



**ESPE**  
**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**Comparación de las coordenadas obtenidas por el Método Procesamiento de Punto Preciso (PPP) obtenidas en el software libre RTKLIB versus software científico BERNESE para determinar su aplicación en proyectos de obras civiles**

Pozo Ortega, Sheslly Dayanna

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención de título de Ingeniera Geógrafa y del Medio Ambiente

Ing. Luna Ludeña, Marco Patricio, PhD

07 marzo del 2023



CERTIFICADO DE ANÁLISIS  
magister

## TESIS SHESLLY POZO

< 1% Similitudes  1% Texto entre comillas  
0% similitudes entre comillas  
1% Idioma no reconocido

Nombre del documento: TESIS SHESLLY POZO.pdf  
ID del documento: 323c878a284c340205ccc9044b1d64589d887c84  
Tamaño del documento original: 3,4 Mo

Depositante: WILSON OSWALDO JÁCOME ENRÍQUEZ  
Fecha de depósito: 1/3/2023  
Tipo de carga: interface  
fecha de fin de análisis: 1/3/2023

Número de palabras: 16.616  
Número de caracteres: 107.574

Ubicación de las similitudes en el documento:



Firmado electrónicamente por:  
MARCO PATRICIO LUNA  
LUDEÑA

ING. MARCO PATRICIO LUNA LUDEÑA, Ph.D.



**Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción**

**Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente**

### **Certificación**

Certifico que el trabajo de titulación: **“Comparación de las coordenadas obtenidas por el Método Procesamiento de Punto Preciso (PPP) obtenidas en el software libre RTKLIB versus software científico BERNESE para determinar su aplicación en proyectos de obras civiles”** fue realizado por la señorita Pozo Ortega, Shesly Dayanna; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 17 de mayo de 2023**



Firmado electrónicamente por:  
MARCO PATRICIO LUNA  
LUDENA

.....  
**Ing. Luna Ludeña, Marco Patricio, PhD**

C.C:1102596044



**Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción**

**Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente**

**Responsabilidad de autoría**

Yo, Pozo Ortega, Sheslly Dayanna, con cédula de ciudadanía 0402036917, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación **“Comparación de las coordenadas obtenidas por el Método Procesamiento de Punto Preciso (PPP) obtenidas en el software libre RTKLIB versus software científico BERNESE para determinar su aplicación en proyectos de obras civiles”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, respetando los derechos intelectuales y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 17 de mayo del 2023**

**Pozo Ortega, Sheslly Dayanna**

C.C: 0402036917



**Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción**

**Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente**

**Autorización de publicación**

Yo, Pozo Ortega, Sheslly Dayanna, con cédula de ciudadanía 0402036917, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, publicar el trabajo de titulación “**Comparación de las coordenadas obtenidas por el Método Procesamiento de Punto Preciso (PPP) obtenidas en el software libre RTKLIB versus software científico BERNESE para determinar su aplicación en proyectos de obras civiles**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 17 de mayo del 2023**

A handwritten signature in blue ink that reads 'Sheslly Pozo Ortega'. The signature is written over a horizontal dotted line.

**Pozo Ortega, Sheslly Dayanna**

C.C: 0402036917

### **Dedicatoria**

A Dios por ser mi fortaleza en momentos de debilidad y por guiarme a largo de mi carrera.

A Amparito y Rodrigo, mis maravillosos padres, por su interminable cariño y paciencia, quienes con su esfuerzo me han permitido cumplir hoy un sueño más.

A mi mamita Luz Mila, por ser mi gran tesoro, por llenarme de amor y cariño desde que era muy pequeña, por ser el ejemplo más grande de valentía y generosidad.

A mis hermanas Karen y Yecenia, por su apoyo incondicional, y por ser mis ejemplos a seguir.

## **Agradecimiento**

Agradezco a Dios por su inmenso amor, por haberme brindado una vida llena de experiencias y aprendizajes, que ha hecho posible todos mis logros a lo largo de mi vida.

Agradezco a mis padres, el tesoro más preciado que tengo, gracias por su apoyo en todo momento, quienes han sido mi soporte en cada instante de dificultad, gracias a ellos por confiar y creer en mí.

Quiero expresar mi gratitud a mi director de tesis Dr. Marco Luna, por ser una guía durante la realización de este proyecto, su ejemplo como profesional y como persona sin duda alguna será una guía en mi futuro camino.

Agradezco a mi director de carrera Ing Alexander Robayo por su constante apoyo durante mi estancia en la Universidad.

A mis amigos de la universidad, que han hecho de esta etapa una de las más bonitas.

Finalmente, a mi amuleto de la buena suerte, mi fiel compañera durante todas las noches de desvelo, que solo bastaba verte dormida en mi cama para no sentirme sola y trabajar a gusto. Gracias Rafaela.

## Índice de contenido

Verificación de similitud .....	2
Certificación .....	2
Responsabilidad de autoría .....	4
Autorización de publicación .....	5
Dedicatoria .....	6
Agradecimiento .....	7
Índice de contenido .....	8
Índice de Tablas .....	11
Índice de Figuras .....	13
Resumen .....	15
Abstract .....	16
Capítulo I: Introducción .....	17
Antecedentes .....	17
Planteamiento Del Problema .....	18
Justificación e Importancia .....	19
Objetivo General .....	21
Objetivos Específicos .....	21
Capítulo II: Marco Teórico .....	22
GNSS Sistema Global de Navegacion por Satelite .....	22
Sistema de Posicionamiento Global GPS .....	22
GALILEO .....	23
Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME) .....	24
Método Absoluto PPP (Posicionamiento de Punto Preciso) .....	25
Correcciones para el método PPP .....	28
Corrección de mareas terrestres .....	28
Corrección de cargas oceánicas .....	28
Deformación rotacional debido al movimiento polar .....	28
Parámetros de rotación de la tierra (ERP) .....	29
Correcciones del desfase de los relojes del satélite .....	29
Corrección de la variación del centro de fase de las antenas de los receptores .....	29
Fase de Wind-up .....	30
Corrección Sesgo diferencial del código .....	31
Refracción ionosférica .....	31

Refracción troposférica.....	32
Tipos de PPP .....	32
PPP en postproceso .....	32
PPP en tiempo real.....	33
PPP estático.....	33
PPP cinemático.....	33
Efemérides GPS .....	33
Software RTKLIB .....	35
Funciones y aplicaciones.....	36
RTKLAUNCH .....	36
RTKPOST .....	37
RTKNAVI.....	37
RTKCONV.....	37
STRSVR.....	37
RTKPLOT.....	37
RTKGET .....	38
NTRIP Browser .....	38
Software BERNESE.....	38
Trimble RTX.....	39
Exactitud posicional para obras civiles.....	41
Capítulo III: Metodología.....	43
Selección de las Estaciones de Monitoreo Continuo de la REGME .....	44
Validación y tratamiento de datos .....	46
Recopilación de archivos satelitales. ....	46
Tratamiento de datos nativos .....	46
Descarga de archivos de corrección .....	47
Procesamiento del método (PPP) en el software RTKLIB .....	48
Procesamiento del método (PPP) constelación GPS .....	49
Procesamiento del método (PPP) constelación Galileo .....	54
Procesamiento del método (PPP) combinación GPS + Galileo .....	55
Comparación con coordenadas de precisión y análisis estadístico .....	57
Validación en campo .....	58
Capítulo IV: Análisis De Resultados.....	59
Análisis de los diferenciales obtenidos mediante la comparación de coordenadas de la estación EPEC, procesadas con la constelación GPS.....	61

<i>Resumen estadístico descriptivo de las coordenadas obtenidas mediante el método PPP de la estación</i> .....	63
Análisis del Error cuadrático medio (RMSE) de los diferenciales $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ (Constelación GPS).....	66
Análisis de los diferenciales obtenidos mediante la comparación de coordenadas de la estación EPEC, procesadas con la constelación Galileo.....	70
<i>Resumen estadístico descriptivo de las coordenadas obtenidas mediante el método PPP de la estación</i> .....	72
Análisis del Error cuadrático medio (RMSE) de los diferenciales $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ (Constelación Galileo).....	75
Análisis de los diferenciales obtenidos mediante la comparación de coordenadas de la estación EPEC, procesadas con la combinación GPS + Galileo.....	79
<i>Resumen estadístico descriptivo de las coordenadas obtenidas mediante el método PPP de la estación</i> .....	81
Análisis del Error cuadrático medio (RMSE) de los diferenciales $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ (combinación GPS + Galileo).....	84
Análisis del error obtenido mediante el procesamiento a diferentes periodos de tiempo e intervalos de grabación – GPS.....	88
Análisis del error obtenido mediante el procesamiento a diferentes periodos de tiempo e intervalos de grabación – Galileo.....	89
Análisis del error obtenido mediante el procesamiento a diferentes periodos de tiempo e intervalos de grabación – combinación GPS + Galileo.....	90
Análisis de coordenadas obtenidas mediante el método PPP procesadas en el software RTKLIB en un periodo de tiempo de 24 horas comparadas con las coordenadas obtenidas en el servicio web TRIMBLE RTX de la estación EPEC.....	91
Análisis de la validación en campo.....	95
Análisis de la aplicabilidad del método PPP en obras de ingeniería civil.....	99
Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones.....	101
Conclusiones.....	101
Recomendaciones.....	103
Referencias Bibliográficas.....	104
Apéndices.....	109

### Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Tipos de Efemérides y relojes de satélite .....	34
<b>Tabla 2.</b> Funciones y aplicaciones .....	36
<b>Tabla 3.</b> Tolerancias de levantamiento topográficos de acuerdo a su escala .....	42
<b>Tabla 4.</b> 25 estaciones de monitoreo continuo del Ecuador seleccionadas para el procesamiento mediante el Método PPP. ....	44
<b>Tabla 5</b> Días GPS seleccionados para el procesamiento con el método Posicionamiento Puntual preciso PPP. ....	46
<b>Tabla 6.</b> Archivos de corrección y fuente de descarga .....	48
<b>Tabla 7.</b> Porcentaje de los datos recopilados (GPS y Galileo) por cada estación de la REGME .....	59
<b>Tabla 8</b> Diferenciales de las coordenadas obtenidas en el software RTKLIB vs software BERNESE de la estación EPEC, procesadas con la constelación GPS a diferentes rangos de tiempo. ....	62
<b>Tabla 9.</b> Análisis estadístico de la estación EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (constelación GPS) .....	63
<b>Tabla 10.</b> RMSE de los componentes horizontal y vertical de los días GPS, procesados a diferentes rangos de tiempo (GPS) .....	65
<b>Tabla 11.</b> RMSE promedio de las diferencias $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ empleando EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (constelación GPS) .....	67
<b>Tabla 12.</b> Diferenciales de las coordenadas obtenidas en el software RTKLIB vs software BERNESE de la estación EPEC, procesadas con la constelación Galileo a diferentes rangos de tiempo. ....	71
<b>Tabla 13.</b> Análisis estadístico de la estación EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (constelación Galileo) .....	72
<b>Tabla 14.</b> RMSE de los componentes horizontal y vertical de los días GPS, procesados a diferentes rangos de tiempo (Galileo) .....	74
<b>Tabla 15.</b> RMSE promedio de las diferencias $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ empleando EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (constelación Galileo) .....	76
<b>Tabla 16.</b> Diferenciales de las coordenadas obtenidas en el software RTKLIB vs software BERNESE de la estación EPEC, procesadas con la combinación GPS + Galileo a diferentes rangos de tiempo. ....	80
<b>Tabla 17.</b> Análisis estadístico de la estación EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (combinación GPS + Galileo) .....	81
<b>Tabla 18.</b> RMSE de los componentes horizontal y vertical de los días GPS, procesados a diferentes rangos de tiempo (GPS +Galileo) .....	83
<b>Tabla 19.</b> RMSE promedio de las diferencias $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ empleando EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (constelación Galileo) .....	85
<b>Tabla 20.</b> Porcentaje de cumplimiento con la precisión de 5 cm, obtenido mediante el procesamiento a diferentes periodos de tiempo. ....	88
<b>Tabla 21.</b> Coordenadas procesadas en el software RTKLIB en un periodo de tiempo de 24 horas comparadas con las coordenadas obtenidas en el servicio web TRIMBLE RTX de la estación EPEC. ....	92

<b>Tabla 22.</b> Coordenadas procesadas en el software RTKLIB en un pedido de tiempo de 24 horas comparadas con las coordenadas obtenidas en el servicio web TRIMBLE RTX de la estación EPEC – Coordenadas Topocéntricas (ENU) .....	93
<b>Tabla 23.</b> Comparación del RMSE del procesamiento realizado con RTKLIB y Trimble RTX vs Bernese .....	94
<b>Tabla 24.</b> Coordenadas procesadas en RTKLIB comparadas con las coordenadas de la red geodésica de la UFA -ESPE (2 Horas) .....	96
<b>Tabla 25.</b> Coordenadas procesadas en RTKLIB comparadas con las coordenadas de la red geodésica de la UFA -ESPE (4 Horas) .....	96
<b>Tabla 26.</b> Coordenadas procesadas en RTKLIB comparadas con las coordenadas de la red geodésica de la UFA -ESPE (8 Horas) .....	96
<b>Tabla 27.</b> Coordenadas procesadas en RTKLIB comparadas con las coordenadas de la red geodésica de la UFA -ESPE (2 Horas) .....	97
<b>Tabla 28.</b> Coordenadas procesadas en RTKLIB comparadas con las coordenadas de la red geodésica de la UFA -ESPE (4 Horas) .....	97
<b>Tabla 29.</b> Coordenadas procesadas en RTKLIB comparadas con las coordenadas de la red geodésica de la UFA -ESPE (8 Horas) .....	97
<b>Tabla 30.</b> Comparación del RMSE del empleando diferentes rangos de tiempo – validación en campo .....	98

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Constelación GPS distribuida en seis orbitas con cuatro satélites en cada orbita. ....	23
<b>Figura 2.</b> Distribución de la REGME.....	25
<b>Figura 3.</b> Posicionamiento Absoluto.....	26
<b>Figura 4.</b> Receptor permanente ARP y APC.....	30
<b>Figura 5.</b> Efecto Wind – Up.....	31
<b>Figura 6.</b> Imagen principal de RTKLAUNCH.....	36
<b>Figura 7.</b> Formulario del servicio online Trimble RTX.....	40
<b>Figura 8.</b> Diagrama metodológico.....	43
<b>Figura 9.</b> Mapa de ubicaciones de las estaciones de monitoreo continuo del Ecuador. ....	45
<b>Figura 10.</b> Conveto to RINEX .....	47
<b>Figura 11.</b> Ventana de configuración Setting 1- GPS .....	49
<b>Figura 12.</b> Ventana de configuración Setting 2- GPS .....	50
<b>Figura 13.</b> Ventana de configuración Output.....	51
<b>Figura 14.</b> Carga de archivos de corrección .....	52
<b>Figura 15.</b> Ventana RTKPOST – GPS .....	53
<b>Figura 16.</b> Archivo de salidas formato EPEC001XXX.pos.....	53
<b>Figura 17.</b> Ventana de configuración Setting 1 – Galileo.....	54
<b>Figura 18.</b> Ventana RTKPOST - GALILEO .....	55
<b>Figura 19.</b> Ventana de configuración Setting 1 combinación GPS+ Galileo .....	56
<b>Figura 20.</b> Ventana RTKPOST combinación GPS + GALILEO .....	57
<b>Figura 21.</b> Punto 1- Equipo Trimble R8s .....	58
<b>Figura 22.</b> Punto 2- Equipo Trimble R8s .....	58
<b>Figura 23.</b> Gráfico de barras del análisis estadístico de la estación EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (constelación GPS) .....	64
<b>Figura 24.</b> Gráfico del RMSE promedio de las diferencias $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ empleando un periodo de tiempo de 2 horas (constelación GPS) .....	68
<b>Figura 25.</b> Gráfico del RMSE promedio de las diferencias $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ empleando un periodo de tiempo de 4 horas (constelación GPS) .....	68
<b>Figura 26.</b> Gráfico del RMSE promedio de las diferencias $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ empleando un periodo de tiempo de 8 horas (constelación GPS) .....	69
<b>Figura 27.</b> Gráfico del RMSE promedio de las diferencias $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ empleando un periodo de tiempo de 24 horas (constelación GPS) .....	69
<b>Figura 28.</b> Gráfico de barras del análisis estadístico de la estación EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (constelación Galileo).....	73
<b>Figura 29.</b> Gráfico del RMSE promedio de las diferencias $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ empleando un periodo de tiempo de 2 horas (constelación Galileo).....	77
<b>Figura 30.</b> Gráfico del RMSE promedio de las diferencias $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ empleando un periodo de tiempo de 4 horas (constelación Galileo).....	77
<b>Figura 31.</b> Gráfico del RMSE promedio de las diferencias $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ empleando un periodo de tiempo de 8 horas (constelación Galileo).....	78
<b>Figura 32.</b> Gráfico del RMSE promedio de las diferencias $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ empleando un periodo de tiempo de 24 horas (constelación Galileo).....	78

<b>Figura 33.</b> Gráfico de barras del análisis estadístico de la estación EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (combinación GPS + Galileo).....	82
<b>Figura 34.</b> Gráfico del RMSE promedio de las diferencias $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ empleando un periodo de tiempo de 2 horas (combinación GPS + Galileo).....	86
<b>Figura 35.</b> Gráfico del RMSE promedio de las diferencias $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ empleando un periodo de tiempo de 4 horas (combinación GPS + Galileo).....	86
<b>Figura 36.</b> Gráfico del RMSE promedio de las diferencias $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ empleando un periodo de tiempo de 8 horas (combinación GPS + Galileo).....	87
<b>Figura 37.</b> Gráfico del RMSE promedio de las diferencias $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ empleando un periodo de tiempo de 24 horas (combinación GPS + Galileo).....	87
<b>Figura 38.</b> Porcentaje promedio de las EMC que cumplen con la precisión de 5cm (GPS, Galileo, GPS + Galileo).....	90
<b>Figura 39.</b> Gráfico del RMSE del procesamiento realizado con RTKLIB y Trimble RTX vs Bernese.....	94

## Resumen

El avance de la tecnología ha permitido el desarrollo de técnicas de posicionamiento satelital, siendo las redes geodésicas los productos con mayor precisión. El principio de esta técnica consiste en emplear equipos receptores de señal GPS y determinar una coordenada, sin embargo, para lograr su obtención se incurre en gastos elevados en la logística de campo. En la actualidad se han desarrollado técnicas como el Método Posicionamiento del Punto Preciso PPP, donde únicamente se involucra un equipo receptor y el procesamiento se realiza corrigiendo variables de la ionósfera, tropósfera, entre otras. El enfoque del presente proyecto es analizar el error del Método Posicionamiento del Punto Preciso PPP procesado en el software libre RTKLIB empleando las estaciones de la REGME a través de la comparación de coordenadas de proyectos anteriores. Mediante un análisis estadístico descriptivo de los datos procesados se obtuvo las diferencias  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  producto del procesamiento realizado a diferentes rangos de tiempo y combinaciones de constelaciones (GPS, Galileo), donde se logró determinar que a mayor tiempo de rastreo las estimaciones de posicionamiento mejoran, además que resulta conveniente procesar únicamente con constelaciones GPS. Ante lo descrito se puede aplicar de este método en proyectos preliminares que no requieran una mayor precisión, la cual dependerá de la escala del proyecto.

*Palabras clave:* Posicionamiento Del Punto Preciso PPP, Software Libre RTKLIB, GPS, Galileo, REGME.

### **Abstract**

The advancement of technology has allowed the development of satellite positioning techniques, with geodetic networks being the products with the highest precision. The principle of this technique consists of using GPS signal receiving equipment and determining a coordinate, however, to obtain it, high expenses are incurred in field logistics. At present, techniques such as the PPP Precise Point Positioning Method have been developed, where only one receiving equipment is involved and the processing is carried out correcting variables of the ionosphere, troposphere, among others. The focus of this project is to analyze the error of the PPP Precise Point Positioning Method processed in the free software RTKLIB using the REGME stations through the comparison of coordinates from previous projects. Through a descriptive statistical analysis of the processed data, the differences  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  and  $\Delta Z$  were obtained as a result of the processing carried out at different time ranges and combinations of constellations (GPS, Galileo), where it was possible to determine that the longer the tracking time, the estimates of positioning improve, and it is convenient to process only with GPS constellations. Given those described, this method can be applied in preliminary projects that do not require greater precision, which will depend on the scale of the project.

*Keywords:* PPP Precise Point Positioning, Free Software RTKLIB, GPS, Galileo, REGME.

## Capítulo I: Introducción

### Antecedentes

Un evento histórico como es el de la misión geodésica francesa ocurrido en los años 1735 – 1744, permitió determinar la forma de la tierra y en concreto esta expedición científica que tardó 9 años tuvo como objetivo calcular cuánto mide un grado de latitud en el Ecuador. (Francou, 2013). A partir de este evento es que mejoraron las mediciones en la Tierra, por tal razón que resulta de gran relevancia hablar sobre este hecho.

En la actualidad el avance de la tecnología ha permitido el desarrollo de diferentes técnicas de posicionamiento satelital, el mismo que ha sido un factor clave en la ubicación espacial de un punto mediante la georreferenciación, siendo las redes geodésicas los productos con mayor precisión. Décadas atrás la técnica que resultaba conveniente aplicar, era la geodesia astronómica, en la cual se tomaba como referencia los astros, utilizándose principalmente métodos de cálculo de trigonometría esférica y álgebra matricial, permitiendo realizar medición de ángulos y realizar cálculos de las distancias entre puntos que por lo general se encontraban en las cumbres de las elevaciones principales, ya que se requería tener un visual entre ellos (Sevilla, 1984).

No fue hasta el año 1980 que surgió un eslabón para la modernidad, cuando surgió el sistema GPS (Sistema de Posicionamiento Global) (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013). En un inicio el sistema GPS fue diseñado para fines militares, pero hoy en día se ha convertido en la herramienta primordial del posicionamiento geodésico, que fue puesto a disposición a la población civil a partir del año 1983, además fue el único sistema de navegación por satélite que se encontraba operativo en su totalidad, mientras que otros sistemas como GLONASS y Galileo se fueron incorporando con el pasar del tiempo (National Coordination Office, 2018). Actualmente este sistema está presente prácticamente en todo, permitiendo rastrear desde una mascota perdida, localizar la posición de un auto, hasta construir mega obras civiles como

puentes, edificios, hidroeléctricas, etc. El principio para estas aplicaciones es el mismo, emplear equipos receptores de señal GPS y determinar una coordenada. La diferencia radica en la calidad del punto es decir su precisión.

Un punto GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite) es determinado a partir de equipos especializados en rastrear frecuencias, permitiendo de esta manera obtener coordenadas de alta precisión. Es por esta razón que para lograr su obtención se incurre en gastos elevados de logística de campo. Cuando se emplea un método relativo, posterior a su rastreo se debe realizar un procesamiento que emplea recursos, no obstante, diversos estudios han demostrado ser los más precisos en aplicación a proyectos de ingeniería. Es por ello que hoy en día lo que se pretende es tratar de optimizar la mayor cantidad de recursos y con el constante desarrollo de la tecnología es posible lograrlo. Específicamente en el campo de la geodesia, y para tratar de reducir costos, en determinación de puntos GNSS, se han desarrollado técnicas como el Método Posicionamiento del Punto Preciso PPP, donde únicamente se involucra un equipo receptor, y el procesamiento se realiza corrigiendo las variables como son la ionósfera y tropósfera, además de las correcciones de órbitas, parámetros rotación de la tierra, relojes de los satélites y receptor, cargas oceánicas entre otras, obteniendo así coordenadas de puntos con mejores precisiones.

### **Planteamiento Del Problema**

En todo proyecto de ingeniería relacionado con las ciencias de la Tierra es primordial la representación del terreno, esto se lo puede realizar de diferentes maneras, ya sea de manera física empleando un plano, croquis o mapa, o más acorde a tiempos modernos de manera digital con una apreciación en tercera dimensión, realidad aumentada o realidad virtual. Lo esencial en este tipo de representación es la georreferenciación espacial, para ello se emplean puntos con coordenadas conocidas, que dependiendo de la escala del proyecto variaría su precisión. En el caso de proyectos como; cartografía a escalas grandes, obras civiles, catastro, oleoductos,

construcciones, etc, demanda una alta precisión y para lograrlo es necesario emplear redes geodésicas GNSS.

En el Ecuador se ha establecido un conjunto de estaciones GNSS de monitoreo continuo denominada REGME (Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador) cuyas precisiones alcanzadas están a nivel centimétrico, lograr esta precisión únicamente es posible empleando un método relativo, que toma como base estaciones excéntricas con coordenadas de alta precisión que se encuentran enlazadas a redes continentales y globales como la del Servicio GNSS Internacional (IGS) (IGM, 2021).

Para determinar puntos GNSS de alta precisión, la técnica que presenta mayor demanda es el método relativo. En ocasiones, y para proyectos de pequeña magnitud se incurre en costos elevados que sobrepasan los presupuestos planificados, debido a que se deben emplear transporte, logística general y réditos económicos para mínimo 2 equipos, además se debe considerar que por definición es necesario que el rastreo sea simultáneo, por lo que la experiencia del personal técnico debe ser alta para no experimentar errores en la obtención de la información.

En la actualidad existen diferentes softwares que permiten procesar todos los observables que registran los receptores geodésicos de alta precisión, como es el caso del software científico Bernese, el cual permite realizar un procesamiento de datos múltiples de alta precisión.

Ante lo descrito y teniendo un enfoque netamente a un aspecto técnico en la determinación de coordenadas precisas GNSS, en el presente proyecto se propone analizar el error del Método Posicionamiento del Punto Preciso PPP procesado en el software libre RTKLIB, empleando las estaciones de la REGME mediante la comparación de las coordenadas con proyectos anteriores.

### **Justificación e Importancia**

En el año 2015 se realizó la aprobación del marco de referencia geodésico por la “Asamblea General de las Naciones Unidas”, logrando contribuir a nivel mundial con el desarrollo

sostenible, a partir de este suceso se reconoció la importancia que tiene un marco de referencia que garantice exactitud y estabilidad, logrando de esta manera la interoperabilidad de las mediciones realizadas en cualquier parte de la superficie de la tierra. SIRGAS es la organización responsable del marco de referencia de América Latina y del Caribe el mismo que ofrece un intercambio abierto de datos geodésicos para emplearlo en una infinidad de aplicaciones como: transporte, agricultura, minería, construcción, vigilancia del cambio climático, entre otras. Por esta razón es de gran importancia la obtención y divulgación de datos geoespaciales que permitan contribuir a los diferentes proyectos de ingeniería que lo requieran.

El entendimiento de la cartografía, parte de la correcta referenciación espacial de los elementos que la componen. Es por esta razón que se requiere un adecuado trato a los datos de las coordenadas de partida. Esta información, por definición actual, es obtenida a partir de sistemas satelitales como GPS, o incluyendo todas las constelaciones GNSS.

Para la obtención de coordenadas precisas en las redes geodésicas nacionales se requiere de un tratamiento riguroso con el fin de lograr precisiones por sobre el centímetro, y a partir de estas, se derivan redes geodésicas locales. El método de procesamiento que es empleado por SIRGAS para la obtención de coordenadas semanales se realiza en software científico como BERNESE o GAMIT/GLOBK, y aplicando el método relativo, que involucra líneas base y vectores independientes que conecta cada vértice geodésico.

