienta tecnológica moderna en investigaciones con amplios campos de aplicación. En Colombia se hace el uso cada vez más de esta técnica, pero la inexistencia de estándares y la falta de información para el procesamiento de datos GPS, particularmente en el error inducido por parte de la troposfera en el posicionamiento, hace que pierda importancia para los usuarios a la hora de realizar el trabajo y obtener los resultados.

El efecto de la troposfera es muy local y puede llegar a causar errores entre 1,9 – 2.5 m en la dirección cenital y se incrementa cuando decrece el ángulo, llegando a ser de 20 – 28 m a unos 5°. Además, como no depende de la frecuencia para la banda del espectro electromagnético en que se encuentran las portadoras, el efecto debe ser siempre modelado.

En el proyecto se contó con datos de estaciones permanentes GPS de la red MAGNA ECO del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), y se procesaron con los programas Leica Geo-office de la casa LeicaGeosystems y Trimble Total Control (TTC) de la casa Trimble. Los modelos troposféricos empleados fueron Saastamoinen y Hopfield. Con cada modelo se realizó el procesamiento de 3 maneras diferentes: Sin modelo troposférico, con LeicaGeoffice V. 4.0, con modelos troposféricos Saastamoinen y Hopfield con los valores de los modelos por defecto, con Trimble Total control V. 2.73. y con los modelos troposféricos Saastamoinen y Hopfield con datos de campo ingresados por el usuario, con Trimble Total control V. 2.73.

Se utilizaron datos del mes de junio y julio del 2007 de las estaciones de Cali y Buenaventura; se registraron en cada estación las desviaciones DX, DY, DZ respecto a las coordenadas X, Y, Z, para diferentes intervalos de tiempo durante el día y así obtener el error debido a las variaciones temporales de la troposfera.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Dadas las implicaciones de los efectos troposféricos en la señal GPS y los errores en las posiciones obtenidas a través de las mismas, los usuarios comunes de esta tecnología, carecen de criterios para la selección de modelos de ajuste troposférico que dependen de la latitud de trabajo y de las condiciones atmosféricas que se presentan en ésta.

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Determinar el comportamiento de las precisiones obtenidas en el procesamiento de datos GPS con software comercial, asociadas a los efectos troposféricos y a los diferentes modelos de corrección de los mismos.

2.2 ESPECIFICOS

- Desarrollar una metodología de procesamiento y análisis de datos GPS con software comercial, que permita fijar la calidad del posicionamiento analizando los errores debido a la troposfera.
- Cuantificar los efectos de la troposfera en la señal GPS en una zona de estudio, reflejados en la precisión de las redes geodésicas GPS.
- Realizar un análisis comparativo entre los modelos de corrección troposférica, con el fin de determinar la tendencia de la variabilidad en las precisiones.
- Definir para la zona de las observaciones GPS utilizadas, una configuración adecuada de procesamiento y de modelos troposféricos recomendados.

3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Según la investigación realizada, relacionada con la selección de modelos troposféricos acordes con las características geográficas de Colombia, se ve reflejado el escaso interés por parte de entidades oficiales en regular el posicionamiento GPS en el país, por lo menos a nivel de aplicaciones de ingeniería, pues los principales esfuerzos en la regulación de procesos se dan a nivel de aplicaciones científicas; haciendo que las empresas realicen procesamientos, mecánicos siguiendo únicamente las instrucciones de los vendedores y las estructuras rígidas de los software comerciales, sumado a la falta de inversión y realmente poco interés en realizar experimentación para validar los resultados de mediciones con equipos de alta tecnología.

La mayoría de los Software comerciales vienen con modelos de ajuste troposféricos configurados por defecto y no se sabe qué modelos aplican y tampoco si son los más adecuados para estas latitudes.

Casas fabricantes como Topcon, con su software Topcon Tools, Trimble en algunas aplicaciones como Pathfinder Office, muy utilizado en proyectos y empresas de ingeniería y otras ramas profesionales, igualmente la casa ThalesNavigatións (GNS Solutions), ASTECH Solutions y un sin número de casas fabricantes y aplicaciones, se comportan prácticamente como “cajas negras” en el sentido de no permitir la selección de los modelos de ajuste troposférico o siquiera saber qué modelo está utilizando en el proceso. Es más, muchos usuarios no saben que su software está usando un modelo de ajuste troposférico. Algunas aplicaciones más elaboradas como LeicaGeoffice, de la Casa fabricante LeicaGEosystems permiten la selección de estos modelos, sin embargo es una herramienta supremamente costosa. Otras de características similares exigen que el usuario tenga un criterio efectivo a la hora de definir sus modelos de ajuste y de procesar la información, pero la inexistencia de estándares y la falta de información (particularmente en esta temática) para el procesamiento de datos GPS en Colombia, hace que esto pierda importancia para los usuarios a la hora de realizar el trabajo y obtener los resultados.

El efecto de la troposfera se considera como una de las principales fuentes de error que limita la calidad de posicionamiento GPS, se han realizado diferentes tipo de investigaciones en el mundo entre ellas: “Evaluación de tres modelos de corrección del retraso troposférico” (Q. Wei-jing, et al., 2008), “ Impacto de diferentes modelos troposféricos en la exactitud de líneas base: Caso de estudio Tailandia” (C. Satirapod, et al., 2005),y en Colombia el instituto Agustín Codazzi realizó el proyecto “ Cálculo de los modelos troposféricos en Colombia” (I. Herrera,

et al., 2009), donde se presenta una distribución espacial de los valores de temperatura y humedad que se deberían introducir para las correcciones troposféricas.

Sin embargo, de acuerdo con las crecientes necesidades tecnológicas y la apremiante carrera competitiva ante un escenario globalizado, se hace necesario realizar cada día proyectos encaminados al conocimiento de nuestros recursos espaciales.

Las técnicas de posicionamiento preciso GPS se han convertido en una herramienta tecnológica moderna en investigaciones con amplios campos de aplicación, como la navegación aérea y marítima, la localización de objetos o de fenómenos, levantamientos geodésicos y aéreos, actividades al aire libre, investigaciones relacionadas con la dinámica de la corteza terrestre, etc., y aunque en Colombia se hace el uso cada vez más de esta técnica, el desconocimiento y la falta de información acerca de las implicaciones de los efectos troposféricos en la señal GPS y los errores en las posiciones obtenidas a través de las mismas, limita la calidad del posicionamiento, ocasionando imposibilidad de generar aplicaciones de precisión confiables a la ingeniería, limitando pues, la calidad en el posicionamiento; es por eso que se hace necesario contar con criterios para la selección de modelos de ajuste troposférico en las respectivas latitudes de trabajo.

La importancia del desarrollo de estudios que permitan identificar las características de la atmósfera alta y baja en cada país o región, radica en que sólo la caracterización particular de las mismas permitirá una correcta identificación y reducción de los errores asociados a estos factores, uno de los aspectos que hace que la navegación aérea no pueda delegar la responsabilidad del posicionamiento a la tecnología GPS, es la autonomía del sistema y los diferentes errores presentes en cualquier posicionamiento que resulta fatal a la hora de una maniobra de un vuelo comercial, por ejemplo si se presenta un problema de localización en la navegación de la topografía o conformación del terreno que se sobrevuela, siendo esto lo que más influencia los vientos, genera desvíos obligando a realizar aterrizajes imprevistos, cambio de rumbo o invasión de cielo.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 EL SISTEMA GPS

4.1.1 Arquitectura del sistema GPS

El sistema GPS se compone de tres segmentos básicos: segmento espacio, formado por 24 satélites GPS con una órbita de 26560 Km. de radio y un periodo de 12 h.; segmento control, que consta de cinco estaciones monitoras encargadas de mantener en órbita los satélites y supervisar su correcto funcionamiento, tres antenas terrestres que envían a los satélites las señales que deben transmitir y una estación experta de supervisión de todas las operaciones; y segmento usuario, formado por las antenas y los receptores pasivos situados en tierra, con los cuales, a partir de los mensajes que provienen de cada satélite visible, calculan distancias y proporcionan una estimación de posición y tiempo.

4.1.2 Principios de funcionamiento del sistema GPS

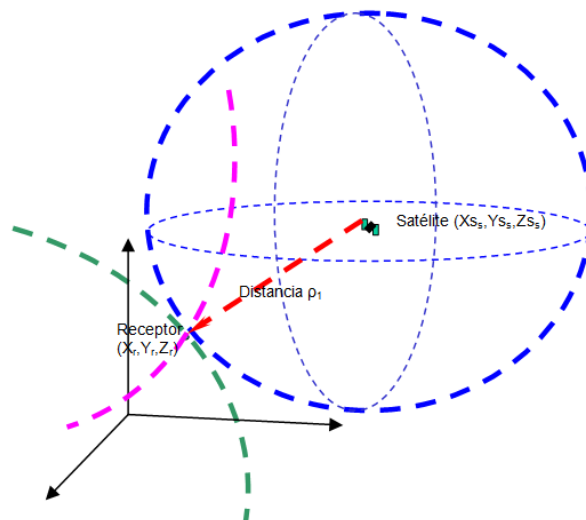


Figura 1. Posicionamiento de un observador en tierra mediante GPS

El sistema GPS tiene por objetivo calcular la posición de un punto en un espacio de coordenadas terrestres (x,y,z), partiendo del cálculo de las distancias del punto a un mínimo de tres satélites cuya localización es conocida. La distancia entre el usuario (receptor GPS) y un satélite se mide multiplicando el tiempo de vuelo de la señal emitida desde el satélite por su velocidad de propagación. Para medir el tiempo de vuelo de la señal de radio es necesario que los relojes de los satélites y de los receptores estén sincronizados, pues deben generar simultáneamente el mismo código. Sin embargo, mientras en los satélites se encuentran cuatro relojes atómicos (dos de cesio y dos de rubidio) que son controlados por la Estación de Control, no es posible equipar a los receptores con relojes de tan alta tecnología. Por esta razón los relojes de los receptores pueden estar afectados de errores intolerables. Debido a ello la distancia determinada satélite – receptor por el sincronismo se denomina pseudodistancia y es necesario añadir una incógnita más que hace utilizar un mínimo de cuatro satélites para estimar correctamente las posiciones.

En el cálculo de las pseudodistancias hay que tener en cuenta que las señales GPS son muy débiles y se hallan inmersas en el ruido de fondo inherente al planeta en la banda de radio. Este ruido natural está formado por una serie de pulsos aleatorios, lo que motiva la generación de un código pseudo-aleatorio artificial por los receptores GPS como patrón de fluctuaciones. En cada instante un satélite transmite una señal con el mismo patrón que la serie pseudo-aleatoria generada por el receptor. En base a esta sincronización, el receptor calcula la distancia realizando un desplazamiento temporal de su código pseudo-aleatorio hasta lograr la coincidencia con el código recibido; este desplazamiento corresponde al tiempo de vuelo de la señal. Este proceso se realiza de forma automática, continua e instantánea en cada receptor. Medida de la distancia a los satélites La utilización de estos códigos pseudo-aleatorios permite el control de acceso al sistema de satélites, de forma que en situaciones conflictivas se podría cambiar el código, obligando a todos los satélites a utilizar una banda de frecuencia única sin interferencias pues cada satélite posee un código GPS propio.

Aunque la velocidad de los satélites es elevada (4 Km/s), la posición instantánea de los mismos puede estimarse con un error inferior a varios metros con base a una predicción sobre las posiciones anteriores en un período de 24 a 48 horas. Las estaciones terrestres revisan periódicamente los relojes atómicos de los satélites, dos de cesio y dos de rubidio, enviando las efemérides y las correcciones de los relojes, ya que la precisión de los relojes y la estabilidad de la trayectoria de los satélites son claves en el funcionamiento del sistema GPS.

4.2 Trayectoria de la Señal GPS

La señal GPS que transmiten los satélites por medio de señales de radio, portan información sobre la medición del tiempo para calcular la distancia sabiendo que la velocidad de la señal (luz) es constante sea cual sea la frecuencia de la onda. La onda electromagnética emitida por el satélite deberá atravesar tres zonas caracterizadas físicamente: el vacío, la ionosfera y la troposfera, antes de alcanzar un receptor estacionado sobre la superficie terrestre. Se define entonces el retardo como el incremento del tiempo de propagación de una señal electromagnética entre dos puntos cuando se propaga en un medio material, comparado con el tiempo de propagación en el vacío, ya que la velocidad de propagación en el primero es menor y la trayectoria aumenta su longitud al curvarse debido a la refracción.

Para calcular los tiempos de llegada de la señal GPS, en un medio material, la atmósfera de la tierra se divide en capas según sean los cambios en temperatura y propiedades eléctricas en:

➤ Clasificación por temperatura

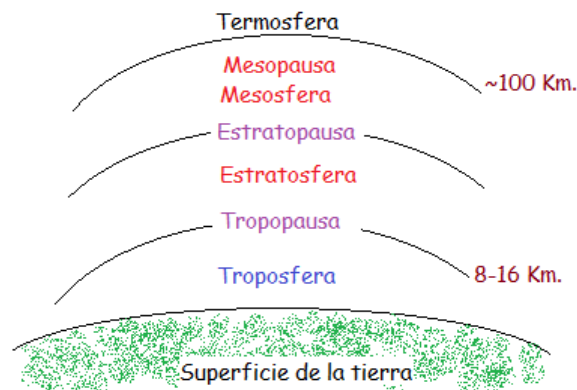


Figura 2. Capas de la atmósfera.

Fuente: Elements of GPS Precise Point Positioning, 2002.

Troposfera: Es la capa inferior, en contacto con la superficie terrestre y contiene casi el 90% de toda la masa atmosférica. Su límite superior es la tropopausa, cuya altura varía entre los 10 km sobre el Ecuador y los 8 km sobre las regiones polares. En la tropósfera la temperatura decrece en función de la altura (aproximadamente - 6,5°C cada 1000 metros de ascenso). En esta región se desarrollan los fenómenos meteorológicos que influyen en los seres vivos, como los vientos, la

lluvia y los huracanes. Además, concentra la mayor parte del oxígeno y del vapor de agua.

Estratosfera: Se extiende desde la tropopausa hasta una altura aproximada de 50 km. Aquí el aire se halla tan enrarecido que no refracta ni difunde la luz del sol, la temperatura aumenta ligeramente hasta alcanzar el límite superior o estratopausa en la cual hay presencia de rayos cósmicos.

Mesosfera: Es la capa atmosférica comprendida entre 50 y 85 km y se caracteriza por un elevado contenido de ozono; inicialmente se observa un gradiente positivo de temperatura hasta unos 60 km, donde se alcanza un máximo de 30° C (debido a la absorción de los rayos ultravioletas por el ozono); de los 60 a los 85 km se observa una disminución de la temperatura con la altura, alcanzando el mínimo en la mesopausa (80- 85 km).

Termosfera: A partir de los 85 km, la temperatura vuelve a crecer con la altitud, llegando a los 90° C a unos 120 km. En el comienzo de la termopausa la temperatura crece rápidamente, seguido de una larga constante de expansión (longstretchconstant) o un ligero incremento de temperatura. El límite superior es impreciso, pudiendo únicamente decir que se encuentra por encima de los 400 km.

Exosfera: Última capa de la atmósfera en la que la temperatura decrece con la altura, aunque existen diversas relaciones numéricas para determinar esta relación basada en modelos teóricos o experimentales.

➤ Clasificación por propiedades eléctricas

Ionosfera: Es el conjunto de capas gaseosas ubicadas sobre la superficie terrestre entre la altura comprendida de los 50 a 650 km. Los componentes de estos estratos son altamente reactivos a la radiación ultravioleta proveniente del Sol, generando la ionización.

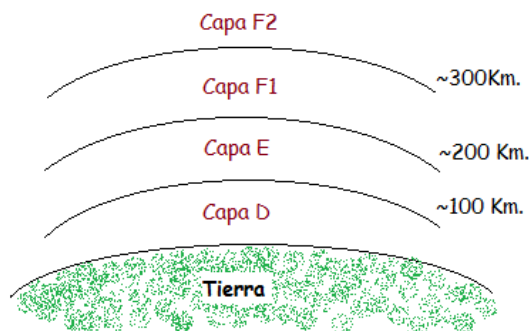


Figura 3. Estructura de la ionosfera.

En la ionosfera es posible distinguir varias capas:

- ❖ Capa D: Es la inferior y se halla entre 50 y 90 km de altura (entre 55 y 65 km para otros autores) y únicamente existe durante el día. Se caracteriza por su baja densidad electrónica; en esta región se reflejan las ondas comprendidas entre 3 y 300 KHz que se propagan entre el suelo y esta capa, en sucesivas reflexiones, a semejanza de un guía de ondas, dejando pasar las frecuencias más altas y es la que genera varios tipos de perturbaciones en las retransmisiones de radio y TV por producir el fenómeno llamado “fading” .
- ❖ Capa E: Llamada de Kennelly-Heaviside, se halla entre 90 y 140 km de altura (95 y 130 km). Caracterizada por una alta densidad de electrones y la ionización es generada por rayos ultravioleta y rayos X procedentes del Sol. Es causante de la reflexión de las ondas de radio comprendidas entre 3 y 30 MHz de día, provocando de noche la reflexión de las ondas de menor frecuencia 30 a 3000 KHz. En el interior de esta capa se presenta una capa denominada Es (de esporádica) y su densidad electrónica es tan alta que es capaz de reflejar ondas de hasta 150 MHz; aparece esporádicamente y por diversos motivos (en los polos se presenta generalmente de noche causada por perturbaciones magnéticas).
- ❖ Capa F1: Llamada de Appleton, se sitúa entre 180 y 230 km (160 y 275 km). Posee una ionización muy alta generada fundamentalmente por el Sol, desapareciendo prácticamente en las horas nocturnas.
- ❖ Capa F2: O de Van Allen, se halla entre 230 y 400 km, durante la noche alcanza 320 Km y de día puede llegar a los 400 km. Posee una densidad electrónica alta, que depende de la actividad solar de la posición geográfica, de la hora del día, de la estación del año, etc. Esta capa es la que garantiza plenamente las comunicaciones, tanto en onda corta como en media, de día como de noche.
- ❖ Capa G: Se encuentra a una altura mayor de 500 km .

Magnetosfera: Esta capa se sitúa por encima de los 1500 km. En esta región que es la más exterior de la atmósfera, se da el movimiento de partículas controlado por el campo magnético terrestre.

4.3 La Señal Electromagnética GPS

La señal GPS como señal electromagnética puede reflejarse, refractarse, difractarse y atenuarse (Fading en GPS) y las subcapas atmosféricas de interés en la evaluación de los retardos de la señal GPS son la troposfera y la ionósfera.

- **Fading.** Se define como la atenuación (debilitamiento) de la señal recibida. Es difícil predecirla al estar influenciado por numerosas variables: la hora, el día, la estación, el viento, la temperatura, la humedad, composición de las masas de aire, alturas entre otros.

Se debe principalmente a:

- la atenuación variable de la señal debido a las variaciones temporales de las características del medio de propagación. Son variaciones relativamente lentas, por ejemplo, la atenuación debida a la absorción de energía por parte del medio puede variar de una hora a la siguiente.
 - la atenuación debido a la interferencia entre las ondas que llegan al receptor siguiendo recorridos diferentes (*Multipath*). Se trata de variaciones más rápidas que influyen en las características no sólo de amplitud, sino también de frecuencia de la señal.
- **Ruido.** Es una interferencia en la señal GPS generada por descargas eléctricas en la atmósfera o por fuentes cósmicas.

4.4 Desviaciones ("biases")

Los sesgos "biases" en las medidas GPS se consideran dentro de tres categorías: debido a los satélites, a las estaciones y dependientes de la observación.

- Desviaciones debido a los satélites: Se deben a las variaciones en las efemérides de los satélites y sesgos en la información enviada en el mensaje sobre los relojes de los satélites por no estar sincronizados con la hora GPS. Estas desviaciones no están correlacionadas entre los satélites y afecta de la misma manera las medidas de código y de fase portadora, y dependen del número de estaciones de control en tierra que proveen los datos para determinar las orbitas en el modelo de fuerzas para el cálculo de las orbitas y la geometría satelital.
- Desviaciones debido a las estaciones: Son las desviaciones generadas por el reloj del receptor.

- Desviaciones dependientes de la observación: Están asociados con la propagación de la señal y con el tipo de observación, por ejemplo cuando se fijan ambigüedades con observaciones de doble frecuencia.

Los efectos de las desviaciones pueden removerse o por lo menos reducirse si éstas se modelan, ya que se asume que éstas tienen relaciones funcionales con el tiempo, la posición, la temperatura, la humedad, etc.

Además de las desviaciones (biases), la exactitud de las posiciones GPS es dependiente de la configuración geométrica de los satélites observados, los errores inherentes a las medidas, más el remanente de las desviaciones después que se han modelado.

El rango es la distancia geométrica entre el satélite y el observador y al rango observado antes de removerle las desviaciones se le llama rango desviado ("biased range"), y dependiendo del tipo de posicionamiento GPS, las desviaciones pueden considerarse totalmente como errores o pueden modelarse para minimizarlas.

El rango observado se puede modelar y cuantificar dependiendo el tipo de medida y en la información que se tiene de ésta. Las contribuciones individuales de las desviaciones pueden tener los siguientes valores máximos:

Tabla 1. Rangos desviados por tipo de desviación.

TIPO DE DESVIACIÓN	RANGO DESVIADO (m)	MÉTODO DE REDUCCIÓN
Desviación del Reloj del Satélite	300.000	Se reduce a 10 m, si se hace una corrección del mensaje del satélite.
Desviación Orbital	80	Se reduce a 10 m, si se hace uso de efemérides precisas
Desviación del Reloj del Receptor	10 a 100	Depende del tipo de oscilador del receptor
Desviación del retardo Ionosférico	150 al horizonte	Disminuye a 50 en el zenit
Desviación del retardo Troposférico	20 - 28 a 5° sobre el horizonte –	Decrece a 1,9 - 2,5 m en el zenit. Se utilizan modelos atmosféricos simplificados Saastamoinen, Hopfield.

