



# **BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
COLEGIO DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y  
GEODÉSICA

**“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE  
RECEPTORES GNSS DE BAJO COSTO EN  
EL MONITOREO DE LA SALUD  
ESTRUCTURAL EN PUENTES  
IMPLEMENTANDO ESTRATEGIAS DE  
PROCESAMIENTO”**

TESIS

*Que para obtener el Grado de:*

**INGENIERO TOPÓGRAFO Y GEODESTA**

Presenta

**DULCE TAMAYO DE LEÓN**

Director de tesis:

**M.V. Máximo Ávila Cruz**

Co-asesor de tesis:

**M.C. Jesús René Vázquez Ontiveros**

Puebla, Pue.

marzo de 2022.



**BUAP**

Oficio No. SAC/0784/2022

**C. Dulce Tamayo de León -201644037-  
Pasante de la Licenciatura en Ingeniería  
Topográfica y Geodésica  
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional en línea, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

**“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE RECEPTORES GNSS DE BAJO COSTO EN EL MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL EN PUENTES IMPLEMENTANDO ESTRATEGIAS DE PROCESAMIENTO”**

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como Asesor Interno de tema al Mtro. Máximo Ávila Cruz.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

**Atentamente**  
**“Pensar bien para vivir mejor”**  
H. Puebla de Z. a 08 de abril de 2022

**M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora**  
Director



M'ACGZ/M'VGL/barv  
C.c.p. Archivo

Facultad  
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio  
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,  
Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
222 229 55 00 Ext. 7610

**M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora**  
**Director de la Facultad de Ingeniería**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**P r e s e n t e.**

El que suscribe: Mtro. Máximo Ávila Cruz, asesor del tema de tesis:

**“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE RECEPTORES GNSS DE BAJO COSTO EN EL MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL EN PUENTES IMPLEMENTANDO ESTRATEGIAS DE PROCESAMIENTO”**

Presentada por la C. Dulce Tamayo de León -201644037-, pasante del Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, y en atención al oficio No. SAC/0784/2022 con fecha de emisión 08 de abril de 2022, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

**A t e n t a m e n t e**  
**“Pensar bien, para vivir mejor”**  
**H. Puebla de Z. a 19 de abril de 2022**

  
**Mtro. Máximo Ávila Cruz**  
**Asesor de Tema**

M<sup>MAC</sup>/BARV  
C.c.p. Interesado  
C.c.p. Archivo

## Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mi familia por su gran apoyo.

Por otra parte, me gustaría darle mi más sincero agradecimiento al M.C. Jesús René Vázquez Ontiveros por su paciencia, asesoría, dedicación a revisar y corregir la presente tesis y sobre todo por su gran apoyo en la recolección de los datos en campo, sin los cuales, no hubiera sido posible la conclusión del trabajo presentado.

Agradezco al M.V. Máximo Ávila Cruz, por su confianza, apoyo durante este proceso y disponibilidad al compartir sus conocimientos que ha adquirido al ejercer en esta bella profesión.

Al Dr. G. Esteban Vázquez Becerra por su orientación para mejorar el documento, pero sobre todo por aceptar que realizara una estancia de investigación bajo su asesoría, la cual fue una pieza clave para empezar el presente trabajo de tesis.

A mis profesores del colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica de la Facultad de Ingeniería (FIBUAP), han sido de gran ayuda para mi formación personal y académica, ya que me han compartido vivencias únicas y enseñanzas magnificas.

A mis amigos, por siempre compartir su tiempo y conocimientos, además de estar en días complicados, me hacen saber que cuento con ellos, ofreciéndome sus más sinceros consejos, muchas gracias.

También agradezco a el Servicio Internacional de Sistemas de Navegación por Satélite Global (IGS) por ofrecer archivos precisos para realizar las correcciones necesarias.

Por último, pero no menos importante, le doy las gracias a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y a la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) por permitir el desarrollo de la presente tesis.

## Resumen

Dentro de la industria de la construcción se lleva a cabo el monitoreo de obras civiles con equipos sofisticados de orden geodésicos. En este trabajo se buscó emplear tecnología GNSS de bajo costo (GNSS Low Cost) para el Monitoreo de la Salud Estructural (SHM) del puente Isla Musalá, localizado en Culiacán, Sinaloa, para ello, se realizaron mediciones con receptores geodésicos y de bajo costo, ambos midiendo con una frecuencia de muestreo de 5 Hz y siguiendo a las constelaciones GPS y GLONASS, las campañas de medición se planearon en días diferentes para cada receptor, éstas tuvieron una duración de una hora, la cual fue estratégica, dado que en este lapso de tiempo existe mayor carga sobre el puente. De esta manera, para cumplir con el objetivo de implementar una metodología adecuada para percibir desplazamientos verticales con tecnología de bajo costo, se utilizaron las técnicas de Posicionamiento Relativo de Diferencias Dobles (DD-GNSS) y Posicionamiento Puntual Preciso con resolución de ambigüedad (PPP-GNSS AR), dichos métodos se procesaron en modo cinemático (época independiente-correcciones de posición por época), es decir, se estimaron soluciones independientes de la posición para cada época de medición.

También, se analizó el comportamiento de las series de tiempo procesadas con software científico y comercial, a estas soluciones se les aplicó una sucesión de tratamientos, de tal manera que el posicionamiento fuera el óptimo y para que las coordenadas estuvieran referidas a un origen topocéntrico sobre la estructura, con la finalidad de llevar a cabo una adecuada interpretación.

En este análisis se encontraron diferencias de orden milimétrico entre los desplazamientos percibidos por un receptor geodésico y por uno de bajo costo, además, las deflexiones registradas por ambos receptores se encuentran dentro de los estados límite de la estructura. Por lo anterior, hacen posible la idea de implementar equipos de bajo costo en la aplicación del SHM.

## Abstract

Within the construction industry, the monitoring of civil works is carried out with sophisticated geodetic equipment. This work sought to use low-cost GNSS technology (GNSS Low Cost) for structural health monitoring (SHM) of the Musala Island bridge, located in Culiacan, Sinaloa. For this, measurements were made with geodetic and low-cost receivers, both with a sampling rate of 5 Hz and following to the GPS and GLONASS constellations. The campaigns were planned on different days for each receiver, these lasted one hour, which was strategic because in this period of time there is a great load on the bridge. In this way, and for achieve the objective of implementing an adequate methodology to perceive vertical displacements with low-cost technology, the techniques of Relative Positioning of Double Differences (DD-GNSS) and Precise Point Positioning with ambiguity resolution (PPP-GNSS AR) were used, these methods were processed in kinematic mode (independent epochby-epoch position fixes), that is, independent solutions of position were estimated for each epoch.

Likewise, the behavior of the time series processed with scientific and commercial software was analyzed. A succession of treatments was applied to these solutions, in such a way that the positioning was optimal, and thus the coordinates were referred to a topocentric origin on the structure, to be able to make an adequate interpretation.

In this analysis, millimeter differences were found between the displacements perceived by a geodesic receiver and a low-cost one. In addition, the deflections recorded by both receptors are within the boundary states of the structure. Therefore, they make possible the idea of implementing low-cost equipment in the application of the SHM.