En la actualidad, se persigue un fin en todo el mundo que es la optimización de recursos, mediante la innovación, es por ello que muchas de las profesiones como la ingeniería, buscan este fin. La presente investigación se alinea a lo antes mencionado ya que el método planteado PPP, infiere en la optimización de recursos. Además, en cualquier investigación es imprescindible cumplir con los Objetivos del Desarrollo Sostenible propuestos por la Organización de las Naciones Unidas en el año 2015, en tal virtud la propuesta de investigación ha tomado como referencia el ODS 9 que se relaciona con la Industria, innovación e infraestructura. Donde se menciona que los gobiernos deben reconocer la importancia de los datos basados en tecnologías

geoespaciales, el monitoreo in situ y la información geoespacial precisa las misma que resultan de gran relevancia para la formulación de políticas, la planificación y la operación de proyectos de desarrollo sostenible (Naciones Unidas, 2015).

### **Objetivo General**

Comparar coordenadas obtenidas por el Método Posicionamiento del Punto Preciso PPP obtenidas en el software libre RTKLIB versus software científico BERNESE para determinar su aplicación en proyectos de obras civiles.

### **Objetivos Específicos**

- Recopilar datos GNSS de la REGME, empleados en el proyecto “Obtención de soluciones semanales de la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador - REGME a través de procesamiento en el software científico Bernese 5.2”, para seleccionar las estaciones de monitoreo continuo (EMC) que serán necesarias para el análisis.
- Procesar los datos recopilados mediante el método PPP, a diferentes rangos de tiempo y combinaciones de constelaciones, empleando el software libre RTKLIB, con el fin de obtener las coordenadas resultantes de esta metodología.
- Realizar un análisis estadístico de las diferencias entre las coordenadas determinadas con el Método PPP obtenidas con el procesamiento del Software libre RTKLIB versus software científico BERNESE para conocer el error de esta metodología.
- Validar el método PPP mediante rastreos satelitales sobre la red geodésica de la UFA-ESPE, para conocer su aplicación en proyectos de ingeniería.
- Investigar obras y su requerimiento posicional para evaluar si es pertinente aplicar este método.

## **Capítulo II: Marco Teórico**

### **GNSS Sistema Global de Navegación por Satélite**

El GNSS (Global Navigation Satellite System) está constituido por una agrupación (constelación) de satélites que orbitan en el espacio y que continuamente transmiten señales. Entre los sistemas que lo conforman se encuentran GPS (Estadounidense), GLONASS (Ruso), Galileo (Europeo) y Compass (Chino) (Marín Sánchez, 2016). Siendo un sistema de navegación que proporciona a los usuarios servicios de posicionamiento espacial a escala global.

Su historia es relativamente reciente y surgió con el desarrollo de Sistema de Posicionamiento Global (GPS), diseñado originalmente y exclusivo para uso militar, bajo el control y supervisión del “Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América” el cual era sometido a un estricto control gubernamental (Alvares, 2008). Además, por mucho tiempo fue el único sistema que se encontraba totalmente operativo y que contaba con una cobertura mundial. El rendimiento del sistema satelital GNSS depende de 4 criterios: disponibilidad, integridad, continuidad y precisión. La disponibilidad está relacionada con la capacidad del sistema en proporcionar información confiable, la integridad se define como el nivel de confianza de la exactitud de la información, la continuidad es la probabilidad de que el rendimiento del sistema se mantenga durante la fase de operación, y la precisión está dada por la distribución estadística de los errores.

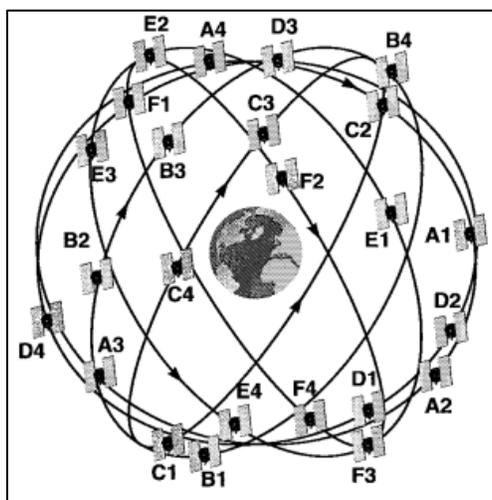
### **Sistema de Posicionamiento Global GPS**

GPS es un ejemplo de tecnología que en un inicio fue desarrollada con fines militares teniendo una capacidad de navegación en aire, mar y tierra bajo cualquier condición climática. No fue hasta el año 1983 que este sistema fue puesto a disposición de la comunidad civil, permitiendo beneficiar a la sociedad con sus diferentes aplicaciones como; navegación aérea y marítima, control vehicular, levantamientos topográficos, recreación, etc (Fallas, 2002).

El 22 de febrero de 1978 entró en órbita el primer satélite del sistema GPS, y a finales del mismo año ya existían 4 satélites capaces de realizar pruebas de posicionamiento 3D en determinadas zonas de la tierra. La constelación GPS, que se completó en 1997, consta de 24 satélites operativos (sin incluir los de respaldo), con un período orbital de 12 horas, una inclinación de  $55^\circ$  con respecto al ecuador y una distancia de la Tierra de 26.560 kilómetros, divididos en seis órbitas con cuatro satélites por órbita (Ver figura 1) (Fallas, 2002).

### Figura 1

Constelación GPS



*Nota:* El gráfico representa la constelación GPS distribuida en seis órbitas con cuatro satélites en cada órbita. Tomado de *Scanning the issue/technology. Proceedings of IEEE Special Issue on Global Positioning System* (p.87), por Enge & Misra, 1999

### GALILEO

El sistema GALILEO fue desarrollado por la unión Europea y surgió ante necesidad de disponer de un sistema de posicionamiento por satélite independiente pero compatible con GPS y GLONASS, esta constelación es completamente diferente ya que está especialmente pensada para proteger a las personas cuyos medios de vida dependen de la navegación por satélite,

también tiene como objetivo ofrecer cobertura en latitudes altas en el norte de Europa, que en la actualidad no están óptimamente cubiertas por el sistema GPS (Martínez, 2013).

El desarrollo de GALILEO surgió en el año 2002, conformado por 27 satélites activos y 3 en reserva que se encuentran totalmente operativos a partir del año 2019 (Cohnen, 2011). Están situados en tres planos orbitales, ubicados a una distancia de 23.222 Km de la tierra y tienen un periodo orbital de 14 horas. Se encuentran a una inclinación de  $56^\circ$  lo cual permite garantizar una cobertura en latitudes polares (Martínez, 2013). En la siguiente tabla se muestra las principales constelaciones y sus características.

El segmento espacial está conformado por los satélites de navegación y de comunicación que emiten continuamente radioseñales a los usuarios, los primeros orbitan alrededor de la tierra y se encuentran distribuidos en distintos planos orbitales, los segundos conforman los sistemas aumento empleados para la corrección de errores de posicionamiento (García, 2008). Las principales funciones del segmento espacial radican en generar y transmitir código y señales de portadora, estas transmisiones están controladas por relojes atómicos altamente estables que se encuentran a bordo de los satélites (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013).

El segmento espacial debe contar con el suficiente número de satélites de navegación que asegure una cobertura global en todo momento y que garantice un mínimo de 5 satélites visibles en cualquier parte del mundo, sin embargo, dependiendo del número de satélites la distribución de los planos orbitales no necesariamente debe ser uniforme (García, 2008).

### **Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME)**

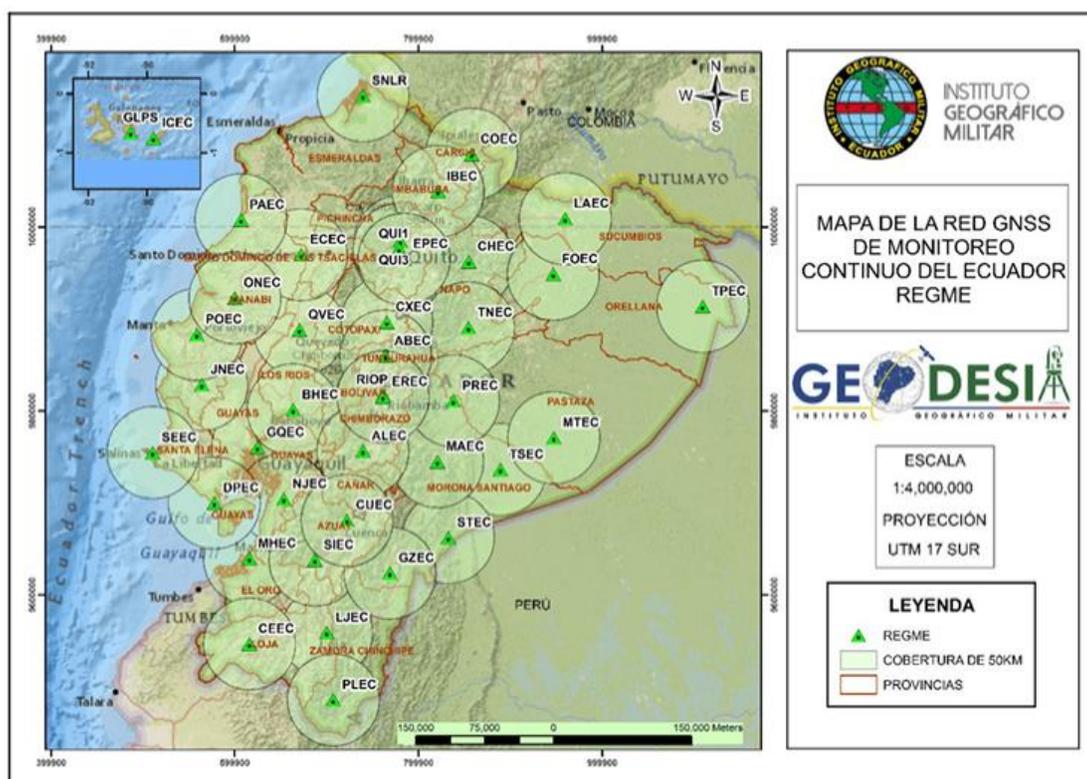
“La REGME (Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador) está conectada a la Red Nacional del Ecuador (RENAGE), que a su vez está conectada a la Red Continental (SIRGAS-CON), las estaciones REGME están ubicadas a una distancia aproximada de 50 km y reciben datos las 24 horas al día, todo el año”. (IGM, 2021). Teniendo como fin

brindar información actualizada a los usuarios que la requieran, se estaciones se encuentran dispersas por todo el territorio nacional, logrando una cobertura de 95%. (Ver figura 2)

Los productos generados por la REGME son archivos diarios de 24 horas registrados durante todo el año, en formato nativo (.T02) y RINEX con intervalos de registro de 1 segundo y 30 segundos respectivamente. En las fichas técnicas proporcionadas en el sitio web del Geoportal Instruccional del Instituto Geográfico Militar (IGM) se detalla la información y coordenadas de cada estación (Cisneros, 2014).

## Figura 2

### Distribución de la REGME



*Nota:* En el gráfico se muestra el mapa de la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador REGME. Tomado de IGM, 2021.

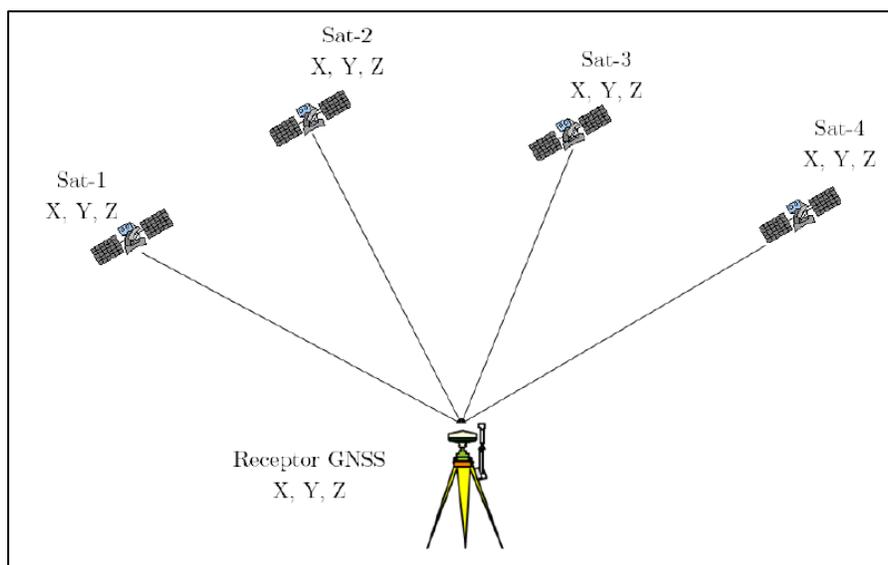
### Método Absoluto PPP (Posicionamiento de Punto Preciso)

Desde su introducción en el año 1997, el Posicionamiento de Punto Preciso (PPP) surge como una alternativa al posicionamiento diferencial, hace referencia a una técnica en la cual

intervienen distintas correcciones que influyen en la precisión de un punto (Muciuk, 2018). Este método involucra un solo receptor GPS es cual rastrea simultáneamente cuatro o más satélites para determinar sus propias coordenadas respecto a centro de la Tierra (Ver figura 3). En este método al no requerir de mediciones simultáneas entre estaciones de referencia, no se encuentra limitado por la distancia o longitud de la línea. (Acuña, 2008).

### Figura 3

#### Posicionamiento Absoluto



*Nota:* El gráfico representa al posicionamiento absoluto. Tomado de *Fundamentos y aplicaciones del Posicionamiento Puntual Preciso (PPP: Precise Point Positioning)*, por J. Orduña. 2019

Autores como (Berné Valero, Garrido Villén, & Capilla Romá, 2019), afirman que “los datos de las orbitas y relojes de los satélites, necesarios para realizar PPP, se consiguen fácilmente a partir de una red global GNSS, dichos datos están a disposición de los usuarios mediante un conjunto de servicios generalmente en línea es decir a través de Internet”.

Acorde al modelo matemático del método PPP modificado por (Yuan et al, 2014) muestra las ecuaciones de medición de código (1) y medición de fase (2)

(1)

$$l_p = \rho + c * (\delta_r - \delta_s) + d_{ion} + d_{trop} + d_{ant} + d_{rot} + d_{orb} + d_{otl} + d_{set} + \varepsilon_p$$

(2)

$$l_\phi = \rho + c * (\delta_r - \delta_s) - d_{ion} + d_{trop} + d_{ant} + d_{rot} + d_{orb} + d_{otl} + d_{set} + d_{windup} + N\lambda + \varepsilon_\phi$$

Donde:

- $l_p$  Medición de código
- $l_\phi$  Medición de fase
- $\rho$  Distancia geométrica entre la antena del satélite y la antena receptora
- $\delta_r$  Desfase entre el tiempo GPS y el reloj del receptor
- $\delta_s$  Desfase entre el tiempo GPS y el reloj del satélite
- $c$  Velocidad de la luz.
- $d_{ion}$  Retardo ionosférico en la propagación de la señal GPS
- $d_{trop}$  Retardo troposférico en la propagación de la señal GPS
- $d_{ant}$  Compensación del centro de fase de la antena y variación de la antena satelital
- $d_{rot}$  Efecto producido por rotación de la tierra
- $d_{orb}$  Error orbital
- $d_{otl}$  Efecto cargas oceánicas
- $d_{set}$  Efecto mareas terrestres
- $d_{windup}$  Fase wind-up
- $N$  Ambigüedad
- $\lambda$  Longitud de onda
- $\varepsilon_p, \varepsilon_\phi$  Errores (ruido del receptor, efecto multipath, centro de fase de antena, etc).

## **Correcciones para el método PPP**

El método Posicionamiento Puntual Preciso PPP es una técnica de estimación de puntos GNSS de alta precisión requiere correcciones a varios factores que influyen directamente a la precisión.

### **Corrección de mareas terrestres**

Las mareas terrestres son una manifestación de las fuerzas que actúan sobre la superficie terrestre, las mismas que se derivan de un campo potencial. Entre las fuerzas principales se encuentra la centrífuga de rotación y la fuerza de atracción que la masa ejerce sobre un punto, teniendo como consecuencia deformaciones y desplazamientos periódicos verticales y horizontales (Vieira, 1978).

### **Corrección de cargas oceánicas**

El movimiento de las masas de agua provocado por las corrientes oceánicas se denomina cargas oceánicas, dicho efecto se observa periódicamente en forma de deformaciones que pueden manifestarse en como desplazamientos verticales y horizontales, además pueden generarse variaciones en la gravedad e inclinación, estos desplazamientos pueden alcanzar un rango de hasta 10 centímetros en algunas zonas del mundo (Benavent, 2011).

### **Deformación rotacional debido al movimiento polar**

Al igual que las deformaciones que se generan por las fuerza de atracciones del Sol y la Luna las mismas que son causantes de desplazamientos periódicos de la posición de la estación, los cambios del eje de giro de la Tierra con respecto a la corteza terrestre, es decir, el movimiento polar, provoca deformaciones periódicas debido a cambios diminutos en el potencial centrífugo de la tierra, dando como resultado desplazamiento que pueden alcanzar 25 mm en la altura y unos 7 mm en las direcciones horizontales (Kauba, 2009).

### **Parámetros de rotación de la tierra (ERP)**

Los cambios en la distribución de masa a nivel global en la Tierra modifican su tensor de inercia, provocando cambios en el potencial gravitatorio terrestre. Este fenómeno también es responsable de los cambios en la rotación de la tierra que se manifiesta a través de variaciones en los parámetros de rotación (Fernández, Schuh, & Brunini, 2005). Los parámetros de rotación de la Tierra, junto con las convenciones para el tiempo sideral, la precesión y la nutación facilitan transformaciones precisas entre terrestre e inercial marcos de referencia que se requieren en el análisis GNSS global (Kauba, 2009).

### **Correcciones del desfase de los relojes del satélite**

Los satélites cuentan con un reloj atómico de alta precisión sin embargo al encontrarse en un campo gravitatorio más débil que el de la Tierra, son diseñados con un ligero atraso que hace que en órbita se estabilice. Las correcciones del reloj resultan necesarias para la estimación de pequeños errores estocásticos de los relojes atómicos de los satélites. Estos errores se generan por el desfase del reloj del satélite con respecto al tiempo GPS ya que existen pequeñas variaciones en la velocidad del oscilador (Cioce, et.al, 2016). Mediante esta corrección es posible tener una mejor calidad en cuanto a la precisión de un punto, evitando que los errores tiendan a propagarse hacia los resultados de manera directa.

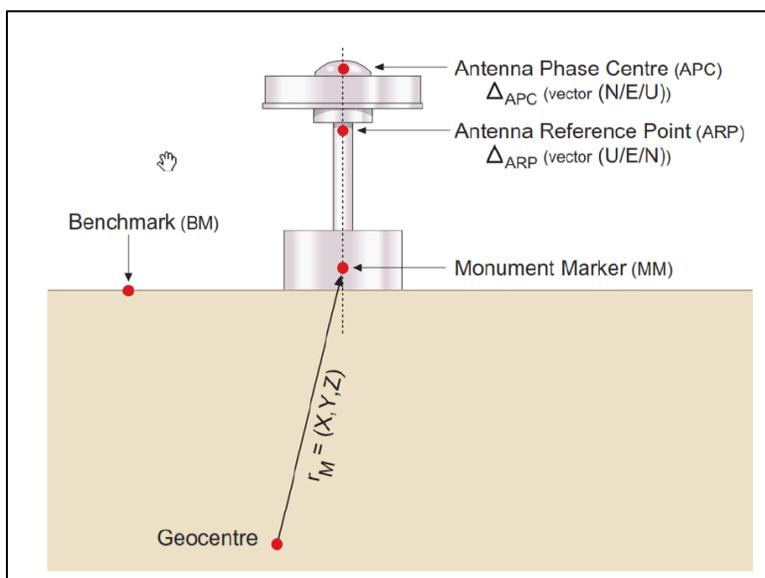
### **Corrección de la variación del centro de fase de las antenas de los receptores**

Las señales GNSS se toman del mismo punto, denominado Centro de Fase de la Antena (APC), el cual se encuentra ubicado en la parte interior de la antena, y que es distinto al punto físico al cual se realiza la medición sobre el punto de posicionamiento, comúnmente conocido como Punto de Referencia de la Antena (ARP)(Ver figura 4) (Capilla, 2015). Para compensar este error se emplean calibraciones en campo y calibraciones absolutas realizadas en cámara. El proceso de calibración ha permitido obtener información para diferentes tipos de antena, los

mismos que han sido recopilados por la IGS en los archivos PCV y ANTEX (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013).

#### Figura 4

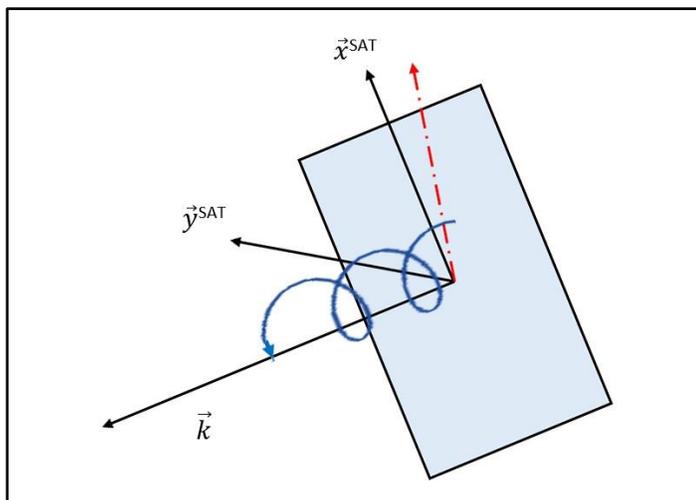
*Receptor permanente ARP y APC*



*Nota:* Tomado de *Gnss Data Processing*. por Subirana, Zornoza, & Hernández, 2013

#### Fase de Wind-up

Una antena receptora, a menos que sea móvil, no gira y permanece orientada hacia una dirección de referencia fija (normalmente el norte). Sin embargo, las antenas de satélite experimentan rotaciones lentas a medida que sus paneles solares están siendo orientados hacia el Sol y la geometría de la estación-satélite cambia, provocando una diferencia de hasta un ciclo el cual corresponde a una revolución completa de la antena, efecto conocido como Phase Wind-Up (Ver figura 5) (Capilla, 2015).

**Figura 5.***Efecto Wind – Up*

*Nota: Tomado de Aportación al estudio de la capacidad de los modelos conceptuales en posicionamiento absoluto preciso (precise point positioning) para tiempo real, a través del análisis del rendimiento de productos y prototipos en un escenario multi-constelación gnss, por Capilla, 2015*

**Corrección Sesgo diferencial del código.**

Permite realizar correcciones del efecto diferencial entre los códigos, P1, P2 y C1 que afectan a los satélites y receptores. Estos errores generan un retraso electrónico en los satélites, sin embargo, el Centro de Determinación de Órbitas en Europa (CODE) facilita una serie de ficheros DBC los cuales permiten corregirlos (Vazquez, 2019).

**Refracción ionosférica**

La ionosfera afecta las señales de GPS que se propagan a través de ella, lo cual depende de la ubicación del usuario, época del año, si es de día o de noche, etc. El error de refracción ionosférico es uno de los principales factores que restringen la precisión del posicionamiento GPS. El error de distancia equivalente del efecto ionosférico suele ser de unos 15 metros durante el día, 3 metros al anochecer y un máximo de 50 metros en el cenit y 150 metros en el horizonte.

(Wang, Yang , & Zhang, 2005) Por lo tanto, el efecto ionosférico debe corregirse. Los procedimientos de rutina existentes para abordar el efecto ionosférico consisten en utilizar observaciones de doble frecuencia.

### **Refracción troposférica**

En la capa troposférica se originan los fenómenos meteorológicos y climáticos como la lluvia, tormentas, granizo, entre otros, haciendo que algunos aparatos electrónicos no funcionen adecuadamente, además generan un retraso en cualquier señal electromagnética que la atraviesa. La troposfera es la capa que presenta más inconvenientes al momento de la transmisión de información de los satélites GPS por tal motivo las señales emitidas por los satélites sufren una refracción y curvatura en su trayectoria (Alvarez, 2019).

De acuerdo con Galera (2008), el error causado por la troposfera en la propagación de las señales GPS pueden alcanzar hasta 30 m, es decir, se tiene en cuenta el ángulo de elevación por satélite y la densidad de la atmósfera.

### **Tipos de PPP**

Las Técnicas empleadas en el Método PPP se pueden aplicar a métodos de observación en modo estático y cinemático, de la misma manera se cuenta con servicios de post-proceso y de tiempo real.

### **PPP en postproceso**

PPP post-proceso emplea algunos servicios gratuitos para llevar a cabo las soluciones, las cuales alcanzan precisiones centimétricas. En este caso los usuarios cargan los archivos RINEX a los servicios en línea o en el software (RTKLIB), la solución se obtiene de forma automática, sin embargo, para mejorar las precisiones es necesario de largas horas de medición (Paredes, 2013).

**PPP en tiempo real**

PPP en tiempo real requiere de productos y modelos de estado que son recibidos continuamente por medio de paquetes de datos conectados a internet, los mismo que deben cumplir con varios requisitos de latencia y disponibilidad continua. Esta técnica se caracteriza por ser muy sensible a sufrir anomalías y pérdidas en la recepción de datos, afectando directamente en la precisión de los resultados (Capilla, 2015).

**PPP estático**

El método estático también conocido como método tradicional, se encarga del estudio y medición de puntos que se encuentran fijos sobre la superficie terrestre, este método puede ser empleado en procesamientos en tiempo real o post proceso (Paredes, 2013)

**PPP cinemático**

Con este método es posible determinar el posicionamiento época por época de un receptor que se encuentra en movimiento (Zumberge, Heflin, Jefferson, Watkins, & Webb, 1997), en el método PPP cinemático es importantes tener un tiempo de rastreo que le permita resolver ambigüedades.

**Efemérides GPS**

El segmento de control operativo de Navstar genera efemérides satelitales y correcciones de reloj que se transmiten en el mensaje de navegación que los receptores utilizan para estimar la posición del satélite en tiempo real. Cualquier error en estas efemérides afectará directamente la precisión del posicionamiento basado en GPS (Warren & Raque, 2003).

Con las efemérides es posible realizar cálculos de la posición de un satélite y determinar con la velocidad con la que este se desplaza. Las efemérides utilizadas para el post-procesamiento también son conocidas como efemérides precisas o finales y se caracterizan por tener una alta precisión, emplean datos de pseudodistancias y fase que son registrados por

estaciones permanentes repartidas por todo el mundo (Berné, Anquela Julián, & V.G, 2014). Las efemérides transmitidas corresponden a parámetros de tiempo, perturbación y keplerianos que resultan necesarios para la estimación de coordenadas, es posible obtenerlas mediante la conversión de archivos RINEX a diferencia de las efemérides finales ya que estas dependen específicamente de las observaciones de los satélites, para el caso de la constelación GPS, se las pueden obtener del sitio web del IGS (CDDIS).