TIPO DE DESVIACIÓN	RANGO DESVIADO (m)	MÉTODO DE REDUCCIÓN
Desviación de pulso de fase de la portadora	Cualquier valor	

Fuente: Location systems: an introduction to the technology behind location awareness, 2008.

4.5 La Troposfera: Fuente de Desviación en la Señal GPS

La troposfera es la capa más baja de la atmósfera, es la zona donde se producen todos los fenómenos del clima, contiene el 75 % de la masa total de la atmósfera (a pesar de su pequeño espesor), su temperatura es máxima junto a la superficie terrestre y desciende con la altura a razón de 6,5 °C cada kilómetro por término medio.

El espesor de la troposfera viene determinado por la tropopausa (límite inferior de la estratosfera), y después de la tropopausa hay una inversión del gradiente de temperatura y por ello se bloquea los movimientos verticales de aire, motivo por el cual todo el vapor de agua, aerosoles, nubes y fenómenos meteorológicos se encuentran y desarrollan en la troposfera. La temperatura media de la troposfera es de -45°C.

La altura de la tropopausa es variable globalmente, desde los 16 Km en el Ecuador a los 8 Km en los polos, además varía localmente con la temperatura y presión en superficie, aumenta cuanto más baja es la presión y/o alta en la temperatura en la superficie.

El efecto de la troposfera es más pequeño y mucho más local que el de la ionosfera. Como no depende de la frecuencia para la banda del espectro electromagnético en que se encuentran las portadoras, debe ser siempre modelado. En el posicionamiento diferencial, la correlación espacial del efecto y el empleo de modelos sencillos permiten mantener sus consecuencias por debajo de las tolerancias para prácticamente todas las aplicaciones en el caso de vectores de unos pocos kilómetros. Cuando se miden vectores largos, el retardo troposférico diferencial puede introducir errores en la determinación de la altura de varios centímetros por lo que debe ser modelado cuidadosamente si se requieren resultados de la máxima exactitud.

La troposfera induce un retraso en cualquier señal electromagnética que la atraviesa debido a dos componentes, uno es el retraso hidrostático debido a los gases inertes presentes en la atmósfera, que es el causante de un 90% del total del retardo. El retraso hidrostático es muy estable, fácil de modelar y tiene fundamentalmente que ver con la presión atmosférica y por tanto depende de la

altura sobre el nivel del mar a la que se toman las medidas. El segundo componente del retraso troposférico es el contenido de vapor de agua en la atmósfera, el cual es difícil de modelar, ya que el vapor de agua en la atmósfera puede cambiar rápidamente debido a las condiciones atmosféricas locales. El contenido de vapor de agua en la atmósfera es muy importante en el estudio del clima y en la predicción del tiempo pero también es fundamental en la claridad y calidad del aire, ya que generalmente una atmósfera más seca permite mejor visibilidad (Romero Trujillo, 2008).

El retardo troposférico causa una desviación de 1,9 – 2,5 m (ver tabla 1) en la dirección cenital y se incrementa cuando decrece el ángulo de elevación, llegando a ser de 20 – 28 m a unos 5°. Lo que se realiza para mejorarlo es utilizar modelos atmosféricos simplificados: Saastamoinen, Hopfield, Goad y Goodman, entre otros.

4.6 Modelos Troposféricos para el modelamiento de las desviaciones de la Señal GPS

4.6.2 Retardo Troposférico

El recorrido del retardo troposférico puede ser definido como (Janes et al., 1991; Mendes, 1994):

$$T_K^P = \int_{path} [n(r)-1] \csc \theta(r) dr + \left[\int_{path} \csc \theta(r) dr - \int_{path} \csc \varepsilon(r) dr \right] \quad [1]$$

Donde

T_K^P =retraso troposférico, del satélite P al receptor K .

r = radio geocéntrico

n = índice de refracción

θ =ángulo aparente (refractado) de elevación del satélite

ε =ángulo de elevación geométrico o verdadero del satélite

El índice de refracción en la atmosfera cercana a la tierra es muy pequeño, y por eso se utiliza la refractividad de la troposfera, N^{Trop}

$$N^{Trop} = (n-1) \cdot 10^6$$

[2]

Donde n = Índice de refracción.

La ecuación [1] es válida para una atmósfera esférica, y n varia a lo largo del recorrido de la señal como una función del radio geocéntrico. El primer término de esta ecuación es la desviación de la trayectoria electromagnética S , respecto a la longitud geométrica de la transmisión refractada y el término entre corchetes es el retardo geométrico considerado para un camino curvo (refractado), el cual es la diferencia en la longitud geométrica del recorrido electromagnético y rectilíneo desde el satélite hasta la estación de observación (Janes et al., 1991); el efecto de curvatura es significativo para ángulos de elevación del satélite de 10-20 grados.; En la práctica, el término entre corchetes es frecuentemente omitido. Para las señales de los satélites se obtiene el retardo troposférico en función de la trayectoria como:

$$T_K^P = 10^{-6} \int_{path} N^{Trop} ds$$

[3]

Teniendo en cuenta las componentes seca y húmeda, el retardo troposférico puede reescribirse como:

$$\begin{aligned} T_K^P &= 10^{-6} \int_{path} (N_d^{Trop} + N_w^{Trop}) ds \\ &= 10^{-6} \int_{path} N_d^{Trop} ds + 10^{-6} \int_{path} N_w^{Trop} ds \end{aligned}$$

[4]

Donde N_d^{Trop} y N_w^{Trop} corresponde a la refractividad troposférica de las componentes seca y húmeda. En 1974, Thayer expresó la refractividad, N_T , en términos de la temperatura absoluta y las presiones parciales de los gases secos, P_d y del vapor de agua, e_0 en milibares:

$$N_T = K_1 \frac{P_d}{T_0} Z_d^{-1} + \left[K_2 \frac{e_0}{T_0} + K_3 \frac{e_0}{T_0^2} \right] Z_w^{-1}$$

[5]

Donde

Los coeficientes K_1 , K_2 , K_3 se determinan empíricamente.

T_0 = temperatura absoluta en la estación de seguimiento en grados Kelvin.

Z_d = compresibilidad para vapor de aire seco

Z_w =compresibilidad para vapor de agua,

El primer término al lado derecho de la ecuación [9] se refiere a la refractividad de la componente seca, N_d^{Trop} , mientras que el término entre corchetes se refiere a la refractividad de la componente húmeda, N_w^{Trop} .

En la Tabla 2 se muestra las constantes de refractividad de uso frecuente.

Tabla 2. Uso frecuente de las constantes de refractividad.

Coeficientes de refractividad	Smith y Weintraub (1953)	Thayer (1974)
K_1 (K/mb)	77.61±0.01	77.604±0.014
K_2 (K/mb)	72±9	64.79±0.08
K_3 (K/mb)	(3.75±0.03).105	(3.776±0.004).105

Fuente: Elements of GPS Precise Point Positioning, 2002.

Normalmente las refracciones verticales húmedas que dependen del vapor del agua y secas están relacionadas con la refracción de un ángulo de elevación por la función de mapeo¹.

La presión de vapor de agua, e_0 , puede calcularse a partir de la humedad y temperatura en la estación de seguimiento. La presión de vapor de agua en milibares recomendada en los convenios del IERS² (1996) es:

$$e_0 = 0.0611 RH 10^{\frac{7.5(T_0 - 273.15)}{237.3 + T_0 - 273.15}}$$

[6]

¹La función de mapeo, describe la dependencia del ángulo de elevación del retraso de la señal, que viaja a través de la atmósfera neutra. (Niell, 1996).

²International Earth Rotation & Reference Systems Service.

Donde RH = humedad relativa (%) de la estación de observación.

Debido a la importancia de los efectos de la troposfera sobre el tiempo de propagación de la señal GPS, se han realizado varios modelos troposféricos, entre los se destacan Hopfield (1972) y Saastamoinen (1973) por su amplia difusión en los softwares de procesamiento GPS.

4.6.2.1 Modelo de Hopfield

En 1969 Hopfield desarrolló un modelo troposférico empírico usando datos de todo el mundo. En el modelo de Hopfield, se aplica el modelo politrópico a una atmosfera, que va desde la superficie de la tierra hasta una altura de 11 Km que representa la capa húmeda y una altura desde la superficie de la tierra hasta 40 Km para la capa seca (Hopfield, 1969; Janes et al. 1991; Hofmann-Wellenhof et al., 1997), ver Figura 4.

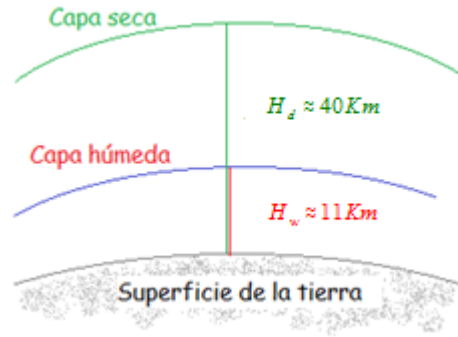


Figura 4. Modelo politrópico de la atmósfera.

Fuente: Elements of GPS Precise Point Positioning, 2002.

El modelo de Hopfield muestra la refractividad de las componentes seca y húmeda como una función de la altura, h , de la estación de seguimiento y está dada por:

$$N_d^{Trop} = N_{d,0}^{Trop} \left[\frac{H_d - h}{H_d} \right]^\mu$$

$$N_w^{Trop} = N_{w,0}^{Trop} \left[\frac{H_w - h}{H_w} \right]^\mu$$

[7]

Donde

$$\mu = 4$$

Empíricamente determinado para relacionar la altura.

$$H_d = 40136 + 148.72(T - 273.16)$$

Espesor politrópico para la parte seca (m), T es la temperatura.

$$H_w = 11000$$

Espesor politrópico para la parte húmeda (m).

$$N_d^{Trop} = K_1 \frac{P_0}{T_0}$$

Refractividad de la tropósfera seca en función de la presión (mb) y temperatura (Kelvin) en la estación.

$$N_w^{Trop} = K_2 \frac{e_0}{T_0} + K_3 \frac{e_0}{T_0^2}$$

Refractividad de la tropósfera húmeda en función de la presión de vapor de agua y temperatura en la estación.

Insertando la ecuación 7 en la ecuación 4, e integrando cada elemento con los respectivos rangos de integración a lo largo de la dirección vertical (ejemplo de $h=0$ a $h=H_d$ y de $h=0$ a $h=H_w$ para la componente seca y húmeda), se obtiene el retraso troposférico en el Zenith, en metros:

$$T_k^P = \frac{10^{-6}}{5} \left[N_{d,0}^{Trop} H_d + N_{w,0}^{Trop} H_w \right]$$

[8]

Los valores del espesor politrópico en la componente húmeda y seca, H_d y H_w , están en el rango de 40-45 Km y 10-13 Km, respectivamente (Hofmann-Wellenhof et al., 1997). La ecuación del retraso troposférico en el Zenith de Hopfield (Ecuación 8), puede emplearse junto con una función de mapeo para obtener el retraso troposférico en un ángulo de elevación del satélite específico P .

4.6.2.2 Modelo de Saastamoinen

Saastamoinen (1971) aplicó la ley de Gladstone y Dale; que dice que la altura integral $\int (n-1)dr$ de la refractividad atmosférica para microondas de radio tomadas desde el nivel del suelo hasta la cima de la estratosfera es, en una atmósfera seca, directamente proporcional a la presión del suelo. La derivación del modelo de Saastamoinen, implica pensar en la atmósfera como una mezcla de dos gases ideales, el aire seco y el vapor de agua. La ley de los gases son aplicados luego para derivar la refractividad. La temperatura en la troposfera desde el nivel del mar a unos 10 Km decrece con la altura aun rango bastante uniforme, el cual varía ligeramente con la latitud y estación, aunque en las regiones polares hay una inversión permanente en la troposfera baja, donde la temperatura actual inicialmente incrementa con la altura.

Saastamoinen dividió la atmósfera seca en dos capas: Una troposfera politrópica, extendida desde la superficie hasta una latitud de aproximadamente 11-12 Km, y una estratosfera isoterma continua desde la troposfera hasta aproximadamente 50 Km, como se muestra en la figura 5. El vapor de agua atmosférico se limita sólo a la troposfera.

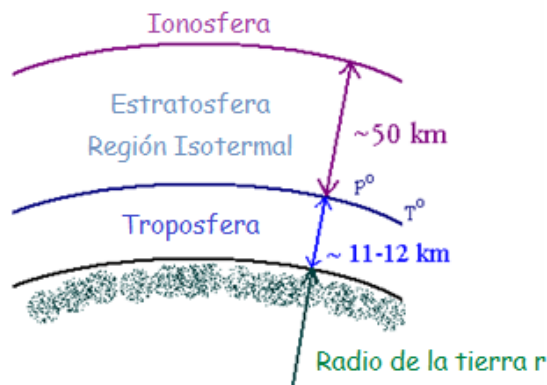


Figura 5. Esquema del modelo de Saastamoinen, capas esféricas de la troposfera y estratosfera de la atmósfera seca.

Fuente: Elements of GPS Precise Point Positioning, 2002.

Para las condiciones normales y en latitudes medias, el modelo de retardo troposferico está dado como:

$$T_k^p = 0.002277 \sec z \left[P_0 + \left(\frac{1255}{T_0} + 0.05 \right) e_0 - \Omega \tan^2 z \right] \quad [9]$$

Donde z es la verdadera distancia Zenital, P_0 es la presión observada en la estación en milibares, y el coeficiente

$$\Omega = \frac{R}{rg} \left[\frac{P_0 T_0 - (R\beta / g) p^0 T^0}{1 - R\beta / g} \right] \quad [10]$$

Donde

R = constante del gas

r = radio de la tierra

T_0 = temperatura en la estación

p^0 =presión en la parte inferior de la estratosfera

T^0 = temperatura en la parte inferior de la estratosfera

β = gradiente vertical de temperatura (dT/dh).

La figura 6 muestra la gráfica de la variabilidad del coeficiente Ω con la altura de la estación sobre el nivel del mar.

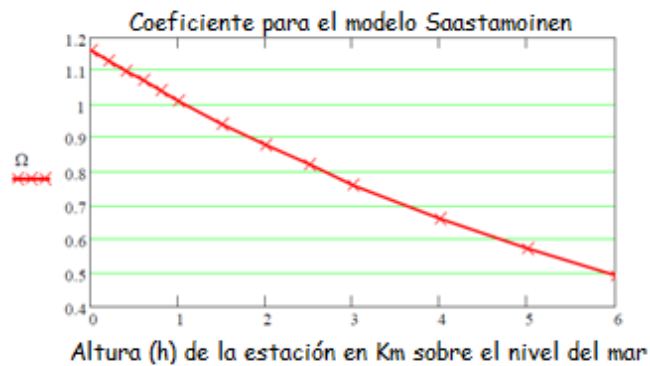


Figura 6. Coficiente Ω para el modelo de Saastamoinen Versus Altura.

Fuente: Elements of GPS Precise Point Positioning, 2002.

Para una estación a nivel del mar, Ω es aproximadamente 1,16. Para la señal en dirección zenital, z , el último término la ecuación [9] se hace cero y esta puede reescribirse como:

$$T_k^p = 0.002277 \left[P_0 + \left(\frac{1255}{T_0} + 0.05 \right) e_0 \right]$$

[11]

Donde el primer término es en función de la presión en la superficie para la componente seca y el segundo termino corresponde a la componente húmeda. Saastamoinen estima la exactitud de las componentes seca y húmeda con un RMS de 2-3 mm y 3-5 mm, respectivamente.

5. DESARROLLO DEL PROYECTO

Según lo que se expresa en el numeral 4.4, hay tres tipos de desviaciones (retardos) en la señal GPS: las que dependen del satélite, las que dependen del receptor y las que dependen de las observaciones. En el proyecto se analizaron gráficamente las desviaciones DX, DY, DZ respecto a las coordenadas X, Y, Z debido a los retardos de la señal por su paso por la troposfera (retardo troposférico), y para ello se procesaron las observaciones con software comercial:

- Sin modelo troposférico, con LeicaGeoffice V. 4.0.
- Con modelos troposféricos Saastamoinen y Hopfield con los valores de los modelos por defecto, con Trimble Total control V. 2.73.
- Con modelos troposféricos Saastamoinen y Hopfield con datos de campo ingresados por el usuario, con Trimble Total control V. 2.73.

Tabla 3. Procesamientos de datos GPS.

No. Procesamiento	Modelo Troposférico	Variable a cambiar	Software
P1	Hopfield	No cambio	TTC
P2	Hopfield	Humedad	TTC
P3	Hopfield	Temperatura	TTC
P4	Hopfield	Presión	TTC
P5	Saastamoinen	No cambio	TTC
P6	Saastamoinen	Humedad	TTC
P7	Saastamoinen	Temperatura	TTC
P8	Saastamoinen	Presión	TTC
P9	Sin modelo	-----	Leica

El retardo troposférico se puede modelar de 4 maneras diferente: mediante datos de la superficie, perfiles con radio sonda, radiometría de vapor de agua y estimación de parámetros troposféricos a partir de modelos estándar. Los modelos Hopfield y Saastamoinen encontrados que utiliza el software considera datos tomados de temperatura, T_0 , humedad relativa, e_0 presión, p y altitud, h , en superficie.

La troposfera se divide en la componente seca y la componente húmeda, donde la primera contribuye con el 90% del retardo y dado que esta en equilibrio hidrostático, es fácil de modelar basándose en la ley de los gases ideales. La componente húmeda es difícil de predecir debido a la distribución irregular

horizontal vertical del agua líquida y vapor de agua, pero solo contribuye con el 10% real del retardo.

Los dos modelos asumen la atmósfera seca y húmeda que dependen de la temperatura en superficie, la presión y el vapor de agua y que al sintetizarlos terminan siendo una función de mapeo, donde el retardo troposférico va a depender de la posición zenital del satélite, lo que puede expresarse como:

$$T = FM(E) \times (\text{retardo}_{\text{seco}} + \text{retardo}_{\text{humedo}})$$

[12]

Donde

T = Retardo troposférico

$FM(E)$ = Función de Mapeo

5.2 Procesamiento de Datos GPS

Los datos GPS corresponden a las estaciones CALI y BUEN de la red MAGNA ECO de funcionamiento continuo del mes de junio y julio de 2007, adquiridos mediante el convenio de la Universidad del Valle y el Instituto Agustín Codazzi, IGAC. Estas estaciones se encuentran respectivamente en los municipios de Cali, con coordenadas Sirgas Lat: 3.375787 y Long: -76,532565, y Buenaventura con coordenadas Sirgas Lat: 3.882023 y Long: -77. 01042. Los procesamientos se llevaron a cabo en los programas Leica Geo-office de la casa LeicaGeosystems y Trimble Total Control (TTC) de la casa Trimble (Licencia DEMO).

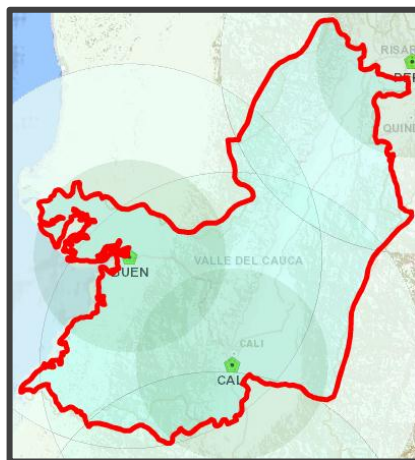


Figura 7. Ubicación geográfica estaciones Magna Eco CALI y BUEN.

Fuente: Mapas de Colombia, geoportal. IGAC

Dado que el valor del retraso troposférico se integra sobre un tiempo más o menos largo (una o dos horas), ya que está directamente correlacionado con la estimación del retraso del reloj de la estación y la altura de la estación (Romero Trujillo, 2008), se fraccionan los archivos RINEX de 24 horas de observación en archivos de 2 horas con la herramienta TEQC desarrollada por UNAVCO.

El tipo de posicionamiento GPS que se utilizó fue el estático y el procesamiento se realizó por líneas base, donde la línea base BUEN-CALI, tiene las coordenadas conocidas de BUEN y se calcula las coordenadas de CALI y la línea base CALI-BUEN, tiene las coordenadas conocidas de CALI y se calcula las coordenadas de BUEN.

En las configuraciones del procesamiento se toman los satélites que tienen una elevación mayor a 10° , ya que como se mencionó anteriormente el retardo troposférico se incrementa cuando el ángulo de elevación decrece. Se utilizaron efemérides precisas del IGS, y las soluciones se restringen a flotante y fija Lc, porque es la combinación de fase portadora libre de efectos ionosféricos. Al punto de control se le ingresan las coordenadas, las variables de humedad, presión, temperatura y se activa la opción de utilizar la altitud del punto.

5.3 Adquisición y Obtención De Los Datos Meteorológicos

Como se presentó anteriormente los modelos troposféricos dependen de la altitud, humedad relativa, presión atmosférica y temperatura. La información de temperatura, presión y humedad relativa se solicitó de forma horaria al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), para las estaciones meteorológicas de UNIVALLE en Cali y LA MISIÓN en Buenaventura, pero llegaron datos diarios y datos de las 7, 13 y 19 horas de temperatura y humedad, sin embargo la base de datos no contaba con información de presión. Como inicialmente se quería saber la corrección del retardo troposférico cada dos horas fue necesario recurrir a otros medios para obtener las variables a la hora que se necesitaban para el desarrollo del proyecto.