## CONTENIDO GENERAL

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>II</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. Introducción .....	1
1.2. Planteamiento del problema .....	2
1.3. Justificación .....	2
1.4. Área de estudio .....	3
1.5. Objetivos .....	5
1.5.1. General .....	5
1.5.2. Específicos .....	5
1.6. Antecedentes .....	5
1.7. Hipótesis .....	6
1.8. Estructura de la Tesis .....	7
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>8</b>
<b>2. Marco teórico</b> .....	<b>8</b>
2.1. Monitoreo de la Salud Estructural en puentes .....	8
2.1.1. Inspección de puentes .....	8
2.1.2. Monitoreo de puentes .....	9
2.1.3. Objetivos de la implementación de SHM .....	10
2.2. Los GNSS .....	11
2.3. Métodos de procesamiento .....	13
2.3.1. Relativo .....	13
2.3.2. Absoluto .....	14
2.3.2.1 Fuentes de error en PPP .....	14
2.4. PPP con resolución de ambigüedad (PPP-AR) .....	18
2.4.1. Ambigüedad .....	18
2.4.2. La importancia de la ambigüedad .....	18
2.4.3. Ambigüedad flotante .....	19
2.4.4. Ambigüedad entera .....	19
2.5. Fundamentos teóricos de PPP .....	20
2.6. Receptores GNSS de bajo costo .....	22

<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>24</b>
<b>3. Metodología</b> .....	<b>24</b>
3.1. Materiales .....	24
3.1.1. Geomax Zenith 25 .....	24
3.1.2. Receptor ZED-F9P .....	25
3.1.3. ANUBIS .....	28
3.1.4. Servicio online CSRS-PPP .....	30
3.1.5. PRIDE-PPPAR.....	31
3.1.6 Topcon Tools v.7.5.1 .....	33
3.1.7 TRACK.....	34
3.1.8 MATLAB .....	34
3.2. Filtros digitales .....	34
3.2.1. Media móvil.....	35
3.2.2. Hampel .....	35
3.2.3. De-trended.....	36
3.2.4 Desplazamientos aparentes .....	36
3.3. Métodos .....	36
3.3.1 Descripción del experimento.....	36
3.3.2 Procesamiento de datos .....	38
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>44</b>
<b>4. Resultados</b> .....	<b>44</b>
4.1. Análisis de calidad .....	44
4.2. Desplazamientos aparentes.....	49
4.3. Comparación estadística de los desplazamientos aparentes .....	50
4.4. Estados límite de diseño. ....	53
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>56</b>
<b>5. Conclusiones</b> .....	<b>56</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>58</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diferentes vistas del Puente Isla Musalá: (a) panorámica, (b) aérea, y (c) de perfil. Fuente: Google Earth. ....	4
<b>Figura 2.</b> Representación 3D de la zona de estudio sobre el Puente Isla Musalá..	4
<b>Figura 3.</b> Área de estudio y antenas GNSS de bajo costo: (a) azotea del edificio UL FGG; (b) Survey (izquierda), Tallysman TW3882 (centro) y Survey Calibrated (derecha). Fuente: Hamza, et al., 2021.....	6
<b>Figura 4.</b> Esquema del posicionamiento de DD-GNSS. Fuente: Guzmán-Acevedo, 2017. ....	13
<b>Figura 5.</b> Receptor GNSS Geomax Zenith 25. ....	24
<b>Figura 6.</b> Equipo de bajo costo: (a) receptor ZED-F9P, (b) antena ANN-MB. ....	26
<b>Figura 7.</b> Diagrama de bloques ZED-F9P-02B. Fuente: Traducido al Español de ublox, 2021.....	27
<b>Figura 8.</b> Modo del funcionamiento de Anubis y relación con entradas, salidas y procedimientos internos. Fuente: Traducido al Español de Dousa y Václavovic, 2021. ....	30
<b>Figura 9.</b> Estructura general de PRIDE PPP-AR. Fuente: Traducido al Español de Geng et al, 2019.....	32
<b>Figura 10.</b> Configuración del experimento para la primera campaña de medición: a) receptor Geomax Zenith 25 como rover sobre el primer claro del puente Isla Musalá, b) estación de referencia. ....	38
<b>Figura 11.</b> Antena ANN-MB-00 de U-blox colocada sobre el parapeto en el primer claro del puente Isla Musalá.....	39
<b>Figura 12.</b> Estrategia de nivelación de la antena de bajo costo: a) prueba de nivelación con una base nivelante profesional, b) nivelación de la antena sobre el puente Isla Musalá. ....	40
<b>Figura 13.</b> Esquemama de la metodología empleada. ....	43
<b>Figura 14.</b> Efecto multitrayectoria en la banda L1 y L2 de las constelaciones GPS y GLONASS, respectivamente: (a) receptor base Geomax, (b) receptor rover Geomax, (c) receptor de bajo costo. ....	46
<b>Figura 15.</b> Efecto SNR en la banda L1 y L2 de las constelaciones GPS y GLONASS, respectivamente: (a) receptor base Geomax, (b) receptor rover Geomax, (c) receptor de bajo costo.....	47

<b>Figura 16.</b> Skyplot: (a) receptor base y rover Geomax, (b) receptor de bajo costo. .....	48
<b>Figura 17.</b> Bandas disponibles en los satelites de las constelaciones GPS y GLONASS: (a) receptor base y rover Geomax, (b) receptor de bajo costo.....	48
<b>Figura 18.</b> Series de tiempo de la componente vertical (U): (a) Receptor GNSS Geomax Zenith 25, (b) Receptor GNSS ZED-F9P.....	50
<b>Figura 19.</b> Histogramas de las diferencias de los desplazamientos obtenidos por el equipo geodésico: (a) discrepancias entre el software científico (TRACK) y el software académico-científico (PRIDE-PPPAR), (b) discrepancias entre TRACK y CSRS-PPP.....	52
<b>Figura 20.</b> Histogramas de las diferencias de los desplazamientos obtenidos por el equipo de bajo costo: (a) diferencias entre el software comercial (Topcon Tools) y el software académico-científico (PRIDE-PPPAR), (b) diferencias entre Topcon Tools y CSRS-PPP.....	53
<b>Figura 21.</b> Histogramas y serie de tiempo del receptor geodésico con los estados límite.....	54