Desde su fundación en 1994, el IGS ha proporcionado efemérides precisas de diferentes series del producto. Las órbitas ultrarrápidas GPS se liberan cuatro veces al día y tiene una latencia inicial de 3 horas. Estas efemérides se dividen en dos secciones, la primera mitad se basa en ajuste de datos de observación, la segunda mitad corresponde a los datos de predicción (Griffiths & Ray, 2009) .Dichas efemérides son empleadas en aplicaciones realizadas en tiempo real debido a su increíble rapidez y publicación. Por otro lado, las efemérides rápidas GPS se liberan cada 17 horas y están diseñadas para usos rápidos que exigen alta precisión. Finalmente, las efemérides finales de GPS y GLONASS se publican semanalmente como un paquete de 7 archivos diarios. Se toma especial cuidado con el fin de asegurar el más alto nivel de coherencia con respecto a los marcos de referencia asociados a el IGS, parámetros de rotación de la tiene y los relojes de los receptores y satélites. En consecuencia, la latencia de estos productos es más larga, aproximadamente 12 (IGS, 2020) . En la siguiente tabla se resume los productos de efemérides precisas y de reloj.

**Tabla 1**

*Tipos de Efemérides y relojes de satélite*

<b>Tipo de efemérides y reloj</b>	<b>Precisión</b>	<b>Latencia</b>	<b>Actualización</b>	<b>Intervalo</b>
Transmitidas (previsto)	Orbita 100cm	Tiempo real	-----	diario
	Reloj 5ns			

Ultrarrápidas (previsto)	Orbita	5cm	Tiempo real	4 veces al día	15 minutos
	Reloj	3ns			
Ultrarrápidas (observado)	Orbita	3cm	3-9 horas	4 veces al día	15 minutos
	Reloj	150ps			
Rápidas (observado)	Orbita	2.5	17-41 horas	diariamente	15 minutos
	Reloj	75ps			
Finales (observado)	Orbita	2.5cm	12-18 días	semanalmente	15 minutos
	Reloj	75ps			

---

Nota: En la tabla se muestra los tipos de efemérides y relojes de satélite. Tomado de *Products – International GNSS Service*, por IGS, 2020.

### Software RTKLIB

“RTKLIB al ser un software libre permite la libertad de los usuarios en la ejecución y manejo, desarrollado por Tomojo Takasu en el año 2013, ofrece procesamiento de datos GNSS para posicionamiento estándar y preciso” (Takasu, 2013), al ser un software libre consta de un paquete de programas de código abierto de fácil manejo por el usuario. (Takasu, 2013). Es una herramienta de análisis de datos GNSS, que mediante la carga de datos de entrada (RINEX), se puedes realizar varios cálculos de posición, incluido el posicionamiento de punto preciso (PPP), GNSS diferencial, cinemático en tiempo real y cinemático de post procesamiento (Everett, et al., 2022).

Sus principales características acorde a su manual de usuario son:

- Es compatible con los sistemas de posicionamiento GPS, Galileo, GLONASS, SBAS, Beidou y QZSS.
- Admite múltiples métodos de posicionamiento GNSS para procesamiento en tiempo real y post -procesamiento

- Es compatible con los formatos de RINEX desde la versión (2.10, 2.11, 2.12), hasta (3.00, 3.01, 3.02)
- Soporta comunicación externa a través de: TCP/IP, NTRIP, FTP/HTTP. (Takasu, 2013).

## Funciones y aplicaciones

Sus funciones y aplicaciones se detallan en la Tabla 2

**Tabla 2**

*Funciones y aplicaciones*

<b>Función</b>	<b>GUI AP (Aplicaciones)</b>
Indicador	RTKLAUNCH
Posicionamiento en tiempo real	RTKNAVI
Servicio de comunicación	STRSVR
Posicionamiento en postproceso	RTKPOST
Convertidor RINEX	RTKCONV
Visualización de soluciones	RTKPLOT
Descargas de productos y datos GNSS	RTKGET

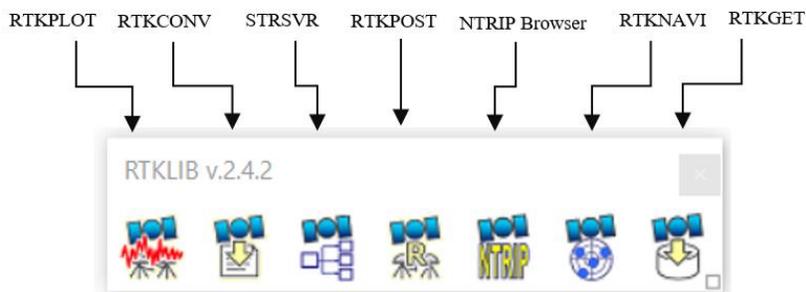
*Nota:* Tomado de *RTKLIB ver 2.4.2 Manual*, por Takasu 2013.

## RTKLAUNCH

Se refiere a la aplicación de inicio, la cual es posible tener una visualización y acceso a las aplicaciones que el software contiene (Ver figura 6).

## Figura 6

*Imagen principal de RTKLAUNCH*



*Nota:* Tomado de *RTKLIB ver 2.4.2 Manual*, por Takasu 2013.

### **RTKPOST**

Esta aplicación es utilizada para carga de datos y archivos, además es posible establecer las configuraciones de acuerdo al tipo procesamiento y realizar la ejecución del mismo, es utilizada para el post – procesamiento de observaciones GNSS.

### **RTKNAVI**

Aplicación que ejecuta el procesamiento de navegación en tiempo real empleando los datos ingresados de observación sin procesar de los receptores GPS/ GNSS

### **RTKCONV**

Es la aplicación que permite convertir datos nativos a formato RINEX.

### **STRSVR**

Denominada como “servidor de comunicaciones” o “derivador de datos”, en el cual el usuario puede configurar los datos de entrada y de salida en (forma de flujo) a través de los enlaces de comunicación.

### **RTKPLOT**

Es la aplicación que permite graficar soluciones por RTKPOST Y RTKNAVI, esta herramienta a su vez muestra las señales de los satélites que grabaron los receptores.

## **RTKGET**

Permite descargar archivos de datos GNSS a través de Internet, entre ellos órbitas de los satélites y la información del reloj, necesarios para análisis de PPP (Posicionamiento de punto preciso).

## **NTRIP Browser**

Aplicación que permite intercambiar datos relacionados con GPS/ GNSS con datos de observación sin procesar del receptor, efemérides y correcciones para DGPS o RTK-GPS.

## **Software BERNESE**

El software Bernese es una herramienta diseñada con fines científicos y cumple con los más altos estándares de calidad para aplicaciones geodésicas basadas en el sistema de navegación global GNSS, fue desarrollado la Universidad de Berna en el Instituto Astronómico de (AIUB, 2019). Bernese considera diferentes parámetros que no se emplean en programas comerciales, lo cual permite alcanzar mayores precisiones. Este software se encuentra disponible para la comunidad científica que está encaminada a la investigación y a clientes comerciales generalmente entidades encargadas del mantenimiento y monitoreo de las redes geodésicas (Orduña, 2019). Entre sus principales características se encuentran:

- Disponible para plataformas Unix / Linux, Mac y Windows.
- Determinación de órbitas precisas LEO basadas en datos GPS
- Diseñados para procesamientos combinados GPS/ GLONASS
- Capacidad de procesamiento de GALILEO
- Permite la resolución de ambigüedades para GPS y GLONASS
- Combinación de distintos tipos de receptores y antenas
- Modelado de Ionosfera que incluyen correcciones de ionosfera de orden superior
- Modelos modernos de troposfera (VMF1, GMF/GPT).
- Procesamiento PPP

- Procesamiento desde redes locales hasta redes globales utilizando una sola o doble frecuencia GNSS.

El modelado de última generación, el control detallado de todas las opciones de procesamiento relevantes, las poderosas herramientas para la automatización, el cumplimiento de estándares actualizados adoptados internacionalmente y la flexibilidad inherente acorde a un diseño altamente modular son características que destacan de este software. En la actualidad, más de 700 instituciones de repartidas el mundo se encuentran registradas en la base de datos de usuarios del software GNSS de Berna (Bernese) (Dach, Lutz, Walser, & Fridez P, 2015).

El software Bernese está particularmente empleado por agencias responsables de levantamiento GNSS de alta precisión, usuarios comerciales con aplicaciones complejas que exigen alta precisión y confiabilidad, además es usado con fines de investigación y educación. Sus principales funciones son:

- Procesamiento automático de redes permanentes.
- Procesamiento de datos que ocupan un gran número de receptores.
- Resolución de ambigüedades en líneas base largas (2000 km y más).
- Monitoreo de la ionosfera y troposfera.
- Combinación de diferentes tipos de receptores, considerando las variaciones del centro de fase de la antena.
- Procesamiento combinado de observaciones GPS y GLONASS.

### **Trimble RTX**

El Trimble CenterPoint RTX es un miembro de la familia de los servicios de corrección Trimble GNSS. Este servicio adopta una metodología PPP que proporciona una precisión de posicionamiento de nivel cm de grado topográfico. Este servicio tiene como objetivo aplicaciones en los mercados como; Agricultura de precisión, Topografía, Construcción y se basa en la generación de información precisa de órbita y reloj para satélites GNSS en tiempo real.

Las correcciones satelitales Trimble CenterPoint RTX se generan con datos de la red de seguimiento mundial de Trimble, que consta de aproximadamente 100 estaciones de referencia distribuidas globalmente. Si bien el sistema se introdujo inicialmente con soporte para satélites GPS y GLONASS, los desarrollos recientes han llevado a la inclusión de satélites de navegación adicionales como Galileo.

Hoy en día la disponibilidad de órbitas y relojes precisos GNSS hace posible el desarrollo de servicios de posicionamiento y navegación mediante el método PPP (Kouba, Lahaye, & Tétreault, 2017). Esta aplicación permite cargar datos GNSS al servicio de post-procesamiento CenterPoint RTX y recibir cálculos de posicionamiento los mismos que se realizan en la época de observación de ITRF 2008 para los datos recopilados antes del 23 de marzo del 2017, e ITRF 2014 para los datos recopilados a partir del 23 de marzo del 2017 (Trimble, 2019). La Transformación es posible realizarla seleccionando el sistema de coordenadas y la placa tectónica (Ver figura 7).

## Figura 7

### Formulario del servicio online Trimble RTX

**Trimble**  
CenterPoint RTX Post-Processing    Post-Processing    Register    Support    Contact Us

**WELCOME TO TRIMBLE CENTERPOINT® RTX POST-PROCESSING SERVICE**

Trimble RTX® is a global GNSS technology that provides centimeter-level positioning, worldwide, at any time.

This application allows you to upload GNSS observation data to the CenterPoint RTX post-processing service and receive positioning calculations. The positioning calculations are performed in the observation epoch (current epoch) of ITRF2008 for data sets that were collected prior to March 23rd 2017, and ITRF2014 for data sets that were collected on or after March 23rd 2017. Transformation can be performed by selecting a different coordinate system and tectonic plate. Complete the form below to receive your calculations via email.

**1. Select a coordinate system and tectonic plate:**

Coordinate System: ITRF2014

Tectonic Plate: (Autodetect)

**2. Select a file to upload:**

Seleccionar archivo    Ninguno archivo selec.

*Nota:* En la imagen se muestra la pantalla principal del servicio web de Trimble RTX. Tomado de Trimble, 2019

### **Exactitud posicional para obras civiles**

La información espacial se puede mostrar en forma de mapas, modelos digitales del terreno o simplemente como una lista de coordenadas de los puntos de interés en un sistema de coordenadas seleccionado. Esta información sirve de base para la gestión de los recursos terrestres y marinos, para el seguimiento de los cambios ambientales y para la planificación, diseño y puesta de obras de ingeniería.

En proyectos de ingeniería civil el levantamiento de información es necesario para la planificación y el diseño, durante el proceso de construcción. Los requisitos de precisión para los levantamientos de ingeniería suelen ser altos y pueden variar desde requisitos submilimétricos en el replanteo y alineación de objetos de alta precisión como mediciones y monitoreo de deformación de estructuras sensibles como grandes presas de energía y excavaciones subterráneas para el almacenamiento de materiales tóxicos, hasta milímetros y unos pocos centímetros en la alineación de túneles y puentes largos o en estudios de hundimiento del suelo.

Para una georreferenciación espacial de proyectos como; cartografía a escalas grandes, obras civiles, catastro, oleoductos, construcciones, etc, se demanda una alta precisión y para lograrlo es necesario emplear redes geodésicas GNSS, para ello se consideran puntos con coordenadas conocidas, que dependiendo de la escala del proyecto variaría su precisión.

Como en cualquier proyecto de ingeniería en la fase inicial se requiere de una planificación, es este caso previo al cálculo de coordenadas mediante posicionamiento satelital se debe considerar varias especificaciones, en el Ecuador la institución encargada de establecerlas es el IGM, donde menciona que las precisiones requeridas para Redes Geodésicas Locales no deber superar los 5 cm en el componente horizontal (IGM, 2019).

Con lo antes mencionado, las precisiones para la referenciación Geodésica pueden variar de acuerdo a la escala del producto final. En el caso de obras civiles viales estas precisiones se

encuentran dadas por la “Norma Para Estudios y Diseños Viales”, donde se menciona la tolerancia para errores planimétricos y altimétricos (Ver tabla 3).

**Tabla 3**

*Tolerancias de levantamiento topográficos de acuerdo a su escala*

<b>Escala del Plano</b>	<b>Tolerancia altimetría (m)</b>	<b>Tolerancia planimetría (m)</b>
1:250	0.13	0.13
1:500	0.25	0.25
1:1 000	0.50	0.50
1:2 000	1.00	1.00
1:5 000	2.50	2.50
1:10 000	5.00	5.00

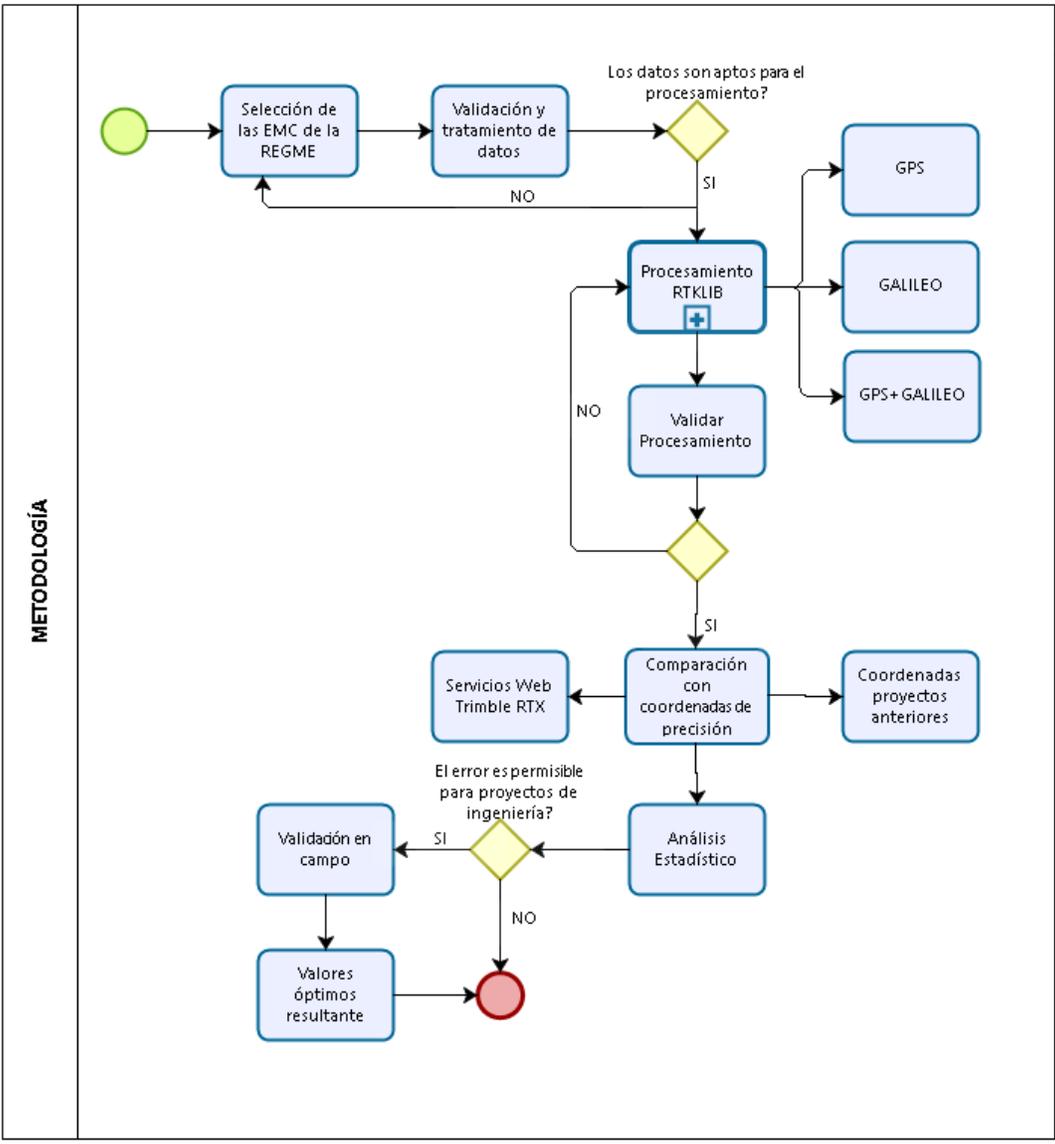
*Nota:* En la tabla se detalla la tolerancia para errores planimétricos y altimétricos. Tomado de *Norma Para Estudios y Diseños Viales* por Norma Ecuatoriana Vial, 2013

### Capítulo III: Metodología

En este capítulo, se presenta la metodología aplicada para la estimación de coordenadas mediante el Método Posicionamiento Puntual Preciso PPP de acuerdo a los objetivos establecidos al comienzo de esta investigación. A continuación, se muestra un esquema en el cual constan las diferentes etapas del proyecto (Ver figura 8).

**Figura 8**

*Diagrama metodológico*



## Selección de las Estaciones de Monitoreo Continuo de la REGME

Para realizar la selección de las Estaciones de Monitoreo Continuo de la REGME se tomó en cuenta a las estaciones que se encontraban activas durante el periodo de estudio Enero - Abril del 2022, adicional se consideró la disponibilidad de información. En la siguiente tabla se muestran las 25 estaciones seleccionadas para el presente proyecto (Ver tabla 4).

**Tabla 4**

*25 estaciones de monitoreo continuo del Ecuador seleccionadas para el procesamiento mediante el Método PPP.*

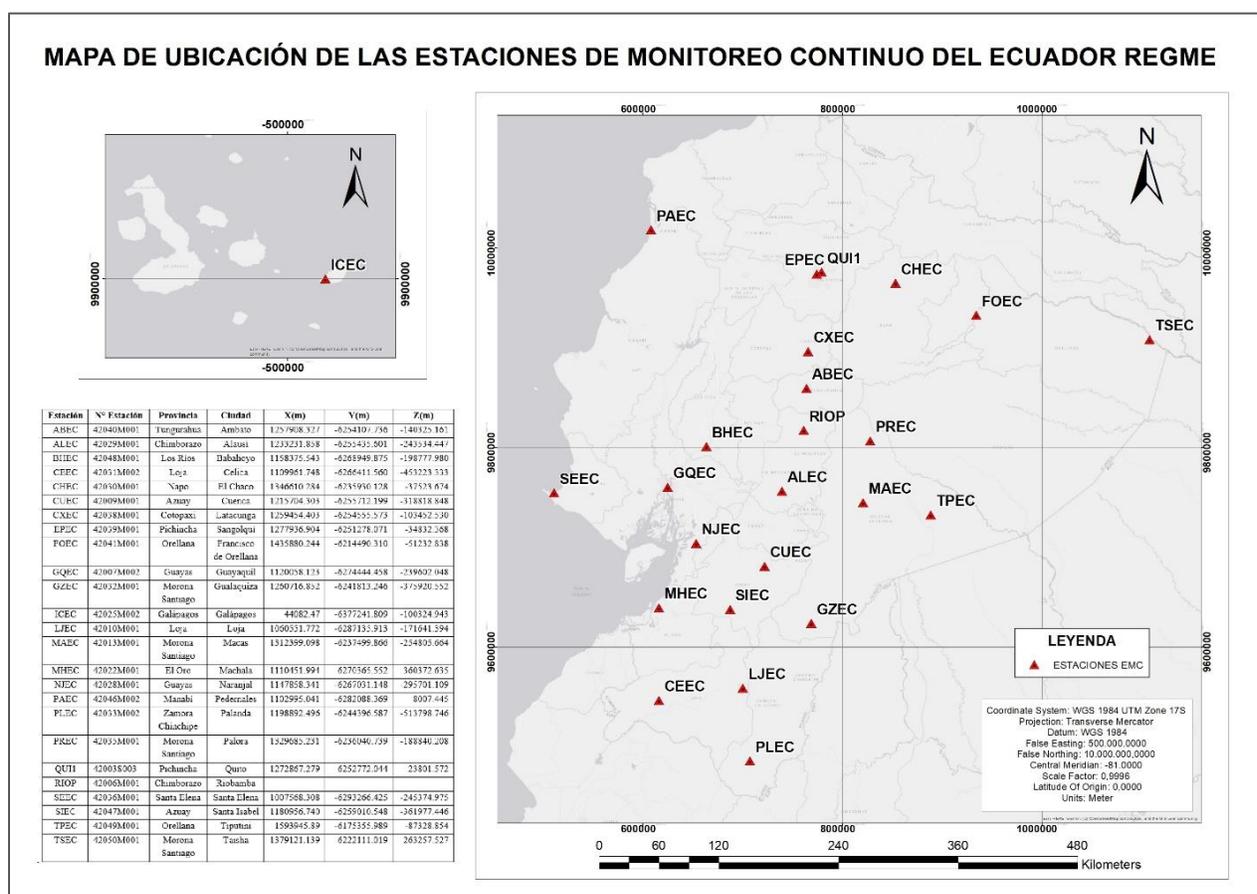
Estación	N° Estación	Provincia	Ciudad	X(m)	Y(m)	Z(m)
ABEC	42040M001	Tungurahua	Ambato	1257908.327	-6254107.736	-140325.161
ALEC	42029M001	Chimborazo	Alausí	1233231.858	-6255435.601	-243534.447
BHEC	42048M001	Los Ríos	Babahoyo	1158375.543	-6268949.875	-198777.980
CEEC	42031M002	Loja	Celica	1109961.748	-6266411.560	-453223.333
CHEC	42030M001	Napo	El Chaco	1346610.284	-6235930.128	-37523.674
CUEC	42009M001	Azuay	Cuenca	1215704.303	-6255712.199	-318818.848
CXEC	42038M001	Cotopaxi	Latacunga	1259454.403	-6254555.573	-103452.530
EPEC	42039M001	Pichincha	Sangolquí	1277936.904	-6251278.071	-34832.368
FOEC	42041M001	Orellana	Francisco de Orellana	1435880.244	-6214490.310	-51232.838
GQEC	42007M002	Guayas	Guayaquil	1120058.123	-6274444.458	-239602.048
GZEC	42032M001	Morona Santiago	Gualaquiza	1260716.852	-6241813.246	-375920.552
ICEC	42025M002	Galápagos	Galápagos	44082.47	-6377241.809	-100324.943
LJEC	42010M001	Loja	Loja	1060551.772	-6287135.913	-171641.394
MAEC	42013M001	Morona Santiago	Macas	1312399.098	-6237499.866	-254805.664
MHEC	42022M001	El Oro	Machala	1110451.994	-6270365.552	-360372.635
NJEC	42028M001	Guayas	Naranjal	1147858.341	-6267031.148	-295701.109
PAEC	42046M002	Manabí	Pedernales	1102995.041	-6282088.369	8007.445
PLEC	42033M002	Zamora Chinchipe	Palanda	1198892.496	-6244396.587	-513798.746
PREC	42035M001	Morona Santiago	Palora	1329685.231	-6236040.739	-188840.208
QUI1	42003S003	Pichincha	Quito	1272867.279	-6252772.044	-23801.572
RIOP	42006M001	Chimborazo	Riobamba			
SEEC	42036M001	Santa Elena	Santa Elena	1007568.308	-6293266.425	-245374.975

SIEC	42047M001	Azuay	Santa Isabel	1180956.740	-6259010.548	-361977.446
TPEC	42049M001	Orellana	Tiputini	1593945.89	-6175355.989	-87328.854
TSEC	42050M001	Morona Santiago	Taisha	1379121.139	-6222111.019	-263257.527

*Nota:* Tomado de *Obtención de soluciones semanales de las estaciones activas de monitoreo continuo de la red REGME, en el período continuo de enero-abril del 2022*, por Cervantes & Imbaquingo, 2022

**Figura 9**

Mapa de ubicaciones de las estaciones de monitoreo continuo del Ecuador.



Dentro de la investigación se realizó una selección de 12 días comprendidos en el periodo de estudio Enero - Abril del 2022, además se consideró una separación entre ellos de 9 a 10 días. A continuación, se muestran los días GPS seleccionados con sus respectivas fechas (Ver tabla 5).

**Tabla 5**

*Días GPS seleccionados para el procesamiento con el método Posicionamiento Puntual preciso PPP.*

<b>Day of Year</b>	<b>Fecha</b>
001	1/1/2022
011	11/1/2022
022	22/1/2022
032	1/2/2022
043	12/2/2022
053	22/2/2022
064	5/3/2022
074	15/3/2022
085	26/3/2022
095	5/4/2022
106	16/4/2022
116	26/4/2022

### **Validación y tratamiento de datos**

#### **Recopilación de archivos satelitales.**

Los archivos de las estaciones de monitoreo continuo de la REGME fueron proporcionados por el Instituto Geográfico Militar, ente rector de la información cartográfica del Ecuador, estos datos corresponden a 24 de las 25 estaciones GPS seleccionadas, con un total de 288 archivos en formato comprimido (.T02) con intervalos de grabación de 1 segundo. Por último, se descargaron de la CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System) los archivos de observación y navegación de la estación RIOP la cual pertenece a la red IGS.

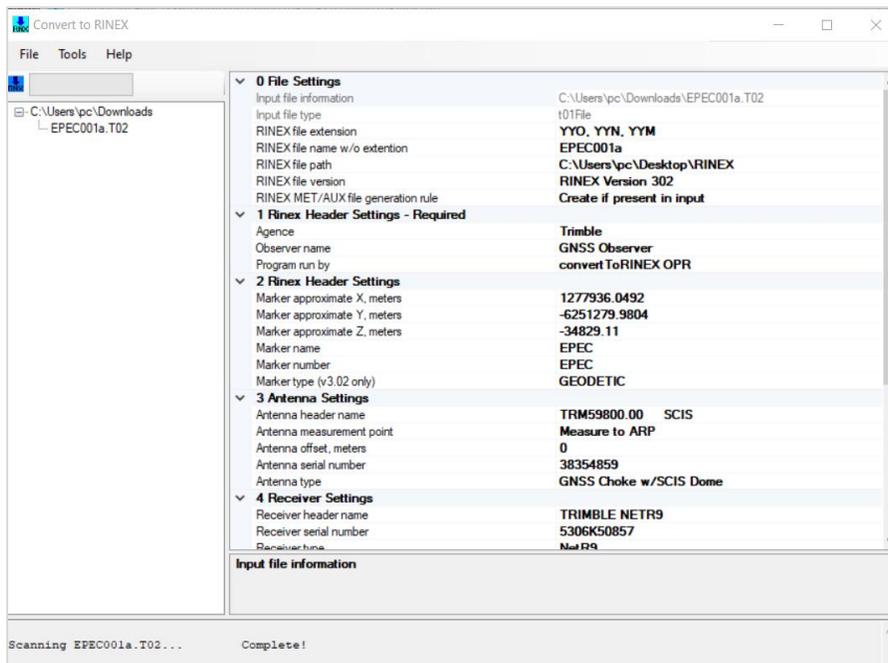
#### **Tratamiento de datos nativos**

Se convirtió los archivos nativos (.T02) a formatos RINEX versión 3.02, empleando el software Convert to RINEX descargado de la página web Trimble RINEX Convert <https://geospatial.trimble.com/trimble-rinex-converter> dando como resultado archivos RINEX de

observación (.22o) y de navegación como efemérides transmitidas (.22n) para GPS y (.22l) para Galileo (Ver figura 10).