5.3.1 Temperatura

Se cuenta con datos de temperatura máxima y mínima por día, temperatura con termómetro seco a las 7, 13 y 19 horas y temperatura con termómetro húmedo a las 7, 13 y 19 horas.

Como es necesario contar con los datos de temperatura a la misma hora que los archivos Rinex, con la temperatura mínima y máxima, se evaluaron tres modelos empíricos: Modelo Snyder (1985), Modelo De Wit et al., (1978) y el Modelo de Parton

y Logan (1981) (Colegio Postgraduados, 2010). Al comparar las temperaturas calculadas con las temperaturas del IDEAM a las 7, 13 y 19 horas, el modelo de Parton y Logan proporcionó los menores errores.

5.3.1.1 Modelo de Parton y Logan

Para $HSS \leq H \leq HPS$

$$Th = (Max_i - Min_i) \times Sen \left[\pi \frac{(H - HSS_i)}{Foto_i + 2a} \right] + Min_i$$

Para $H < HSS$

$$Th = Min_i + (THPS_{i-1} - Min_i) \times EXP \left[-b \left(\frac{24 - HPS_{i-1} - H}{(24 - Foto_{i-1})} \right) \right]$$

Para $H > HPS$

$$Th = Min_{i+1} + (THPS_i - Min_{i+1}) \times EXP \left[-b \left(\frac{H - HPS_i}{(24 - Foto_i)} \right) \right]$$

Donde:

H = Hora

Fotoperíodo= $Foto = 2 \times HS/15$

Hora salida del sol

$HSS = 12 - (HS/15)$

Hora puesta del sol

$HPS = 12 + (HS/15)$

HS = Ángulo Horario

$HS = \arccos [-TAN(Decli) \cdot TAN(lat)]$

Th = temperatura a la hora h

Max_i = temperatura máxima del día actual.

Min_i = temperatura mínima del día actual.

HSS_i = hora de la salida del sol del día actual.

$Foto_i$ = fotoperíodo en el día actual.

a = Coeficiente de retraso para la temperatura máxima

$a = (MAX_i - 12) / FOTO_i$.

$THPS_{i-1}$ = temperatura a la hora de la puesta del sol del día anterior.

b = coeficiente para la disminución de la temperatura nocturna.

$b = 2.2$

HPS = hora de la puesta del sol

$Foto_i$ = Fotoperíodo del día anterior.

$THPS_i$ = temperatura a la hora de la puesta del sol día actual.

Tabla 4. Cálculo de temperaturas (°C) para la estación UNIVALLE en Cali.

Día Hora	172	173	175	176	177	180	195	200
19	28.1	28.1	28.5	28.0	25.4	26.2	26.6	27.5
21	26.6	26.6	26.9	26.7	24.4	25.2	25.5	26.0
23	29.0	29.0	29.3	28.7	26.0	26.8	27.2	28.4
1	25.6	23.4	25.9	25.8	23.6	24.4	24.7	25.0
3	26.6	24.3	26.9	26.7	24.4	25.2	25.5	26.0
5	23.1	23.2	22.1	23.4	23.7	23.0	22.6	22.9
7	23.7	23.6	22.8	23.9	24.0	23.4	23.1	23.5
9	24.3	24.0	23.5	24.4	24.3	23.9	23.6	24.1
11	24.9	24.3	24.2	25.0	24.5	24.3	24.0	24.6
13	25.5	24.7	24.9	25.5	24.8	24.7	24.5	25.2
15	26.0	25.0	25.5	26.0	25.1	25.1	25.0	25.7
17	26.6	25.4	26.2	26.5	25.4	25.4	25.4	26.2

Tabla 5. Cálculo de temperaturas (°C) para la estación La Misión en Buenaventura

Día Hora	172	173	175	176	177	180	195	200
19	27.9	26.0	27.3	27.9	27.9	27.5	26.5	26.2
21	25.9	24.0	25.2	25.2	25.2	24.9	24.6	24.0
23	29.0	27.2	28.5	29.4	29.4	29.1	27.7	27.5
1	23.3	24.6	23.8	22.7	23.4	23.0	23.3	22.5
3	24.8	25.9	25.2	24.5	25.2	24.9	24.6	24.0
5	18.1	20.3	18.6	18.6	16.8	18.8	18.5	16.6
7	22.3	23.2	22.6	23.0	21.2	22.7	22.2	21.0
9	26.2	25.8	26.2	27.0	25.1	26.2	25.5	24.9
11	29.0	27.8	28.8	29.9	27.9	28.8	27.9	27.7
13	30.3	28.6	30.0	31.3	29.2	30.0	29.0	29.0
15	29.9	28.2	29.5	31.0	28.6	29.5	28.5	28.4
17	27.8	26.6	27.5	28.9	26.4	27.6	26.6	26.2

5.3.2 Presión Atmosférica

Para el desarrollo del proyecto se asumió la presión atmosférica promedio de cada ciudad. La presión atmosférica tomada como promedio para Cali se obtuvo mediante datos de la estación de la Corporación Autónoma Regional Del Valle del Cauca, CVC, correspondiente a datos de presión atmosférica horaria durante cuatro meses. La presión atmosférica para Buenaventura fue tomada de acuerdo a la clasificación por zonas, presentada en el libro régimen de la presión atmosférica en Colombia (Eslava Ramírez, 1995).

5.3.3 Humedad Relativa

Los datos de humedad relativa igual que los de temperatura, se tienen a las 7, 13 y 19 horas. Se recurrió a las formulas de la termodinámica, para estimar la humedad relativa horaria. El primer inconveniente fue obtener la temperatura bulbo húmedo de forma horaria, ya que los modelos hasta el momento encontrados eran para calcular la temperatura real, es decir la tomada con bulbo seco, y en las formulas de la termodinámica es necesario contar con ambas temperaturas.

A modo de prueba, se realizaron cálculos para estimar la humedad relativa con las temperaturas de bulbo seco y húmedo que se tenía (a las 7, 13 y 19 horas), tomando como datos para validar los resultados, las humedades relativas del IDEAM.

Para realizar el cálculo teórico de las humedades relativas, se tomaron las variables de: Capacidad calorífica del aire seco (C_p), la cual es constante para el aire seco en el intervalo de temperatura de -10°C a 50°C con un error despreciable

de 0.2%, humedad absoluta de salida (w_2 , relacionada con la temperatura de bulbo húmedo), humedad absoluta de entrada (w_1 , relacionada con la temperatura de bulbo seco), entalpía evaporación de vapor saturado (hfg_2), entalpía vapor saturado a la temperatura de bulbo seco (hg_1), entalpía evaporación a la temperatura de bulbo húmedo (hf_2), presión de saturación a la temperatura de bulbo húmedo (Pg_2) y la presión del ambiente (P_2). Todas las variables se encuentran tabuladas para el vapor de agua en el manual de referencia de Keenan y Keyes (1936).

Las presiones llevan asociadas sus respectivas temperaturas de saturación, en caso de no encontrarlas exactamente, se realiza una interpolación asumiendo que se comportan de manera lineal. Así, sólo con las temperaturas de bulbo seco y húmedo y con la ayuda de las tablas del manual, se puede llegar a la humedad relativa.

Temperatura bulbo seco = 20.2 °C

Temperatura bulbo húmedo = 19.2 °C

$P_2 = 101.325 \text{ KPa}$

$Pg_2 = 2.228 \text{ KPa}$

$$w_2 = \frac{0.622 P_{g_2}}{P_2 - P_{g_2}} \quad [18]$$

$$w_2 = \frac{0.622 (2.228 \text{ KPa})}{(101.325 - 2.228 \text{ KPa}) \text{ KPa}}$$

$$w_2 = 0.01398 \text{ Kg } H_2O / \text{ Kg aire seco}$$

Entalpía evaporación de vapor saturado:

$$\frac{2453.3 - 2456.6}{20.4 - 19} = \frac{hfg_2 - 1456.6}{19.2 - 19}$$

$$hfg_2 = 2456.13 \text{ KJ / Kg}$$

[19]

Entalpía evaporación a la temperatura de bulbo húmedo:

$$\frac{83.9 - 75.5}{20 - 18} = \frac{hf_2 - 75.5}{19.2 - 18}$$

$$hf_2 = 80.54 \text{ KJ / Kg}$$

[20]

Ahora:

$$w_1 = \frac{Cp(T_2 - T_1) + w_2 hfg_2}{hg_1 - hf_2}$$

$$w_1 = \frac{(1.005 \text{ KJ / Kg}^\circ\text{C})(19.2 - 20.2)^\circ\text{C} + (80.01398)(2456.13) \text{ KJ / Kg}}{2547.3 - 80.54 \text{ KJ / Kg}}$$

[21]

Presión de saturación a la temperatura de bulbo seco:

$$\frac{0.0264 - 0.0234}{22 - 20} = \frac{Pg_1 - 0.0234}{20.2 - 20}$$

$$Pg_1 = 0.0237 \text{ bar} = 2.37 \text{ KPa}$$

[22]

Humedad relativa

$$\phi = \frac{w_1 P_2}{(0.622 + w_1) P_{g_1}}$$

[23]

$$\phi = \frac{(0.013512)(101.325 \text{ KPa})}{(0.622 + 0.013512)(2.37 \text{ KPa})}$$

$$\phi = 0.909 = 90.9\%$$

El valor de la humedad relativa el 1 de Junio de 2007 a las 7 AM, en la estación meteorológica UNIVALLE es 91%, el valor teórico calculado es 90.9%, la diferencia es muy poca, si se aproxima el resultado a dos cifras significativa el resultado queda igual.

Lo anterior muestra que la falta de contar con los datos de temperatura horaria de bulbo húmedo, impidió realizar el cálculo de la humedad relativa horaria. Para el proyecto se tomó la humedad relativa promedio del día adquirida en el IDEAM.

6. RESULTADOS

Se analizaron gráficamente las desviaciones DX, DY, DZ, las cuales fueron adquiridas restando las coordenadas cartesianas X, Y, Z que se obtuvieron de cada procesamiento realizado, con las coordenadas reales de cada estación (BUEN o CALI), obtenidas en la pagina del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Americas –SIRGAS.

6.1 Sin Corrección Troposférica

El método de posicionamiento empleado permite reducir las desviaciones debido a los satélites, a los receptores y a la ionosfera. En las gráficas se representan las desviaciones debidas a la tropósfera, las cuales no contienen la corrección del retardo troposférico ni de los errores aleatorios contenidos en las desviaciones.

El procesamiento de datos sin modelo troposférico se realizó durante ocho días, haciendo observaciones cada dos horas. Luego se tomaron 20 días continuos, realizando observaciones para cada día, en general.

Se observa que la variación total (COMP) toma valores entre 10.5 m y 12.75 m, como se muestra en las figuras 8 y 9. Las gráficas son idénticas como era de esperarse, con promedios totales muy cercanos entre sí, alrededor de 11.500 m, lo cual se deduce del conjunto de datos de los promedios totales. La máxima variación se observa en el día 177, y la mínima en el día 195. Los mayores incrementos se presentaron entre los días 175 y 177 y luego se observa una disminución progresiva entre los días 177 y 195. Las variaciones máxima y mínima pueden explicarse por las condiciones meteorológicas (lluvias, nubosidad, tormentas eléctricas, etc.) y por la posición de los satélites en los días respectivos. Las pendientes de las rectas indican las variaciones bruscas o moderadas entre las observaciones diarias; por ejemplo, entre los días 175 y 177 se presentó un aumento significativo en la variación total.

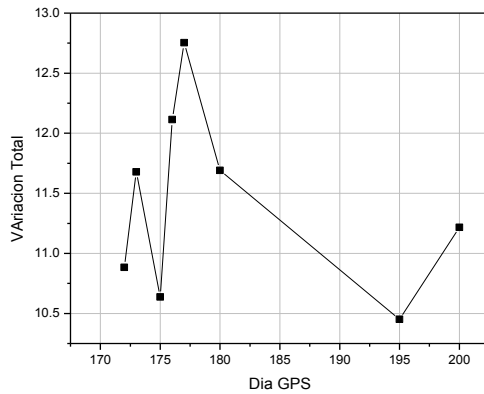


Figura 8. Variación Total vs Día GPS. BUEN_CALI. Sin Modelo.

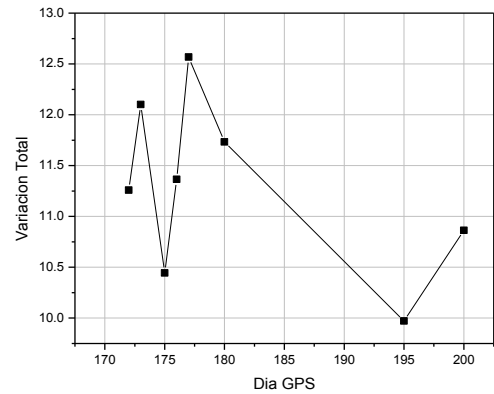


Figura 9. Variación Total vs Día GPS. CALI_BUEN. Sin Modelo.

En las figuras 10 y 11, se muestran las desviaciones promedio de las componentes X, Y, Z y de la variación total para cada día. En la línea BUEN_CALI se observa que la mayor variabilidad promedio ocurre en la dirección Y, mientras que en las direcciones X y Z las variabilidades son mínimas. En contraste, en la línea CALI_BUEN se dan condiciones contrarias: la variabilidad en la dirección Y es mínima, mientras que aumentan las variabilidades en las direcciones X y Z. En ambos casos, la variabilidad total es mayor, como era de esperarse.

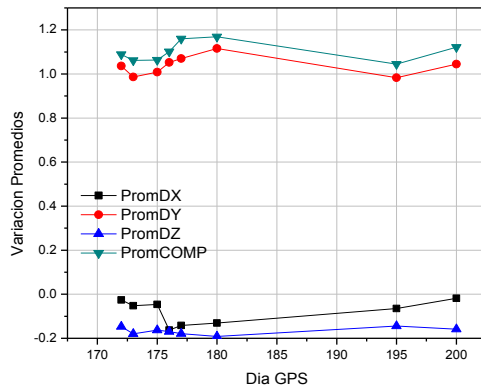


Figura 10. Variación Promedios vs Día GPS. BUEN_CALI. Sin Modelo.

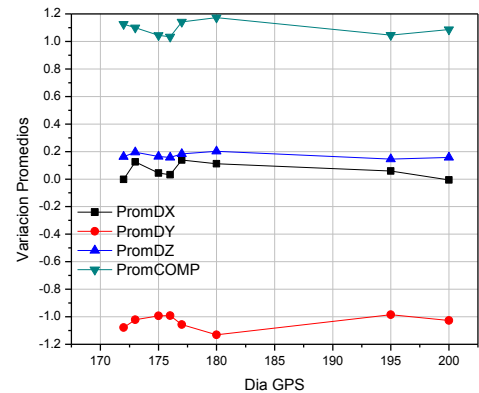


Figura 11. Variación Promedios vs Día GPS. CALI_BUEN Sin Modelo

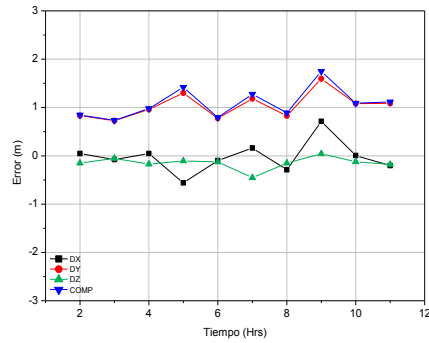


Figura 12. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. BUEN_CALI. Sin Modelo.(día 172)

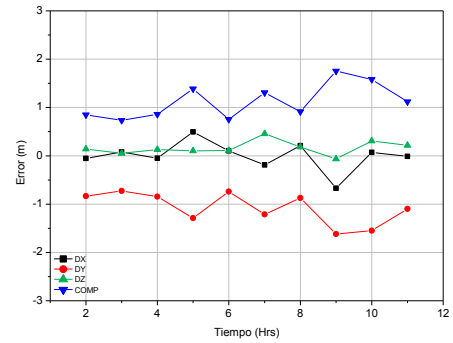


Figura 13. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. CALI_BUEN. Sin Modelo.(día 172)

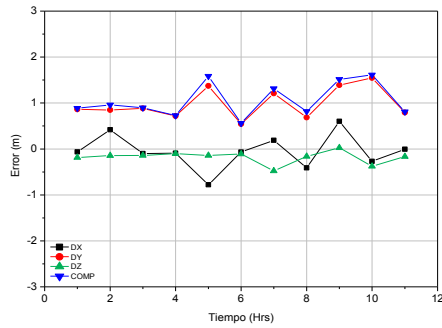


Figura 14. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. BUEN_CALI. Sin Modelo.(día 173)

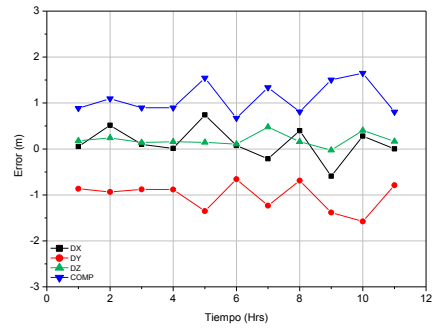


Figura 15. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. CALI_BUEN. Sin Modelo.(día 173)

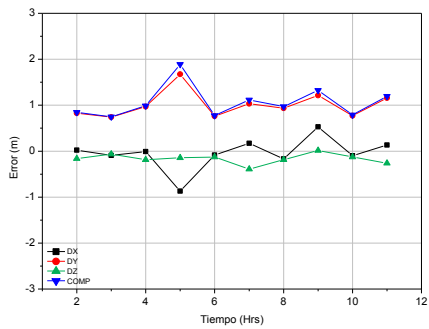


Figura 16. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. BUEN_CALI. Sin Modelo.(día 175)

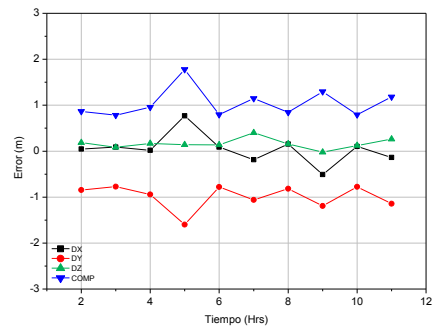


Figura 17. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. CALI_BUEN. Sin Modelo.(día 175)

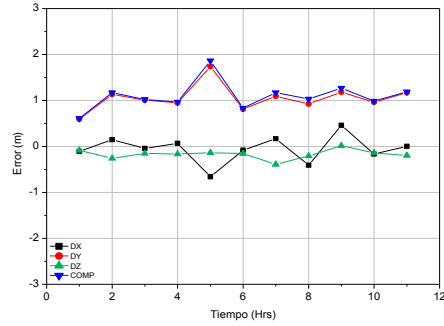


Figura 18. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. BUEN_CALI. Sin Modelo.(día 176)

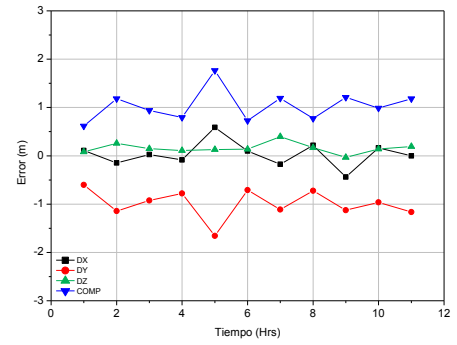


Figura 19. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. CALI_BUEN. Sin Modelo.(día 176)

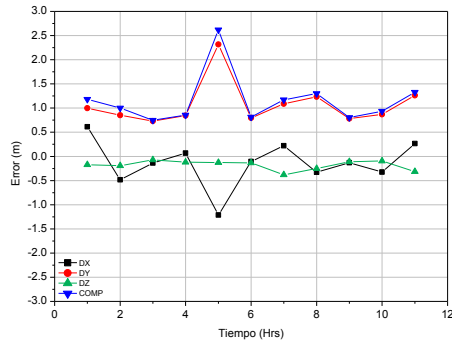


Figura 20. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. BUEN_CALI. Sin Modelo.(día 177)

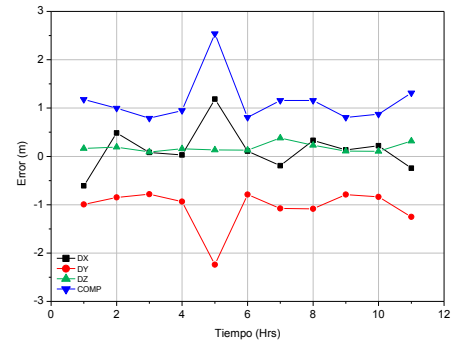


Figura 21. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. CALI_BUEN. Sin Modelo.(día 177)

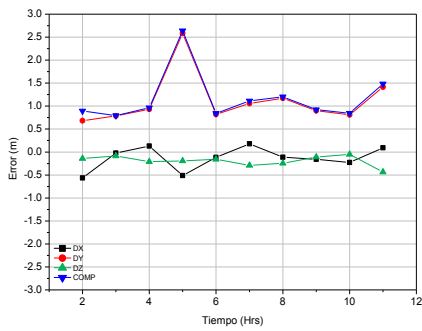


Figura 22. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. BUEN_CALI. Sin Modelo.(día 180)

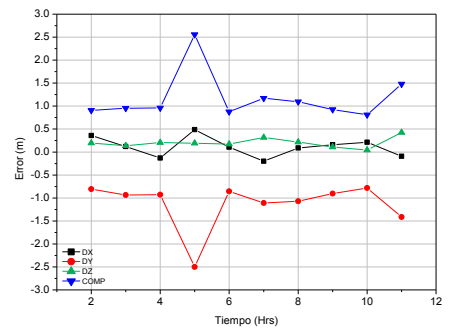


Figura 23. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. CALI_BUEN. Sin Modelo.(día 180)

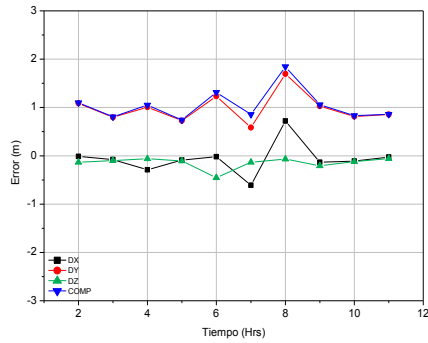


Figura 24. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. BUEN_CALI. Sin Modelo.(día 195)

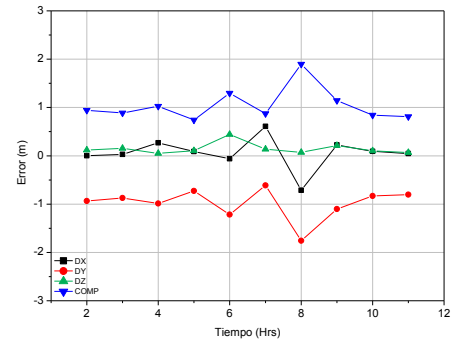


Figura 25. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. CALI_BUEN. Sin Modelo.(día 1952)

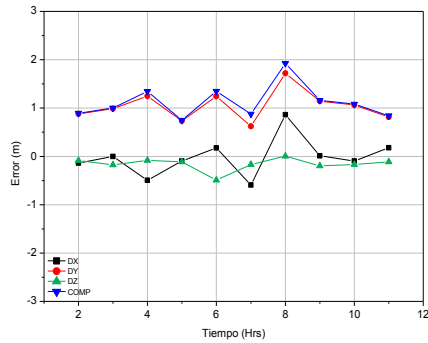


Figura 26. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. BUEN_CALI. Sin Modelo.(día 200)

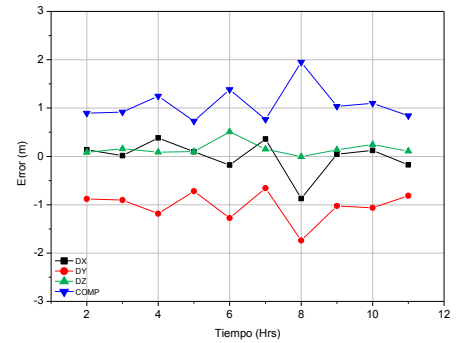


Figura 27. Error Posicional vs Intervalos de tiempo. CALI_BUEN. Sin Modelo.(día 200)

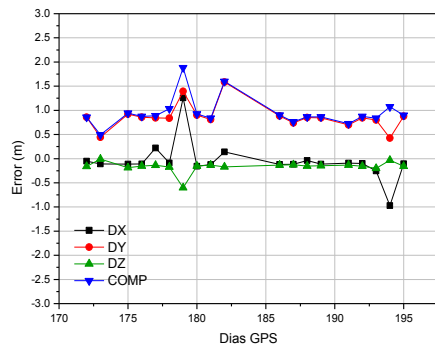


Figura 28. Error Posicional vs Dia GPS. BUEN_CALI. Sin Modelo.