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Características de las constelaciones de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS). Fuente: Traducido al Español de Teunissen y Montenbruck, 2014.....	12
<b>Tabla 2.</b> Componentes del modelo y las correcciones a priori en las aplicaciones de PPP. Los valores de magnitud e incertidumbre deben considerar aproximados y pueden diferir de un caso a otro. Fuente: Traducido al Español de Teunissen y Montenbruck, 2014.....	16
<b>Tabla 3.</b> Comparación de características de los receptores. ....	23
<b>Tabla 4.</b> Características técnicas del receptor Geomax Zenith 25. Fuente: GeoMax AG, 2012. ....	25
<b>Tabla 5.</b> Características técnicas del receptor ZED-F9P. Fuente: u-blox, 2021. ...	25
<b>Tabla 6.</b> Productos de los parámetros de la órbita del satélite, el reloj, el sesgo y la orientación de la tierra utilizados en CSRS-PPP. Fuente: Traducido al Español de Banville et al, 2021. ....	30
<b>Tabla 7.</b> Parámetros de los softwares empleados. ....	41
<b>Tabla 8.</b> Valores establecidos por el IGS. Fuente: IGS, 2015.....	44
<b>Tabla 9.</b> Comparación de los desplazamientos máximos y mínimos de las series resultantes.....	49
<b>Tabla 10.</b> Desviación estándar de los desplazamientos aparentes obtenidos por los cinco softwares utilizados.....	51
<b>Tabla 11.</b> Comparación de la desviación estándar calculada a partir de la diferencia entre los diferentes softwares empleados. ....	53
<b>Tabla 12.</b> Desviación estándar de los desplazamientos aparentes obtenidos por los cuatro softwares utilizados. ....	55

# CAPÍTULO 1

## 1. Introducción

### 1.1. Introducción

En las últimas tres décadas, las aplicaciones que han brindado las tecnologías han sido de gran ayuda para lograr satisfacer las necesidades del ser humano, del mismo modo, la tecnología tiene un papel importante en la solución de problemas. Como ejemplo, se cita la tecnología satelital GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), que es capaz de obtener coordenadas tridimensionales precisas en cualquier parte del globo terrestre (Hofmann-Wellenhof et al., 2007). La tecnología GNSS ha ayudado a que nuevas investigaciones se desarrollen, como en el estudio de la atmósfera (MacDonald y Platzer, 2020), en el análisis de las ondas sísmicas (Romero, 2015), estudios del nivel medio del mar (Martinez-Felix et al., 2021; Tabibi et al., 2020), monitoreo de la salud estructural (Meng, 2002; Yi et al., 2010), entre otros. Los GNSS han sido aceptados en la aplicación del Monitoreo de Salud Estructural (SHM, por sus siglas en inglés), debido a que han demostrado alcanzar altas precisiones al momento de estudiar diversas propiedades sobre una estructura. De acuerdo con diversos estudios, la técnica de Posicionamiento Relativo de Diferencias Dobles (DD-GNSS) es la más utilizada en el SHM, ya que durante su procesamiento elimina la mayoría de las fuentes de error que afectan a las mediciones GNSS, dando como resultado desplazamientos en el orden de milímetros (Guzmán-Acevedo, 2017). La técnica de diferencias dobles es económicamente costosa, ya que requiere de por lo menos dos receptores, uno como estación de referencia-base y otro como rover. Sin embargo, una alternativa potencial al DD es la técnica de posicionamiento puntual preciso (PPP, por sus siglas en inglés). PPP es capaz de obtener precisiones muy similares a las obtenidas con el método de DD (Vazquez-Ontiveros, et al., 2021).

Una de las ventajas de utilizar PPP-GNSS es que se requiere de un solo receptor, y a partir de diferentes productos precisos se puede obtener posicionamiento en el orden de los milímetros (Yigit y Gurlek, 2017), a pesar de esto, el equipo requerido para la recopilación de datos geoespaciales es de alta gama, por lo cual tienen un costo elevado en el mercado. Actualmente, se ha propuesto la utilización de equipos de bajo costo, estos son capaces de obtener precisiones tolerables, dando origen a una alternativa económica para el posicionamiento GNSS. Los receptores GNSS de bajo costo son pequeños y

ligeros, gracias a esto pueden ser utilizados en el monitoreo de obras con un nivel de peligro considerable (Cina y Piras, 2015; Hamza, et al., 2021).

Hamza et al. (2021) manifiestan que la utilización de antenas de bajo costo tiene un buen desempeño sin considerar su calibración, según lo demande el proyecto. Por otro lado, Cina y Piras (2015) realizaron una comparación entre el rendimiento de equipos de alta gama y el rendimiento de equipos bajo-costos (u-blox EVK-5T) lo cual apunta hacia la conclusión de que el equipo utilizado de bajo costo puede tener un rendimiento similar al del receptor geodésico, siempre y cuando se encuentre en condiciones particulares como lo es: la distancia de la línea base-rover sea  $\leq 1$  Km y que las observaciones sean más largas (para el caso del posicionamiento absoluto).

De esta manera el presente estudio busca evaluar los desplazamientos del puente Isla Musalá en Culiacán, Sinaloa empleando un receptor de bajo costo y tomando como referencia un receptor de orden geodésico, sosteniendo que los receptores de bajo costo son una alternativa en estudios de SHM en obras civiles, para ello, a continuación, se expone el contexto de los GNSS y sus respectivas técnicas, además se explicará el funcionamiento de los softwares utilizados para obtener los desplazamientos en la componente vertical.

## 1.2. Planteamiento del problema

El inadecuado mantenimiento de las obras civiles ha causado que la sociedad se encuentre en constante peligro, de esta manera se vuelve de gran importancia el monitoreo de la salud estructural sobre diferentes estructuras de ingeniería, principalmente para prevalecer la integridad del usuario. Sin embargo, el monitoreo genera un presupuesto demasiado elevado, puesto que la adquisición del equipo requerido es costosa, por lo cual no es viable económicamente, ya que elaborar un reporte del estado de la estructura requiere varias campañas de medición, donde la recopilación de información debe de ser constante y en un tiempo prolongado que va desde una hora hasta un día y en casos más específicos puede ser hasta meses o años. La finalidad de la investigación es evaluar los desplazamientos verticales percibidos por equipo de bajo costo, para divulgar la viabilidad del uso de tecnología GNSS de bajo costo en el SHM de Puentes.

## 1.3. Justificación

La construcción de obras civiles es esencial para el desarrollo de una ciudad, por lo cual, se debe asegurar que las mismas estén en óptimas condiciones para prevenir catástrofes y a su vez evitar pérdidas económicas y humanas etc. La mayoría de las edificaciones de puentes que se encuentran en México están en el límite de su vida útil, además están sujetas a diferentes factores que contribuyen a su deterioro, en específico, los puentes son dañados estructuralmente por la

sismicidad, erosión causada por crecientes de ríos, viento, temperatura, aumento de tránsito, así como de carga. La implementación de un monitoreo de la salud estructural en este tipo de obras ayuda a detectar fallas o prevenir el colapso de ellas. Por otro lado, el realizar este tipo de estudios conlleva un presupuesto considerable, ocasionando que proyectos de este tipo no logren cumplirse en su totalidad. Uno de los parámetros a evaluar en el monitoreo de puentes es el desplazamiento vertical, ya que es la componente más crítica (Li et al., 2005).