## Figura 10

### Convert to RINEX



*Nota:* En la imagen se muestra la pantalla principal del software Convert to RINEX, donde se estable las configuraciones para el procesamiento

### Descarga de archivos de corrección

Se recopilaron los archivos de corrección generados por la IGS mediante el sitio web Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) entre ellos: archivo de órbitas precisas, archivo de parámetros de rotación de la tierra, corrección ionosférica y corrección del reloj, para facilitar la búsqueda y descarga de estos archivos es importante conocer el día y semana GPS correspondientes a los 12 días seleccionados para el análisis. Además, se incluyeron los archivos de corrección de cargas oceánicas proporcionados por el sitio web Onsala Space Observatory (OSO) (Ver tabla 6).

**Tabla 6.**

*Archivos de corrección y fuente de descarga*

<b>Archivos de corrección</b>	<b>Formato</b>	<b>Sitio Web</b>	<b>URL</b>
Archivo de orbitas precisas	(.sp3)		<a href="https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/GNSS_data_and_product_archive.html">https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/GNSS_data_and_product_archive.html</a>
Parámetros de rotación de la tierra	(.erp)	CDDIS	
Corrección del reloj	(.clk)		
Corrección ionosférica	(.ion)		
Archivos de corrección de cargas oceánicas	(.blq)	OSO	<a href="http://holt.oso.chalmers.se/loading/">http://holt.oso.chalmers.se/loading/</a>
Corrección de centro de fase de la antena del receptor	(.pcv)		
Corrección de la antena del satélite	(.atx)	Archivos que contiene el paquete de software RTKLIB	
Corrección del sesgo diferencial del código	(.DCB)		

*Nota:* En la tabla se muestra los archivos de corrección, su formato y fuente de descarga. Tomado de *Técnica de Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) aplicada a la estimación de vapor de agua precipitable (PWV) de la estación EPEC*, por M.J. Albán, 2018

### **Procesamiento del método (PPP) en el software RTKLIB**

Esta etapa corresponde al procesamiento de datos en el software libre RTKLIB donde se procesaron archivos GNSS de las constelaciones GPS y GALILEO. El Procesamiento se lo llevó a cabo en la aplicación RTKPOST empleada para importar datos, estableciendo las configuraciones de procesamiento acorde al método PPP. Se utilizó como insumos los archivos

RINEX de las 25 estaciones de monitoreo continuo con observaciones a intervalos de grabación de 1 segundo y los archivos de corrección recopilados.

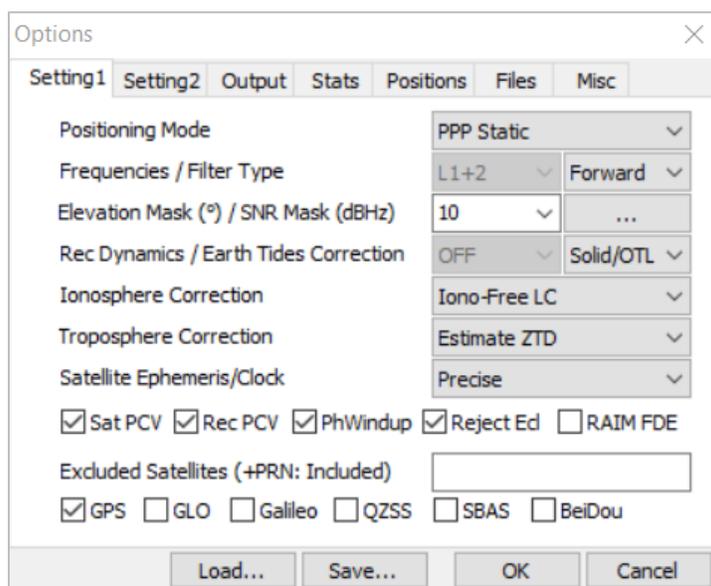
### Procesamiento del método (PPP) constelación GPS

En el caso del procesamiento con la constelación GPS las configuraciones empleadas (Options) fueron las siguientes (Ver figura 11).

- Positioning Mode: “PPP Static”
- Frequencies / Filter Type: Forward
- Elevation Mask (°) / SNR Mask (dBHz): 10°
- Rec Dynamics Earth Tides Correction: “Solid/OTL”
- Ionosphere Correction: “Ion Free LC”
- Troposphere Correction: “Estimate ZTD”
- Satellite Ephemeris / Clock: “Precise”

### Figura 11

Ventana de configuración Setting 1- GPS



*Nota:* En la tabla se muestra la ventana de configuración Setting 1 para el procesamiento realizado con la constelación GPS

En Setting 2 se configuró que las ambigüedades sean enteras como se muestra a continuación (Ver figura 12).

- Integer Ambiguity Res (GPS/GLO): Fix and H

**Figura 12**

*Ventana de configuración Setting 2- GPS*

Setting1	Setting2	Output	Stats	Positions	Files	Misc
Integer Ambiguity Res (GPS/GLO)		Fix and H	ON			
Min Ratio to Fix Ambiguity		3				
Min Confidence / Max FCB to Fix Amb		0.9999	0.25			
Min Lock / Elevation (°) to Fix Amb		0	0			
Min Fix / Elevation (°) to Hold Amb		10	0			
Outage to Reset Amb/Slip Thres (m)		5	0.050			
Max Age of Diff (s) / Sync Solution		30.0	ON			
Reject Threshold of GDOP/Innov (m)		30.0	30.0			
Number of Filter Iteration		1				
<input type="checkbox"/> Baseline Length Constraint (m)		0.000	0.000			

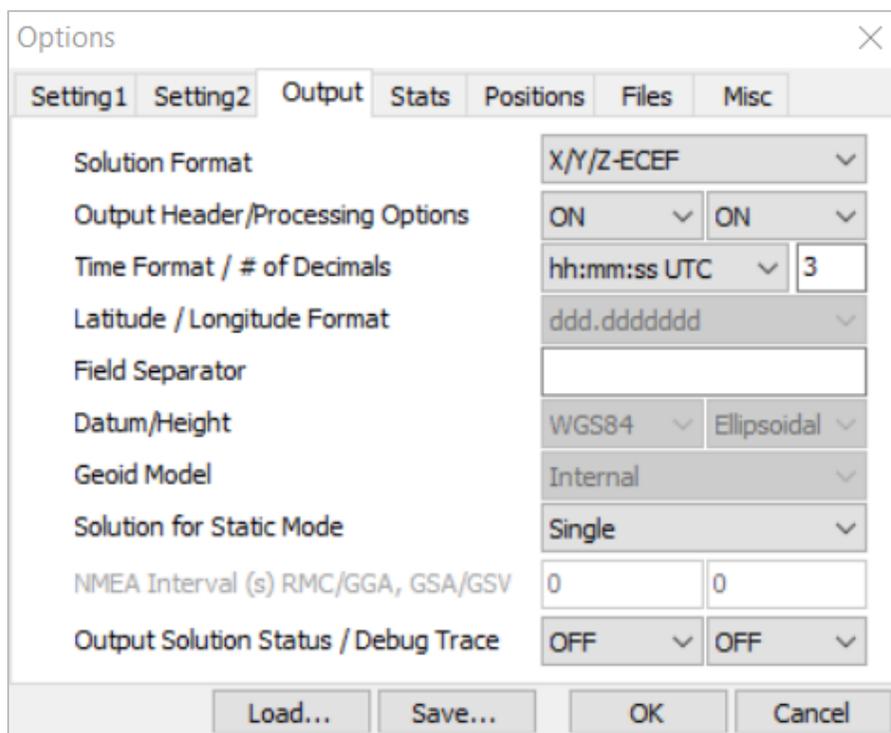
*Nota:* En la imagen se muestra las configuraciones realizadas en la ventana Setting 2

Las siguientes configuraciones corresponden a los archivos de salidas (Output), para lo cual se estableció que se generen coordenadas cartesianas (X/Y/Z) como producto, considerando el tiempo UTC, y que calcule una sola solución, como se muestra a continuación (Ver figura 13).

- Solution Format: X/Y/Z-ECEF
- Time Format / # of Decimals: hh:mm:ss UTC
- Solution for Static Mode: Single

**Figura 13**

Ventana de configuración Output



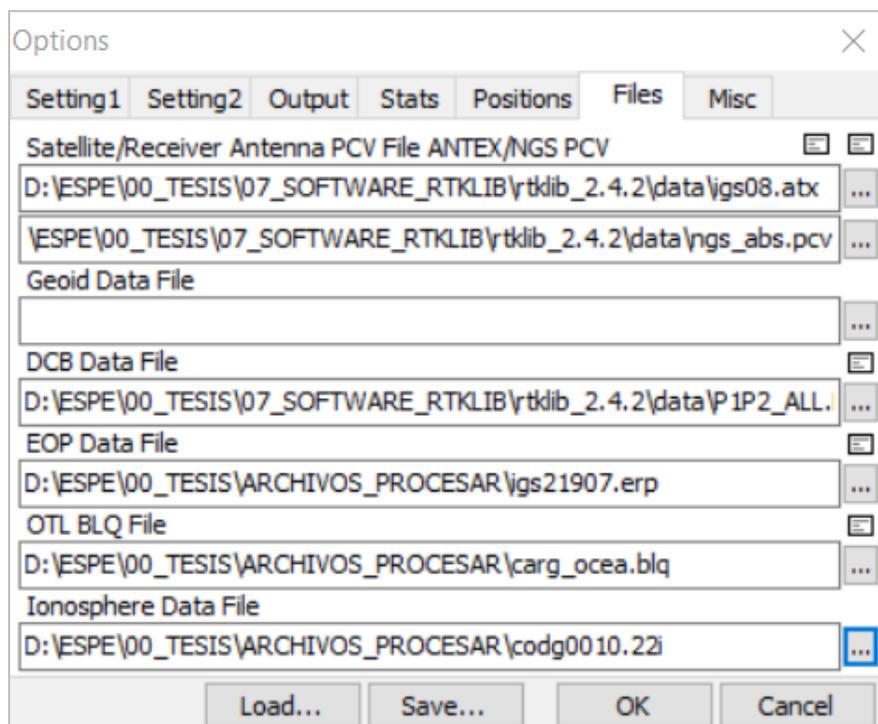
*Nota:* En la imagen se muestra las configuraciones realizadas en la ventana Output

Las siguientes configuraciones (Files) están relacionadas a la carga de archivos de corrección detallados en la tabla 6, los tres primeros archivos corresponden a la corrección de la antena del satélite (.atx), corrección de centro de fase de la antena del receptor (.pcv) y corrección del sesgo diferencial del código (.DCB), dichos archivos se encuentran localizados en la carpeta "data" que pertenece al mismo software (Ver figura 14).

Los siguientes archivos que el programa requiere cargar son los parámetros de rotación de la tierra (.erp), archivo de corrección de cargas oceánicas (.blq), y finalmente el archivo de corrección ionosférica (.ion) (Ver figura 14).

**Figura 14**

*Carga de archivos de corrección*

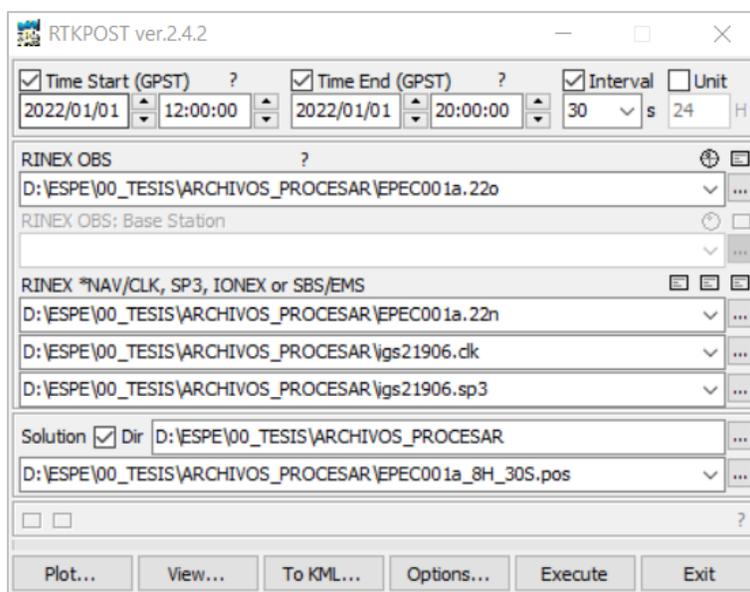


*Nota:* En la imagen se muestra los archivos cargados en la ventana Files

En la ventana principal de RTKPOST se definió el tiempo de inicio (12 am) y fin del procesamiento, para la presente investigación se realizó el análisis a diferentes periodos de tiempo (2 horas, 4 horas, 8 horas y 24 Horas) e intervalos de grabación (5 segundos, 5 segundos, 30 segundos y 30 segundos) respectivamente además se estableció la fecha (Año/Mes/Día) y hora (Hora/ Minutos/ Segundos) en tiempo UTC. En esta ventana se deben cargar los archivos RINEX de observación (.22o) y navegación (.22n), de la misma manera se cargan los archivos de corrección del reloj (.clk) y el de órbitas precisas (.sp3). Una vez configurados el programa e ingresadas las correcciones se inicia el procesamiento de los datos (Ver figura 15).

Figura 15

## Ventana RTKPOST – GPS



*Nota:* En la imagen se muestra los archivos cargados en la ventana principal, para el procesamiento con GPS

Como resultado se obtiene un solo archivo de salida formato EPEC001XXX.pos, en el cual se refleja a detalle el procesamiento, los archivos cargados, el tiempo de inicio y fin, las configuraciones, y la coordenada cartesiana (X/Y/Z) calculada (Ver figura 16).

Figura 16

## Archivo de salidas formato EPEC001XXX.pos

```

EPEC001a_8H_30S.pos: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
% program : RTKPOST ver.2.4.2
% inp file : D:\ESPE\00_TESIS\ARCHIVOS_PROCESAR\EPEC001a.22o
% inp file : D:\ESPE\00_TESIS\ARCHIVOS_PROCESAR\EPEC001a.22n
% inp file : D:\ESPE\00_TESIS\ARCHIVOS_PROCESAR\igs21906.clk
% inp file : D:\ESPE\00_TESIS\ARCHIVOS_PROCESAR\igs21906.sp3
% obs start : 2022/01/01 11:59:44.0 UTC (week2190 561600.0s)
% obs end : 2022/01/01 19:59:44.0 UTC (week2190 590400.0s)
% pos mode : ppp-static
% solution : forward
% elev mask : 10.0 deg
% dynamics : off
% tidecorr : on
% tropo opt : est ztd
% ephemeris : precise
% antennal : ( 0.0000 0.0000 0.0000)
%
% (x/y/z-ecef=WGS84,Q=1:fix,2:float,3:sbas,4:dgps,5:single,6:ppp,ns=# of satellites)
% UTC x-ecef(m) y-ecef(m) z-ecef(m) Q ns sdx(m) sdy(m) sdz(m) sdx(m) sdy(m) sdz(m) sdx(m) sdy(m) sdz(m) age(s) ratio
2022/01/01 11:59:44.000 1277936.9450 -6251278.0265 -34832.3605 6 9 0.0078 0.0102 0.0027 -0.0023 0.0019 -0.0011 0.00 0.0

```

*Nota:* En la imagen se muestra el archivo de salida generado al culminar el procesamiento

## Procesamiento del método (PPP) constelación Galileo

Para llevar a cabo el procesamiento con la constelación Galileo, las configuraciones empleadas (Options) difieren en el tipo de efemérides, en este caso transmitidas y la selección de la constelación Galileo (Ver figura 17).

- Satellite Ephemeris / Clock: "Broadcast"

**Figura 17**

*Ventana de configuración Setting 1 – Galileo*

Setting1	Setting2	Output	Stats	Positions	Files	Misc
Positioning Mode	PPP Static					
Frequencies / Filter Type	L1+2	Forward				
Elevation Mask (°) / SNR Mask (dBHz)	10	...				
Rec Dynamics / Earth Tides Correction	OFF	Solid/OTL				
Ionosphere Correction	Iono-Free LC					
Troposphere Correction	Estimate ZTD					
Satellite Ephemeris/Clock	Broadcast					
<input checked="" type="checkbox"/> Sat PCV <input checked="" type="checkbox"/> Rec PCV <input checked="" type="checkbox"/> PhWindup <input checked="" type="checkbox"/> Reject Ed <input type="checkbox"/> RAIM FDE						
Excluded Satellites (+PRN: Included)						
<input type="checkbox"/> GPS <input type="checkbox"/> GLO <input checked="" type="checkbox"/> Galileo <input type="checkbox"/> QZSS <input type="checkbox"/> SBAS <input type="checkbox"/> BeiDou						
Load...		Save...		OK		Cancel

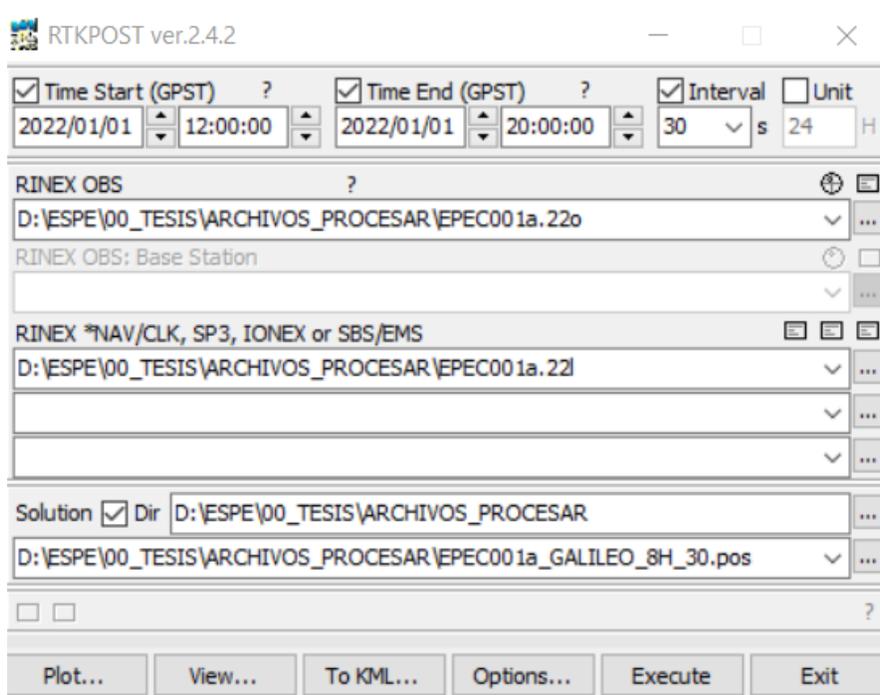
*Nota:* En la tabla se muestra la ventana de configuración Setting 1 para el procesamiento realizado con la constelación Galileo

Las configuraciones en Setting2, Output y la carga de archivos de corrección (Files) se conservan igual como se muestran en las Figuras 12,13 y 14. La diferencia se presenta en la ventana principal de RTKPOST donde únicamente se cargan los archivos de observación (.22o) y las efemérides transmitidas (.22l) correspondientes a la constelación Galileo (Ver figura 18).

De la misma manera se realizó el análisis a diferentes periodos de tiempo e intervalos de grabación, como se estableció en la constelación GPS. Una vez configurado el programa e ingresado las correcciones se inicia el procesamiento de los datos.

**Figura 18**

*Ventana RTKPOST - GALILEO*



*Nota:* En la imagen se muestra los archivos cargados en la ventana principal, para el procesamiento con Galileo

### **Procesamiento del método (PPP) combinación GPS + Galileo**

Para llevar a cabo el procesamiento con la combinación GPS+ Galileo, las configuraciones empleadas (Options) difieren en el tipo de efemérides (transmitidas) y la selección de la constelación GPS y Galileo (Ver figura 19).

- Satellite Ephemeris / Clock: "Broadcast"

**Figura 19**

Ventana de configuración Setting 1 combinación GPS+ Galileo

Options

Setting1 Setting2 Output Stats Positions Files Misc

Positioning Mode PPP Static

Frequencies / Filter Type L1+2 Forward

Elevation Mask (°) / SNR Mask (dBHz) 10 ...

Rec Dynamics / Earth Tides Correction OFF Solid/OTL

Ionosphere Correction Iono-Free LC

Troposphere Correction Estimate ZTD

Satellite Ephemeris/Clock Broadcast

Sat PCV  Rec PCV  PhWindup  Reject Ed  RAIM FDE

Excluded Satellites (+PRN: Included)

GPS  GLO  Galileo  QZSS  SBAS  BeiDou

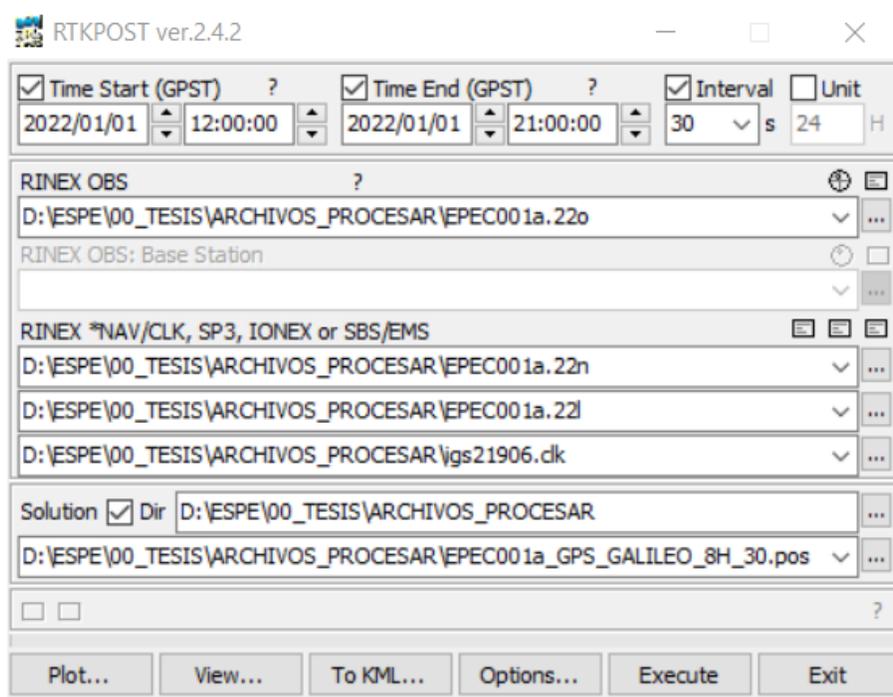
Load... Save... OK Cancel

*Nota:* En la tabla se muestra la ventana de configuración Setting 1 para el procesamiento realizado con la constelación GPS + Galileo

Para el procesamiento de la combinación GPS + GALILEO, se consideró los mismos periodos de tiempo e intervalos de grabación, la diferencia se presenta en la cargar las efemérides transmitidas (.22n) para GPS y (.22l) para Galileo, además se cargó el archivo de corrección del reloj (.clk) como se muestra en la Figura 20.

**Figura 20**

Ventana RTKPOST combinación GPS + GALILEO



*Nota:* En la imagen se muestra los archivos cargados en la ventana principal, para el procesamiento con GPS + Galileo

### Comparación con coordenadas de precisión y análisis estadístico

Una vez obtenidas las soluciones procesadas en el software libre RTKLIB mediante la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso PPP se realizó la comparación con las efemérides finales obtenidas en el proyecto denominado “Obtención de soluciones semanales de la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador - REGME a través de procesamiento en el software científico Bernese 5.2”, obteniendo una diferencia entre coordenadas cartesianas ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ) y coordenadas topocéntricas ( $\Delta E$ ,  $\Delta N$ ,  $\Delta U$ ). Una vez calculada la diferencia entre las soluciones se realizó el análisis estadístico correspondiente a la diferencia máxima, diferencia mínima, media aritmética y desviación estándar. Con el fin de analizar el funcionamiento del software RTKLIB se realizó una comparación con las coordenadas obtenidas mediante el servicio web

que ofrece Trimble RTX , el cual proporciona posicionamiento con precisiones centimétricas en tiempo real, para ello se tomó como ejemplo de análisis la estación EPEC.

### Validación en campo

Para la validación de esta técnica se seleccionaron dos puntos de la red geodésica de la UFA-ESPE, en los cuales se realizó un rastreo satelital de 8 horas mediante método estático, con un intervalo de grabación de 5 segundos y máscara de elevación de 10 grados. Los equipos utilizados fueron: GNSS Trimble R8s doble frecuencia (Ver figura 21 y 22). Para el procesamiento de los datos GPS se convirtió los archivos formato nativo (.T02) a archivos RINEX de observación y navegación. Se realizó la descarga de los archivos de corrección correspondientes al día que se realizó el rastreo satelital (20/12/2022), que posteriormente fueron cargados y procesados en el software RTKLIB.

#### Figura 22

*Punto 1- Equipo Trimble R8s*



#### Figura 21

*Punto 2- Equipo Trimble R8s*



*Nota:* En las imágenes se muestra los puntos de rastreo sobre la Red Geodésica de la UFA - ESPE

## Capítulo IV: Análisis De Resultados

### Resultados generales del procesamiento mediante el método Posicionamiento Puntual

#### Preciso de la REGME

Para la presente investigación se procesaron 12 días correspondientes a 12 semanas GPS, empezando con el día 01 de enero hasta el día 26 de abril del 2022. Se obtuvieron un total de 2840 estimaciones de las 25 estaciones de monitoreo continuo de la REGME, las 844 siguientes se obtuvieron a través del procesamiento con la constelación Galileo y las 844 restantes se obtuvieron por medio del procesamiento de la combinación de GPS + Galileo. En la tabla 7 se representa la disponibilidad de datos recopilados por cada estación.

**Tabla 7.**

*Porcentaje de los datos recopilados (GPS y Galileo) por cada estación de la REGME*

<b>Estación</b>	<b>Porcentaje días recopilados GPS</b>	<b>Porcentaje días recopilados Galileo</b>
ABEC	100%	100%
ALEC	100%	100%
BHEC	100%	100%
CEEC	100%	100%
CHEC	100%	100%
CUEC	100%	0%
CXEC	100%	100%
EPEC	100%	100%
FOEC	100%	66.66%
GQEC	100%	100%
GZEC	100%	100%

ICEC	100%	0%
LJEC	100%	0%
MAEC	100%	100%
MHEC	100%	100%
NJEC	100%	100%
PAEC	100%	100%
PLEC	100%	100%
PREC	100%	100%
QUI1	100%	0%
RIOP	100%	0%
SEEC	100%	91.66%
SIEC	100%	100%
TPEC	91.66%	0%
TSEC	100%	0%

*Nota:* En la tabla se muestra el porcentaje de disponibilidad de información de las EMEC correspondiente a las costelaciones GPS y Galileo

Se recopilaron un total de 288 archivos en formato nativo (.T02) desde el día 1 de enero hasta el 26 de abril del 2022, mediante la conversión a archivos RINEX se obtuvo archivos de observación y navegación para GPS y Galileo, tomando en cuenta que las estaciones CUEC, ICEC, LJEC, QUI1, TPEC, RIOP y TSEC, no contaron con los archivos de navegación para Galileo debido a que los equipos GNSS de estas estaciones no rastrean esta constelación o no fue posible su conversión. Además, los archivos de observación y navegación de la estación RIOP fueron descargados directamente de la CDDIS en su página oficial (<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/2022/001/22o/>).