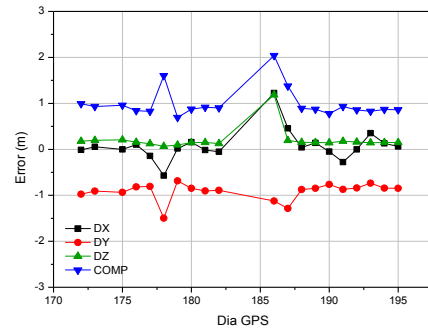


Figura 29. Error Posicional vs Dia GPS. CALI_BUEN. Sin Modelo.

6.1 Corrección Troposférica realizada con los valores en los modelos que el software trae

El software considera para los modelos Hopfield y Saastamoinen los valores adoptados en la atmósfera estándar, con humedad relativa del 50%, presión atmosférica de 1013 hPa y temperatura de 293 Kelvin. Se procesaron las líneas base CALI_BUEN, BUEN_CALI durante 8 días cada dos horas. Los errores que se representan en las gráficas corresponden a los errores aleatorios y al remanente de las desviaciones debido a los satélites, estaciones y observaciones después de que se han modelado.

Se observa que la variación total (COMP) para la línea base BUEN_CALI, con el modelo Saastamoinen toma valores entre 1.840 m y 4.668 m, y con el modelo Hopfield toma valores entre 2.049 m y 4.850 m, como se muestra en las figuras 30 y 31. La máxima variación se observa en ambos modelos el día 173, y la mínima el día 175 y 195, con los modelos de Saastamoinen y Hopfield, respectivamente. Los mayores incrementos con el modelo Saastamoinen se presentaron entre los días 175 y 176, y con Hopfield entre los días 172 y 173. Los promedios totales para la línea base BUEN_CALI con ambos modelos son muy cercanos entre sí, alrededor de 3.500 m.

En la línea base CALI_BUEN la variación total con el modelo Saastamoinen toma valores entre 0.489 m y 1.453 m, y con el modelo Hopfield toma valores entre 0.543 m y 1.579 m, como se muestra en las figuras 32 y 33. La máxima variación se observa el día 200 con el modelo Saastamoinen, y el día 175 con Hopfield. Los mayores incrementos se presentaron, con ambos modelos, entre los días 173 y 175, y luego se observa una disminución progresiva entre los días 175 y 180. Los promedios totales para la línea base CALI_BUEN con ambos modelos son muy cercanos entre sí, alrededor de 95 cm.

Al procesar con los valores de presión, humedad relativa y temperatura en los modelos que el software trae, por defecto, la precisión obtenida es muy alta, siendo mayor para la línea base CALI_BUEN.

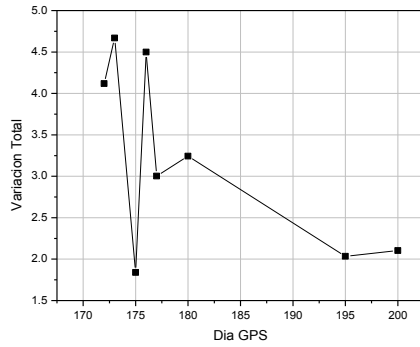


Figura 30. Variación Total vs Día GPS, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Saastamoinen.

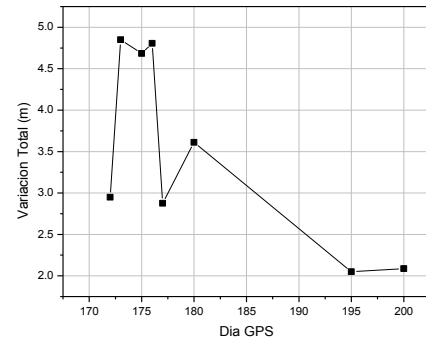


Figura 31. Variación Total vs Día GPS, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Hopfield.

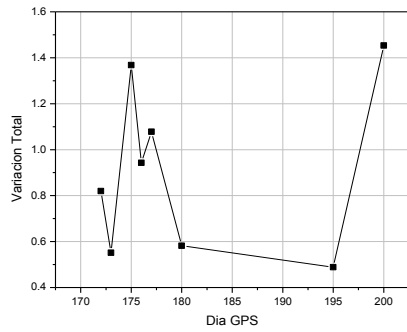


Figura 32. Variación Total vs Día GPS, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Saastamoinen

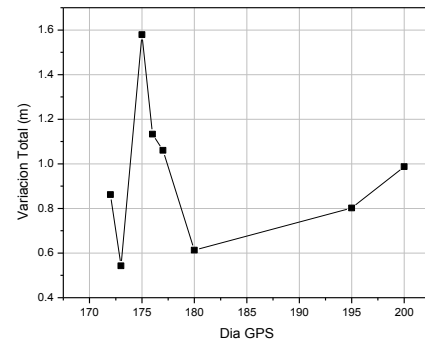


Figura 33. Variación Total vs Día GPS, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Hopfield.

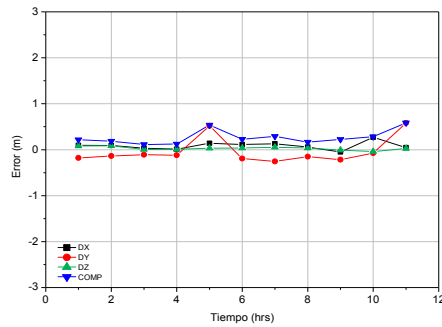


Figura 34. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Hopfield.(día 172)

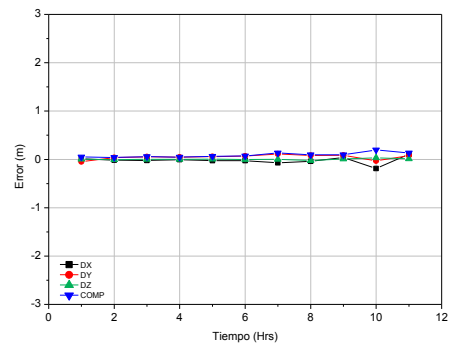


Figura 35. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Hopfield.(día 172)

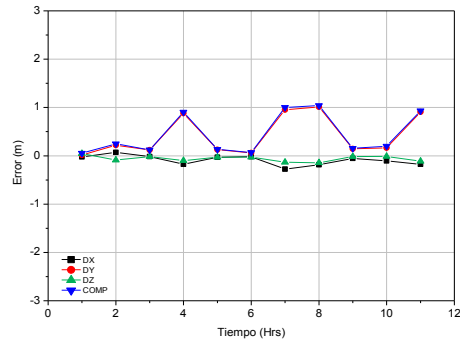


Figura 36. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Hopfield.(día 173)

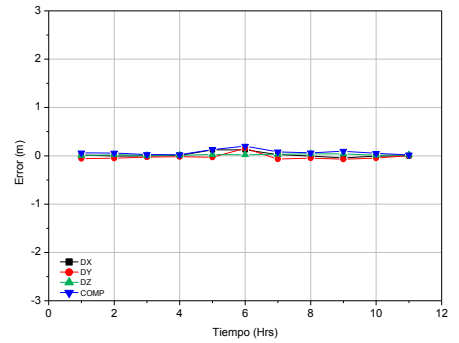


Figura 37. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Hopfield.(día 173)

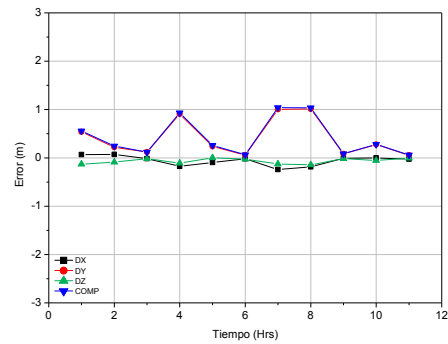


Figura 38. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Hopfield.(día 175)

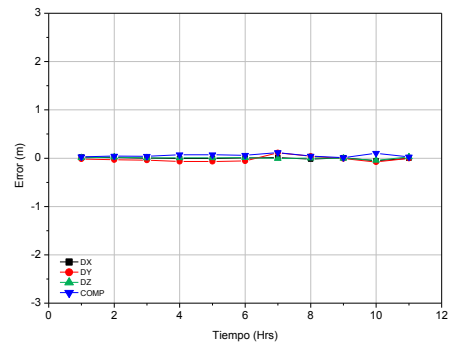


Figura 39. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Hopfield.(día 175)

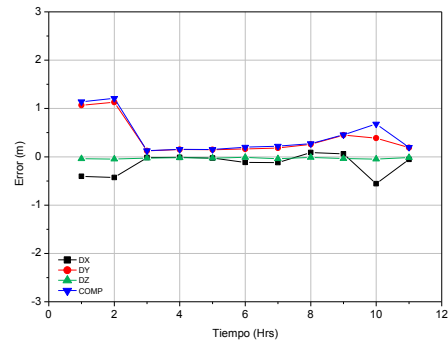


Figura 40. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Hopfield.(día 176)

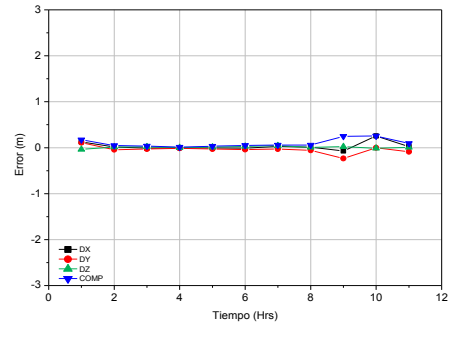


Figura 41. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Hopfield.(día 176)

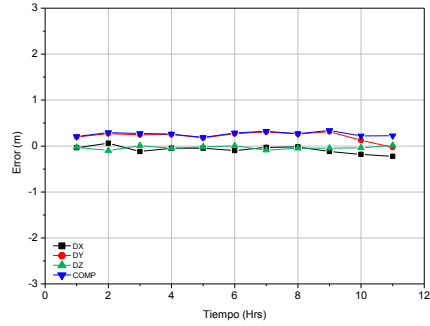


Figura 42. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Hopfield.(día 177)

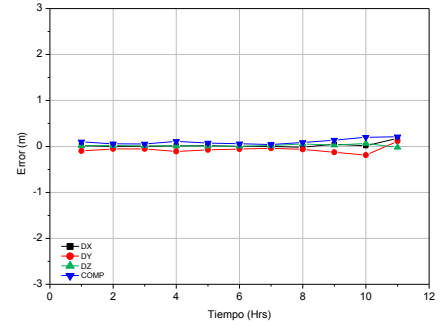


Figura 43. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Hopfield.(día 177)

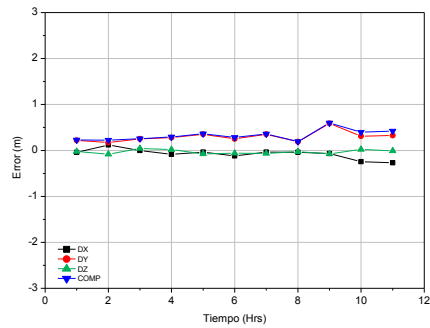


Figura 44. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Hopfield.(día 180)

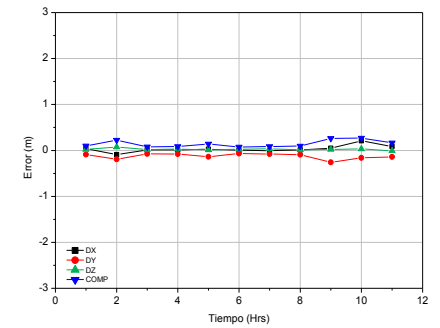


Figura 45. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Hopfield.(día 180)

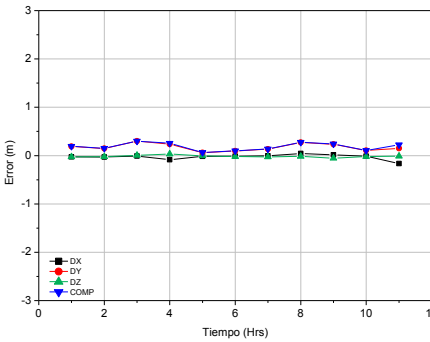


Figura 46. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Hopfield.(día 195)

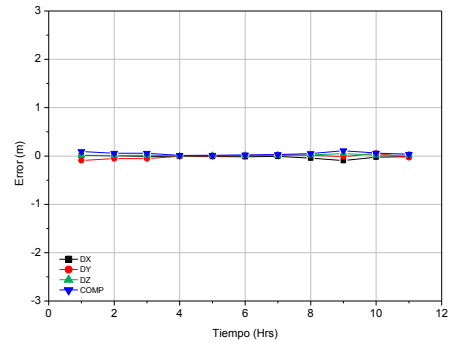


Figura 47. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Hopfield.(día 195)

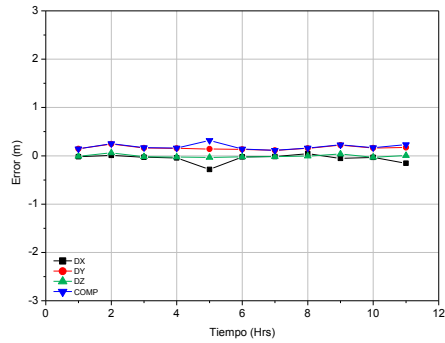


Figura 48. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Hopfield.(día 200)

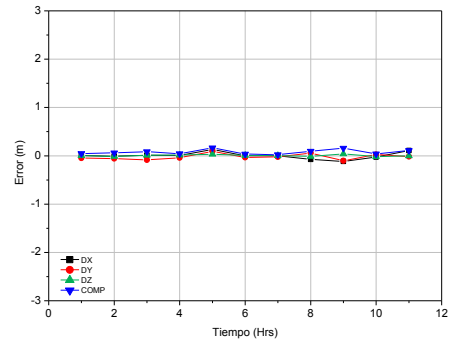


Figura 49. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Hopfield.(día 200)

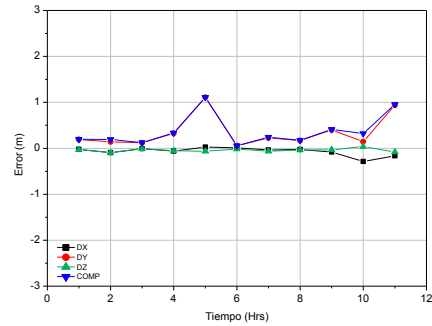


Figura 50. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 172)

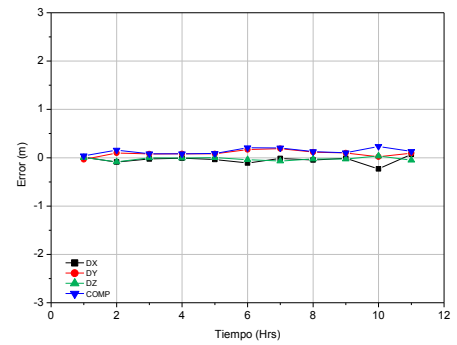


Figura 51. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 172)

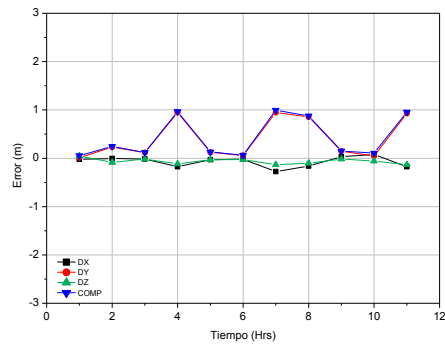


Figura 52. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 173)

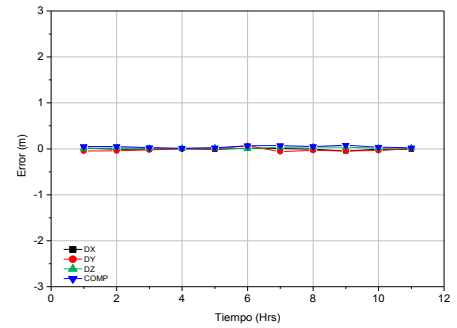


Figura 53. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 173)

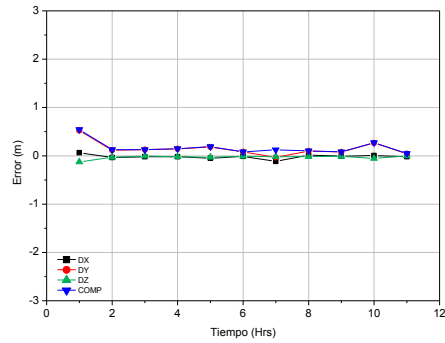


Figura 54. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 175)

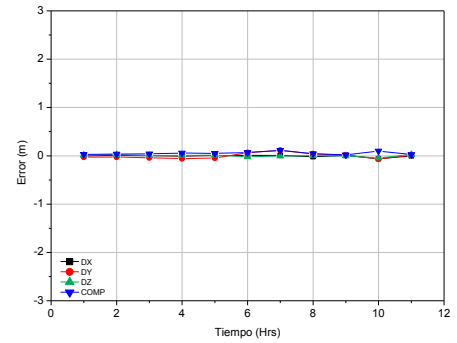


Figura 55. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 175)

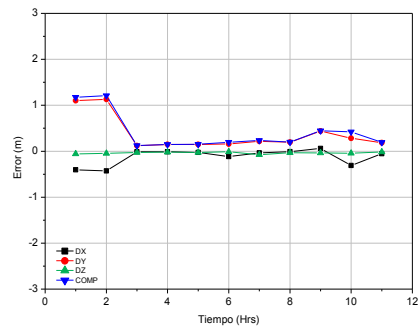


Figura 56. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 176)

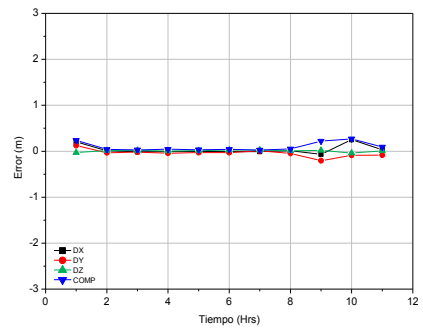


Figura 57. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 176)

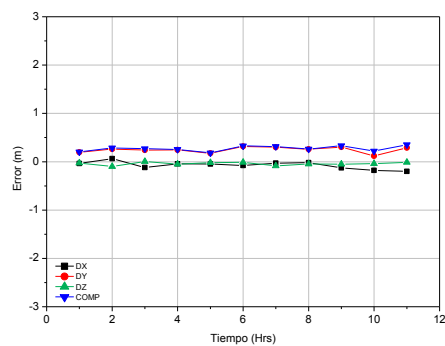


Figura 58. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 177)