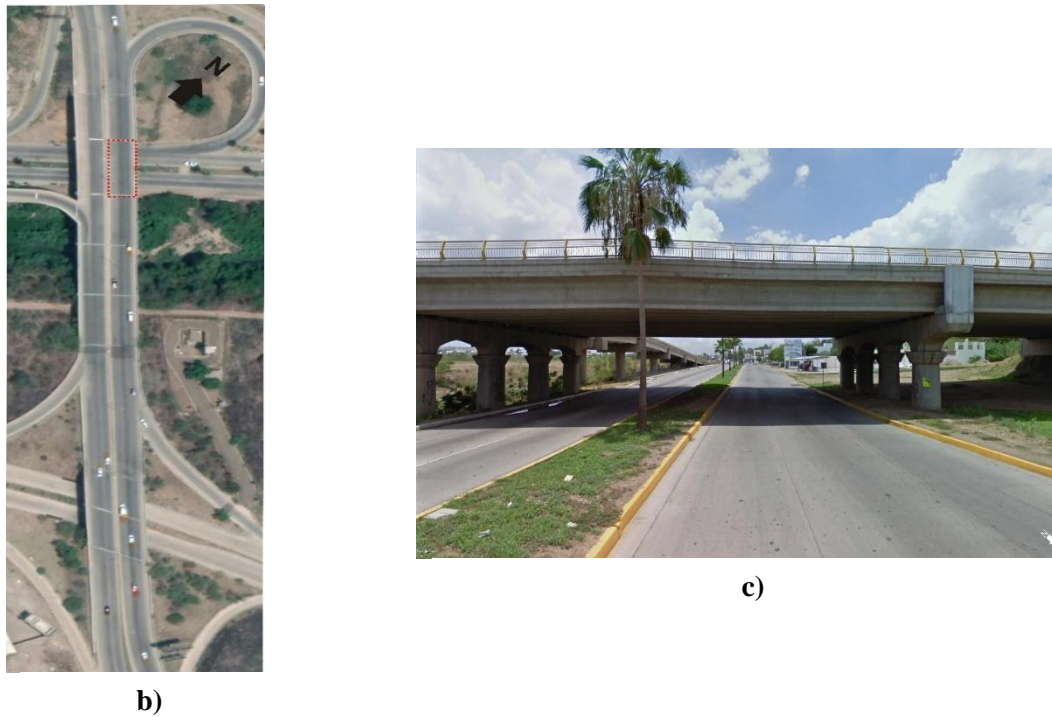
Por lo anterior, se determinó realizar el SHM del puente Isla Musalá en Culiacán Sinaloa, esta estructura presenta deflexiones considerables para probar el desempeño de los equipos de bajo costo, con el propósito de determinar desplazamientos en el orden de los centímetros. Para el SHM se empleará metodología GNSS y equipos de orden geodésico y de bajo costo con la finalidad de evaluar el desempeño de estos dos diferentes equipos y generar un oportuno reporte de la estructura.

#### 1.4. Área de estudio

El caso de estudio presentado, es el puente Isla Musalá localizado en la ciudad de Culiacán, Sinaloa. El puente Isla Musalá tiene una longitud aproximada de 400 metros y fue construido aproximadamente hace 17 años para conectar la zona noreste y sureste de la ciudad a través del cruce sobre el río Tamazula. El puente Isla Musalá es un tipo de puente de vigas de hormigón pretensado y permite el paso de miles de vehículos pesados, vehículos ligeros, bicicletas y peatones. El puente es una estructura relativamente nueva que ha mostrado un desempeño estructural similar al del diseño original, debido a que el puente no presenta deterioro en su estructura y no ha sido afectado por un fenómeno natural o accidente de tránsito, sin embargo, presenta vibraciones incómodas a los peatones cuando circulan vehículos pesados. En la Figura 1 se ilustra el puente en diferentes vistas. Lo anterior mencionado, motivó al estudio de validar los desplazamientos verticales con la tecnología satelital GNSS a través de sensores de bajo costo.

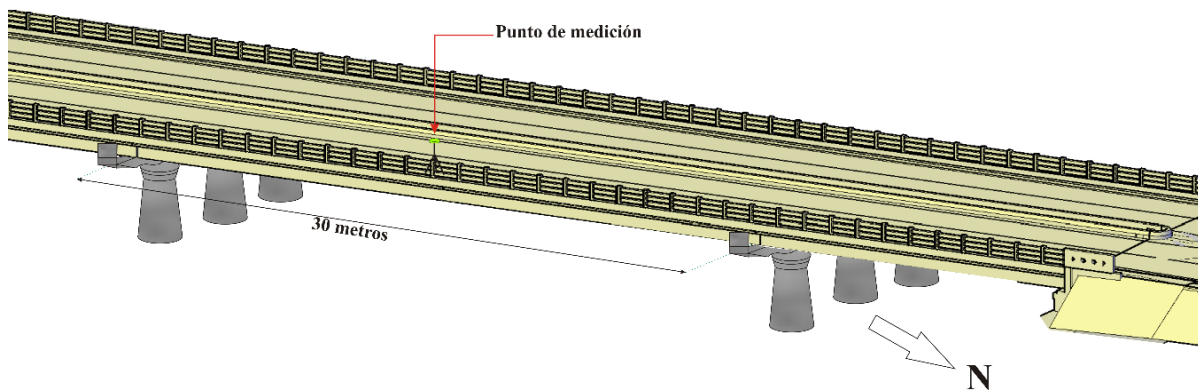


a)



**Figura 1.** Diferentes vistas del Puente Isla Musalá: (a) panorámica, (b) aérea, y (c) de perfil.  
Fuente: Google Earth.

Las mayores vibraciones se presentan sobre los claros de aproximadamente 30 metros, específicamente a la mitad de ellos, por lo cual, para el presente estudio se seleccionó el primer claro del carril del lado izquierdo en dirección Norte-Sur (ver Figura 2).



**Figura 2.** Representación 3D de la zona de estudio sobre el Puente Isla Musalá.

## 1.5. Objetivos

### 1.5.1. General

Implementar una metodología que permita determinar los desplazamientos verticales del puente Isla Musalá a partir de mediciones con receptores GNSS de bajo costo.

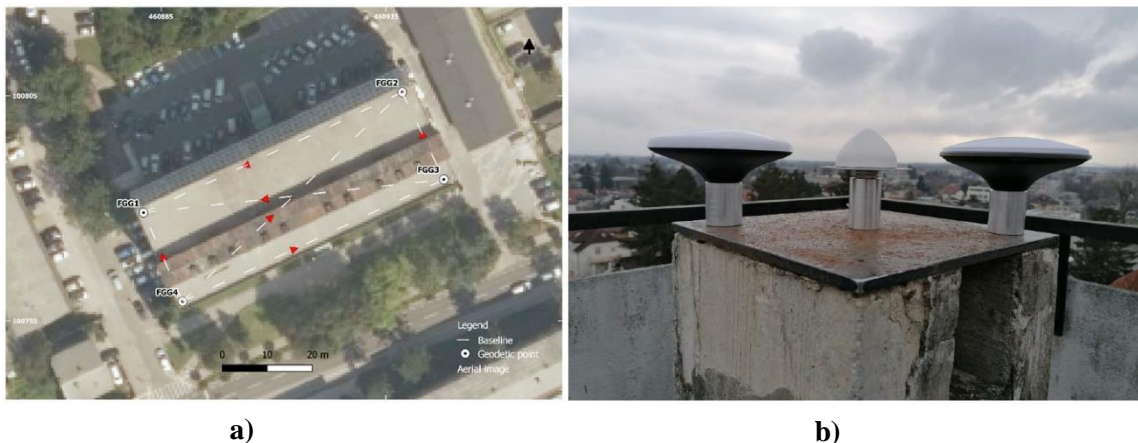
### 1.5.2. Específicos

- Obtener posicionamiento en la componente vertical a través de series de tiempo con receptores de orden geodésico y con receptores de bajo-costo.
- Procesar y analizar los datos geoespaciales con diferente software especializado.
- Analizar las series de tiempo resultantes de DD-GNSS.
- Comparar la precisión de las deflexiones obtenidas con la técnica DD-GNSS y PPP-GNSS AR.
- Definir la viabilidad de utilizar receptores bajo-costo en el SHM de puentes.