**Análisis de los diferenciales obtenidos mediante la comparación de coordenadas de la estación EPEC, procesadas con la constelación GPS.**

Concluido el cálculo de coordenadas cartesianas obtenidas mediante el método PPP, procesadas con la constelación GPS en periodos de tiempo de 2 horas, 4 horas, 8 horas y 24 horas, se realizó un análisis comparativo con las coordenadas semanales procesadas en software Bernese.

Se considero como ejemplo la estación EPEC para realizar esta comparación, siendo una de las estaciones que reflejó los mejores resultados en el procesamiento, esto se debe que contó con todos archivos RINEX de los 12 días procesados, además, de que sus resultados en cuanto a precisión no presentaron mayor alteración como ocurrió en otras estaciones. Para poder analizar el error del desplazamiento en Este, Norte y altura se transformó las coordenadas cartesianas a coordenadas topocéntricas (ENU). Acorde a lo descrito, la diferencia obtenida a través de esta comparación se encuentra dada por  $\Delta E$ ,  $\Delta N$  y  $\Delta U$  (Ver tabla 8).

**Tabla 8**

*Diferenciales de las coordenadas obtenidas en el software RTKLIB vs software BERNESE de la estación EPEC, procesadas con la constelación GPS a diferentes rangos de tiempo.*

DOY	Diferenciales de las coordenadas obtenidas en RTKLIB vs BERNESE de la estación EPEC											
	2 Horas			4 Horas			8 Horas			24 Horas		
	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$
001	11.14	0.82	2.54	8.26	0.56	1.15	0.11	0.72	5.93	1.66	1.31	4.99
011	10.68	2.09	6.22	7.38	0.00	3.77	1.24	0.28	3.35	1.76	0.25	0.25
022	6.66	1.07	1.00	2.21	0.67	6.86	2.74	0.71	2.70	0.28	0.73	2.23
032	5.71	0.85	6.10	3.04	0.69	11.12	1.45	0.52	2.84	1.52	1.07	2.41
043	4.87	0.32	7.66	1.85	0.11	11.27	2.06	0.81	3.37	0.63	1.41	1.93
053	1.23	0.78	11.98	0.89	0.16	13.29	3.60	1.24	2.75	2.25	0.92	2.04
064	0.28	1.70	16.94	1.07	0.25	11.55	3.87	1.16	3.15	2.56	1.23	3.41
074	4.92	0.36	17.34	1.33	0.43	7.86	2.62	1.37	1.82	1.90	1.02	3.49
085	6.00	1.84	9.81	0.16	0.89	7.08	2.97	1.63	2.31	1.53	1.33	2.93
095	10.46	2.56	8.99	1.03	0.38	6.04	2.52	0.92	4.07	3.20	0.46	3.81
106	5.78	0.62	5.27	2.16	1.14	1.56	1.10	1.15	1.68	1.02	1.14	1.13
116	1.88	0.78	5.52	1.45	0.81	0.16	0.08	1.36	1.22	3.73	0.75	1.68

**Resumen estadístico descriptivo de las coordenadas obtenidas mediante el método PPP de la estación EPEC, procesadas con la constelación GPS**

Con los diferenciales obtenidos en  $\Delta E$ ,  $\Delta N$  y  $\Delta U$ , se realizó el análisis estadístico descriptivo, en el cual se calculó el valor máximo, el valor mínimo, la media aritmética y la desviación estándar (Ver tabla 9). Dichos cálculos corresponden al procesamiento de la estación de monitoreo continuo EPEC en periodos de tiempo de 2 horas, 4 horas, 8 horas y 24 horas, logrando determinar que a mayor tiempo de rastreo las precisiones mejoran (Ver figura 23). Con el fin de identificar el desplazamiento en el componente horizontal (Este y Norte) y vertical se calculó el RMSE (Ver tabla 10), el mismo que sirve como referencia para verificar el cumplimiento de las precisiones requeridas.

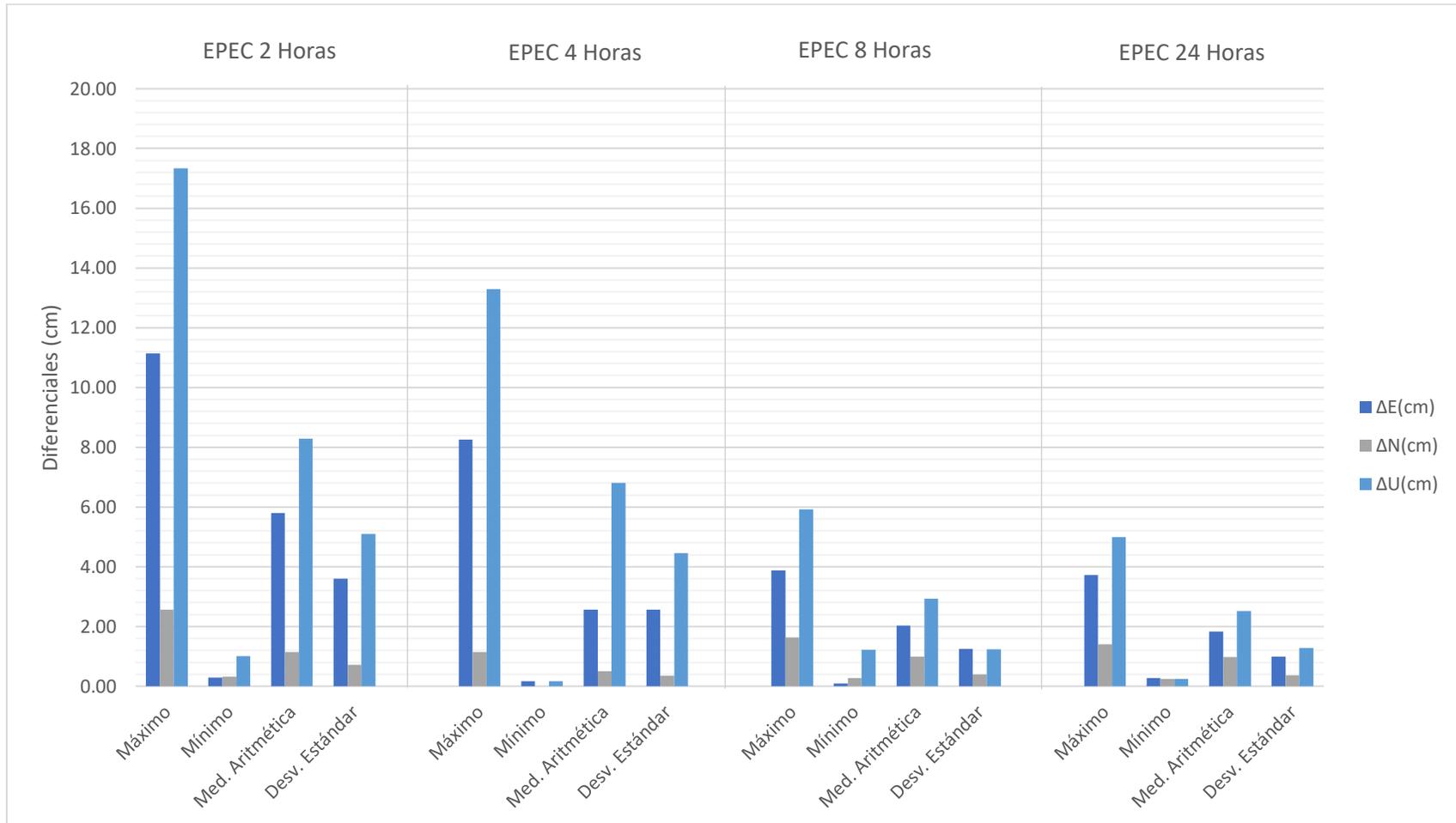
**Tabla 9.**

*Análisis estadístico de la estación EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (constelación GPS)*

<b>EPEC 2 Horas - GPS</b>				<b>EPEC 4 Horas - GPS</b>			
	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$		$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$
Máximo	11.14	2.56	17.34	Máximo	8.26	1.14	13.29
Mínimo	0.28	0.32	1.00	Mínimo	0.16	0.00	0.16
Med. Aritmética	5.80	1.15	8.28	Med. Aritmética	2.57	0.51	6.81
Desv. Estándar	3.61	0.72	5.10	Desv. Estándar	2.57	0.35	4.45
<b>EPEC 8 Horas - GPS</b>				<b>EPEC 24 Horas - GPS</b>			
	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$		$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$
Máximo	3.87	1.63	5.93	Máximo	3.73	1.41	4.99
Mínimo	0.085	0.28	1.22	Mínimo	0.28	0.25	0.25
Med. Aritmética	2.03	0.99	2.93	Med. Aritmética	1.84	0.97	2.52
Desv. Estándar	1.25	0.40	1.24	Desv. Estándar	1.00	0.36	1.28

**Figura 23**

Gráfico de barras del análisis estadístico de la estación EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (constelación GPS)



**Tabla 10.**

*RMSE de los componentes horizontal y vertical de los días GPS, procesados a diferentes rangos de tiempo (GPS)*

DOY	2 HORAS		4 HORAS		8 HORAS		24 HORAS	
	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE
	Horizontal (cm)	Vertical (cm)						
001	11.167	2.539	8.278	1.145	0.729	5.926	2.116	4.985
011	10.880	6.222	7.375	3.769	1.276	3.352	1.778	0.247
022	6.746	1.004	2.306	6.859	2.834	2.701	0.780	2.227
032	5.769	6.102	3.118	11.116	1.540	2.836	1.859	2.411
043	4.882	7.658	1.856	11.271	2.218	3.366	1.544	1.930
053	1.457	11.978	0.905	13.294	3.807	2.751	2.430	2.036
064	1.724	16.942	1.103	11.554	4.045	3.154	2.840	3.408
074	4.935	17.338	1.397	7.863	2.953	1.824	2.158	3.486
085	6.279	9.808	0.905	7.078	3.388	2.305	2.031	2.934
095	10.767	8.987	1.100	6.039	2.680	4.073	3.236	3.811
106	5.810	5.268	2.439	1.563	1.594	1.683	1.529	1.131
116	2.036	5.515	1.661	0.163	1.363	1.216	3.801	1.676

### **Análisis del Error cuadrático medio (RMSE) de los diferenciales $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ (Constelación GPS)**

Para analizar el comportamiento de las 25 estaciones de monitoreo continuo procesadas con la constelación GPS, se calculó del error cuadrático medio (RMSE) para X, Y y Z (Ver tabla 11), con el fin de identificar las estaciones que presentan un mayor error, dicho análisis se lo realizó para los diferentes tiempos de rastreo; 2 horas (Ver figuras 24), 4 horas (Ver figuras 25), 8 horas (Ver figuras 26) y 24 horas (Ver figuras 27).

De esta manera, se pudo determinar que las estaciones ABEC, MHEC, PLEC, PREC y TSEC presentan los valores más altos en el RMSE, demostrando que existe un error más alto en estas estaciones, dicho error está relacionado a varios factores, sin embargo, el más evidente fue los cortes de señal durante el periodo de rastreo.

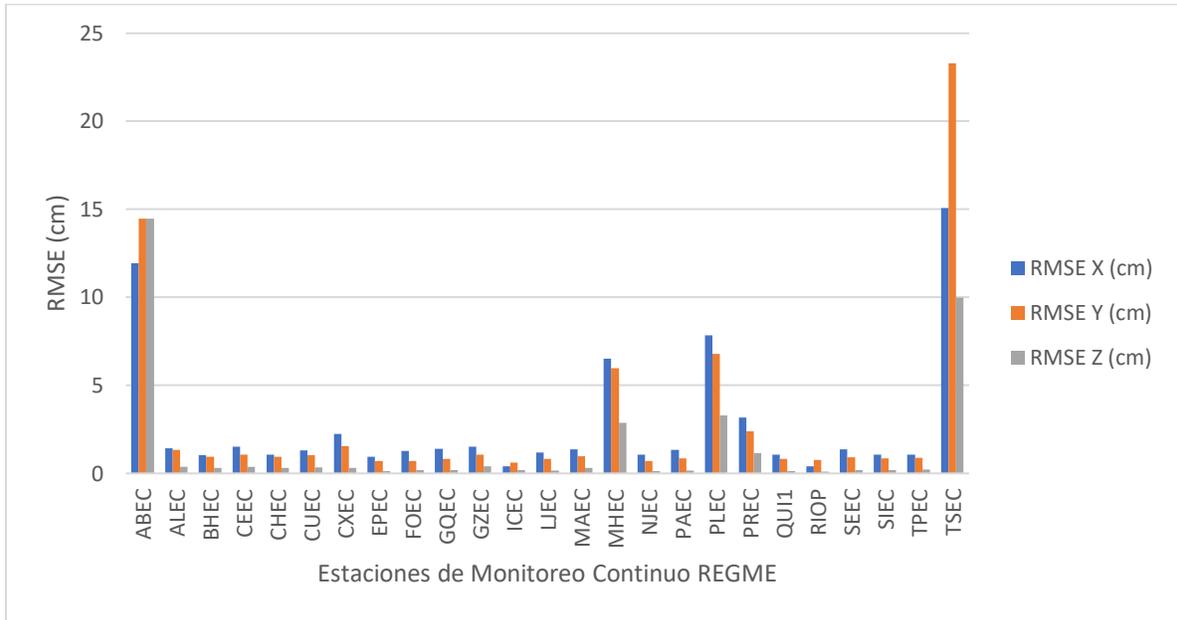
Tabla 11.

*RMSE promedio de las diferencias  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  empleando EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (constelación GPS)*

Estación	2 Horas			4 Horas			8 Horas			24 Horas		
	RMSE X (cm)	RMSE Y (cm)	RMSE Z (cm)	RMSE X (cm)	RMSE Y (cm)	RMSE Z (cm)	RMSE X (cm)	RMSE Y (cm)	RMSE Z (cm)	RMSE X (cm)	RMSE Y (cm)	RMSE Z (cm)
ABEC	11.9336	14.4635	14.4745	17.8377	33.4029	9.5803	2.9829	2.3256	0.6472	0.9756	0.6792	0.2177
ALEC	1.4394	1.3384	0.3606	0.8703	0.8174	0.1595	0.2000	0.5985	0.1458	0.1372	0.5574	0.0635
BHEC	1.0382	0.9359	0.3254	0.6989	0.8050	0.2205	0.3008	0.7515	0.2040	0.4571	0.5612	0.0673
CEEC	1.5291	1.0696	0.3833	1.1493	0.9513	0.2425	0.4039	0.9073	0.2362	0.5696	0.7031	0.0763
CHEC	1.0712	0.9440	0.3189	0.8899	0.8357	0.2167	0.3142	0.6682	0.2206	0.4488	0.4628	0.0689
CUEC	1.2961	1.0483	0.3494	0.9857	0.8534	0.2351	0.3129	0.7614	0.2253	0.4453	0.5330	0.0601
CXEC	2.2416	1.5406	0.3137	1.5327	1.3632	0.1457	0.5869	1.3738	0.1492	0.7625	1.0084	0.0783
EPEC	0.9452	0.6944	0.1341	0.7092	0.5189	0.0605	0.1524	0.3641	0.1057	0.2924	0.1906	0.1026
FOEC	1.2689	0.7013	0.1799	0.9330	0.4700	0.0721	0.4056	0.2706	0.0874	0.4856	0.4395	0.0795
GQEC	1.4010	0.8111	0.2021	0.9046	0.5062	0.0462	0.3654	0.2779	0.0838	0.4226	0.3832	0.0609
GZEC	1.5205	1.0765	0.3918	1.0430	0.8619	0.2509	0.3212	0.6874	0.2161	0.4515	0.4395	0.0605
ICEC	0.3962	0.6155	0.2063	0.2047	0.4407	0.1121	0.2146	0.2622	0.1132	0.2793	0.2144	0.0847
LJEC	1.1982	0.8380	0.1615	0.8933	0.4819	0.0572	0.2206	0.2837	0.1183	0.3440	0.2043	0.0955
MAEC	1.3658	0.9745	0.3145	1.2027	0.8331	0.2763	0.3682	0.7436	0.2192	0.4669	0.5348	0.0742
MHEC	6.5096	5.9818	2.8671	6.0315	5.3194	1.9985	3.5337	3.0376	0.8925	0.7186	0.9367	0.1367
NJEC	1.0800	0.7081	0.1457	0.7593	0.5184	0.0646	0.1938	0.3369	0.1206	0.2478	0.2279	0.1218
PAEC	1.3355	0.8642	0.1682	1.4778	0.6191	0.0904	0.8104	0.4803	0.1122	0.9362	0.3171	0.1314
PLEC	7.8557	6.7803	3.2981	4.6790	4.2933	2.7872	2.0100	3.0292	1.0298	1.2035	0.5347	0.2111
PREC	3.1899	2.3816	1.1510	2.8861	2.1075	0.7718	1.4073	1.7246	0.9437	1.7478	1.2833	0.8874
QUI1	1.0789	0.8348	0.1437	0.7621	0.5217	0.0780	0.3030	0.2406	0.0893	0.3672	0.4305	0.1001
RIOP	0.4040	0.7770	0.0938	0.2301	0.5171	0.0724	0.2863	0.3276	0.0759	0.3744	0.5016	0.0680
SEEC	1.3533	0.9170	0.1909	0.9552	0.4938	0.0592	0.2232	0.3642	0.0952	0.3362	0.2693	0.0763
SIEC	1.0788	0.8531	0.1860	0.8599	0.5962	0.1241	0.3930	0.5012	0.0992	0.5590	0.3490	0.0806
TPEC	1.0679	0.9006	0.2312	0.8590	0.4901	0.1347	0.4048	0.2924	0.0882	0.2388	0.2188	0.0521
TSEC	15.0836	23.3075	9.9862	10.0515	8.1415	9.8877	5.0071	3.3994	1.2235	1.6098	0.8526	0.3257

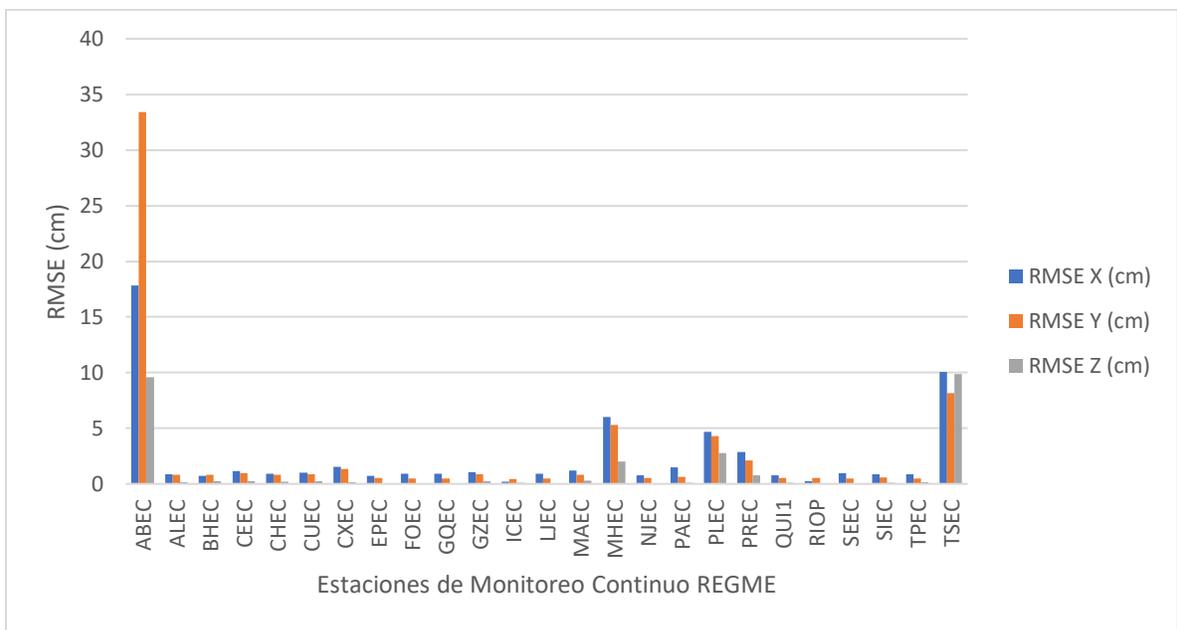
**Figura 24.**

*Gráfico del RMSE promedio de las diferencias  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  empleando un periodo de tiempo de 2 horas (constelación GPS)*



**Figura 25.**

*Gráfico del RMSE promedio de las diferencias  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  empleando un periodo de tiempo de 4 horas (constelación GPS)*



**Figura 26.**

Gráfico del RMSE promedio de las diferencias  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  empleando un periodo de tiempo de 8 horas (constelación GPS)

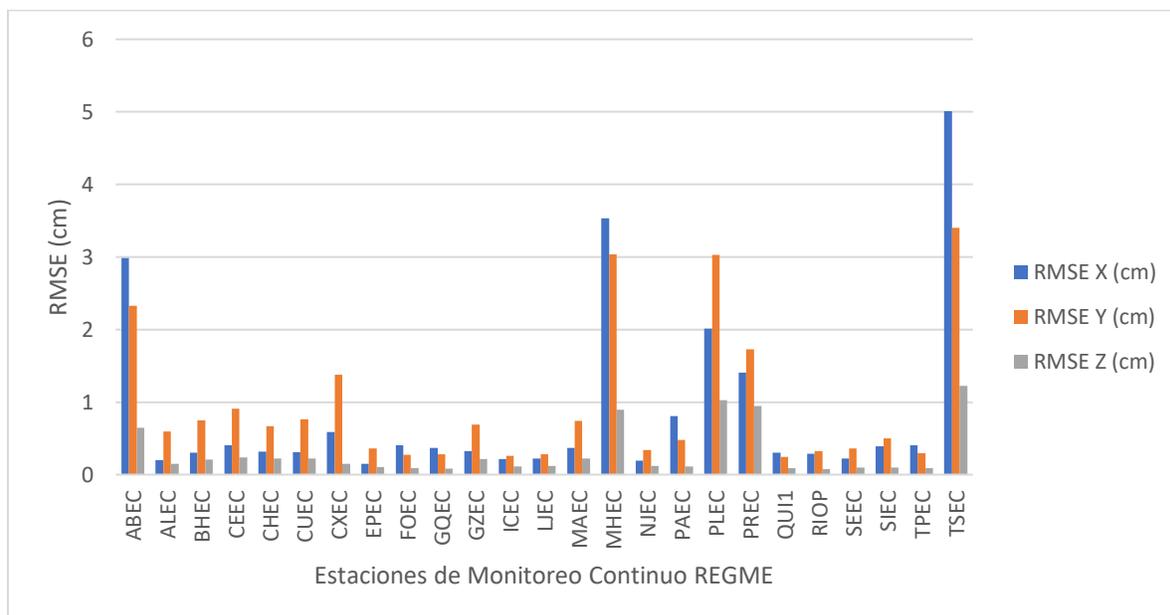
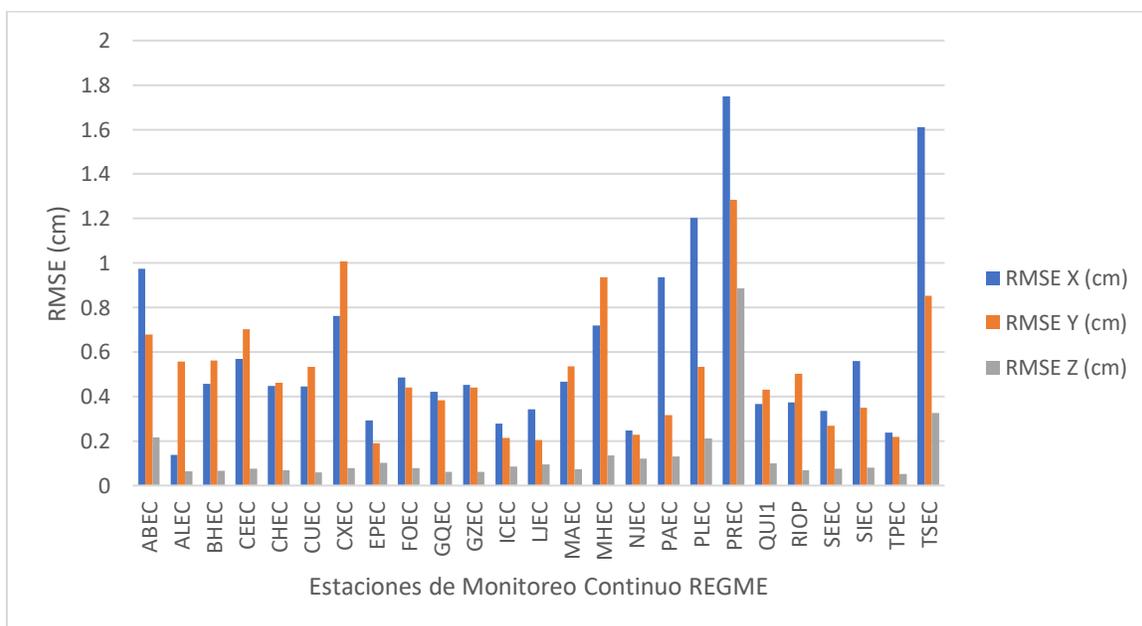
**Figura 27.**

Gráfico del RMSE promedio de las diferencias  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  empleando un periodo de tiempo de 24 horas (constelación GPS)



**Análisis de los diferenciales obtenidos mediante la comparación de coordenadas de la estación EPEC, procesadas con la constelación Galileo.**

De igual forma una vez calculadas las coordenadas cartesianas obtenidas mediante el método PPP, esta vez procesadas con la constelación Galileo en periodos de tiempo de 2 horas, 4 horas, 8 horas y 24 horas, se hizo un análisis comparativo con las coordenadas semanales procesadas en software Bernese de la estación EPEC, con el fin de analizar el error del desplazamiento en Este, Norte y altura se transformó las coordenadas cartesianas de a coordenadas topocéntricas (ENU) y el las diferencias obtenidas a través de esta comparación se encuentran dadas por  $\Delta E$ ,  $\Delta N$  y  $\Delta U$  (Ver tabla 12).