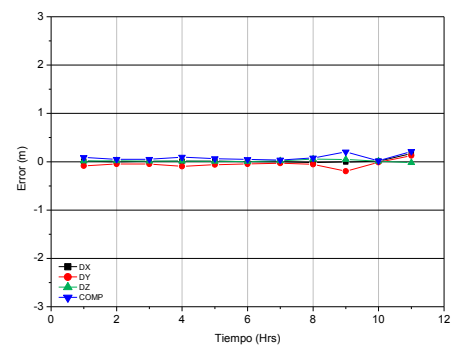


Figura 59. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 177)

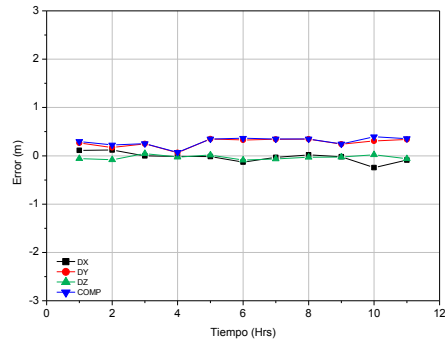


Figura 60. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 180)

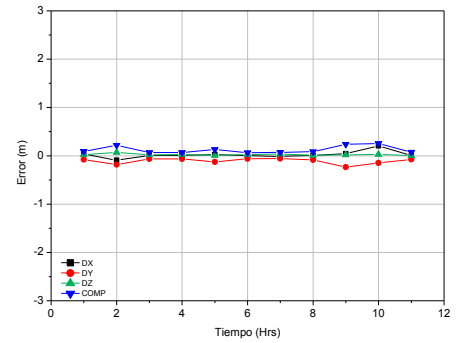


Figura 61. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 180)

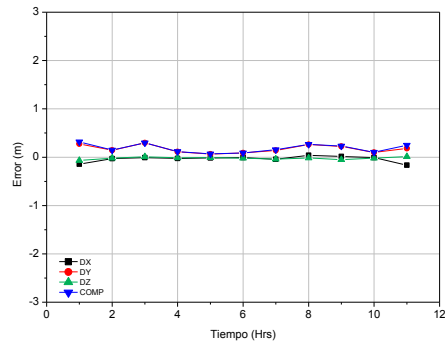


Figura 62. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 195)

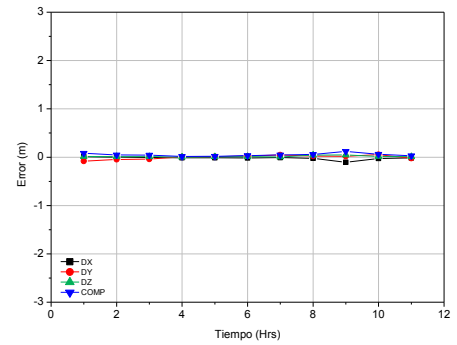


Figura 63. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 1195)

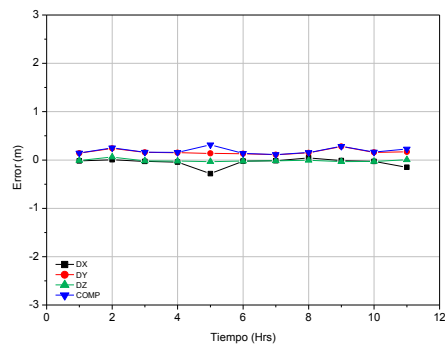


Figura 64. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 200)

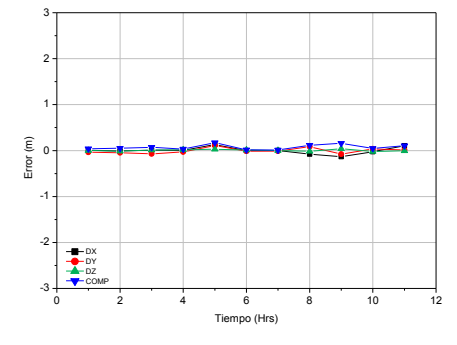


Figura 65. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, valores sin calibrar. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 200)

6.2 Corrección Troposférica realizada con datos ingresados por el usuario en los modelos

Con los modelos Hopfield y Saastamoinen se realizaron procesamientos cambiando ya sea la humedad relativa, presión atmosférica o temperatura, con el fin de apreciar el cambio en las precisiones y observar cuál variable meteorológica afecta más los modelos.

Al variar la presión atmosférica y dejar fijas la humedad relativa y la temperatura, las precisiones obtenidas son muy altas, prácticamente del mismo orden de las precisiones adquiridas con los procesamientos realizados con los valores de los modelos que el software trae. La presión atmosférica ingresada al software para el punto de Cali es 903.7 hPa y 1013.9 hPa para el punto de Buenventura. Como los valores de presión son muy próximos al valor del software, no se generan variaciones significativas, como se observa en las figuras 66-97, cuando se cambia dicho valor.

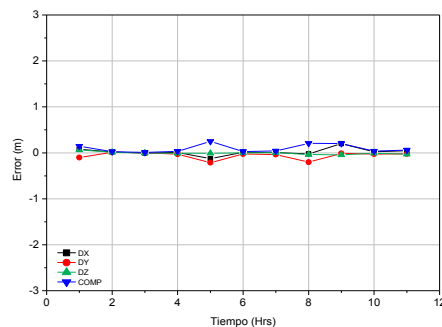


Figura 66. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN_CALI. Hopfield.(día 172)

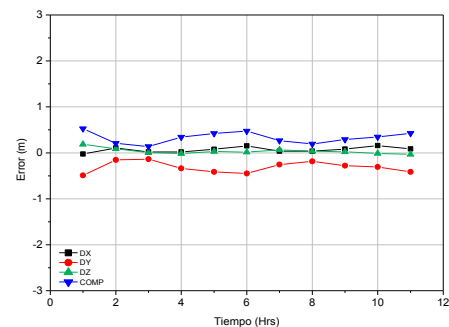


Figura 67. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN. Hopfield.(día 172)

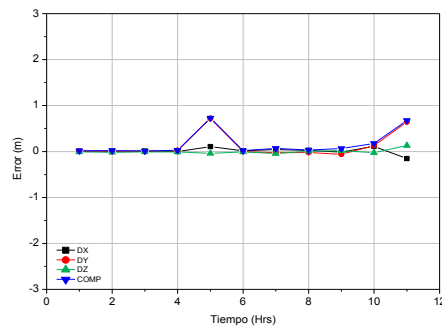


Figura 68. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN_CALI. Hopfield.(día 173)

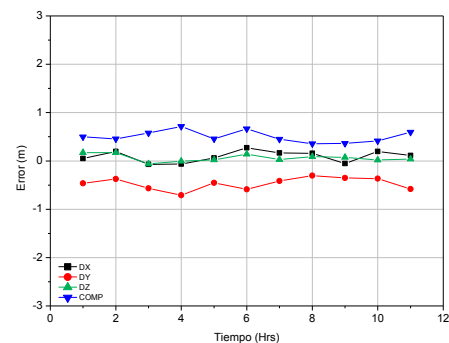


Figura 69. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN. Hopfield.(día 173)

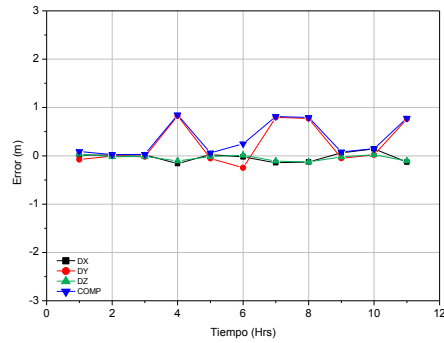


Figura 70. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. BUEN_CALI. Hopfield.(día 175)

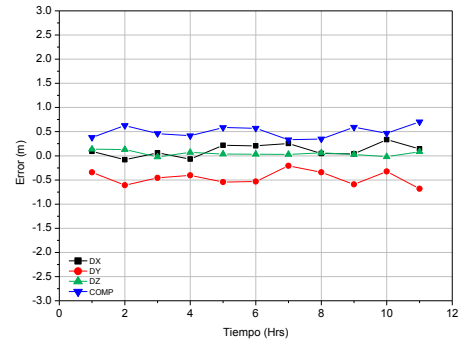


Figura 71. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN. Hopfield.(día 175)

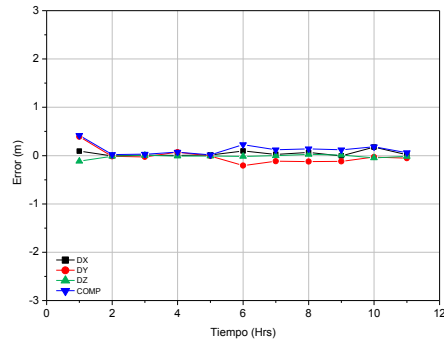


Figura 72. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. BUEN_CALI. Hopfield.(día 176)

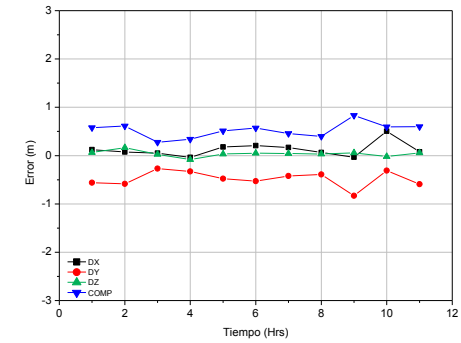


Figura 73. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN. Hopfield.(día 176)

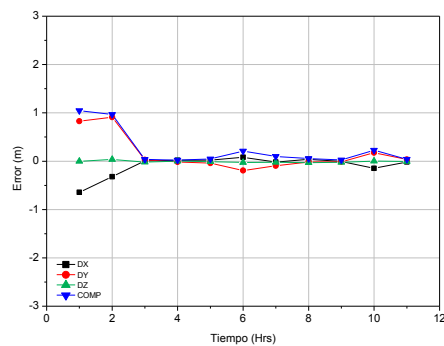


Figura 74. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. BUEN_CALI. Hopfield.(día 177)

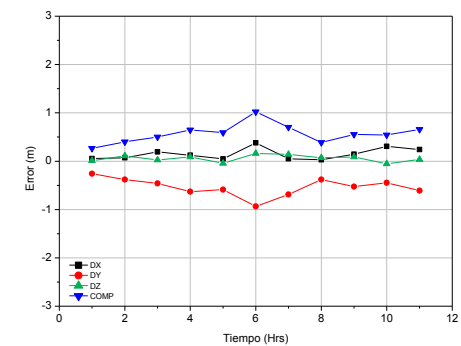


Figura 75. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN. Hopfield.(día 177)

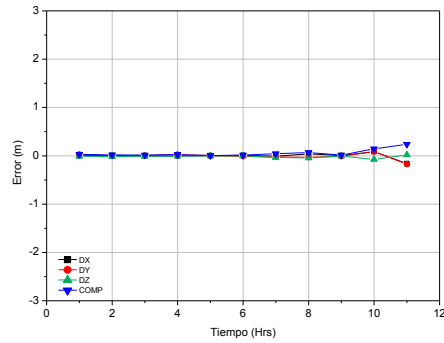


Figura 76. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. BUEN_CALI. Hopfield.(día 180)

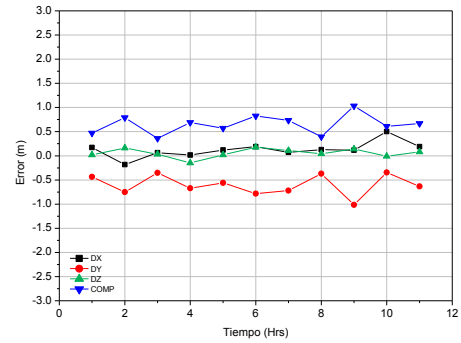


Figura 77. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN. Hopfield.(día 180)

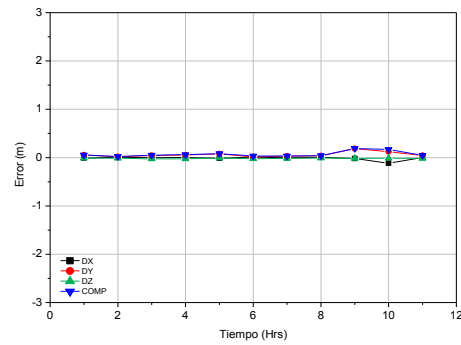


Figura 78. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. BUEN_CALI. Hopfield.(día 195)

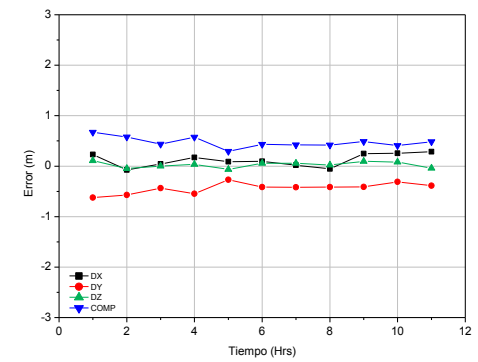


Figura 79. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN. Hopfield.(día 195)

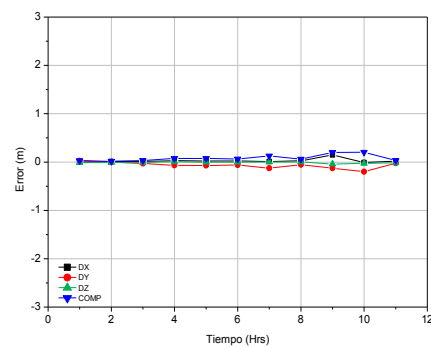


Figura 80. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. BUEN_CALI. Hopfield.(día 200)

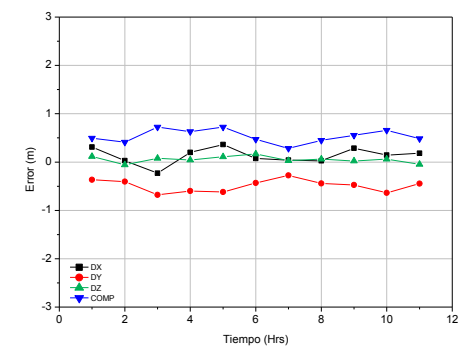


Figura 81. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN. Hopfield.(día 200)

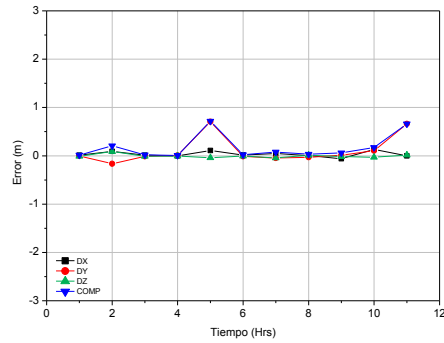


Figura 82. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 172)

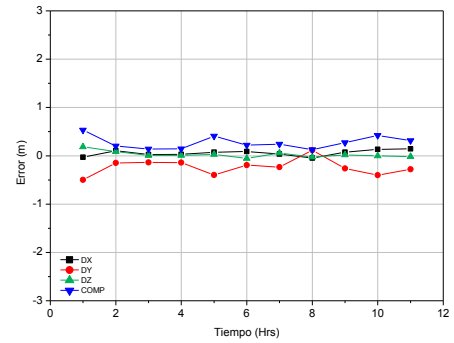


Figura 83. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 172)

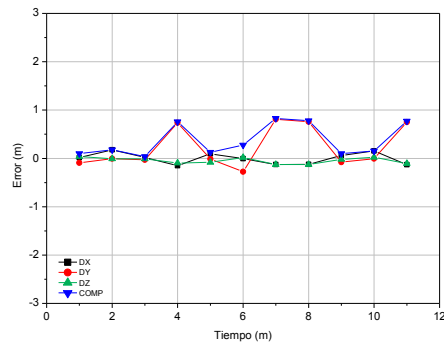


Figura 84. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 173)

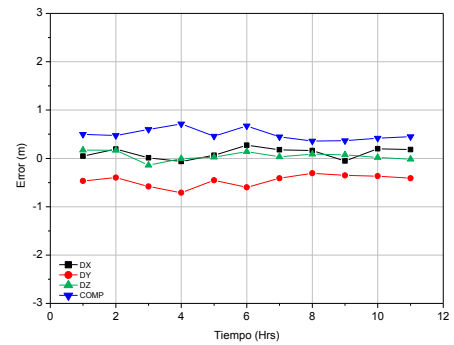


Figura 85. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 173)

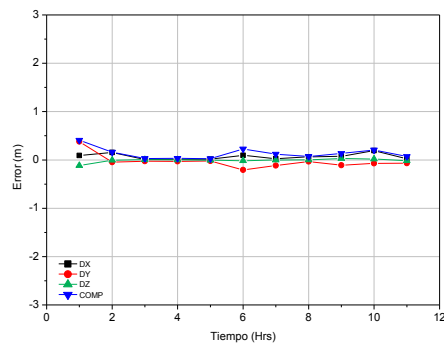


Figura 86. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 175)

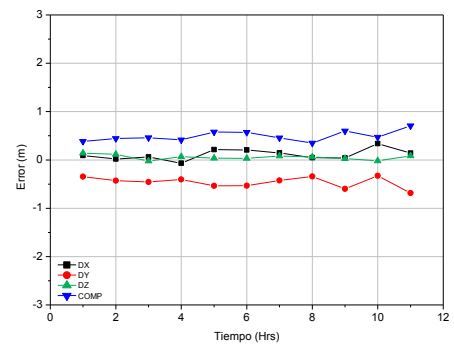


Figura 87. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 175)

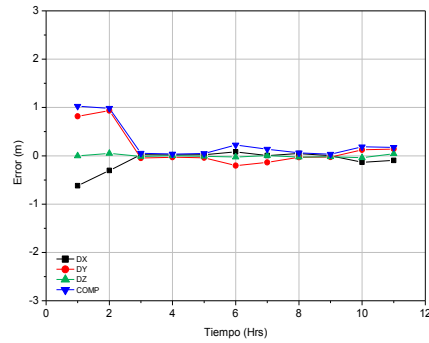


Figura 88. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 176)

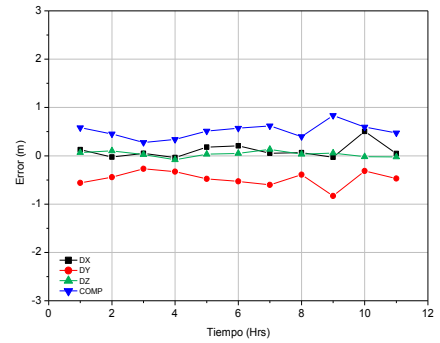


Figura 89. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 176).

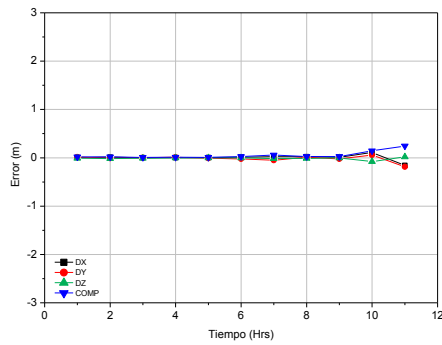


Figura 90. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 177)

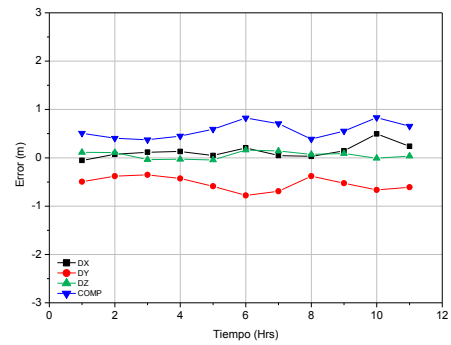


Figura 91. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 177)

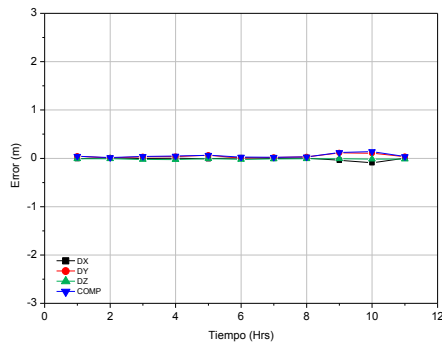


Figura 92. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 180)

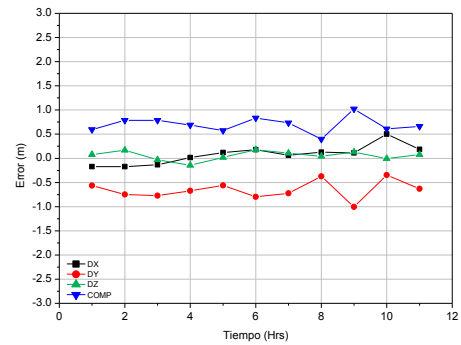


Figura 93. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 180)

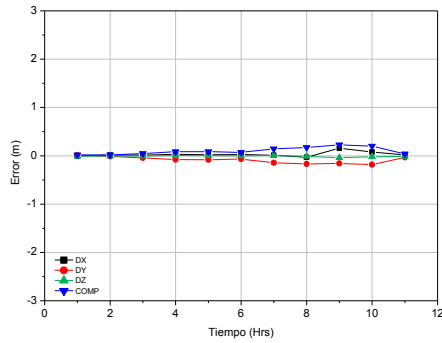


Figura 94. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 195)

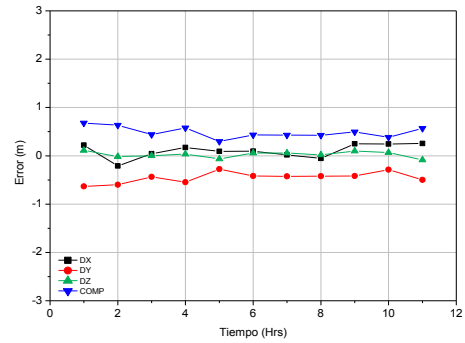


Figura 95. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 195)

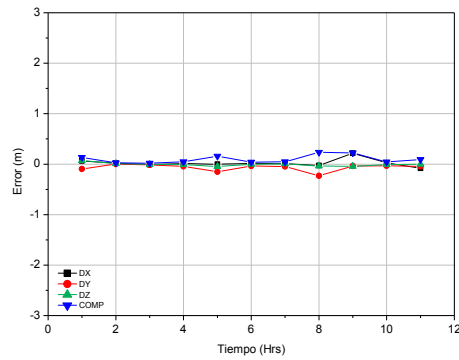


Figura 96. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 200)

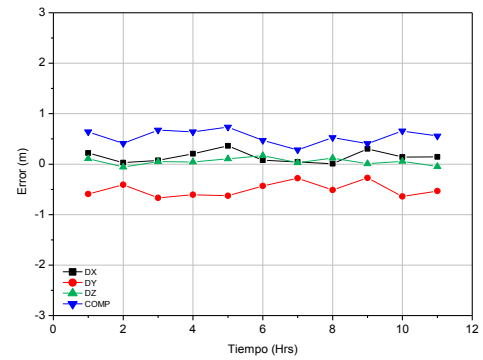


Figura 97. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Presión. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 200)

El valor de la humedad relativa se modificó durante 20 días por el valor correspondiente al promedio del día. La variación total en la línea base BUEN_CALI está entre 6 mm y 17 cm con el modelo Saastamoinen, y entre 6 mm y 82 cm con el modelo Hopfield, como se muestra en la figura 98. El promedio total para la línea base BUEN_CALI, con el modelo Saastamoinen es 3 cm, y con el modelo de Hopfield es 11 cm. En la línea base CALI_BUEN la variación total en con ambos modelos está entre 3 mm y 17 cm (figura 99).