## 1.6. Antecedentes

La tecnología de los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS) brindan diversos usos, uno de ellos es con fines de monitoreo en estructuras artificiales, uno de ellos es monitorear estructuras de ingeniería civil. En los últimos años, se han introducido en el mercado equipos de doble frecuencia de bajo costo, los cuales se consideran como sensores adecuados, consiguiendo ser comparables con los equipos de alta gama, por ello diferentes trabajos se han llevado a cabo, donde emplean tecnología GNSS de bajo costo, con el objetivo de determinar las coordenadas precisas, así como el desempeño del equipo durante diferentes experimentos principalmente estáticos y dinámicos. Hamza et al. (2020) realizaron trabajos donde analizan el desempeño de los equipos de bajo costo dándole diferentes enfoques, las mediciones fueron llevadas a cabo sobre el techo del edificio de la Facultad de Ingeniería Civil y Geodésica de la Universidad de Ljubljana (UL FGG), ya que su ubicación se encuentra a cielo abierto y se espera menor error Multipath en las pruebas. Utilizaron un receptor ZED-F9P y antena u-blox ANN-MB-00 de bajo costo, donde se enfocaron en evaluar la calidad y precisión en los desplazamientos en modo estático y dinámico, consiguiendo detectar desplazamientos tridimensionales (3D) en un rango mínimo de 10 mm, concluyendo que la calidad del posicionamiento de la tecnología de bajo costo es lo suficientemente precisa para aplicaciones de monitoreo geodésico donde existe un cierto nivel de peligro. En relación con el buen funcionamiento del equipo de bajo costo descrito anteriormente, se analizó el posicionamiento, el ruido, la calidad de

coordenadas, así como el desempeño del mismo, en este caso empleando diferentes antenas (calibradas y no calibradas), simultáneamente, fue necesario utilizar receptores GNSS geodésicos para tener una referencia. En este caso el equipo de bajo costo obtuvo coordenadas con pocos milímetros de precisión en un período de tiempo corto; sin embargo, los equipos geodésicos se desempeñaron ligeramente mejor (Hamza et al., 2021). Por otro lado, para analizar la magnitud de los desplazamientos que pueden registrar los equipos de bajo costo, tanto en posicionamiento relativo como en absoluto, Hamza, et al. (2021) emplearon un receptor multifrecuencia u-blox ZED-F9P y tres antenas de bajo costo (Survey, Tallysman TW3882 y Survey Calibrated) (ver Figura 3), los parámetros de calibración son desconocidos para dos de ellas (Survey, Tallysman TW3882). Adicionalmente, realizaron una comparativa entre los instrumentos GNSS de bajo costo y los instrumentos GNSS geodésicos para garantizar un nivel similar de calidad y confiabilidad en los desplazamientos. Como resultado, el equipo de bajo costo obtuvo desplazamientos de 20 mm o más en modo absoluto y menores de 10 mm en relativo, así mismo, estas precisiones son adecuadas para monitorear objetos naturales como deslizamientos de tierra y para el monitoreo de edificios de ingeniería, respectivamente.



**Figura 3.** Área de estudio y antenas GNSS de bajo costo: (a) azotea del edificio UL FGG; (b) Survey (izquierda), Tallysman TW3882 (centro) y Survey Calibrated (derecha). Fuente: Hamza, et al., 2021.

## 1.7. Hipótesis

El desempeño en posicionamiento y estabilidad de los receptores GNSS de bajo costo ha demostrado ser de alta precisión al ser comparado con equipos de orden geodésico, por lo cual, una alternativa potencial y económica en los estudios

de Monitoreo de la Salud Estructural en puentes es la tecnología GNSS de bajo costo.

## 1.8. Estructura de la Tesis

El presente documento de tesis está constituido por 5 capítulos, los cuales se organizan de la siguiente manera:

**Capítulo 1:** Se describe una introducción sobre el tema principal, así como también se plantea el problema, la justificación e hipótesis de la investigación que se llevó a cabo.

**Capítulo 2:** Se definen las características generales de los GNSS, así como también los métodos de procesamiento utilizados y las fuentes de error que afectan de manera directa a la técnica PPP-GNSS, por otro lado, se describen las ambigüedades flotantes y enteras. Finalmente, se muestra el contexto de los equipos de bajo costo.

**Capítulo 3:** Se describe la configuración experimental y los instrumentos necesarios para su ejecución. También, se describen las estrategias de evaluación, edición, procesamiento y extracción de series de tiempo que representan el comportamiento de una estructura.

**Capítulo 4:** Los resultados y análisis de los procesamientos y de las series de tiempo son presentadas en este capítulo.

**Capítulo 5:** Se mencionan las conclusiones de los resultados alcanzados en el presente documento de tesis.

## CAPÍTULO 2

### 2. Marco teórico

#### 2.1. Monitoreo de la Salud Estructural en puentes

Las estructuras de los puentes representan un desafío en el entorno construido: son la cristalización de fuerzas finalizadas para mantener a alguien en un lugar inalcanzable. Los puentes proporcionan la conexión más adecuada a lo que la naturaleza ha dividido por un río o un valle, algo a lo que es imposible llegar. El primer puente fue un regalo natural para la humanidad, probablemente un árbol que cayó sobre un pequeño río, y sugirió a los primeros constructores prehistóricos que es posible superar obstáculos. A partir de esta estructura simple, se inspiró una parte central del mundo de la ingeniería estructural y se ha perfeccionado a lo largo de los siglos (Pipinato, 2021).

##### 2.1.1. Inspección de puentes

La inspección de puentes se basa en una metodología que toma en consideración instrucciones, lineamientos, estándares y otras regulaciones oficiales. La inspección de puentes se puede clasificar en los siguientes grupos, según su alcance y frecuencia (Radomski, 2002): inspecciones superficiales, realizadas por el personal de mantenimiento durante las inspecciones de rutina, que normalmente se realizan todos los días; inspecciones básicas, realizadas normalmente al menos una vez al año por inspectores de puentes locales; inspecciones detalladas, realizadas al menos cada cinco años en puentes seleccionados por inspectores regionales de puentes; e inspecciones especiales, realizadas por expertos e investigadores altamente calificados según las necesidades técnicas, normalmente como consecuencia de resultados anormales de inspecciones básicas o detalladas, ya que es necesario determinar la capacidad y evaluar la seguridad de un puente después de cargas inesperadas o accidentales para establecer su capacidad de resistencia a las cargas, o para indicar la necesidad de rehabilitación y refuerzo.