**Tabla 12.**

*Diferenciales de las coordenadas obtenidas en el software RTKLIB vs software BERNESE de la estación EPEC, procesadas con la constelación Galileo a diferentes rangos de tiempo.*

DOY	Diferenciales de las coordenadas obtenidas en RTKLIB vs BERNESE de la estación EPEC											
	2 Horas			4 Horas			8 Horas			24 Horas		
	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$
001	5.02	3.60	1.54	10.46	0.29	3.80	29.90	3.36	15.43	12.94	0.22	11.16
011	72.93	14.62	39.23	36.62	0.51	25.08	56.41	0.45	30.04	37.44	1.39	24.71
022	45.52	4.26	14.34	73.31	3.67	40.35	49.38	3.71	39.85	48.92	1.97	44.03
032	63.80	14.41	45.04	70.07	3.42	45.67	43.86	4.23	34.80	24.92	0.51	16.74
043	80.14	3.99	33.46	81.65	2.14	39.36	63.34	12.29	51.39	48.30	4.59	34.54
053	82.01	11.22	47.01	64.47	2.09	44.91	40.42	0.53	28.89	58.65	1.26	35.52
064	61.70	8.24	39.28	46.59	3.16	28.86	60.21	1.77	25.36	71.20	0.45	30.24
074	7.07	3.04	7.89	8.57	1.13	5.91	28.58	0.87	13.66	18.89	0.94	8.79
085	42.92	8.24	47.04	40.38	9.40	39.00	24.01	2.16	28.36	21.06	1.51	27.29
095	78.87	4.62	90.82	54.31	1.67	43.56	43.40	1.38	32.87	63.31	0.43	36.95
106	80.06	10.94	45.41	27.90	12.66	15.84	35.83	10.03	24.37	60.18	6.28	43.30
116	25.20	1.60	44.84	20.45	1.84	27.79	35.17	4.64	34.27	41.30	0.23	37.13

**Resumen estadístico descriptivo de las coordenadas obtenidas mediante el método PPP de la estación EPEC, procesadas con la constelación Galileo**

Con los diferenciales obtenidos en  $\Delta E$ ,  $\Delta N$  y  $\Delta U$ , se realizó el análisis estadístico descriptivo, en el cual se calculó el valor máximo, el valor mínimo, la media aritmética y la desviación estándar (Ver tabla 13). Dichos cálculos corresponden al procesamiento de la estación de monitoreo continuo EPEC en periodos de tiempo de 2 horas, 4 horas, 8 horas y 24 horas. Acorde a los resultados antes obtenidos con la constelación GPS, en este caso el comportamiento es el mismo, con mayor tiempo de rastreo las precisiones mejoran (Ver figura 28). Con el fin de identificar el desplazamiento en el componente horizontal (Este y Norte) y vertical se calculó el RMSE (Ver tabla 14), el mismo que sirve como referencia para verificar el cumplimiento de las precisiones requeridas.

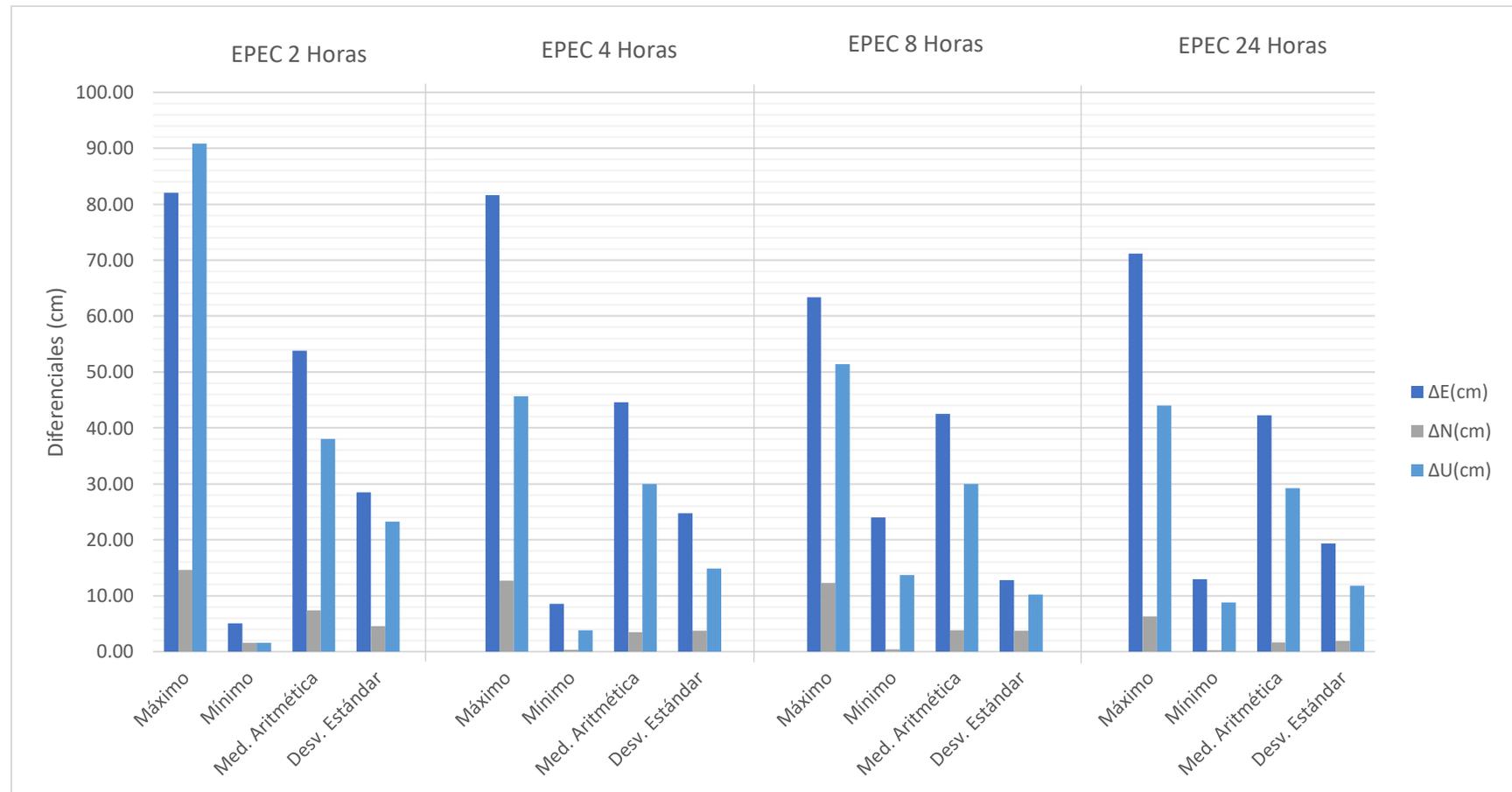
**Tabla 13.**

*Análisis estadístico de la estación EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (constelación Galileo)*

<b>EPEC 2 Horas - Galileo</b>				<b>EPEC 4 Horas - Galileo</b>			
	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$		$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$
Máximo	82.01	14.62	90.82	Máximo	81.65	12.66	45.67
Mínimo	5.02	1.60	1.54	Mínimo	8.57	0.29	3.80
Med. Aritmética	53.77	7.40	37.99	Med. Aritmética	44.57	3.50	30.01
Desv. Estándar	28.45	4.53	23.21	Desv. Estándar	24.76	3.74	14.85
<b>EPEC 8 Horas - Galileo</b>				<b>EPEC 24 Horas - Galileo</b>			
	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$		$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$
Máximo	63.34	12.29	51.39	Máximo	71.20	6.28	44.03
Mínimo	24.013	0.45	13.66	Mínimo	12.94	0.22	8.79
Med. Aritmética	42.54	3.78	29.94	Med. Aritmética	42.26	1.65	29.20
Desv. Estándar	12.75	3.76	10.18	Desv. Estándar	19.38	1.89	11.80

**Figura 28.**

Gráfico de barras del análisis estadístico de la estación EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (constelación Galileo)



**Tabla 14.**

*RMSE de los componentes horizontal y vertical de los días GPS, procesados a diferentes rangos de tiempo (Galileo)*

DOY	2 HORAS		4 HORAS		8 HORAS		24 HORAS	
	RMSE Horizontal (cm)	RMSE Vertical (cm)						
001	6.178	1.542	10.462	3.797	30.085	15.429	12.942	11.158
011	74.382	39.231	36.625	25.081	56.408	30.045	37.467	24.713
022	45.722	14.340	73.398	40.355	49.523	39.853	48.964	44.032
032	65.402	45.043	70.158	45.665	44.065	34.797	24.924	16.744
043	80.243	33.460	81.678	39.365	64.517	51.386	48.513	34.535
053	82.774	47.008	64.501	44.908	40.422	28.892	58.668	35.518
064	62.243	39.280	46.698	28.857	60.236	25.364	71.200	30.243
074	7.697	7.891	8.644	5.911	28.594	13.661	18.910	8.789
085	43.705	47.037	41.462	38.997	24.110	28.355	21.112	27.294
095	79.006	90.821	54.339	43.565	43.417	32.873	63.316	36.953
106	80.802	45.411	30.640	15.839	37.206	24.374	60.509	43.296
116	25.252	44.845	20.532	27.789	35.476	34.266	41.303	37.130

### **Análisis del Error cuadrático medio (RMSE) de los diferenciales $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ (Constelación Galileo)**

De forma similar para analizar el comportamiento de las 18 estaciones de monitoreo continuo procesadas con la constelación Galileo, se calculó del error cuadrático medio (RMSE) para las coordenadas cartesianas X, Y y Z (Ver tabla 15), con el fin de identificar las estaciones que presentan un mayor error, dicho análisis se lo realizó para los diferentes tiempos de rastreo; 2 horas (Ver figuras 29), 4 horas (Ver figuras 30), 8 horas (Ver figuras 31) y 24 horas (Ver figuras 32). De esta manera, se pudo determinar que las estaciones ALEC, BHEC, GZEC y PAEC presentan los valores más altos en el RMSE por ende presentan un mayor error.

Tabla 15.

*RMSE promedio de las diferencias  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  empleando EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (constelación Galileo)*

Estación	RMSE X (cm)	RMSE Y (cm)	RMSE Z (cm)	RMSE X (cm)	RMSE Y (cm)	RMSE Z (cm)	RMSE X (cm)	RMSE Y (cm)	RMSE Z (cm)	RMSE X (cm)	RMSE Y (cm)	RMSE Z (cm)
ABEC	2.1540	4.7211	1.3228	1.7029	4.0661	0.7660	1.0229	2.9656	0.4150	0.8548	2.7176	0.1861
ALEC	2.5419	7.5178	0.9965	2.1385	7.0512	0.7305	1.7078	5.7164	0.6426	3.7229	7.6943	2.2641
BHEC	2.5591	8.5190	1.0166	1.3902	7.2666	0.8512	1.6238	6.0980	0.5026	1.9119	5.7083	0.7780
CEEC	2.2144	5.3665	1.7551	1.8711	3.9224	1.3046	1.1545	2.7028	0.5145	1.0232	2.4512	0.3108
CHEC	2.5508	7.4489	1.1061	2.0080	6.1889	0.7163	1.6386	5.7144	0.6133	1.4705	5.5131	0.1966
CXEC	2.1688	6.9552	1.4876	1.5919	6.4702	1.1720	1.0854	5.7439	0.9461	0.8806	5.9174	0.5081
EPEC	1.8405	7.2330	0.8577	1.3952	5.8792	0.5003	1.1279	5.3133	0.5220	1.2579	5.4335	0.2445
FOEC	1.9411	3.7886	1.3669	1.2350	3.0549	0.7278	1.2808	2.4374	0.3600	0.9044	1.8596	0.4062
GQEC	1.8068	2.9271	1.3935	2.6458	3.1176	1.0685	1.2823	3.6432	0.4101	0.4008	2.1783	0.2868
GZEC	3.2026	8.4124	1.2389	2.4949	7.2922	0.5978	1.6565	5.8496	0.4673	1.5559	5.8835	0.6328
MAEC	2.7118	7.4842	0.8896	2.1540	5.9965	0.6242	1.5161	5.8899	0.5141	1.3928	5.4141	0.2325
MHEC	2.2071	4.4710	1.4590	1.5883	3.6215	1.0342	1.2010	3.0621	0.4091	0.8137	2.3197	0.2276
NJEC	2.0514	6.7036	1.4003	1.8116	5.6219	0.7946	1.1947	5.0623	0.7264	1.0650	5.1178	0.3068
PAEC	2.3999	6.9908	1.4726	4.0387	6.3672	1.0118	6.2592	4.9147	0.9090	3.9179	5.4297	0.5948
PLEC	1.4765	4.9291	3.3211	1.7453	3.9299	2.5010	0.7309	3.4706	1.7296	0.6632	3.3993	1.2596
PREC	2.5471	6.7848	0.9480	1.7901	5.2982	0.5122	1.4447	5.1750	0.4431	1.4571	5.2235	0.2535
SEEC	2.7315	6.6773	1.2133	1.8446	5.3750	0.5918	1.4790	4.5991	0.4986	1.2251	4.3811	0.3290
SIEC	1.5973	7.5067	2.9935	1.7615	6.2789	2.2084	2.7375	5.6407	1.6380	1.9649	5.6899	1.1373

**Figura 29.**

Gráfico del RMSE promedio de las diferencias  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  empleando un periodo de tiempo de 2 horas (constelación Galileo)

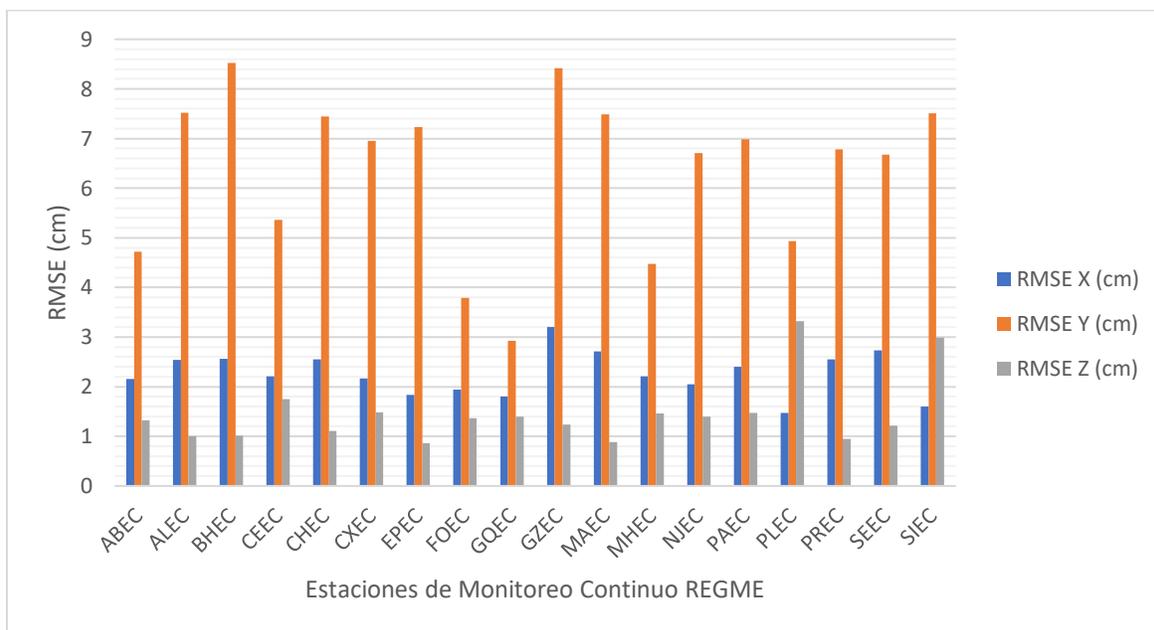
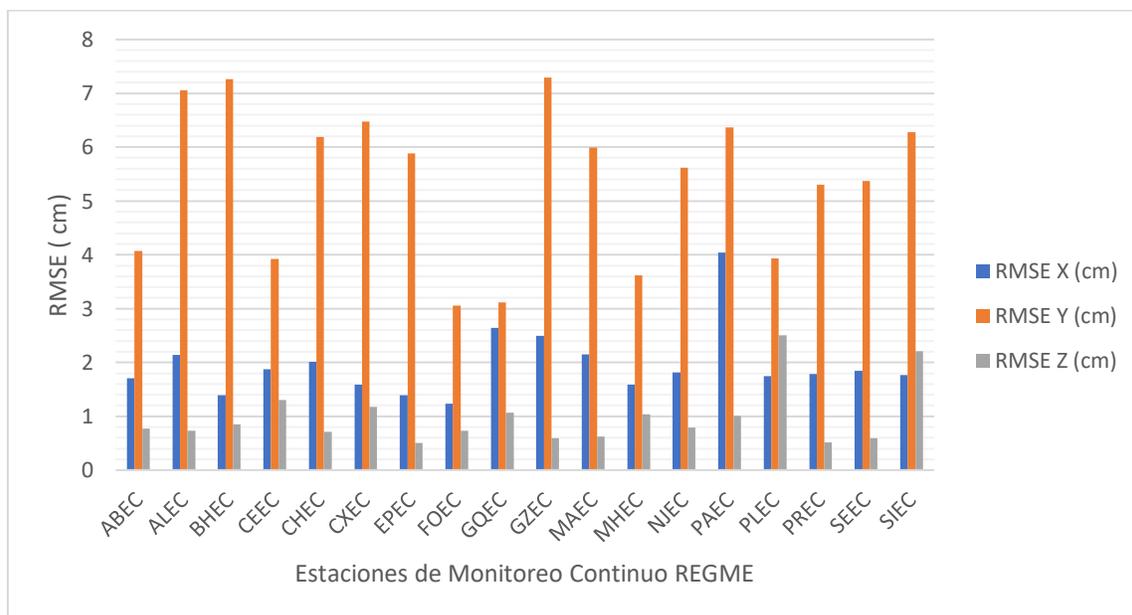
**Figura 30.**

Gráfico del RMSE promedio de las diferencias  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  empleando un periodo de tiempo de 4 horas (constelación Galileo)



**Figura 31.**

Gráfico del RMSE promedio de las diferencias  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  empleando un periodo de tiempo de 8 horas (constelación Galileo)

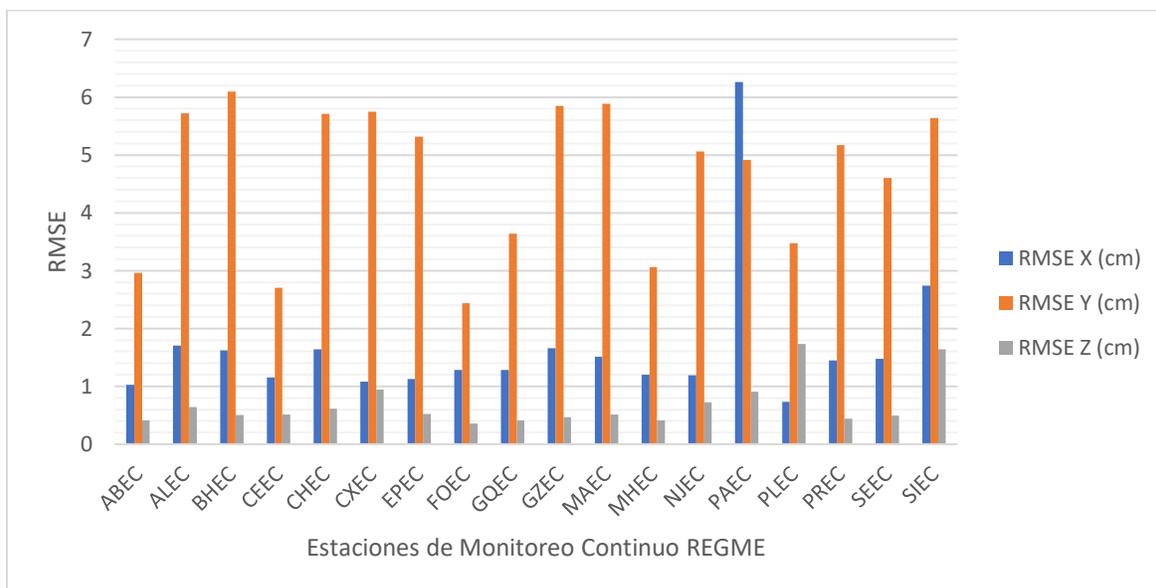
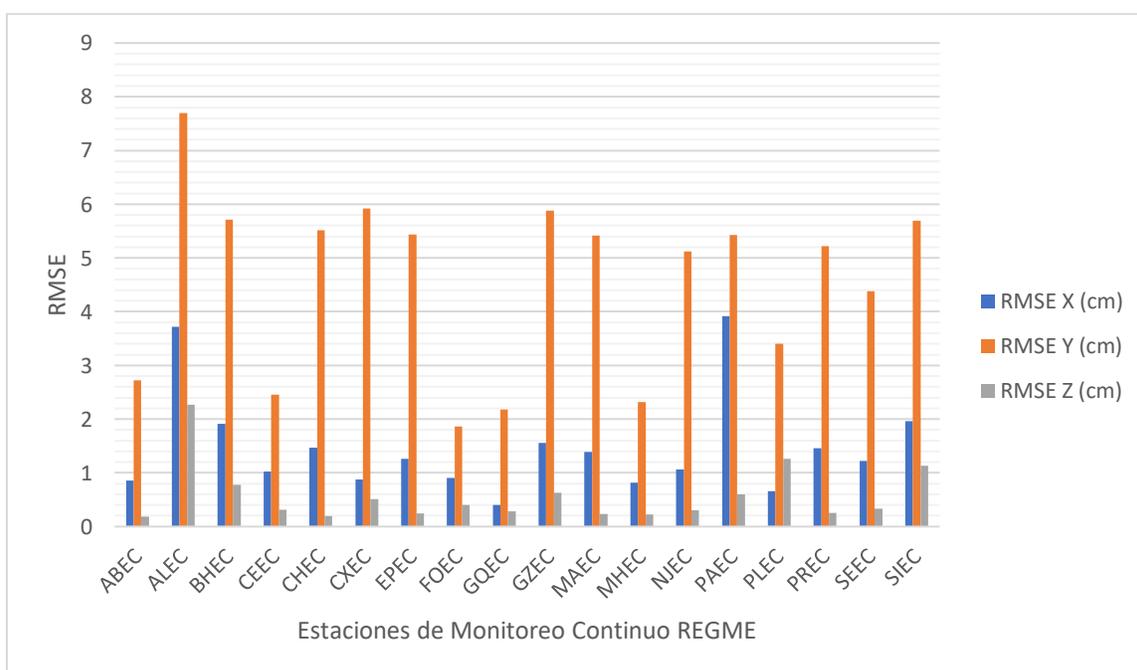
**Figura 32.**

Gráfico del RMSE promedio de las diferencias  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  empleando un periodo de tiempo de 24 horas (constelación Galileo)



**Análisis de los diferenciales obtenidos mediante la comparación de coordenadas de la estación EPEC, procesadas con la combinación GPS + Galileo.**

De manera similar a lo realizado anteriormente, una vez calculadas las coordenadas cartesianas obtenidas mediante el método PPP, en esta ocasión procesadas con la combinación GPS + Galileo en periodos de tiempo de 2 horas, 4 horas, 8 horas y 24 horas, se realizó un análisis comparativo con las coordenadas semanales procesadas en software Bernese de la estación EPEC, con el fin de analizar el error del desplazamiento en Este, Norte y altura se transformó las coordenadas cartesianas de a coordenadas topocéntricas (ENU) y el las diferencias obtenidas a través de esta comparación se encuentran dadas por  $\Delta E$ ,  $\Delta N$  y  $\Delta U$  (Ver tabla 16).

**Tabla 16.**

*Diferenciales de las coordenadas obtenidas en el software RTKLIB vs software BERNESE de la estación EPEC, procesadas con la combinación GPS + Galileo a diferentes rangos de tiempo.*

DOY	Diferenciales de las coordenadas obtenidas en RTKLIB vs BERNESE de la estación EPEC											
	2 Horas			4 Horas			8 Horas			24 Horas		
	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$
001	8.81	16.93	50.83	54.91	5.59	76.95	24.56	7.45	10.33	44.33	5.80	2.17
011	51.90	5.00	53.66	33.75	15.82	15.92	34.73	17.76	18.75	69.76	1.03	51.22
022	26.21	12.66	44.33	11.52	13.61	14.98	15.03	8.23	6.60	8.99	4.05	3.59
032	16.21	19.19	13.11	6.02	14.28	25.95	32.36	2.64	33.24	21.45	0.81	6.07
043	12.13	15.81	47.68	29.63	27.60	77.32	60.23	14.07	50.19	33.16	11.84	47.14
053	11.97	17.97	33.55	41.61	26.09	39.04	57.91	2.10	18.27	21.63	1.28	24.67
064	79.35	7.64	83.03	5.52	7.35	23.17	14.44	3.79	11.12	56.97	7.91	5.96
074	13.72	26.21	82.80	23.53	12.37	56.76	8.92	11.18	10.24	46.68	6.75	20.78
085	5.08	22.27	84.97	21.40	1.57	47.69	12.97	4.59	2.59	15.08	4.18	0.88
095	76.25	30.87	8.64	19.39	7.81	5.25	37.58	6.28	21.73	73.39	1.16	41.15
106	80.62	0.81	47.11	48.27	24.59	3.86	10.23	1.25	13.22	14.84	3.89	1.78
116	0.40	4.12	22.38	16.55	9.66	68.20	60.86	5.10	49.50	52.24	3.08	36.33

**Resumen estadístico descriptivo de las coordenadas obtenidas mediante el método PPP de la estación EPEC, procesadas con la combinación GPS + Galileo**

Con los diferenciales obtenidos en  $\Delta E$ ,  $\Delta N$  y  $\Delta U$ , se realizó el análisis estadístico descriptivo, en el cual se calculó el valor máximo, el valor mínimo, la media aritmética y la desviación estándar (Ver tabla 17). Dichos cálculos corresponden al procesamiento de la estación de monitoreo continuo EPEC en periodos de tiempo de 2 horas, 4 horas, 8 horas y 24 horas (Ver figura 33). Con el fin de identificar el desplazamiento en el componente horizontal (Este y Norte) y vertical se calculó el RMSE (Ver tabla 18), el mismo que sirve como referencia para verificar el cumplimiento de las precisiones requeridas.