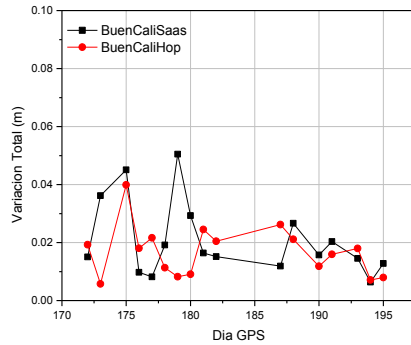


Figura 98. Variación Total vs Día GPS. BUEN_CALI. Saastamoinen-Hopfield.

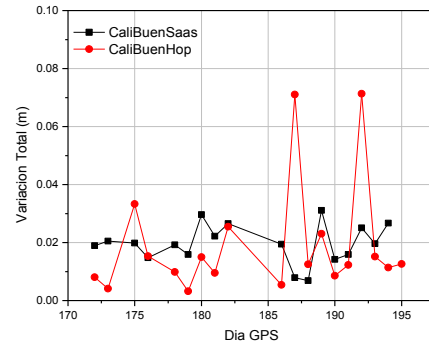


Figura 99. Variación Total vs Día GPS. CALI_BUEN. Saastamoinen-Hopfield.

Las figuras 100-103, muestran que las desviaciones de las componentes X, Y, Z y la variación total para cada día son mínimas, con los modelos Saastamoinen y Hopfield en cada línea base.

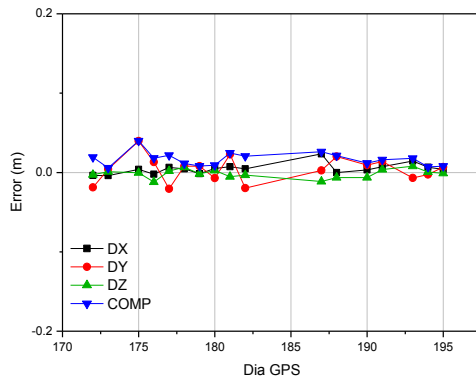


Figura 100. Error Posicional vs Día GPS, BUEN_CALI. Hopfield

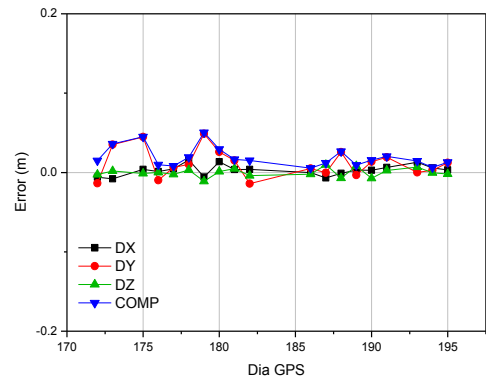


Figura 101. Error Posicional vs Día GPS, BUEN_CALI. Saastamoinen.

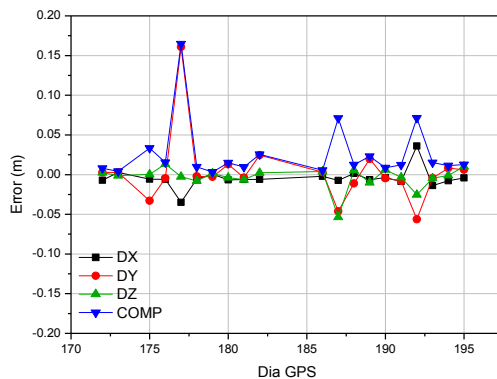


Figura 102. Error Posicional vs Día GPS, CALI_BUEN. Hopfield

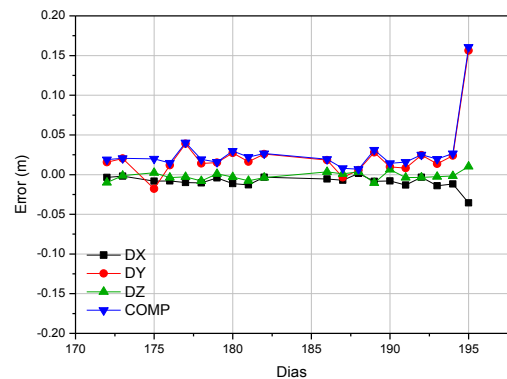


Figura 103. Error Posicional vs Día GPS, CALI_BUEN. Saastamoinen.

Cuando el procesamiento se realiza por horas, tomando durante cada hora el valor promedio de humedad del día, se observa que la mayor variabilidad ocurre en la dirección Y, mientras que en las direcciones X y Z las variabilidades son mínimas, y la variabilidad total se debe fundamentalmente a la variación en la componente Y. Con el modelo de Hopfield ambas líneas base se ven afectadas en la precisión, y se puede deber a que el modelo depende más de la altura de la estación, y con Saastamoinen se afecta mayormente la precisión en la línea base CALI_BUEN. Lo anterior demuestra que el valor de la humedad no es el adecuado para las estaciones de observación y genera mayor error al realizar el ajuste.

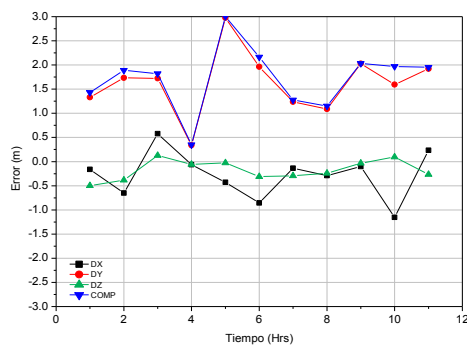


Figura 104. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. BUEN_CALI. Hopfield.(día 172)

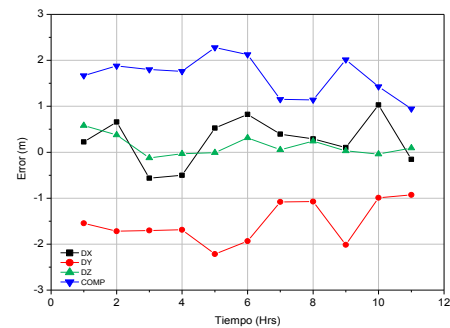


Figura 105. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. CALI_BUEN. Hopfield.(día 172)

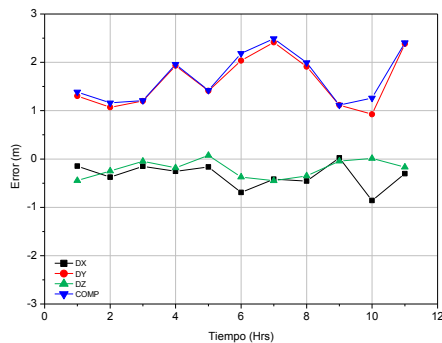


Figura 106. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. BUEN_CALI. Hopfield.(día 173)

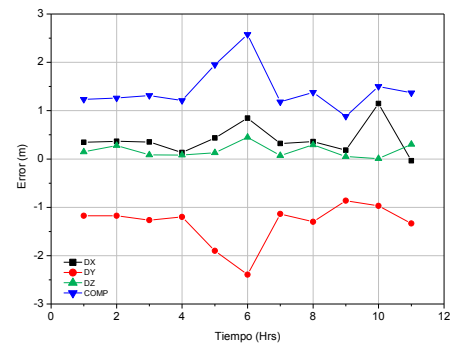


Figura 107. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. CALI_BUEN. Hopfield.(día 173)

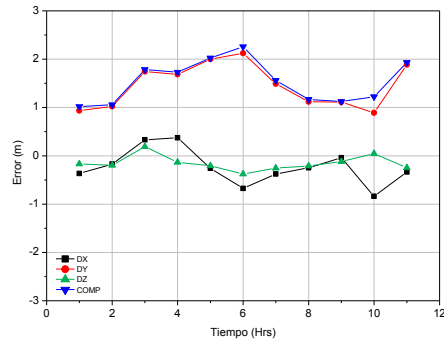


Figura 108. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. BUEN_CALI. Hopfield.(día 175)

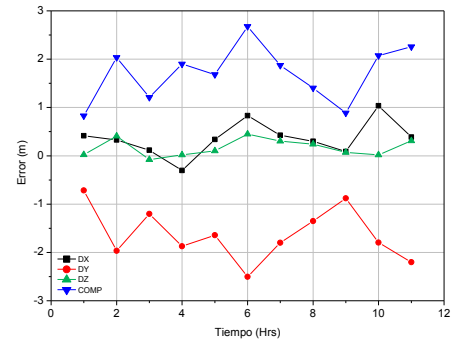


Figura 109. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. CALI_BUEN. Hopfield.(día 175)

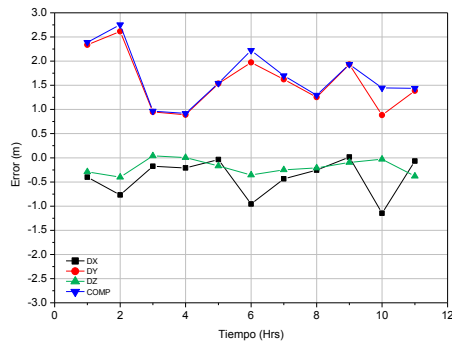


Figura 110. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. BUEN_CALI. Hopfield.(día 176)

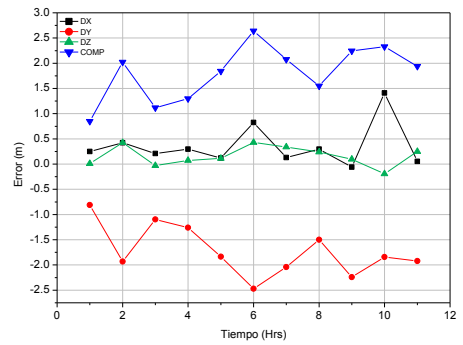


Figura 111. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. CALI_BUEN. Hopfield.(día 176)

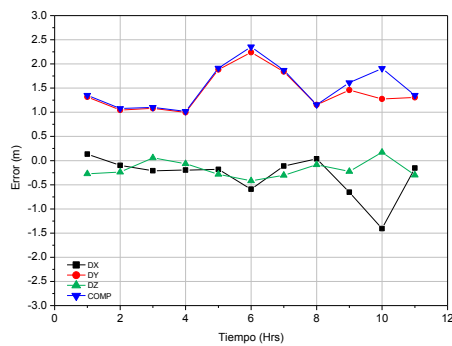


Figura 112. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. BUEN_CALI. Hopfield.(día 177)

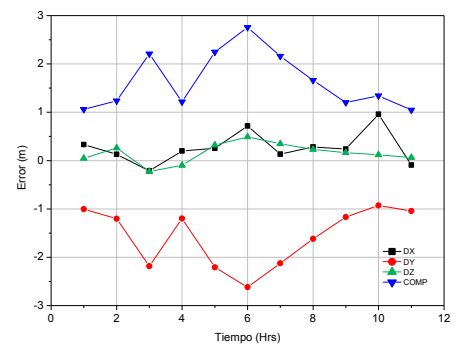


Figura 113. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. CALI_BUEN. Hopfield.(día 177)

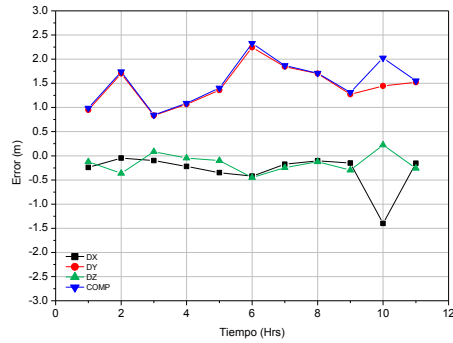


Figura 114. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. BUEN_CALI. Hopfield.(día 180)

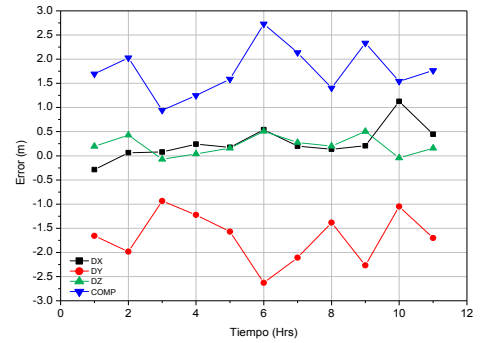


Figura 115. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. CALI_BUEN. Hopfield.(día 180)

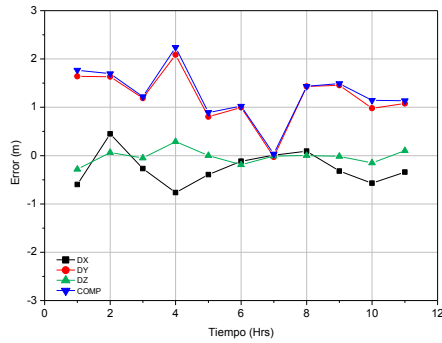


Figura 116. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. BUEN_CALI. Hopfield.(día 195)

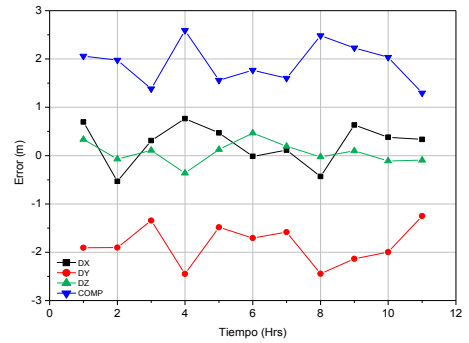


Figura 117. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. CALI_BUEN. Hopfield.(día 195)

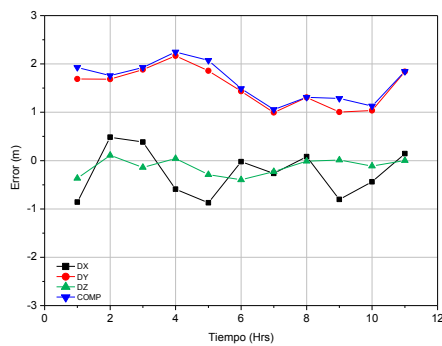


Figura 118. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. BUEN_CALI. Hopfield.(día 200)

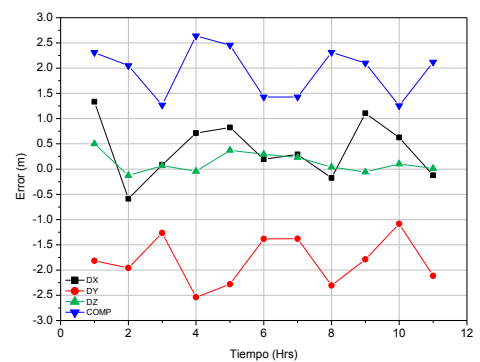


Figura 119. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. CALI_BUEN. Hopfield.(día 200)

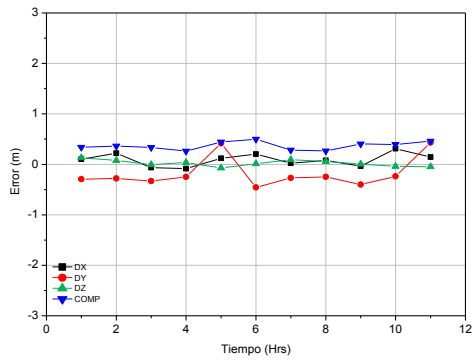


Figura 120. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 172)

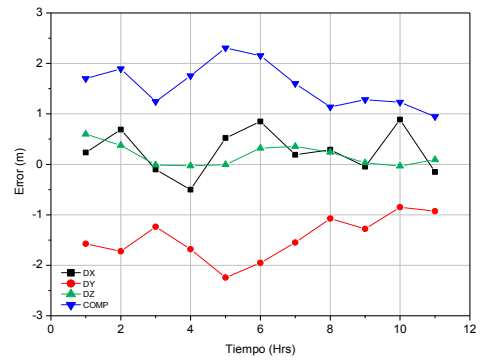


Figura 121. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 172)

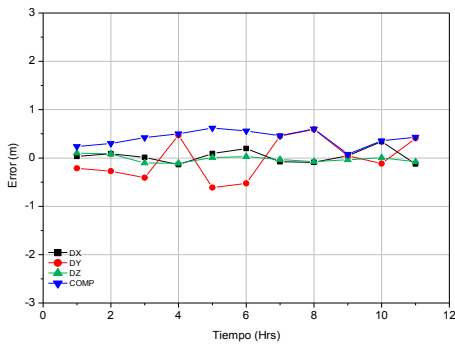


Figura 122. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 173)

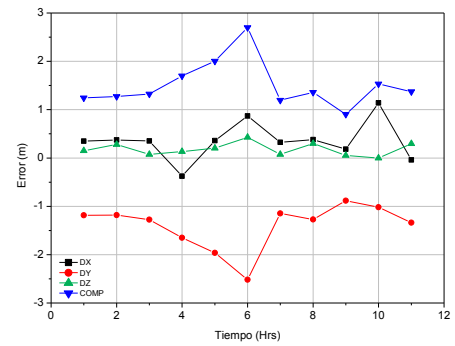


Figura 123. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 173)

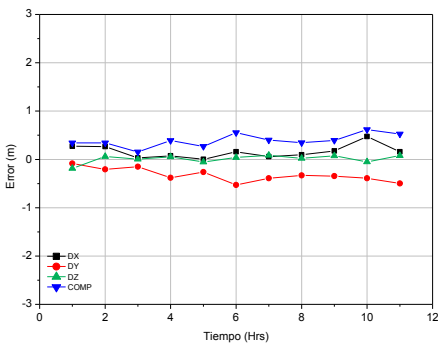


Figura 124. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 175)

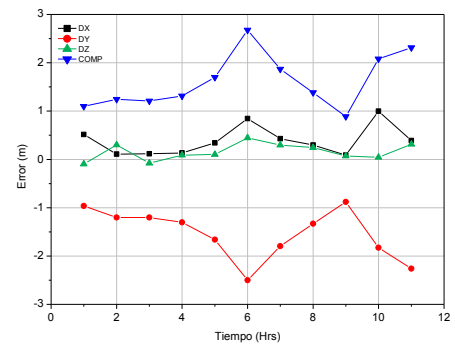


Figura 125. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 175)

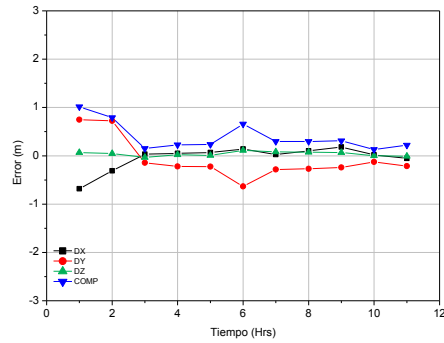


Figura 126. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 176)

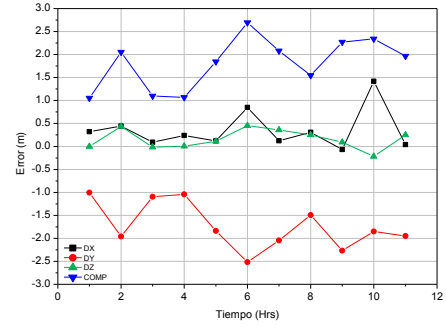


Figura 127. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 176)

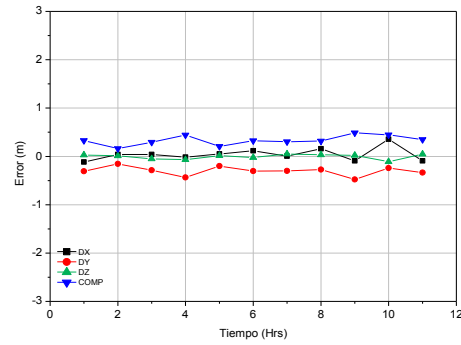


Figura 128. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 177)

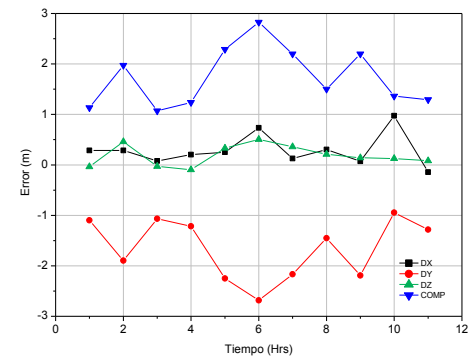


Figura 129. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 177)