La inspección de puentes es crucial en la evaluación de un puente existente, y está directamente relacionada con la siguiente fase de decisiones de rehabilitación de puentes, porque las inspecciones ayudan a investigar la condición actual de la estructura a partir de la cual se pueden formular recomendaciones para reparaciones, si es necesario (Brinckerhoff, 1993).

## 2.1.2. Monitoreo de puentes

El Monitoreo de la Salud Estructural (SHM, por sus siglas en inglés) es un tema importante para la comunidad de ingeniería de puentes. Los rápidos avances tecnológicos han facilitado la instalación de extensos sistemas de monitoreo de puentes. Se espera que, al obtener datos cuantitativos, será posible desarrollar estructuras inteligentes, con sistemas de monitoreo que puedan complementar las prácticas de inspección visual subjetiva y variable que se emplean actualmente como medio principal para evaluar las condiciones de los puentes (Bennetts, 2019; Bennetts et al., 2020; Sony et al., 2019).

El objetivo principal de los sistemas SHM se percibe comúnmente como el deseo de detectar daños o deterioro. Luego, la información relevante se puede utilizar para optimizar las intervenciones de mantenimiento de una manera rentable. Este es un objetivo que proporcionaría valor a los operadores de puentes. Sin embargo, esto por sí solo no es suficiente para capturar todo el espectro de usos potenciales de SHM. El SHM debe proporcionar datos que puedan transformarse en información útil para mejorar la toma de decisiones por parte de los ingenieros de puentes y los administradores de activos.

Antes de implementar un sistema SHM, se deben hacer las siguientes preguntas de orientación propuestas en Pipinato, 2021:

- a) ¿Cuáles son los objetivos generales de las actividades de seguimiento?
- b) ¿Qué información se necesita de un sistema de monitoreo para cumplir con estos objetivos?
- c) ¿Qué datos sin procesar se requieren para proporcionar esta información?
- d) ¿Cuáles son los valores esperados de las lecturas que se obtendrán de las mediciones y cómo se ven afectados por diversas incertidumbres?
- e) ¿Qué precisión (y frecuencia de lecturas) se necesita de las mediciones para permitir que se tomen decisiones basadas en las mediciones?
- f) ¿Qué tecnología será capaz de tomar las medidas necesarias?
- g) ¿Cómo y a qué costo se registrará, interpretará, difundirá y almacenará la información, y qué estrategia de comunicación se utilizará para transferir los datos al usuario final?
- h) ¿Qué información se requiere de todas las partes interesadas relevantes para que todas las expectativas puedan entenderse y gestionarse?
- i) ¿Quién se hará cargo del capital y los costos operativos continuos asociados con el sistema? ¿Son estos costos asequibles?
- j) ¿Cómo se puede cuantificar el valor/beneficio de la información obtenida?

Es importante señalar que la elección de la tecnología de monitoreo, en sí misma es una consideración que ocurre mucho más tarde en el proceso de especificación que la definición de los objetivos generales de las actividades de monitoreo.

### **2.1.3. Objetivos de la implementación de SHM**

SHM se puede utilizar para cumplir muchos objetivos, y es extremadamente importante que estos objetivos se definan claramente desde el principio, antes de que se especifique cualquier tecnología de monitoreo. Sin una razón clara de por qué se necesita el monitoreo, es muy poco probable que se obtenga el valor esperado. En general, suele existir el deseo de garantizar que los puentes sean seguros y funcionen según lo requerido, y que esto se logre a un costo razonable. Sin embargo, para definir objetivos específicos para un sistema dentro de este objetivo general, existen muchas consideraciones, algunas de las cuales se presentarán a continuación.

En primer lugar, hay varios beneficiarios potenciales de SHM, cada uno de los cuales puede obtener diferentes beneficios del monitoreo de puentes. Un sistema de monitoreo que tiene como objetivo proporcionar información a una parte interesada individual puede proporcionar un valor limitado o nulo a otras partes interesadas. Por lo tanto, es vital que se identifiquen las partes interesadas y sus objetivos. También se advierte que los usuarios finales de la información obtenida por un programa de monitoreo pueden no ser los responsables de pagar por el sistema. Andersen y Vesterinen (2006) identificaron siete partes interesadas clave de los proyectos SHM "Autoridades", "Propietarios", "Usuarios", "Investigadores", "Diseñadores", "Contratistas" y "Operadores", lo que demuestra que cada parte interesada tiene diferentes objetivos para ser satisfecha por los sistemas SHM.

Los objetivos de un sistema de seguimiento también pueden variar según la fase del proyecto. Antes de que comience un proyecto de construcción, SHM se puede utilizar para proporcionar información para respaldar el trabajo de diseño. Por ejemplo, las pruebas de campo se pueden usar para determinar las condiciones del suelo y de esta manera se puedan incorporar al diseño. También puede ser necesario realizar mediciones para respaldar la evaluación de la condición de las estructuras existentes, con el propósito de determinar si pueden continuar en servicio. Durante la fase de construcción, hay varias áreas diferentes donde los sistemas de monitoreo tienen el potencial de agregar valor. Esto puede incluir el monitoreo de estructuras cercanas para garantizar a sus propietarios que no se vean afectados negativamente por los procesos de construcción. En algunos casos, también puede ser posible usar un sistema de monitoreo para mejorar la eficiencia del proceso de construcción al permitir que se realicen ajustes a medida que avanza el proyecto. Además, puede ser beneficioso en algunos casos recopilar datos para permitir que se verifiquen las suposiciones de diseño clave, lo que reduce el riesgo

de que fenómenos imprevistos afecten la funcionalidad de una estructura. Hay muchos objetivos diferentes que se pueden realizar durante la vida operativa de una estructura. Estos incluyen sistemas diseñados para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente de la estructura, y para ayudar a quienes investigan el comportamiento de las estructuras y los materiales durante largos períodos de tiempo para respaldar futuros desarrollos de diseño.