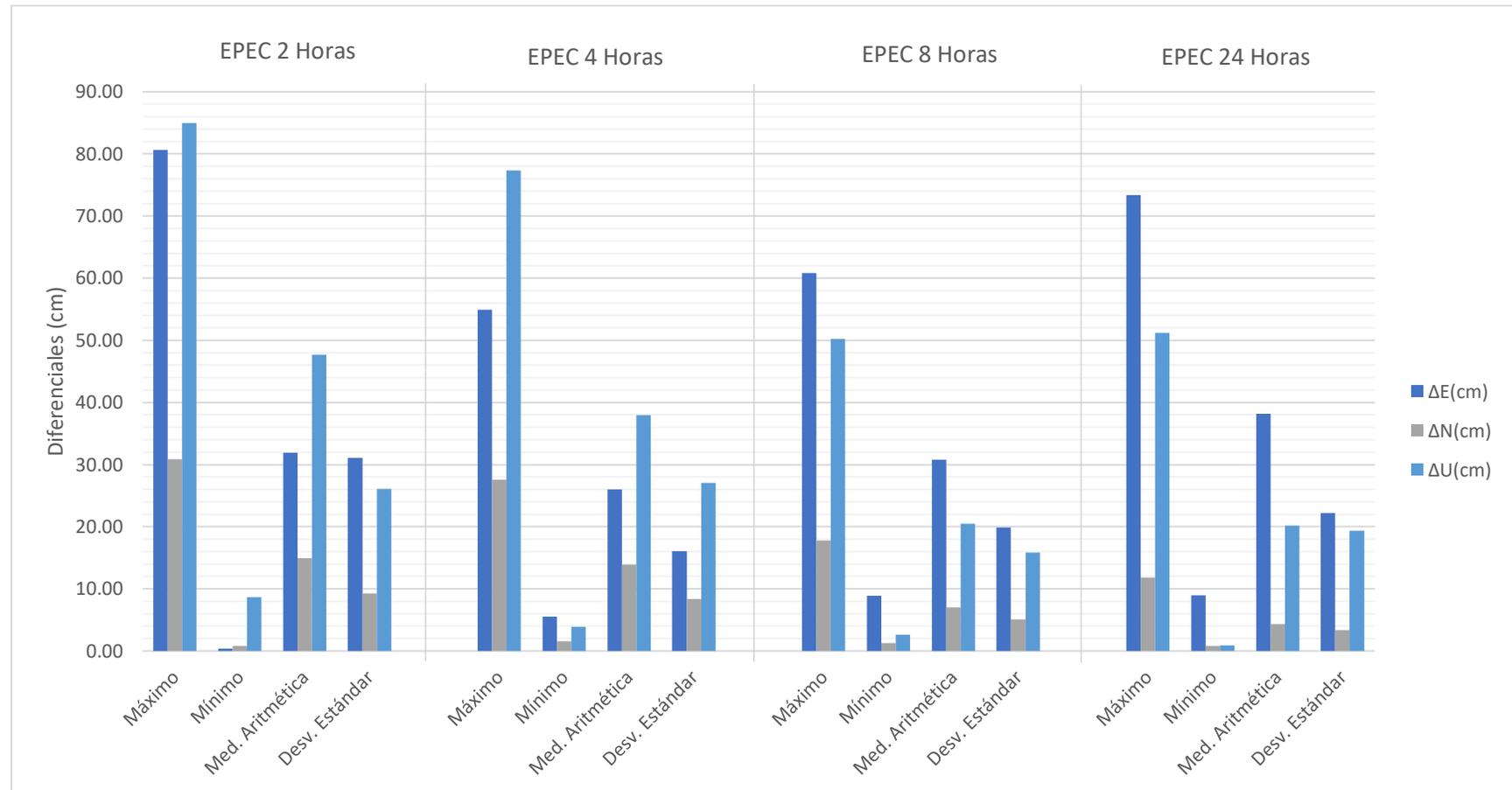
**Tabla 17.**

*Análisis estadístico de la estación EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (combinación GPS + Galileo)*

<b>EPEC 2 Horas – GPS + Galileo</b>			<b>EPEC 4 Horas – GPS + Galileo</b>				
	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$		$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$
Máximo	80.62	30.87	84.97	Máximo	54.91	27.60	77.32
Mínimo	0.40	0.81	8.64	Mínimo	5.52	1.57	3.86
Med. Aritmética	31.89	14.96	47.67	Med. Aritmética	26.01	13.86	37.92
Desv. Estándar	31.09	9.25	26.09	Desv. Estándar	16.06	8.40	27.04
<b>EPEC 8 Horas – GPS + Galileo</b>			<b>EPEC 24 Horas – GPS + Galileo</b>				
	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$		$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$
Máximo	60.86	17.76	50.19	Máximo	73.39	11.84	51.22
Mínimo	8.924	1.25	2.59	Mínimo	8.99	0.81	0.88
Med. Aritmética	30.82	7.04	20.48	Med. Aritmética	38.21	4.32	20.15
Desv. Estándar	19.87	5.06	15.84	Desv. Estándar	22.17	3.33	19.36

**Figura 33.**

Gráfico de barras del análisis estadístico de la estación EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (combinación GPS + Galileo)



**Tabla 18.**

*RMSE de los componentes horizontal y vertical de los días GPS, procesados a diferentes rangos de tiempo (GPS +Galileo)*

DOY	2 HORAS		4 HORAS		8 HORAS		24 HORAS	
	RMSE Horizontal (cm)	RMSE Vertical (cm)						
1	19.086	50.826	55.198	76.947	25.663	10.331	44.706	2.171
11	52.142	53.655	37.274	15.917	39.011	18.752	69.771	51.223
22	29.109	44.329	17.830	14.983	17.132	6.597	9.864	3.592
32	25.118	13.110	15.499	25.950	32.472	33.241	21.462	6.074
43	19.926	47.680	40.498	77.322	61.853	50.190	35.207	47.143
53	21.593	33.552	49.116	39.039	57.950	18.272	21.668	24.671
64	79.719	83.028	9.189	23.165	14.928	11.116	57.518	5.961
74	29.585	82.802	26.580	56.759	14.304	10.239	47.162	20.782
85	22.845	84.973	21.462	47.694	13.757	2.588	15.644	0.877
95	82.266	8.641	20.903	5.247	38.104	21.729	73.400	41.146
106	80.628	47.108	54.170	3.861	10.308	13.216	15.344	1.775
116	4.140	22.380	19.167	68.200	61.074	49.505	52.332	36.331

### **Análisis del Error cuadrático medio (RMSE) de los diferenciales $\Delta X$ , $\Delta Y$ y $\Delta Z$ (combinación GPS + Galileo)**

Para analizar el comportamiento de las 18 estaciones de monitoreo continuo procesadas con la combinación GPS + Galileo, se calculó del error cuadrático medio (RMSE) para las coordenadas cartesianas X, Y y Z (Ver tabla 19), con el fin de identificar las estaciones que presentan un mayor error, dicho análisis se lo realizó para los diferentes tiempos de rastreo; 2 horas (Ver figuras 34), 4 horas (Ver figuras 35), 8 horas (Ver figuras 36) y 24 horas (Ver figuras 37).

De esta manera, se pudo determinar que las estaciones ABEC, NJEC y MHEC presentan los valores más altos en el RMSE, demostrando que existe un error más alto en estas estaciones por ende un mayor error.

Tabla 19.

*RMSE promedio de las diferencias  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  empleando EPEC empleando diferentes rangos de tiempo (constelación Galileo)*

Estación	RMSE X (cm)	RMSE Y (cm)	RMSE Z (cm)	RMSE X (cm)	RMSE Y (cm)	RMSE Z (cm)	RMSE X (cm)	RMSE Y (cm)	RMSE Z (cm)	RMSE X (cm)	RMSE Y (cm)	RMSE Z (cm)
ABEC	5.38156	8.25048	2.51819	4.49930	6.36112	1.97775	2.45672	8.61810	0.78103	2.06713	6.82962	0.41491
ALEC	3.85936	7.57091	1.69586	2.58015	5.62791	1.81247	2.34147	4.55094	0.90591	2.33239	6.26582	0.84259
BHEC	3.12243	8.16485	1.96070	2.45332	6.96669	2.01250	2.47061	6.24587	0.87857	2.10268	7.33253	0.76106
CEEC	4.45910	8.47595	4.06201	4.37695	8.37909	1.58550	2.89772	7.92262	1.03807	0.84148	7.05679	0.81881
CHEC	3.33933	8.65802	2.13889	2.67444	7.86414	1.70587	2.65489	6.22057	0.68774	2.04471	7.55690	0.28257
CXEC	2.58134	8.69994	2.46044	2.60393	7.44967	1.93661	1.88468	4.97262	0.81086	1.10118	5.65242	0.46823
EPEC	3.24179	6.12294	1.73794	2.15379	5.05730	1.60250	1.81123	4.04140	0.85402	1.95600	4.77276	0.53622
FOEC	6.38789	7.46522	3.67013	6.38264	8.33626	1.78515	5.27942	6.90357	0.94881	4.70375	7.15332	0.58367
GQEC	4.10922	7.90682	3.49554	3.90283	8.01955	2.18158	2.74494	8.03776	0.88558	1.61740	7.15928	0.61500
GZEC	4.55824	8.35827	2.67658	4.26284	7.28281	2.12320	3.35875	6.92254	0.90094	2.30458	7.82817	0.68519
MAEC	3.69617	7.02577	2.08423	2.29956	5.41497	1.99589	2.30722	3.96397	0.83269	1.78229	5.29120	0.40662
MHEC	26.37860	49.24078	17.18873	18.90767	32.70938	8.07006	3.53374	3.03759	0.89251	0.71861	0.93669	0.13666
NJEC	3.35910	7.43029	2.05512	2.16855	5.58302	1.86520	1.84139	4.31711	0.93120	1.74382	4.54808	0.58872
PAEC	4.14211	8.43990	1.77179	5.14618	7.22093	1.57047	7.66182	5.27156	1.10704	4.46163	5.22457	0.78810
PLEC	5.07201	9.78927	3.52513	6.02333	6.74614	1.76759	2.89530	7.49299	1.56943	1.29662	5.36606	1.27121
PREC	3.84903	8.69731	1.99556	3.05465	7.07018	1.64361	2.73509	5.61552	0.67495	2.55114	6.00670	0.47574
SEEC	4.27462	7.10592	1.44470	3.73110	5.73710	1.65053	2.62201	3.84782	0.77027	2.33253	4.99113	0.61872
SIEC	3.47424	10.46128	3.77297	3.62287	7.83084	2.43819	4.51223	7.26892	1.32868	2.69661	6.99357	1.22513

**Figura 34.**

Gráfico del RMSE promedio de las diferencias  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  empleando un periodo de tiempo de 2 horas (combinación GPS + Galileo)

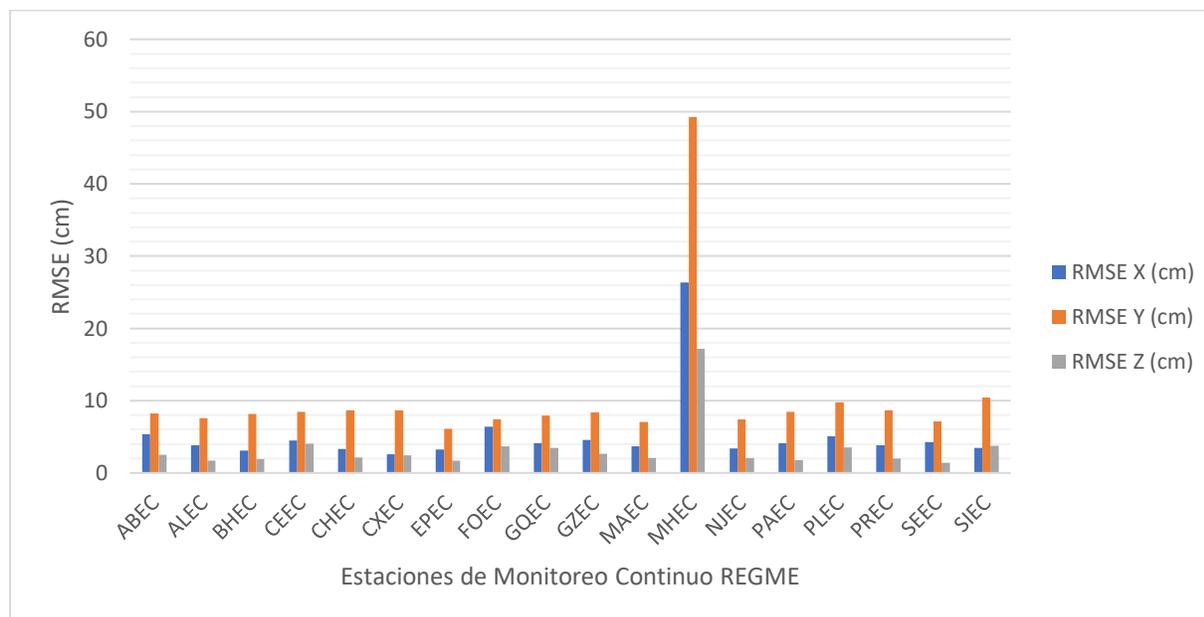
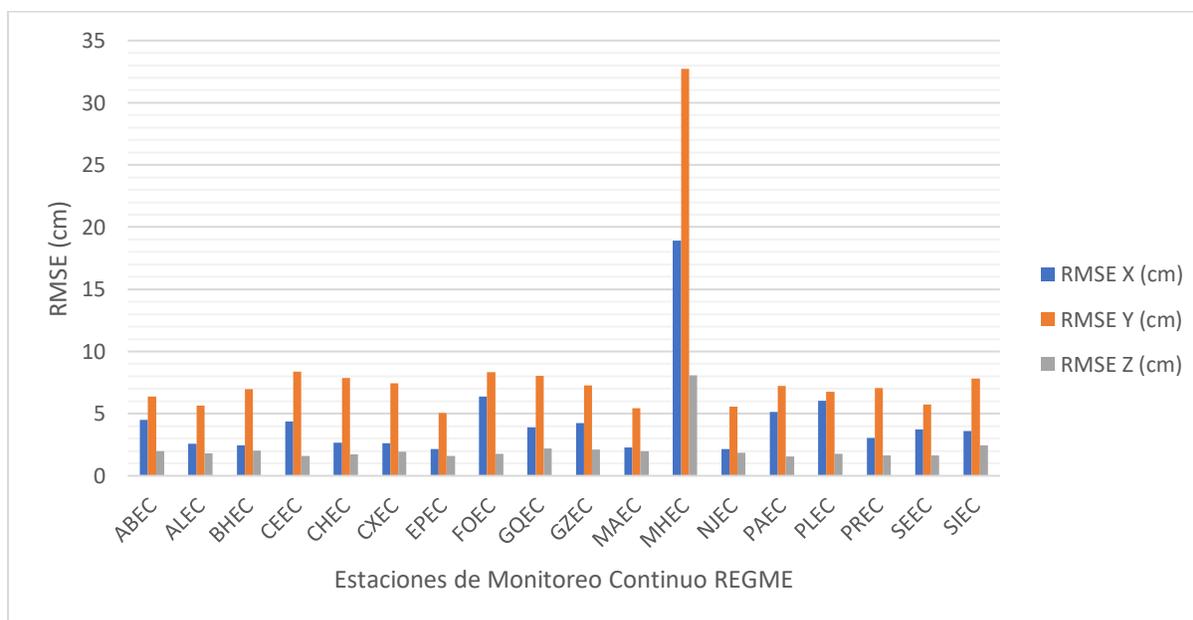
**Figura 35.**

Gráfico del RMSE promedio de las diferencias  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  empleando un periodo de tiempo de 4 horas (combinación GPS + Galileo)



**Figura 36.**

Gráfico del RMSE promedio de las diferencias  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  empleando un periodo de tiempo de 8 horas (combinación GPS + Galileo)

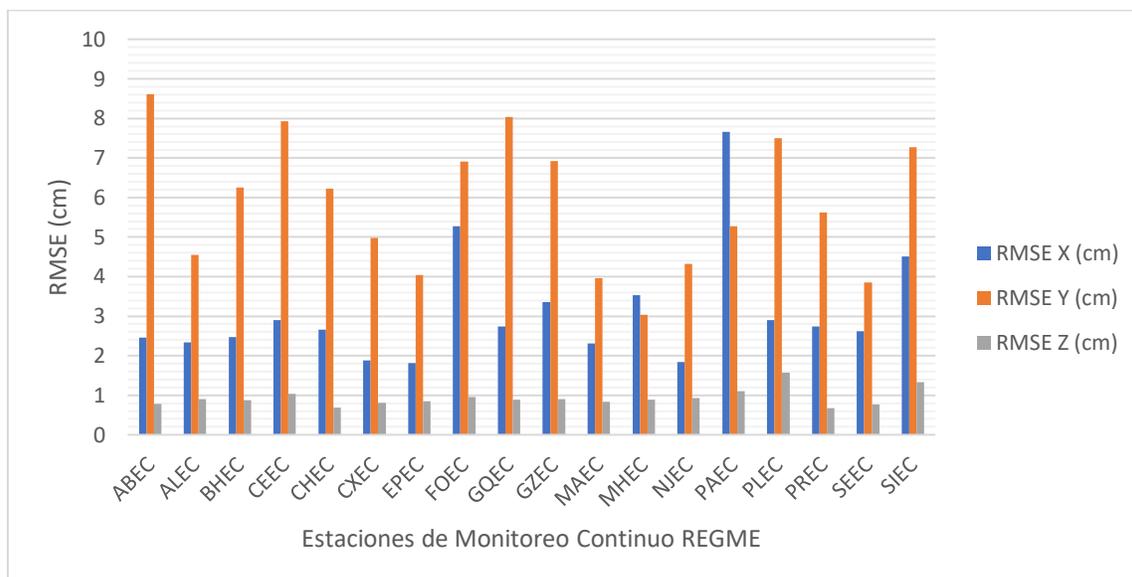
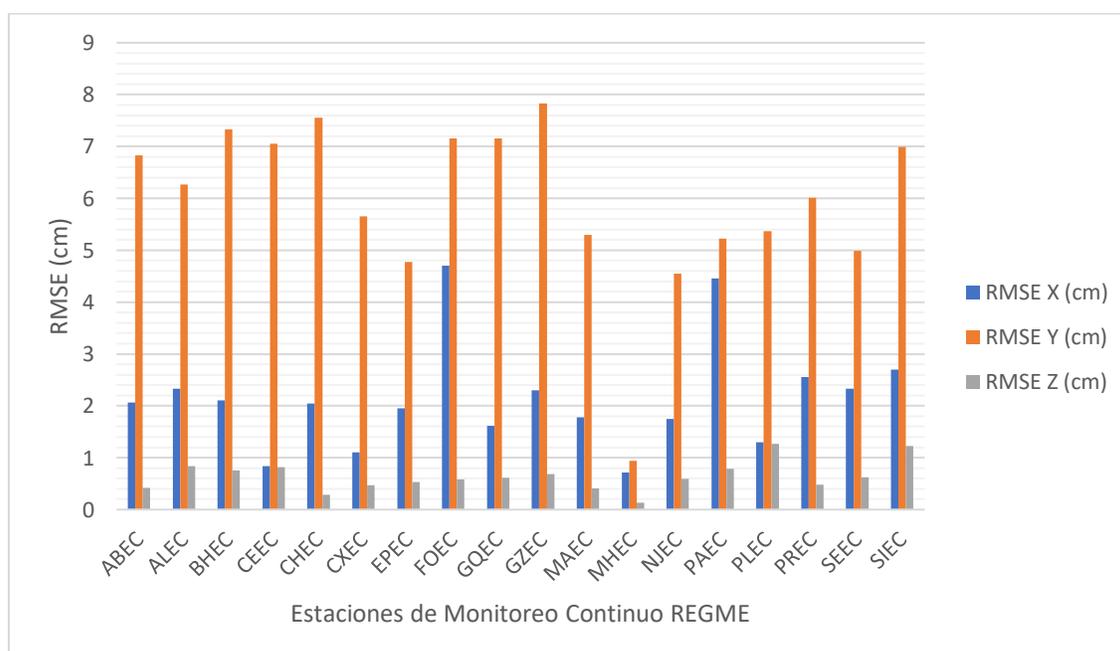
**Figura 37.**

Gráfico del RMSE promedio de las diferencias  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$  empleando un periodo de tiempo de 24 horas (combinación GPS + Galileo)



### **Análisis del error obtenido mediante el procesamiento a diferentes periodos de tiempo e intervalos de grabación – GPS**

Se calculó el porcentaje de los días que cumplen con la precisión establecida por el IGM de 5 cm, permitiendo de esta manera analizar el comportamiento de los resultados producto del procesamiento a diferentes periodos de tiempo y combinación de constelaciones (GPS, Galileo y GPS + Galileo) (Ver figura 38)

Con lo mencionado en el párrafo anterior se logró determinar, que al emplear 2 horas de rastreo, de los 12 días procesados únicamente el 6.36% cumplen con límites de tolerancia , en el caso del procesamiento realizado con 4 horas de rastreo, este porcentaje incrementó al 11.70%, siendo ICEC y RIOP las estaciones que cuentan con el porcentaje más alto, es decir, presentan un mejor resultado en su precisión, sin embargo al procesar con 8 horas y 24 horas estos porcentajes aumentan considerablemente a 51.18% y 45.0% respectivamente, siendo EPEC, ICEC, LJEC, NJEC, RIOP y TPEC las estaciones que muestran el porcentaje más alto, además que las estaciones ICEC Y TPEC cumplen con el 100%, es decir todos los días que fueron procesados se encuentran dentro del límite permisible de 5 cm (Ver tabla 20)

#### **Tabla 20.**

*Porcentaje de cumplimiento con la precisión de 5 cm, obtenido mediante el procesamiento a diferentes periodos de tiempo.*

<b>Estación</b>	<b>2 horas</b>	<b>4 horas</b>	<b>8 horas</b>	<b>24 horas</b>
ABEC	0 %	0 %	50 %	58.33%
ALEC	8.33%	8.33%	75 %	75 %
BHEC	8.33%	16.67%	75 %	25 %
CEEC	0 %	8.33%	41.67%	8.33%
CHEC	8.3%	8.33%	58.33%	50 %
CUEC	8.33%	8.33%	66.67%	33.33%
CXEC	0 %	0 %	16.67%	8.33%

EPEC	0 %	16.67%	83.33%	83.33%
FOEC	0 %	8.33%	50 %	16.67%
GQEC	0 %	0 %	75 %	41.67%
GZEC	8.33%	8.33%	58.33	33.33%
ICEC	33.33%	58.33%	100 %	91.67%
LJEC	8.33%	16.67%	91.67%	66.67%
MAEC	8.33%	8.33%	66.67%	41.67%
MHEC	0 %	0 %	0 %	25.00%
NJEC	0 %	16.67%	83.33%	91.67%
PAEC	0 %	0 %	0 %	0 %
PLEC	0 %	0 %	0 %	16.67%
PREC	0 %	16.67%	8.33%	75 %
QUI1	0 %	8.33	66.67%	33.33%
RIOP	33.33	50.00%	83.33%	25 %
SEEC	8.33	8.33%	66.67%	75 %
SIEC	16.67	16.67%	8.33%	41.67 %
TPEC	9.09	9.09%	54.55%	100 %
TSEC	0 %	0 %	0 %	8.33%
<b>Media</b>	<b>6.36%</b>	<b>11.70%</b>	<b>51.18</b>	<b>45.0%</b>

### **Análisis del error obtenido mediante el procesamiento a diferentes periodos de tiempo e intervalos de grabación – Galileo**

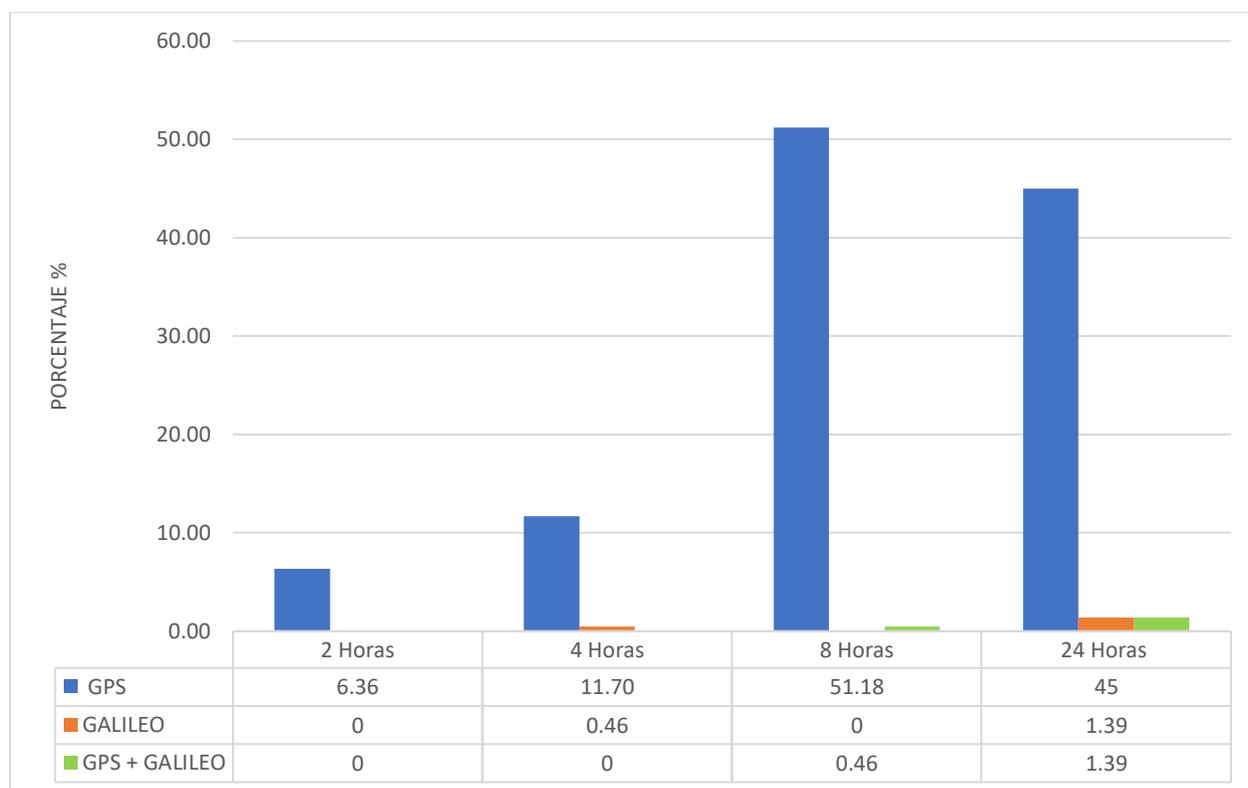
Al procesar con la constelación Galileo se puede apreciar que existe un mayor error en comparación con el procesamiento realizado con GPS, ya que únicamente las estaciones NJEC, ABEC y GQEC que presentan un porcentaje de cumplimiento con la precisión de 5 cm. Además, se puede apreciar que en el procesamiento realizado en un periodo de tiempo de 2 y 8 horas ninguna de las estaciones cumple con esta precisión (Ver figura 38).

### Análisis del error obtenido mediante el procesamiento a diferentes periodos de tiempo e intervalos de grabación – combinación GPS + Galileo

De manera similar al procesar con la combinación GPS + Galileo se puede apreciar que existe un mayor error comparado con el procesamiento realizado solamente con GPS, siendo las estaciones NJEC y MHEC las únicas que presentan un porcentaje de cumplimiento con la precisión de 5 cm. Además, se puede apreciar que el procesamiento realizado en un periodo de tiempo de 2 y 4 horas ninguna de las estaciones cumple con esta precisión (Ver figura 38).

**Figura 38.**

*Porcentaje promedio de las EMC que cumplen con la precisión de 5cm (GPS, Galileo, GPS + Galileo)*



**Análisis de coordenadas obtenidas mediante el método PPP procesadas en el software RTKLIB en un periodo de tiempo de 24 horas comparadas con las coordenadas obtenidas en el servicio web TRIMBLE RTX de la estación EPEC**

Al contar con distintas estimaciones de procesamiento se puede realizar un análisis más amplio de las precisiones resultantes, es por esa razón se utilizó el servicio web Trimble RTX, para realizar una comparación con las coordenadas obtenidas en el software RTKLIB y Bernese.

En la tabla 21 se presenta las coordenadas cartesianas obtenidas mediante el procesamiento del método PPP en el software RTKLIB procesadas con la constelación GPS en un periodo de tiempo de 24 horas, comparadas con las coordenadas obtenidas en el servicio web Trimble RTX de la estación EPEC. Para llevar a cabo el procesamiento en este servicio web, se cargó el archivo en formato nativo (.T02) de los 12 días seleccionados para el procesamiento, obteniendo los diferenciales  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  y  $\Delta Z$ , con los cuales se realizó el análisis del RMSE. Del mismo modo con el fin de analizar el desplazamiento en Este Norte y Altura, se transformó estas coordenadas a topocéntricas (Ver tabla 22).