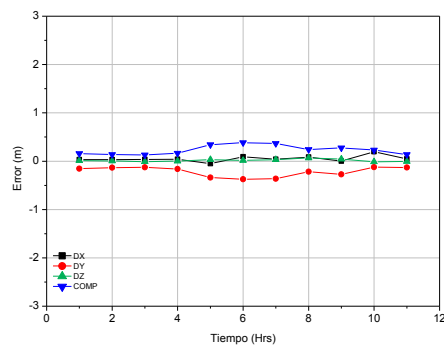


Figura 130. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 180)

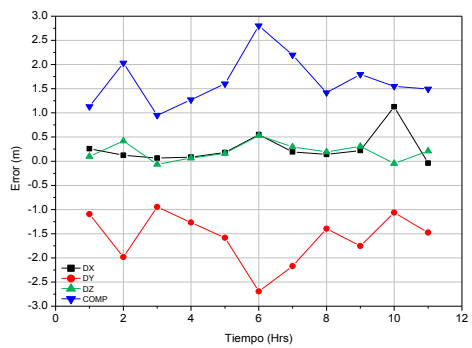


Figura 131. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 180)

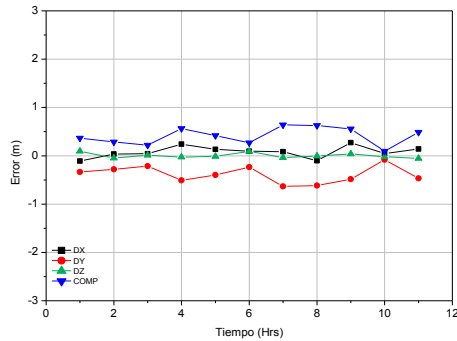


Figura 132. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 195)

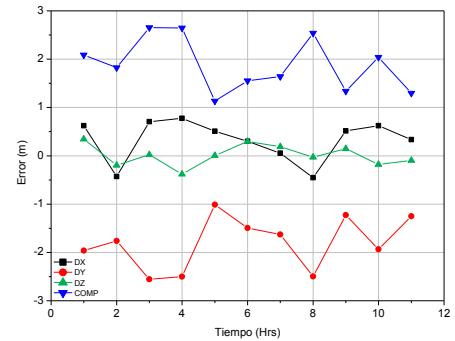


Figura 133. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 195)

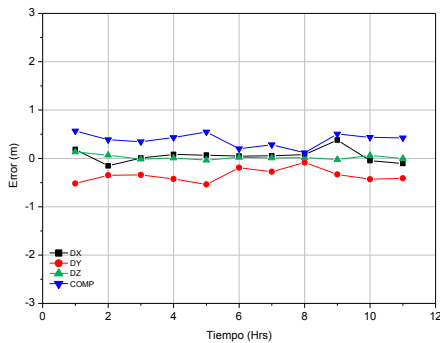


Figura 134. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 200)

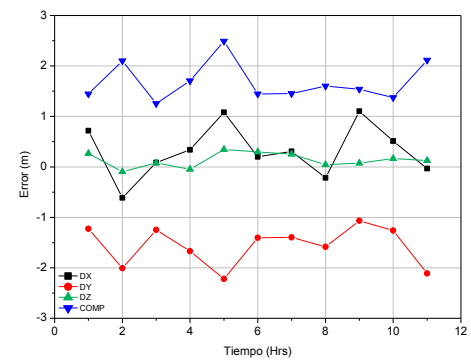


Figura 135. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Humedad. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 200)

El procesamiento de datos variando la temperatura se realizó de dos maneras: variando la temperatura cada dos horas, y dejando constante la temperatura durante todas las horas. Con el primero, la variabilidad promedio total en la línea base BUEN_CALI es de 2.500 m, y para la línea base CALI_BUEN es de 17.600 m, con ambos modelos. En el segundo procesamiento, la variabilidad promedio total en la línea base BUEN_CALI es de 3.229 m, y en la línea base CALI_BUEN es de 19.000 m.

Las precisiones adquiridas, en ambos procesamientos, hacen ver que no vale la pena cambiar las temperaturas cada hora, ya que los errores están en un orden de magnitud muy cercano, además el comportamiento de las variaciones en cada componente son iguales, como se puede apreciar en las figuras 136-139.

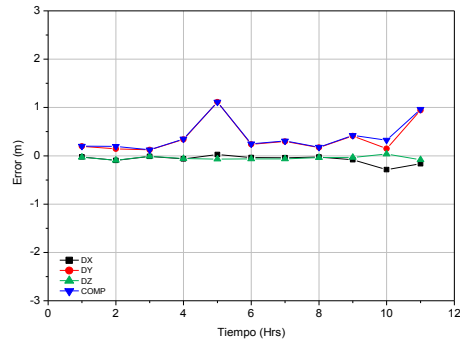


Figura 136. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Hopfield.(día 172)

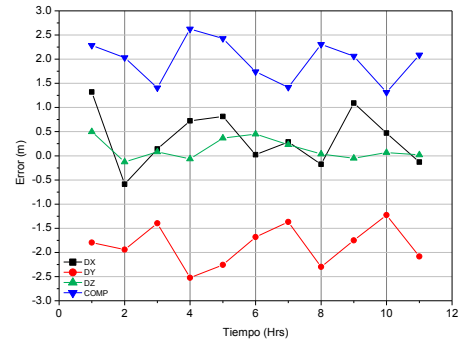


Figura 137. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. CALI_BUEN. Hopfield.(día 172)

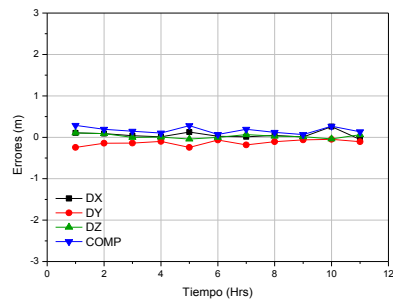


Figura 138. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, variando temperatura cada hora. BUEN_CALI. Hopfield.(día 172)

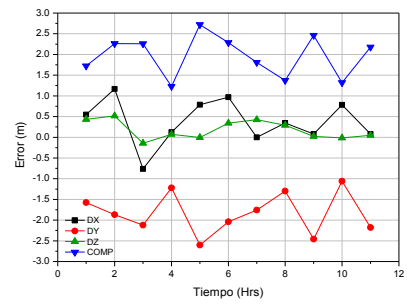


Figura 139. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, variando temperatura cada hora. CALI_BUEN. Hopfield.(día 172)

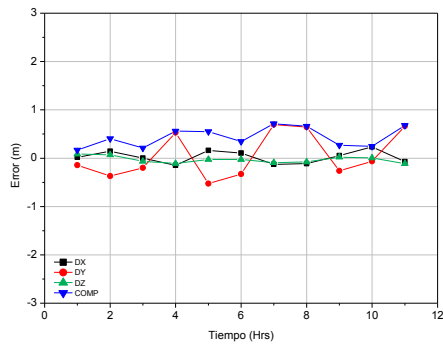


Figura 140. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Hopfield.(día 173)

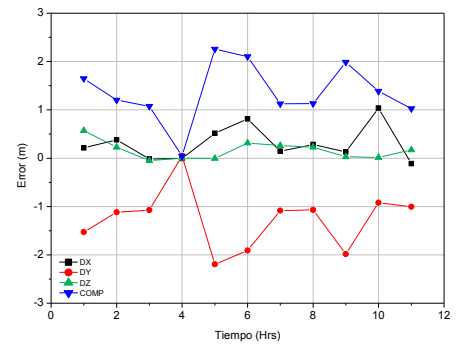


Figura 141. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. CALI_BUEN. Hopfield.(día 173)

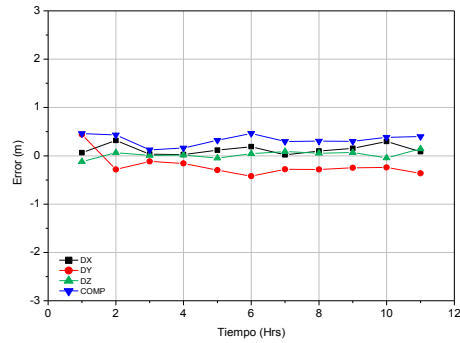


Figura 142. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Hopfield.(día 175)

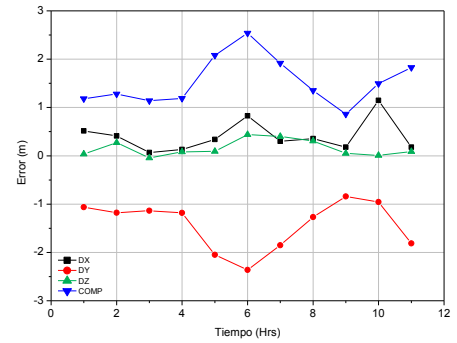


Figura 143. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. CALI_BUEN. Hopfield.(día 175)

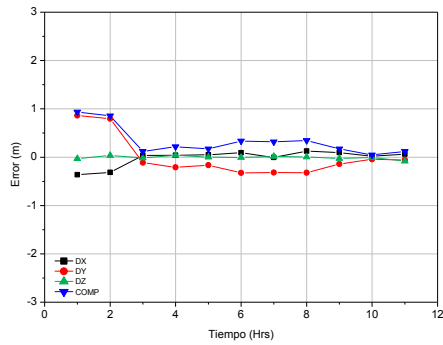


Figura 144. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Hopfield.(día 176)

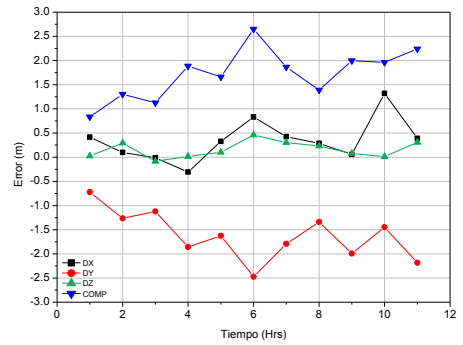


Figura 145. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. CALI_BUEN. Hopfield.(día 176)

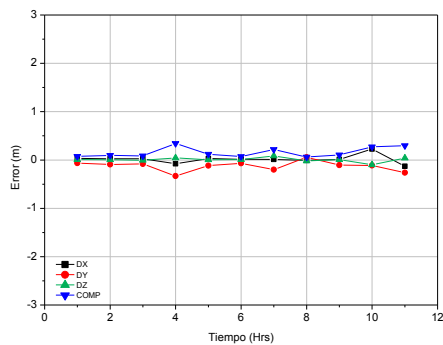


Figura 146. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Hopfield.(día 177)

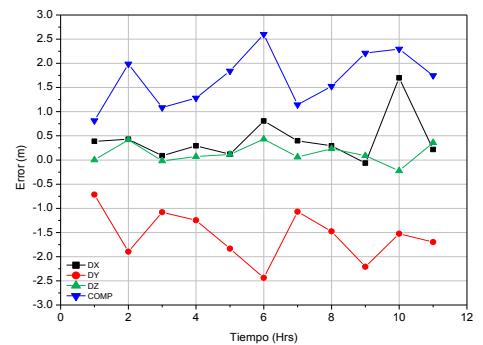


Figura 147. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. CALI_BUEN. Hopfield.(día 177)

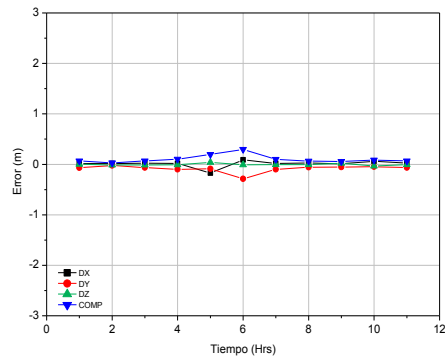


Figura 148. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Hopfield.(día 180)

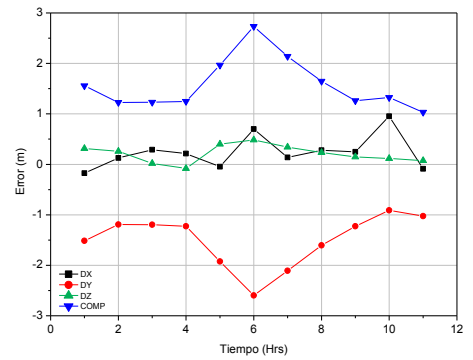


Figura 149. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. CALI_BUEN. Hopfield.(día 180)

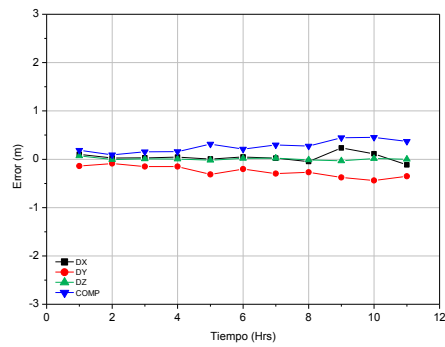


Figura 150. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Hopfield.(día 195)

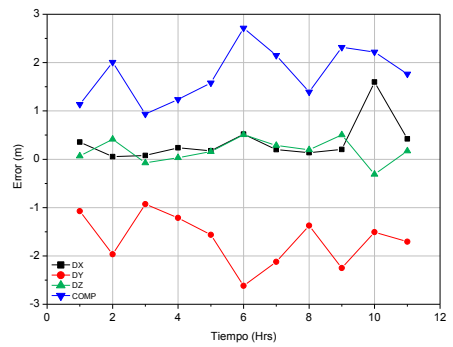


Figura 151. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. CALI_BUEN. Hopfield.(día 195)

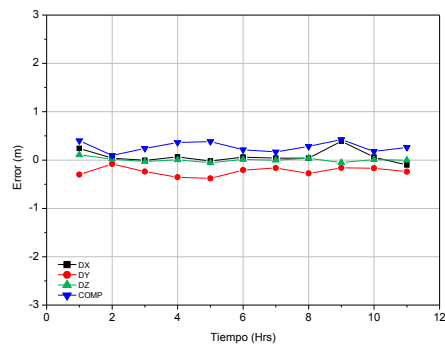


Figura 152. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Hopfield.(día 200)

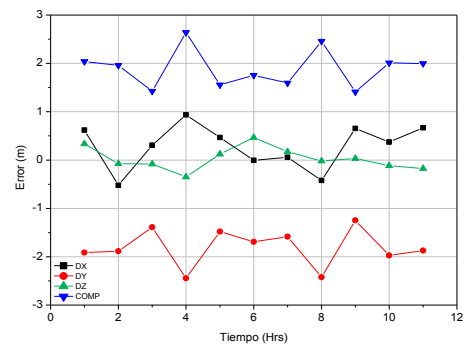


Figura 153. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. CALI_BUEN. Hopfield.(día 200)

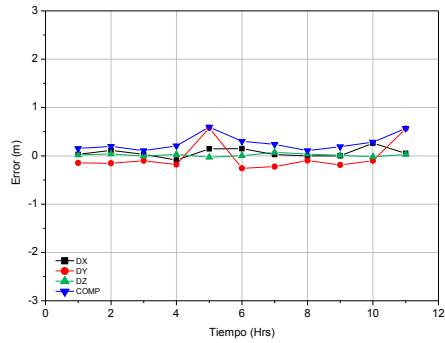


Figura 154. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 172)

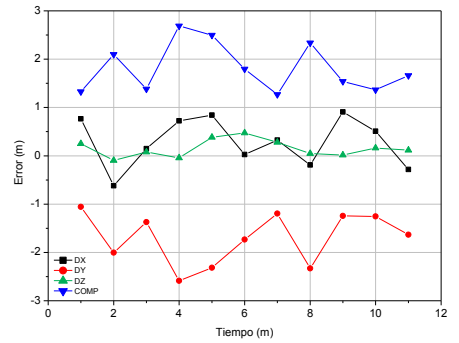


Figura 155. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 172)

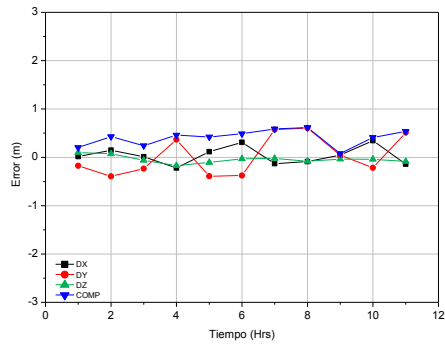


Figura 156. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 173)

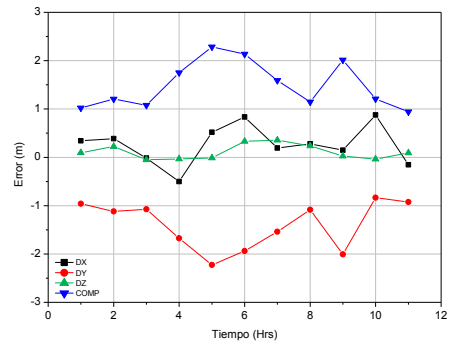


Figura 157. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 173)

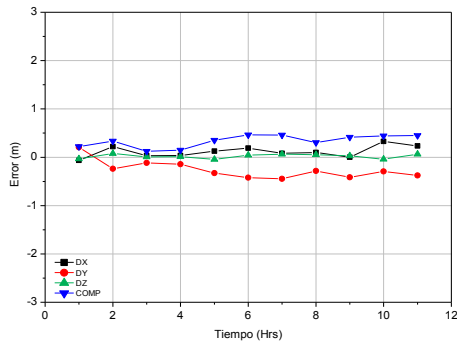


Figura 158. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 175)

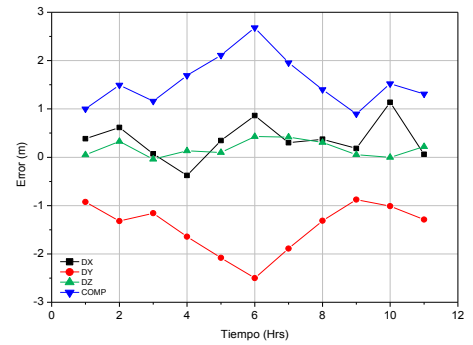


Figura 159. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 175)

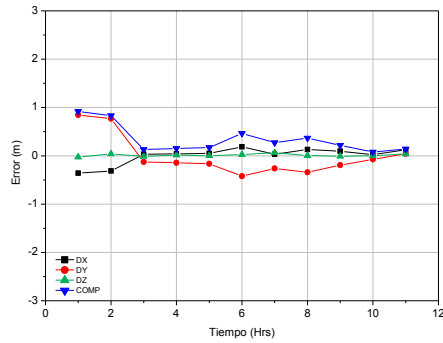


Figura 160. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 176)

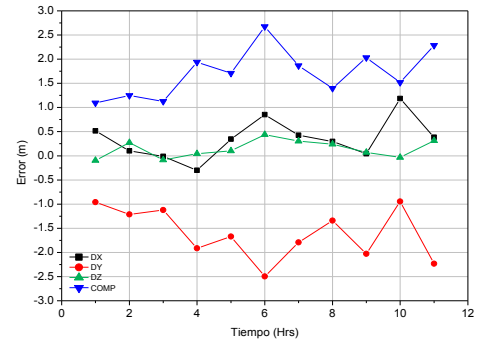


Figura 161. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 176)

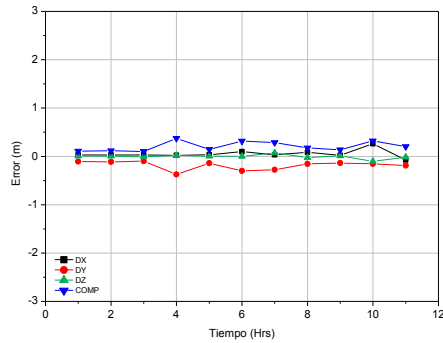


Figura 162. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 177)

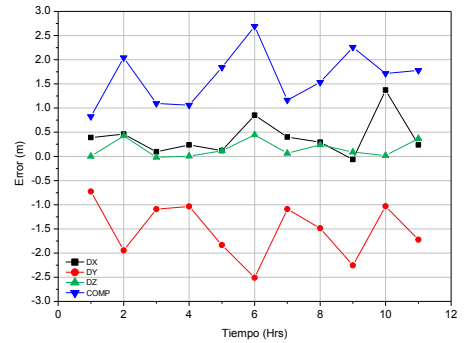


Figura 163. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 177)

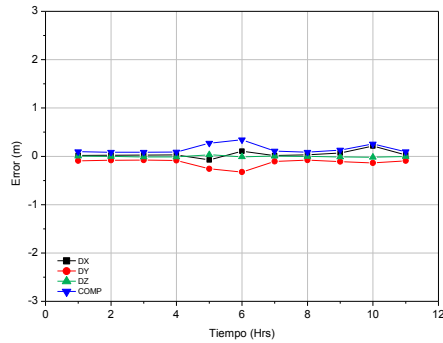


Figura 164. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 180)

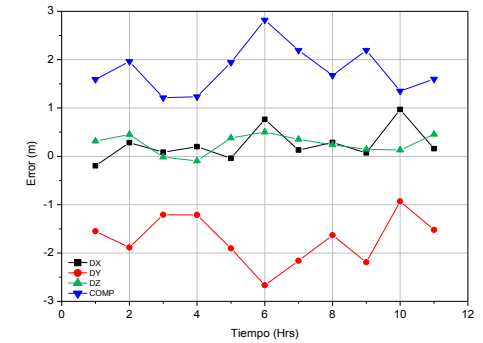


Figura 165. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 180)