## 2.2. Los GNSS

Los sistemas globales de navegación satelital (GNSS, por sus siglas en inglés) son constelaciones de satélites que orbitan la tierra, proporcionan tiempo y a través de señales electromagnéticas se obtiene un posicionamiento tridimensional (X, Y, Z) de cualquier punto sobre la superficie terrestre (Hofmann-Wellenhof et al., 2007, 2012). Existen diferentes constelaciones GNSS que están dirigidas y desarrolladas por diferentes países. En la Tabla 1 se muestran las características principales de los GNSS. Los GNSS están constituidos por tres segmentos fundamentales (Hofmann-Wellenhof et al., 2007; Huerta, E., Mangiaterra, A., y Noguera, 2005):







1. **Segmento espacial:** abarca las constelaciones donde se encuentran orbitando los satélites. Estas deben de desarrollar un número suficiente de satélites para garantizar que al menos cuatro de ellos sean simultáneamente visibles en cualquier zona geográfica del planeta. Los criterios de diseño de las constelaciones son: la precisión de la posición del usuario, la disponibilidad del satélite, la cobertura del servicio y la geometría del satélite.
2. **Segmento de control:** OCS (*Operational Control Segment*) o segmento terrestre, lo integra una Estación de Control Maestra (MCS, por sus siglas en inglés), varias Estaciones de Monitoreo (MS, por sus siglas en inglés) y Antenas Terrestres (GA, por sus siglas en inglés), sus principales funciones son: Monitoreo y control permanente de los satélites, sincronización de los relojes de los satélites con el tiempo GPS y transmisión, a cada satélite, de la información procesada.
3. **Segmento de usuario:** se puede clasificar en categorías de usuarios (civiles, militares, autorizados/no autorizados), tipos de receptores (basados en el tipo de observables, es decir, el tipo de pseudorangos y en la capacidad de rastrear una, dos o incluso más frecuencias) y diversos servicios de información (gubernamentales y privados), estos últimos proporcionan a los usuarios informes de estado de constelación, interrupciones programadas y datos orbitales.

Las señales emitidas por los satélites sufren diferentes errores derivados de efectos atmosféricos, efectos multitrayecto, errores de efemérides y reloj, errores debidos a la relatividad; provocando que la información recopilada sea afectada, causando la degradación de la precisión del posicionamiento. De acuerdo con las

señales emitidas de los GNSS permiten tres tipos de mediciones (Teunissen y Montenbruck, 2014):

- Pseudorange: Es la diferencia que existe entre el reloj del receptor en la recepción de la señal y el reloj del satélite en la transmisión de la señal.
- Fase portadora: es la medida del desfase de la onda portadora, se mide el tiempo de propagación. La fase de la señal emitida del satélite es comparada con la fase de una señal de referencia generada por el receptor.
- Doppler: Medida de la velocidad de alcance o velocidad de línea de visión (modificación de la frecuencia recibida causada por el efecto Doppler).

**Tabla 1.** Características de las constelaciones de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS). Fuente: Traducido al Español de Teunissen y Montenbruck, 2014.

	GPS	GLONASS	BeiDou	Galileo	QZSS	IRNSS/NavIC
<b>Sistema</b>						
<b>Órbita</b>	MEO	MEO	MEO, IGSO, GEO	MEO	IGSO, GEO	IGSO, GEO
<b>Número nominal de satélites</b>	24	24	27, 3, 5	30	3, 1	4, 3
<b>Plano orbital</b>	6 planos	Walker (24/3/1)	Walker (24/3/1)	Walker (24/3/1)	IGSO	IGSO
<b>Grado de inclinación</b>	56°	64.8°	55°	56°	43°	29°
<b>Servicios</b>	SPS, PPS	SPS, PPS	OS, AS, WADS, SMS	OS, CS, PRS	GCS, GAS, PRS, EWS, MCS	SPS, RS
<b>Inicio del servicio</b>	Dic. 1993	Sep. 1993	Dic. 2012	2016/2017 (planeación)	2018 (planeación)	2016 (planeación)
<b>Origen</b>	USA	Rusia	China	Europa	Japón	India
<b>Cobertura</b>	Global	Global	Global	Global	Regional Este de Asia y Oceanía	$-30^\circ < \phi < 50^\circ$ $30^\circ < \lambda < 130^\circ$
<b>Frecuencia (MHz)</b>	L1 1575.42	L1 1602.00	B1 1561.098	E1 1575.42 E5a 1176.45	L1 1575.42 L2 1227.60 L5 1176.45	L5 1176.45 S 2492.028

L2	L2	B2	E5b	E6 1278.75
1227.60	1246.00	1207.14	1207.14	
L5	L3	B3	E6 1278.75	
1176.45	1202.25	1268.52		

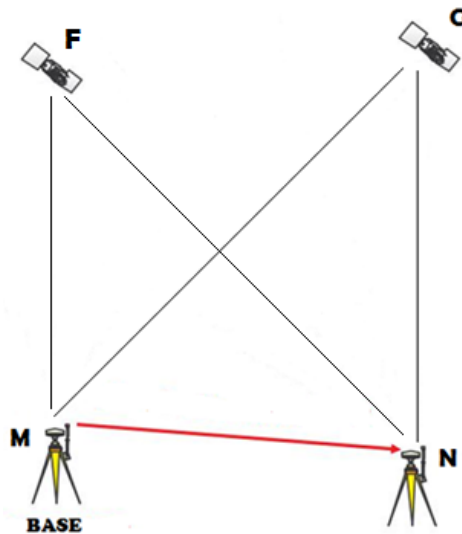
*SPS: Servicio de posicionamiento estándar; PPS: Servicio de posicionamiento preciso; OS: Servicio abierto; AS: Servicio autorizado; WADS: Servicio diferencial de área amplia; SMS: Servicio de mensajes cortos; CS: Servicio comercial; PRS: Servicio regulado público; GCS: Servicio complementario GPS; GAS: Servicio de Aumento del GPS; EWS: Servicio de Alerta Temprana; MCS: Servicio de Comunicaciones de Mensajes; PS: Servicio de precisión; RS: Servicio restringido.*

## 2.3. Métodos de procesamiento

En esta sección se describen dos métodos de procesamiento utilizados en esta investigación, así como también sus principales fuentes de error, además, se describe el término ambigüedad para el método PPP.

### 2.3.1. Relativo

La técnica de DD, es conocida como un proceso relativo, se basa en la medición simultánea de dos receptores, estos deben seguir los mismos satélites (ver Figura 4), un receptor se ubica sobre un punto con coordenadas conocidas. La precisión obtenida es del orden milimétrico gracias a que algunos errores son eliminados en su totalidad o parcialmente durante su procesamiento, (Guzmán-Acevedo, 2017).



**Figura 4.** Esquema del posicionamiento de DD-GNSS. Fuente: Guzmán-Acevedo, 2017.

## 2.3.2. Absoluto

El Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) es una técnica de posicionamiento GNSS absoluta, puede emplearse en condiciones estáticas o cinemáticas, principalmente se desarrolló para el análisis de datos de grandes redes (Zumberge et al., 1997). Esta técnica procesa mediciones de pseudodistancia y fase portadora no diferenciada en un solo receptor mediante la fijación de órbitas de satélites conocidas y relojes de precisión centimétrica-milimétrica (Vazquez-Ontiveros, et al., 2021; Zumberge et al., 1997). En general, en un solo receptor, su posición, el retardo troposférico cenital (ZTD, por sus siglas en inglés), el reloj y las ambigüedades de todos los satélites observados se estiman en PPP (Kouba y Héroux, 2001). Para un receptor de doble frecuencia, los retardos ionosféricos de primer orden pueden eliminarse utilizando la combinación libre de ionosfera observable (Hofmann-Wellenhof et al., 2012). Los retrasos residuales de orden superior representan menos del 0.1% del total de los retardos ionosféricos y se presume que sus impactos en las estimaciones de posición son mínimos, por lo que generalmente se ignoran en PPP (Petrie et al., 2010). Para un receptor de frecuencia única, los retrasos ionosféricos suelen mitigarse con modelos de corrección a priori, como los mapas de contenido total de electrones vertical (VTEC, por sus siglas en inglés) del IGS. Desafortunadamente, los errores de estos mapas pueden ser de hasta 4.5 TECU (Unidad de Contenido Total de Electrones) en promedio, que es aproximadamente igual a 72 cm para la frecuencia L1 (Hernández-Pajares et al., 2009). Finalmente, el reloj del receptor se estima como ruido blanco y las ambigüedades se estiman como constantes de valor real sobre mediciones continuas de fase portadora.