**Tabla 21.**

*Coordenadas procesadas en el software RTKLIB en un pedido de tiempo de 24 horas comparadas con las coordenadas obtenidas en el servicio web TRIMBLE RTX de la estación EPEC.*

DOY	EPEC coordenada obtenida en RTKLIB (24H)			Coordenada obtenida en TRIMBLE RTX			Diferenciales		
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	$\Delta X(\text{cm})$	$\Delta Y(\text{cm})$	$\Delta Z(\text{cm})$
001	1277936.951	-6251278.046	-34832.3546	1277936.9	-6251278.08	-34832.368	5.09	3.83	1.34
011	1277936.919	-6251278.078	-34832.3599	1277936.903	-6251278.08	-34832.367	1.61	0.48	0.71
022	1277936.925	-6251278.06	-34832.3553	1277936.905	-6251278.08	-34832.365	1.97	1.60	0.97
032	1277936.925	-6251278.063	-34832.3554	1277936.906	-6251278.07	-34832.363	1.93	1.05	0.76
043	1277936.903	-6251278.055	-34832.353	1277936.906	-6251278.08	-34832.361	0.34	2.94	0.80
053	1277936.923	-6251278.071	-34832.3594	1277936.907	-6251278.07	-34832.364	1.59	0.35	0.46
064	1277936.901	-6251278.025	-34832.3569	1277936.905	-6251278.07	-34832.363	0.38	4.54	0.61
074	1277936.939	-6251278.056	-34832.3608	1277936.906	-6251278.07	-34832.364	3.27	1.13	0.32
085	1277936.915	-6251278.037	-34832.3558	1277936.907	-6251278.07	-34832.365	0.81	2.77	0.92
095	1277936.95	-6251278.056	-34832.3638	1277936.908	-6251278.07	-34832.364	4.21	1.17	0.02
106	1277936.918	-6251278.055	-34832.3573	1277936.905	-6251278.07	-34832.365	1.31	1.84	0.77
116	1277936.942	-6251278.063	-34832.3611	1277936.908	-6251278.07	-34832.367	3.35	0.57	0.59

**Tabla 22.**

*Coordenadas procesadas en el software RTKLIB en un pedido de tiempo de 24 horas comparadas con las coordenadas obtenidas en el servicio web TRIMBLE RTX de la estación EPEC – Coordenadas Topocéntricas (ENU)*

DOY	EPEC coordenada obtenida en RTKLIB (24H)			Coordenada obtenida en TRIMBLE RTX			Diferenciales		
	Este (m)	Norte (m)	Altura (m)	Este (m)	Norte (m)	Altura (m)	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$
001	-5323958.981	-34915.71976	-3516683.81	-5323958.9694	-34915.7332	-3516683.8709	1.17	1.34	6.02
011	-5323958.982	-34915.72506	-3516683.86	-5323958.9715	-34915.7322	-3516683.8688	1.01	0.71	1.27
022	-5323958.973	-34915.72046	-3516683.84	-5323958.9729	-34915.7302	-3516683.8674	0.02	0.97	2.81
032	-5323958.975	-34915.72056	-3516683.84	-5323958.9665	-34915.7282	-3516683.8596	0.83	0.76	1.90
043	-5323958.953	-34915.71816	-3516683.85	-5323958.9736	-34915.7262	-3516683.8667	2.04	0.80	1.56
053	-5323958.979	-34915.72456	-3516683.85	-5323958.9672	-34915.7292	-3516683.8589	1.16	0.46	1.09
064	-5323958.931	-34915.72206	-3516683.83	-5323958.9658	-34915.7282	-3516683.8603	3.48	0.61	2.94
074	-5323958.98	-34915.72596	-3516683.83	-5323958.9665	-34915.7292	-3516683.8596	1.30	0.32	3.32
085	-5323958.95	-34915.72096	-3516683.83	-5323958.9672	-34915.7302	-3516683.8589	1.74	0.92	2.88
095	-5323958.988	-34915.72896	-3516683.82	-5323958.9680	-34915.7292	-3516683.8582	2.01	0.02	3.95
106	-5323958.964	-34915.72246	-3516683.84	-5323958.9658	-34915.7302	-3516683.8603	0.16	0.77	2.02
116	-5323958.987	-34915.72626	-3516683.83	-5323958.9680	-34915.7322	-3516683.8582	1.90	0.59	2.84

En la tabla 23 se realizó el análisis del procesamiento realizado en el software RTKLIB y el servicio web Trimble RTX comparado con el procesamiento realizado con BERNESE de la estación EPEC en un periodo de 24 horas, donde se puede apreciar que el error obtenido empleando el servicio web Trimble RTX disminuye, optimizando el cálculo de coordenadas. (Ver figura 39)

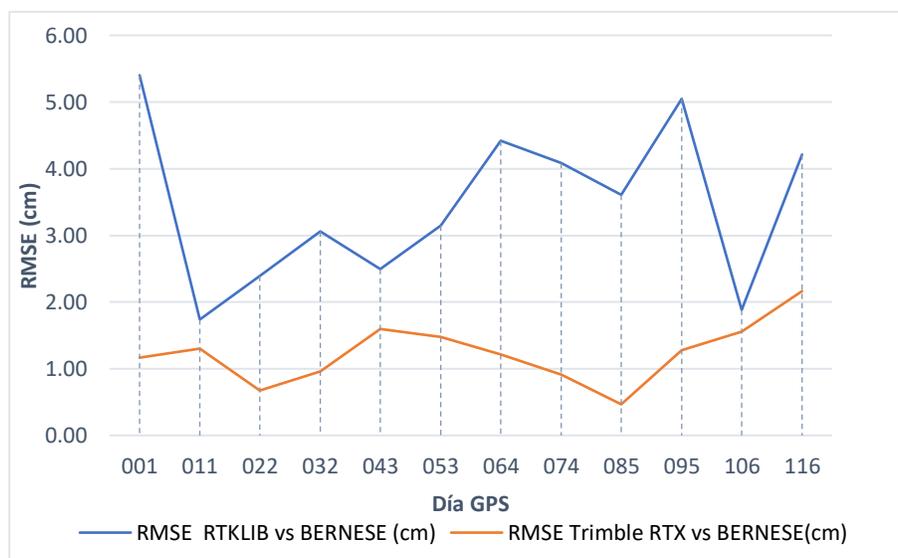
**Tabla 23**

*Comparación del RMSE del procesamiento realizado con RTKLIB y Trimble RTX vs Bernese*

DOY	RMSE RTKLIB vs BERNESE (cm)	RMSE Trimble RTX vs BERNESE (cm)
1	5.40	1.17
11	1.74	1.30
22	2.39	0.68
32	3.06	0.96
43	2.50	1.60
53	3.14	1.48
64	4.42	1.21
74	4.09	0.91
85	3.61	0.47
95	5.05	1.28
106	1.88	1.56
116	4.21	2.16

**Figura 39**

*Gráfico del RMSE del procesamiento realizado con RTKLIB y Trimble RTX vs Bernese*



### **Análisis de la validación en campo**

Para la validación en campo se seleccionó dos puntos de la red geodésica de la UFA - ESPE, en los cuales se hizo un rastreo satelital de 8 horas, con el fin de realizar el procesamiento a diferentes rangos de tiempo e intervalos de grabación, mismo procedimiento que fue realizado con estaciones de monitoreo continuo procesadas anteriormente. En las tablas 24, 25 y 26 se muestra los resultados del procesamiento realizado en diferentes periodos de tiempo. De manera similar a lo realizado con anterioridad se transformo a coordenadas topocéntricas para analizar el desplazamiento en el componente horizontal (Este y Norte) y vertical. (Ver tablas 27, 28 y 29)

**Tabla 24.**

*Coordenadas procesadas en RTKLIB comparadas con las coordenadas de la red geodésica de la UFA -ESPE (2 Horas)*

Punto	Coordenada obtenida en RTKLIB (2H)			Coordenada Red Geodésica de la UFA - ESPE			Diferenciales		
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	$\Delta X(\text{cm})$	$\Delta Y(\text{cm})$	$\Delta Z(\text{cm})$
GPS 1 - P	1278399.5	-6251178.64	-10648431.5	1278399.46	-6251178.71	-34522.184	3.56	7.80	2.45
GPS 2 - L	1277951.22	-6251271.62	-34772.8981	1277951.29	-6251271.66	-34772.862	7.67	3.56	3.61

**Tabla 25.**

*Coordenadas procesadas en RTKLIB comparadas con las coordenadas de la red geodésica de la UFA -ESPE (4 Horas)*

Punto	Coordenada obtenida en RTKLIB (4H)			Coordenada Red Geodésica de la UFA - ESPE			Diferenciales		
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	$\Delta X(\text{cm})$	$\Delta Y(\text{cm})$	$\Delta Z(\text{cm})$
GPS 1 - P	1278399.39	-6251178.75	-34522.1995	1278399.46	-6251178.71	-34522.184	7.19	4.09	1.55
GPS 2 - L	1277951.31	-6251271.7	-34772.8942	1277951.29	-6251271.66	-34772.862	1.75	4.42	3.22

**Tabla 26.**

*Coordenadas procesadas en RTKLIB comparadas con las coordenadas de la red geodésica de la UFA -ESPE (8 Horas)*

Punto	Coordenada obtenida en RTKLIB (8H)			Coordenada Red Geodésica de la UFA - ESPE			Diferenciales		
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	$\Delta X(\text{cm})$	$\Delta Y(\text{cm})$	$\Delta Z(\text{cm})$
GPS 1 - P	1278399.44	-6251178.74	-34522.2197	1278399.46	-6251178.71	-34522.184	2.34	2.20	3.57
GPS 2 - L	1277951.28	-6251271.7	-34772.8432	1277951.29	-6251271.66	-34772.862	1.08	4.05	1.88

**Tabla 27.**

*Coordenadas procesadas en RTKLIB comparadas con las coordenadas de la red geodésica de la UFA -ESPE (2 Horas)*

Punto	Coordenada obtenida en RTKLIB (2H)			Coordenada Red Geodésica de la UFA - ESPE			Diferenciales		
	E(m)	N(m)	U(m)	E(m)	N(m)	U(m)	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$
GPS 1 - P	-5324215.76	-34605.5644	-3516286.45	-5324215.79	-34605.5399	-3516286.54	2.970	2.450	8.061
GPS 2 - L	-5323964.52	-34856.2629	-3516669.18	-5323964.6	-34856.2268	-3516669.15	7.990	3.610	2.899

**Tabla 28.**

*Coordenadas procesadas en RTKLIB comparadas con las coordenadas de la red geodésica de la UFA -ESPE (4 Horas)*

Punto	Coordenada obtenida en RTKLIB (4H)			Coordenada Red Geodésica de la UFA - ESPE			Diferenciales		
	E(m)	N(m)	U(m)	E(m)	N(m)	U(m)	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$
GPS 1 - P	-5324215.76	-34605.5554	-3516286.62	-5324215.79	-34605.5399	-3516286.54	2.192	1.550	7.990
GPS 2 - L	-5323964.65	-34856.259	-3516669.17	-5323964.6	-34856.2268	-3516669.15	4.384	3.220	1.838

**Tabla 29.**

*Coordenadas procesadas en RTKLIB comparadas con las coordenadas de la red geodésica de la UFA -ESPE (8 Horas)*

Punto	Coordenada obtenida en RTKLIB (8H)			Coordenada Red Geodésica de la UFA - ESPE			Diferenciales		
	E(m)	N(m)	U(m)	E(m)	N(m)	U(m)	$\Delta E(\text{cm})$	$\Delta N(\text{cm})$	$\Delta U(\text{cm})$
GPS 1 - P	-5324215.79	-34605.5756	-3516286.57	-5324215.79	-34605.5399	-3516286.54	0.071	3.570	3.181
GPS 2 - L	-5323964.62	-34856.208	-3516669.19	-5323964.6	-34856.2268	-3516669.15	2.121	1.880	3.677

En la tabla 30 se realizó el análisis del RMSE obtenido mediante la comparación de coordenadas topocéntricas, donde se puede apreciar que a mayor tiempo de rastreo la precisión mejora, cumpliendo con la precisión de 5 cm en el componente horizontal.

**Tabla 30.**

*Comparación del RMSE del empleando diferentes rangos de tiempo – validación en campo*

Punto	2 Horas		4 Horas		8 Horas	
	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE
	Horizontal (cm)	Vertical (cm)	Horizontal (cm)	Vertical (cm)	Horizontal (cm)	Vertical (cm)
GPS 1 - P	3.8499	8.4251	2.68479284	8.13917107	3.5707	4.78186219
GPS 2 - L	8.7680	4.6300	5.43955261	3.70784502	2.83442015	4.12969165

## **Análisis de la aplicabilidad del método PPP en obras de ingeniería civil**

Para todo proyecto de ingeniería civil resulta conveniente y necesario el levantamiento de información preliminar, es aquí donde la estimación de coordenadas de alta precisión juega un papel muy importante para la georreferenciación espacial de estos proyectos. De acuerdo a métodos tradicionales como es el posicionamiento relativo se logra obtener producto de alta precisión como son las Redes Geodésicas, sin embargo, para proyectos de pequeña magnitud, los gastos pueden ser muy elevados, es por esta razón que se analizó la aplicabilidad del método absoluto mediante el Procesamiento De Punto Preciso PPP, en el cual se emplea un solo equipo receptor de alta precisión para el cálculo de coordenadas.

Ante lo mencionado se ha tomado como referencia a la Normativa Ecuatoriana Vial (NEVI-12), en la cual se mencionan los criterios que deben cumplirse para la planificación, diseño y evaluación de proyectos viales, en la misma que se establecen las tolerancias de precisión aplicables a levantamiento de información de acuerdo a su escala, los mismo que sirven como información base para estudios de obras civiles (Ver tabla 3).

Para analizar la aplicabilidad de este método, se han considerado tres ejemplos de proyectos relacionados con obras de ingeniería civil, en los cuales es posible evaluar las precisiones requeridas de acuerdo a la escala del proyecto.

A continuación, se mencionan tres estudios para evaluar la aplicabilidad del método.

- **Ejemplo de estudio hidráulico:** *“Diseño del sistema de alcantarillado pluvial para el sector Capricho”* (Ortiz Moya & Cando, 2017).

En este estudio la información preliminar es de suma importancia, la misma que es empleada para la ubicación de pozos, sumideros de puntos de descarga para aguas de lluvias, etc. De acuerdo a su escala 1: 1000 y haciendo referencia a los límites permisibles

establecidos por la normativa NEVI -12, la precisión para altimetría y planimetría no debe superar los 50 cm.

- **Ejemplo de estudio estructural:** “*Estudio para el diseño del puente sobre el Río Capelo*” (Aguilar Carrera & Cadena Cadena, 2016)

La información base en este tipo de estudio contribuyen al planteamiento estructural en el área de intervención que lo requiera. De acuerdo a su escala 1: 500 y haciendo referencia a los límites permisibles establecidos por la normativa, la precisión para altimetría y planimetría no debe superar los 25 cm.

- **Ejemplo de estudio vial:** “*Estudio y diseño vial de la Av. 15 de noviembre etapa III de 1.71Km de longitud, cantón Tena provincia de Napo*” (Moreno Carlosama, 2013).

De la misma manera para este tipo de estudio la información base es de importancia para el diseño geométrico vial. De acuerdo a su escala 1: 5000 y haciendo referencia a los límites permisibles establecidos por la normativa NEVI -12, la precisión para altimetría y planimetría no debe superar los 2.5m.

Haciendo un breve análisis de los resultados obtenidos mediante el procesamiento de las 25 estaciones de monitoreo continuo y con la validación realizada en Red Geodésica de la UFA-ESPE, se logró determinar que las precisiones varían y alcanzan valores centimétricos. Si bien el procesamiento realizado a diferentes periodos de tiempo indica que los resultados se optimizan cuando se cuenta con mayor tiempo de rastreo, en muchos de los casos no se cumplió con la precisión de 5 cm. No obstante, la aplicación de este método en obras de ingeniería civil como las antes mencionadas es posible realizarlo cuando los proyectos son de pequeña magnitud, donde las precisiones dependerán netamente de la escala del proyecto.

## Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

- Una vez culminadas las diferentes etapas del proyecto, se estimaron coordenadas cartesianas mediante el Método Posicionamiento Puntual Preciso PPP, empleando diferentes rangos de tiempo y combinaciones de constelaciones. Con el análisis de coordenadas de las 25 estaciones de monitoreo continuo de la REGME en los 12 días seleccionados, se concluyó que las precisiones que mejor se ajustan a los límites establecidos en cuanto a precisión, son las coordenadas procesadas con constelación GPS con rangos de tiempo de 8 y 24 horas. Además, se logró determinar que las estaciones de monitoreo continuo ABEC, MHEC, PLEC y TSEC presentan los valores más altos, debido a que los insumos para el procesamiento presentaron irregularidades generando valores atípicos en los resultados.
- Dentro del procesamiento realizado con la constelación Galileo y la combinación GPS + Galileo, los resultados reflejan que las precisiones se ven afectadas y que más del 98% de los datos procesados no cumplen con los límites establecidos para la presente investigación. Por lo tanto, se concluye que el procesamiento realizado con Galileo al no contar con efemérides finales y archivos del reloj, se genera un mayor error en la estimación de las coordenadas.
- Uno de los requerimientos fundamentales para el procesamiento de datos GNSS es contar con los archivos de corrección que optimizan los errores de posicionamiento, para la presente investigación se contó con correcciones de la ionosfera, del reloj, cargas oceánicas, parámetros de rotación de la tierra y archivos de órbitas precisas. Respecto a la recopilación de datos en formato nativo, 24 estaciones cumplieron con los días totales seleccionados, en el caso de la estación TPEC no se contó con información para el día

116, también fue la única estación que presentó cortes de señal en el rastro satelital, por tal motivo no fue posible completar el procesamiento para esta estación.

- Con la validación realizada en campo se puede concluir que a mayor tiempo de rastreo la estimación de coordenadas mejora, logrando presiones inferiores a 5 cm, lo cual es aplicable a ciertos proyectos, tal es el caso de obras civiles preliminares las cuales no requieren una mayor precisión ya que dependerá de la escala del producto final.

## Recomendaciones

- Se recomienda utilizar distintos servicios web que emplean el método PPP para el cálculo de coordenadas, como Trimble RTX, CSRS -PPP y OPUS, con la finalidad de verificar y validar el procesamiento realizado en el software libre RTKLIB. Tener distintas estimaciones de procesamiento permite realizar un análisis más amplio de las precisiones obtenidas.
- Se recomienda emplear el método PPP procesando únicamente con la constelación GPS, siendo la única constelación que tiene a disposición las correcciones necesarias para el este método, permitiendo obtener una mayor exactitud en el posicionamiento. Es importante tener en cuenta que los archivos de corrección proporcionados por la CDDIS tardan de 15 a 20 días en estar disponibles para su descarga. Además, los resultados mejoran cuando se tiene un tiempo de rastreo mayor a 2 horas.
- Al trabajar con una gran cantidad de archivos GNSS y archivos de corrección con distintas extensiones. Es recomendable organizar la información creando carpetas de trabajo y asignarles un nombre específico a cada una de ellas, de la misma forma ordenar y nombrar los archivos ya procesados.
- En la aplicación a proyectos de ingeniería se recomienda considerar este método como una alternativa al método relativo, sin embargo, hay que considerar que estos proyectos sean preliminares y que no requieran de altas precisiones.

## Referencias Bibliográficas

- Acuña, G. (2008). *Introducción al Posicionamiento GPS de Punto Preciso (PPP): Fundamentos Teóricos*. Maracaibo, Venezuela: Escuela de Ingeniería Geodésica de la Universidad del Zulia.
- Aguilar Carrera, J. O., & Cadena Cadena, L. (2016). Diseño del puente sobre el Río Capelo, parroquia San Pedro de Taboada barrio El Purún, Cantón Rumiñahui Provincia de Pichincha desde el km 0+066 hasta el km 0+093. Trabajo de Graduación previo la obtención del Título de Ingeniero Civil. *Universidad Central del Ecuador*, pág. 375.
- AIUB. (2019). *Bernese GNSS Software*. Obtenido de <http://www.bernese.unibe.ch/>
- Albán, M. F. (2018). Técnica de Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) aplicada a la estimación de vapor de agua precipitable (PWV) de la estación EPEC.
- Alvares, D. G. (2008). Sistema GNSS (global navigation satellite system).
- Alvarez, J. (2019). Analizar los efectos de la troposfera sobre la señal de GPS y el impacto en la precisión en el posicionamiento de un receptor . *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*, pág. 7.
- Benavent, M. (2011). Estudio metodológico del efecto oceánico indirecto y desarrollo de modelos de carga oceánica: aplicaciones geodésicas para la península Ibérica y Canarias. *Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Matemáticas, Sección Departamental de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I*.
- Berné Valero, J., Garrido Villén, N., & Capilla Romá, R. (2019). GNSS: GPS, Galileo, Glonass, Beidou. Fundamentos y métodos de posicionamiento. *Colección Académica*.
- Berné, J., Anquela Julián, A., & V.G, N. (2014). GNSS. GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática. *Univeridad Politécnica de Valencia*,.

- Capilla, R. (2015). Aportación al estudio de la capacidad de los modelos conceptuales en posicionamiento absoluto preciso (precise point positioning) para tiempo real, a través del análisis del rendimiento de productos y prototipos en un escenario multi-constelación gnss. *Universidad Politécnica de Valencia*.
- Cervantes, F., & Imbaquingo, J. (2022). Obtención de soluciones semanales de las estaciones activas de monitoreo continuo de la red REGME, en el período continuo de enero-abril del 2022.
- Cioce, V., Espinoza, D., Rincón, M., Wildermann, E., Royero, G., & Sánchez, L. (2016). Estimación y seguimiento del retardo troposférico GPS empleando posicionamiento de punto preciso.
- Cisneros, D. (2014). *Procesamiento científico ecuatoriano de datos GPS generados por estaciones permanentes ubicadas en países de la región SIRGAS . 114. .* Obtenido de [http://www.geoportaligm.gob.ec/wordpress/?wpfb\\_dl=66](http://www.geoportaligm.gob.ec/wordpress/?wpfb_dl=66)
- Cohnen, F. (2011). Europa lanza los dos primeros satélites de la flotilla Galileo. *Antena de telecomunicación*(184), págs. 10-13.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., & Fridez P. (2015). Bernese GNSS software version 5.2. doi:10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9.
- Enge, P., & Misra, P. (1999). Scanning the issue/technology. *Proceedings of IEEE Special Issue on Global Positioning System*,. 87(1).
- Everett, T., Taylor, T., Lee, D., & Akos, D. (2022). Optimizing the Use of RTKLIB for Smartphone-Based GNSS Measurements. *Sensors*, 22(10), pág. 3825.
- Fallas, J. (2002). Sistema de posicionamiento global. *Escuela de Ciencias Ambientales Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica*.

- Fernández, L., Schuh, H., & Brunini, C. (2005). Obtención de series temporales de los parámetros de stores a partir de modelos geofísicos globales y su relación con las variaciones en los ERP. *Geoacta*, 30.
- Francou, B. (2013). La primera Misión Geodésica francesa en el Perú y la determinación de la forma de la Tierra (1735-1744). En *Ecuador y Francia: diálogos científicos y políticos* (pág. 23).
- García, D. (2008). Sistema GNSS (global navigation satellite system). Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
- Griffiths, J., & Ray, J. (2009). On the precision and accuracy of IGS orbits. *Journal of Geodesy*, 83(3-4), págs. 277–287. doi:<https://doi.org/10.1007/s00190-008-0237-6>
- IGM. (2019). Protocolo De Fiscalización Para Proyectos De Generación De Cartografía Base Con Fines Catastrales Escala 1 : 1 000.
- IGS. (2020). *Products – International GNSS Service*. Obtenido de Igs.org: <https://igs.org/products/>
- Kauba, J. (2009). A guide to using international gps Service (IGS) products. *GPS Solutions*.
- Kouba, J., Lahaye, F., & Tétreault, P. (2017). Precise Point Positioning. *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, págs. 723-751.
- Marín Sánchez, C. (2016). Modelos Matemáticos Utilizados en el Cálculo del Retardo Ionosférico y Troposférico y su Influencia en Procesamiento GPS de Alta Precisión. *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*.
- Martínez, J. (2013). Sistema Galileo: El concepto europeo de navegación por satélite.

Moreno Carlosama, S. M. (2013). Estudio y diseño vial de la Av. 15 de Noviembre (Etapa III de 1.71 Km de Longitud), Cantón Tena, Provincia de Napo. Trabajo de Graduación previo la obtención del Título de Ingeniero Civil. Carrera de Ingeniería Civil. Quito. pág. 848.

Muciuk, K. (2018). GPS-only, GLONASS-only and combined GPS+ GLONASS absolute positioning under different sky view conditions. En *Rehnički vjesnik* (Vol. 24, págs. 933-939).

Naciones Unidas. (2015). *Marco de Referencia Geodésico para el Desarrollo Sostenible*. Informe del Consejo Económico y Social.

*National Coordination Office*. (23 de 05 de 2018). Obtenido de GPS.gov: <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>

Norma Ecuatoriana Vial. (2013). *Ministerio De Transporte Y Obras Públicas Del Ecuador*, pág. 312.

Orduña, J. (2019). Fundamentos y aplicaciones del Posicionamiento Puntual Preciso (PPP: Precise Point Positioning). *UNIVERSIDAD DE SALAMANCA*.

Ortiz Moya, E. W., & Cando, F. J. (2017). Diseño del sistema de alcantarillado pluvial para el sector El Capricho ubicado en el Cantón Carlos Juliio Arosemena Tola - Provincia de Napo. Trabajo de Graduación previo la obtención del Título de Ingeniero Civil. Carrera de Ingeniería Civil. Quito. pág. 182.

Paredes, M. (2013). Procesamiento Ppp De Observaciones Gnss Utilizando Software Libre RTKLIB.

Sanz, J., Zornoza, J., & Hernández, M. (2013). GNSS Data Processing. En *Netherlands: ESA Communications*. (Vol. 1).

Sevilla, M. (1984). *Astronomía geodésica*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10261/25438>

Subirana, J., Zornoza, J., & Hernández, M. (2013). Gns Data Processing.

Takasu, T. (2013). *RTKLIB ver 2.4.2 Manual*.

Trimble. (2019). *Servicio de post-procesamiento Trimble CenterPoint RTX*.

Vazquez, R. (2019). Implementación de la técnica PPP-GNSS para el monitoreo de la salud estructural en puentes. *UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SINALOA*. doi:10.13140/RG.2.2.33003.49446

Vieira, R. (1978). Mareas terrestres. (U. C. Madrid, Ed.) Obtenido de <http://hdl.handle.net/10261/27996>

Wang, Z., Yang, M., & Zhang, K. (2005). Triple Frequency Method for High Order Ionospheric Refractive Error Modelling in GPS Modernization. *Journal of Global Positioning Systems* · December 2005, 4(1-2), págs. 291-295. doi:10.5081/jgps.4.1.291

Warren, D., & Raque, J. (2003). Broadcast vs. precise GPS ephemerides: a historical perspective. *gps solutions*, 7(3), págs. 151-156.

Yuan, Y., Zhang, K., Rohm, W., Choy, S., Norman, R., & Sheng Wang, C. (2014). Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS precise point positioning. *J. Geophys. Res. Atmos.* doi:10.1002/2014JD021486

Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M., & Webb, F. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research*, 102(B3), págs. 5005-5017.

## Apéndices