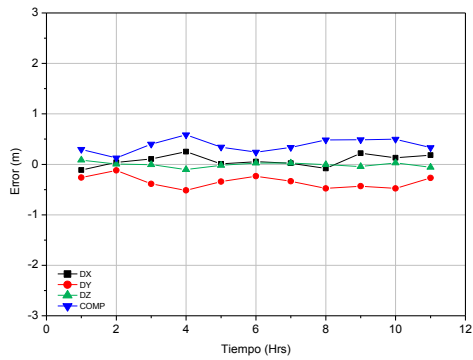


Figura 166. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 195)

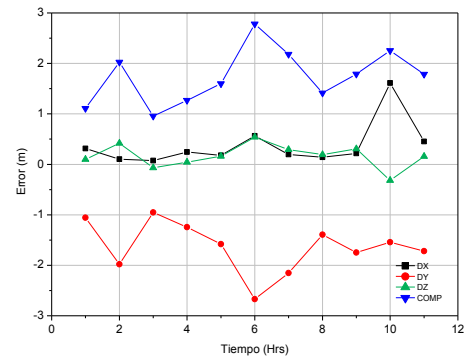


Figura 167. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 195)

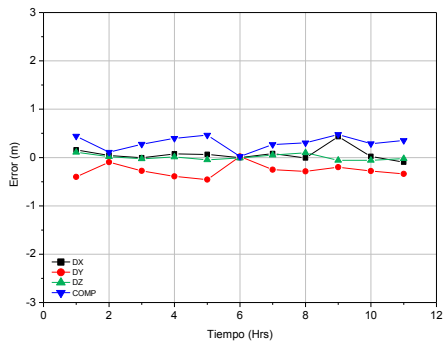


Figura 168. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. BUEN_CALI. Saastamoinen.(día 200)

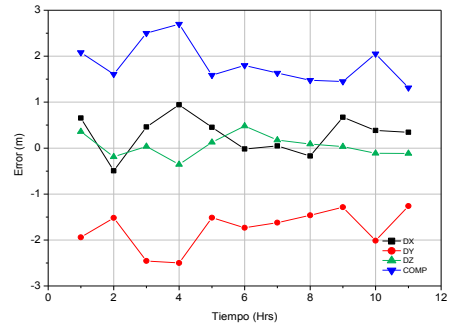


Figura 169. Error Posicional vs Intervalos de tiempo, Temperatura. CALI_BUEN. Saastamoinen.(día 200)

7. CONCLUSIONES

- ✓ Para el procesamiento comercial de acuerdo con los resultados obtenidos, en las observaciones menores a dos horas, donde la estación no cuenta con datos de presión, humedad relativa y temperatura, se recomienda trabajar con los valores que trae el software por defecto para cada modelo troposférico, pero, si el método de observación es de modo estático (observaciones de todo un día), es aconsejable utilizar variables meteorológicas promedio del día, sean o no tomadas en la estación de observación, ya que la precisión no se ve afectada.
- ✓ Aunque al procesar con el modelo de Hopfield y Saastamoinen no se aprecia diferencias significativas en las precisiones obtenidas, se recomienda en lo sucesivo al procesamiento con software comercial, utilizar el modelo troposférico de Saastamoinen, pues además de arrojar precisiones mayores que Hopfield, éste no depende tanto de la altura de la estación, lo que puede permitir atenuar los errores, cuando no se cuente con valores de humedad relativa, presión y temperatura en la estación de observación.
- ✓ El cambio en las precisiones obtenidas en cada línea base, variando los valores de humedad relativa y temperatura, en cada modelo troposférico evaluado, indica que una de las estaciones de observación cuenta con el valor de la variable meteorológica adecuada, mientras que se carece de ésta en la otra estación, ocasionando un mayor error al realizar el ajuste.
- ✓ La línea base CALI_BUEN presenta las mayores variaciones en las precisiones obtenidas, lo cual se debe a que los valores ingresados para el cálculo de las coordenadas de Buenaventura no son los adecuados, y a otros errores difíciles de controlar por el observador (multipath, saltos de ciclos, etc).
- ✓ Las variaciones obtenidas cambiando la presión atmosférica, se encuentran en el mismo orden que cuando se realiza el procesamiento con los valores que trae el software, por defecto, ya que las presiones manejadas quedan cerca a la presión atmosférica normalizada que maneja el software.
- ✓ Las mayores variaciones se presentan en la componente Y, independientemente de la configuración que se haya tenido a la hora de realizar el procesamiento. Lo anterior causa inquietud, pues la troposfera

afecta principalmente la determinación de alturas (componente z, en coordenadas cartesianas, WGS84), existe incluso “una regla general” donde dice que 1 mm del sesgo troposférico diferencial causa un error en la altura cerca de 3 mm. (Beutler et al 1989). De acuerdo con esto, los resultados obtenidos impulsan a pensar que cuando se realiza el ajuste de las líneas base para el cálculo de las coordenadas, al ingresar al punto de control las coordenadas verdaderas (coordenadas MAGNA ECO), se está generando una restricción para el ajuste, obligando a que todos los errores se distribuyan en función de dicha restricción, generando un sesgo detectable al analizar de forma individual cada posición, pero con respecto a la red presentan una posición adecuada, así, si las coordenadas presentan un sesgo en alguna de las componentes, igualmente el resultado del cálculo de las coordenadas presentará este sesgo. En los resultados obtenidos al ser la componente Y la de mayor error, indica que en esta componente se presenta un sesgo, haciendo que durante todo el procesamiento los mayores errores se presenten en esa componente

- ✓ Para identificar el comportamiento que tiene cada una de las variables meteorológicas en los modelos troposféricos Saastamoinen y Hopfield, se debe trabajar con software científico, ya que con el software comercial no se sabe con qué aproximación de los modelos se está trabajando.
- ✓ La falta de disponibilidad de datos con las características requeridas, afectó el desarrollo del proyecto como se tenía previsto.

8. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda hacer otros estudios durante diferentes temporadas del año, buscando que haya condiciones atmosféricas diferentes, para analizar cómo el comportamiento de la troposfera afecta de acuerdo a la temporada, las precisiones en el posicionamiento GPS.
- ✓ Para el posicionamiento de redes no geodésicas que requieren buena precisión, los valores por defecto de humedad relativa, presión atmosférica y temperatura, para los modelos troposféricos en el software Trimble Total Control, son adecuados para realizar y obtener calidad en el procesamiento de datos GPS.

9. BIBLIOGRAFÍA

A. J. Coster, et al., "Ionospheric and tropospheric path delay obtained from GPS integrated phase, incoherent scatter and refractometer data and from IRI-86," *Advances in Space Research*, vol. 10, pp. 105-108, 1990.

A. Walpersdorf, et al., "Assessment of GPS data for meteorological applications over Africa: Study of error sources and analysis of positioning accuracy," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 69, pp. 1312-1330, 2007

C. Satirapod and P. Chalermwattanachai, "Impact of Different Tropospheric Models on GPS Baseline Accuracy: Case Study in Thailand", *Journal of Global Positioning Systems*, vol. 4, pp. 36-40, 2005.

J. Dousa, "Evaluation of tropospheric parameters estimated in various routine GPS analysis," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 29, pp. 167-175, 2004.

J. Jack Wang, J Wang, "Tropospheric Delay Estimation for Pseudolite Positioning", *Journal of Global Positioning Systems*, vol. 4, pp. 106-112, 2005.

K. Hocke and A. G. Pavelyev, "General aspect of GPS data use for atmospheric science," *Advances in Space Research*, vol. 27, pp. 1313-1320, 2001.

O. Bock and E. Doerflinger, "Atmospheric modeling in GPS data analysis for high accuracy positioning," *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, vol. 26, pp. 373-383, 2001.

O. Croitoru and M. Alexandru, "Propagation effects in GPS accuracy. The precisionimprovement of positioning in real conditions ofPropagation", *Electronic and Computers Department, "Transilvania" University of Braşov*, 2004.

Q. Wei-jing, et al., "Evaluation of the Precision of ThreeTropospheric Delay Correction Models", *Chinese Astronomy and Astrophysics*, vol 32, pp. 429-438, 2008.

M.V MackernOberti, "Materialización de un Sistema de Referencia Geocéntrico de alta precisión mediante observaciones GPS", *San Fernando del Valle de Catamarca*, 2003, 246p, Tesis doctoral, Universidad Nacional de Catamarca, Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas.

B. Witchayangkoon, “ Elements of GPS precise pointpositioning”, Orono, 2000, Tesis doctoral, Universidad de Maine.

J.A Eslava Ramirez, “Regimen de la presión atmosférica en Colombia”, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 149p,NOV 1995.

Colegio de Postgraduados, “Varios métodos de estimación de temperaturas horarias” {En línea}. {14abril de 2010} disponible en: <http://www.cm.colpos.mx/meteoro/progde/agm/frio1.htm>

GLOSARIO

Ambigüedad

Número entero de ciclos desconocidos de la fase portadora reconstruida, presentes en una serie de mediciones continuas, de un solo paso de satélite en un mismo receptor.

Ángulo Cenital

Ángulo vertical con un valor de 0° sobre el horizonte y 90° directamente sobre el usuario.

Ángulo de Elevación

Ángulo de elevación mínima por debajo del cual el sensor no rastrea ningún satélite GPS.

Efemérides

Lista de posiciones o ubicaciones de un objeto celeste en función del tiempo.

Entalpía

("calentar") es una magnitud termodinámica, cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno.

GPS

Sistema de Posicionamiento Global

Línea Base

Longitud del vector tridimensional entre un par de estaciones en las que se han registrado simultáneamente datos GPS y se procesan con técnicas diferenciales.

Proceso Politrópico

Se da cuando un fluido gaseoso se expande o comprime de manera tal que la presión y el volumen cambian proporcionalmente de forma tal que $PV^n=C$. Donde C y n son constantes.

Rango

Término empleado en navegación para referirse a la longitud de la trayectoria entre dos puntos. Normalmente, esta trayectoria es el círculo máximo o la línea de rumbo.

RINEX

Siglas de Receiver INdependent Exchange format. Conjunto de definiciones y formatos estándar para promover el libre intercambio de datos GPS.

Seudorangeo

Medición del tiempo de propagación de la señal aparente de un satélite a una antena receptora, referido en distancia dividida entre la velocidad de la luz. El tiempo de propagación aparente es la diferencia entre el momento de la recepción de la señal (medido en el receptor) y el tiempo de emisión (medido por el satélite). El seudorangeo difiere del intervalo actual por la influencia del reloj

ANEXOS

ANEXO A

EJEMPLO FORMATOS DE CONTROL

BUEN-CALI								
MODELO TROPOSFERICO HOPFIELD- VARIANDO PRESIÓN PUNTO DE CONTROL								
ESTACIÓN FIJA	X SIRGAS	Y SIRGAS	Z SIRGAS	DIA GPS	FECHA			
BUEN	1430383.860	-6200818.174	428934.002	200	Julio 19 de 2007			
EST CALCULADA	X SIRGAS	Y SIRGAS	Z SIRGAS					
CALI	1483099.943	-6193060.194	373124.079					
Intervalo de tiempo(Hrs)	X GPS	DX	Y GPS	DY	Z GPS	DZ	COMPUESTO	SOLUCIÓN
0-2	1483100.021	0.078	-6193060.297	-0.103	373124.1431	0.064	0.144	Dif. Doble / Fija / Lc
2-4	1483099.961	0.018	-6193060.181	0.013	373124.0903	0.012	0.025	Dif. Doble / Fija / Lc
4-6	1483099.937	-0.006	-6193060.193	0.001	373124.072	-0.007	0.009	Dif. Doble / Fija / Lc
6-8	1483099.953	0.010	-6193060.225	-0.031	373124.0692	-0.010	0.034	Dif. Doble / Fija / Lc
8-10	1483099.816	-0.127	-6193060.407	-0.214	373124.0691	-0.010	0.248	Dif. Doble / Fija / Lc
10-12	1483099.954	0.012	-6193060.221	-0.027	373124.0772	-0.002	0.030	Dif. Doble / Fija / Lc
12-14	1483099.949	0.006	-6193060.232	-0.038	373124.0839	0.005	0.038	Dif. Doble / Fija / Lc
14-16	1483099.921	-0.021	-6193060.395	-0.201	373124.0412	-0.038	0.206	Dif. Doble / Flotante / Lc
16-18	1483100.141	0.198	-6193060.205	-0.011	373124.0349	-0.044	0.203	Dif. Doble / Flotante / Lc
18-20	1483099.965	0.022	-6193060.221	-0.027	373124.069	-0.010	0.036	Dif. Doble / Fija / Lc
20-22	1483099.99	0.048	-6193060.218	-0.024	373124.0475	-0.031	0.062	Dif. Doble / Fija / Lc
SUMATORIA		0.238		-0.661		-0.069	1.036	
CALI-BUEN								
MODELO TROPOSFERICO HOPFIELD- VARIANDO PRESIÓN PUNTO DE CONTROL								
EST CALCULADA	X SIRGAS	Y SIRGAS	Z SIRGAS	DIA GPS	FECHA			
BUEN	1430383.860	-6200818.174	428934.002	200	Julio 19 de 2007			
ESTACIÓN FIJA	X SIRGAS	Y SIRGAS	Z SIRGAS					
CALI	1483099.943	-6193060.194	373124.079					
Intervalo de tiempo(Hrs)	X GPS	DX	Y GPS	DY	Z GPS	DZ	COMPUESTO	SOLUCIÓN
0-2	1430384.172	0.312	-6200818.542	-0.367	428934.1202	0.118	0.496	Dif. Doble / Fija / Lc
2-4	1430383.891	0.030	-6200818.579	-0.405	428933.9437	-0.059	0.411	Dif. Doble / Fija / Lc
4-6	1430383.629	-0.232	-6200818.854	-0.680	428934.0786	0.076	0.722	Dif. Doble / Flotante / Lc
6-8	1430384.059	0.199	-6200818.772	-0.598	428934.0448	0.043	0.631	Dif. Doble / Fija / Lc
8-10	1430384.224	0.363	-6200818.792	-0.618	428934.1104	0.108	0.725	Dif. Doble / Flotante / Lc
10-12	1430383.937	0.076	-6200818.605	-0.431	428934.172	0.170	0.470	Dif. Doble / Fija / Lc
12-14	1430383.902	0.041	-6200818.451	-0.277	428934.0312	0.029	0.281	Dif. Doble / Fija / Lc
14-16	1430383.888	0.027	-6200818.617	-0.443	428934.0626	0.060	0.448	Dif. Doble / Fija / Lc
16-18	1430384.145	0.285	-6200818.647	-0.473	428934.024	0.022	0.552	Dif. Doble / Fija / Lc
18-20	1430384.004	0.143	-6200818.812	-0.637	428934.0621	0.060	0.656	Dif. Doble / Flotante / Lc
20-22	1430384.043	0.183	-6200818.62	-0.445	428933.956	-0.046	0.484	Dif. Doble / Fija / Lc
SUMATORIA		1.428		-5.374		0.581	5.876	
BUEN-CALI								
MODELO TROPOSFERICO SAASTAMOINEN - VARIANDO HUMEDAD PUNTO DE CONTROL								
ESTACIÓN FIJA	X SIRGAS	Y SIRGAS	Z SIRGAS	DIAGPS	FECHA			
BUEN	1430383.860	-6200818.171	428934.001	176	Junio 25 de 2007			
EST CALCULADA	X SIRGAS	Y SIRGAS	Z SIRGAS					
CALI	1483099.943	-6193060.194	373124.077					
Intervalo de tiempo(Hrs)	X GPS	DX	Y GPS	DY	Z GPS	DZ	COMPUESTO	SOLUCIÓN
0-2	1483099.263	-0.680	-6193059.445	0.749	373124.1461	0.069	1.014	Dif. Doble / Flotante / Lc
2-4	1483099.631	-0.312	-6193059.471	0.723	373124.1237	0.047	0.789	Dif. Doble / Fija / Lc
4-6	1483099.976	0.033	-6193060.339	-0.145	373124.0431	-0.034	0.152	Dif. Doble / Fija / Lc
6-8	1483099.993	0.049	-6193060.415	-0.222	373124.1009	0.024	0.228	Dif. Doble / Fija / Lc
8-10	1483100.011	0.068	-6193060.417	-0.223	373124.0865	0.009	0.233	Dif. Doble / Fija / Lc
10-12	1483100.084	0.140	-6193060.827	-0.634	373124.1884	0.111	0.659	Dif. Doble / Flotante / Lc
12-14	1483099.969	0.026	-6193060.477	-0.284	373124.1598	0.083	0.297	Dif. Doble / Fija / Lc
14-16	1483100.044	0.101	-6193060.463	-0.269	373124.1521	0.075	0.297	Dif. Doble / Fija / Lc
16-18	1483100.127	0.183	-6193060.435	-0.241	373124.1448	0.068	0.311	Dif. Doble / Fija / Lc
18-20	1483099.963	0.020	-6193060.322	-0.128	373124.0785	0.001	0.129	Dif. Doble / Fija / Lc
20-22	1483099.888	-0.055	-6193060.407	-0.213	373124.0696	-0.007	0.220	Dif. Doble / Fija / Lc
SUMATORIA		-0.427		-0.886		0.446	4.329	

ANEXO B

PROTOCOLO EXPERIENTIAL DISEÑADO

A continuación se presenta las configuraciones en las opciones de procesamiento del software Trimble Total Control, realizadas para cada una de las líneas base.

1. Creación de un nuevo proyecto

Se selecciona la plantilla por defecto y se guarda el proyecto con el nombre correspondiente a las estaciones que se están procesando, siendo la primera el punto de control, seguido con el numero del inicio del intervalo de tiempo, ejemplo: línea base BUEN-CALI, el nombre del proyecto seria buencali6, línea base BUEN-CALI, intervalo de tiempo de 6 a 8 horas (ya que el intervalo de los archivos Rinex es cada dos horas).

2. Selección del sistema de coordenadas

Se elige grupo de sistemas de coordenadas Colombia, zona oeste y modelo geoidal EGM96 (Global).

3. Importación de datos

Se realiza la importación de los archivos Rinex (*.O, *.N), en el cual se debe introducir la referencia del equipo utilizado en la estación (antena y receptor) y verificar la altura de la antena, estos datos se comprueban con el archivo de integridad del Rinex. También se importan las efemérides precisas.

4. Proceso/configuraciones

- Parámetro

Tipo de órbita preciso, ya que se utilizarán efemérides precisas, el resto se deja por defecto.

- Procesador

Estático, el resto por defecto.

- Tiempos
(Default), ya que el software toma como intervalo de tiempo las dos horas que tiene el archivo Rinex.

- Sats. GPS, Sats. GNL

(Default)

- Filtrar

Utilizar las siguientes soluciones: Flot./Lc y Fijo./Lc. Se utiliza la combinación Lc, porque es la combinación de fase portadora libre de efectos ionosféricos.

- Opciones de línea

(Default)

- Tropo/Meteo

Se elige como modelo meteorológico el Estándar US, y el modelo troposférico va cambiando a medida que cada uno se va evaluando; nótese que los valores de temperatura, presión y humedad por defecto que el software presenta son 293 K, 1013.0 hPa y 50%, respectivamente.

- Avanzado

Lo único que se cambia es el valor del test Fisher, ya que la posibilidad de una solución fija de ambigüedad es limitada por la razón mínima requerida de varianzas del test. Cambiando este valor se aumenta la probabilidad que fije las ambigüedades. El valor mínimo a utilizar es 1.

5. Asignación de coordenadas reales al punto de control

Se ingresa a las propiedades del punto que se requiere sea de control, y se introducen sus coordenadas X, Y, Z reales, finalmente asignar. El software toma las coordenadas empleadas para el procesamiento de la siguiente manera:

X
Coordenada WGS 84 X

E
Coordenada WGS 84 Y

H

Coordenada WGS 84 Z

Lo anterior se presenta con el fin de evitar confusiones a la hora de obtener y analizar los resultados (rotaciones, errores no esperados en las componentes, etc)

6. Proceso/Generar Efemérides

7. Proceso/Procesar el proyecto

Tras procesar una línea-base, Trimble Total Control provee la calidad de la estimación de línea-base GPS dentro de la traza del proyecto. Se emplea una indicación basada en los colores del semáforo:

Verde: línea-base procesada con éxito, se han fijado ambigüedades;

Amarillo: línea-base procesada con éxito, no se han fijado ambigüedades, desviación estándar menor de "x" milímetros;

Rojo: reducción de línea-base sin éxito: no se han fijado ambigüedades, desviación estándar mayor de "x" milímetros. Esta línea-base precisa de un mayor análisis.

"x" es el número dado como "Posición sigma máximo" en la ventana Opciones de procesamiento, página Avanzado.

Las líneas-base rojas indican sólo que el error estándar computado para la línea-base supera el sigma máximo de posición (por defecto: 20mm). Las líneas-base de gran longitud se marcan a menudo de color rojo

Criterios de escrutinio

Se efectúa un escrutinio de las observaciones a fin de encontrar los mejores intervalos para la resolución de ambigüedades. Los criterios son el número de satélites observados, la longitud del intervalo y el valor PDOP.

- Restricciones de tiempo
 - Eliminar siempre los inicios de la toma (5 minutos iniciales).
 - Eliminar períodos en los cuales no exista cobertura de alguno de los dos satélites.
 - Eliminar periodos de observación que presenten frecuentes cortes por periodos mayores a 10 minutos.

Restricciones de satélites

- Eliminar satélites que tengan menos del 50% de cobertura.
- Eliminar satélites que no tengan datos.
- Eliminar satélites que tengan un porcentaje de ruido mayor al 50%.

Ajustar

Se realiza un ajuste 3D con tendencia, ya que este ajuste en el sistema WGS84, es limitado por los puntos de control. Al efectuarse se guarda el informe.