### 2.3.2.1 Fuentes de error en PPP

PPP se complica por sus correcciones de última generación que incluyen el centro de ajuste y variación de la fase de la antena, el efecto *wind-up* de la fase, el efecto de la relatividad, el retardo troposférico, los efectos de desplazamiento de la estación y los efectos entre los sesgos de la pseudodistancia (Kouba y Héroux, 2001). Para un satélite, su centro de masa, referido por su órbita, no coincide con su centro de fase de antena. Por lo tanto, este desplazamiento del centro de fase del centro de masa debe corregirse. Tenga en cuenta que esta corrección está sujeta a la altitud del satélite, que es bastante complicada e incierta durante los períodos de eclipse (Kouba, 2009). Esta corrección también se aplica a las antenas de los receptores. Además, el centro de fase real no coincide con el nominal, sino que depende de la frecuencia de la señal y de la posición relativa entre el satélite y el receptor. Esta variación del centro de fase está a nivel milimétrico. Desde el 5 de noviembre de 2006, los centros de fase absoluta, en lugar de los relativos, se han aplicado a los productos IGS (Schmid et al., 2007).

Los satélites GPS transmiten ondas de radio polarizadas circularmente a la derecha y, por lo tanto, las mediciones de fase portadora entrantes dependen de la orientación mutua entre las antenas del satélite y del receptor. Este efecto se llama fase *wind-up* (Wu et al., 1992). Específicamente, una rotación de la antena del receptor alrededor de sí misma puede cambiar las mediciones de la fase de la portadora hasta un ciclo. Para un receptor móvil, este efecto *wind-up* está sujeto a la altitud de la antena (Kim et al., 2006).

El efecto de la relatividad perturba significativamente a las mediciones GPS indiferenciadas (Hofmann-Wellenhof et al., 2012). Por un lado, el campo gravitacional da como resultado una curvatura espacio-temporal de la propagación de la señal. Esta corrección de propagación puede ser de hasta 18.7 mm para satélites GPS, pero esta corrección es mucho menor para el posicionamiento relativo. Por otro lado, la frecuencia fundamental del satélite se ve afectada por el movimiento del satélite y la diferencia de los campos gravitacionales en el satélite y el receptor, por lo que cambia el reloj del satélite. El desplazamiento de frecuencia resultante bajo el supuesto de órbitas circulares se ha corregido en la frecuencia de reloj del satélite emitida. El efecto periódico residual debido a esta suposición puede ser de hasta 46 ns para el reloj del satélite, pero se cancela en el posicionamiento relativo (Hofmann-Wellenhof et al., 2012).

Una estación terrestre sufre movimientos periódicos subdiarios que pueden ser de hasta unos pocos decímetros, especialmente en la dirección vertical. Estos desplazamientos de estaciones son causados principalmente por la marea sólida de la Tierra, la carga oceánica, el movimiento polar, la carga de presión atmosférica y la carga hidrológica (McCarthy y Petit, 2004). Para generar estimaciones de posición que sean compatibles con el ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), hay que corregir estos desplazamientos.

Los desplazamientos debido a la marea sólida de la Tierra, la carga del océano y el movimiento polar se pueden modelar con precisión a 0.1 mm según McCarthy y Petit (2004). Finalmente, los sesgos de hardware difieren para diferentes tipos de medición. Debido a que las desviaciones del reloj están gobernadas por las desviaciones de pseudodistancia y los relojes oficiales actuales se estiman utilizando el observable libre de ionosfera P1-P2, otros tipos de pseudodistancia, a saber, C/A, C2, etc, deben calibrarse para mantener su compatibilidad con la combinación P1-P2 (Defraigne y Bruyninx, 2007). Dichas calibraciones se realizan aplicando los sesgos de código diferencial P1-C1 (DCBs, por sus siglas en inglés) a las mediciones de pseudodistancia sin procesar. Los productos DCB normalmente se consideran bastante estables durante al menos un mes.

Los productos de satélite comprenden órbitas y relojes. Las órbitas GNSS se determinan integrando numéricamente todas las fuerzas físicas impuestas a los satélites, como la gravedad de la Tierra, el Sol y la Luna, la presión de radiación solar, la presión de radiación de la Tierra y la fuerza de empuje. Los parámetros desconocidos del modelo que describen estas fuerzas se estiman utilizando las mediciones GNSS de una red de estaciones terrestres de referencia (J. H. Geng et al., 2008).

Desde 1994, el IGS ha estado proporcionando rutinariamente productos satelitales GPS precisos generados mediante la combinación de productos individuales de varios centros de análisis, incluido CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*), GFZ (*Geo Forschungs Zentrum*) y JPL (*Jet Propulsion Laboratory*).

En la Tabla 2 se exponen los efectos adicionales que normalmente no se consideran para el posicionamiento de pseudodistancia.

**Tabla 2.** Componentes del modelo y las correcciones a priori en las aplicaciones de PPP. Los valores de magnitud e incertidumbre deben considerar aproximados y pueden diferir de un caso a otro. Fuente: Traducido al Español de Teunissen y Montenbruck, 2014.

Modelo del componente		Magnitud	Incertidumbre	Notas
Satélite	Posición del centro de masas		2.5 cm (GPS)	Interpolado a partir de un producto de órbita precisa en formato estándar (SP3) con muestreo típico de 15 minutos
	Fase de antena			Vector de desplazamiento de antena en el sistema de navegación (intercambio de antena IGS (ANTEX)) y modelos de actitud específicos GNSS
	Desplazamiento del centro	0.5-3 m	10 cm	
	Variaciones del centro de fase	5-15 mm (GPS)	0.2-1 mm	Modelo IGS ANTEX
	Desplazamiento del reloj	< 1 ms	75 ps, 2 cm (GPS)	Interpolado de un producto de reloj preciso con muestreo típico de 30 s a 5 min

	Efectos de reloj relativista	10-20 m	-	Efecto dependiente de la excentricidad
		2 cm	-	Descuido constantemente en los productos de reloj GNSS precisos actuales y en los modelos PPP
	Sesgos de código diferencial	Hasta 15 ns, 5 m	0.1-1 ns	Los sesgos requeridos dependen de las señales de seguimiento y de los productos del reloj
	Sesgos de fase fraccional	Hasta 0.5	0.01 cy	Para resolución de ambigüedades
<b>Atmósfera</b>	Troposfera (seca)	2.3 m	5 mm	Retardo vertical
	Troposfera (húmeda)	Hasta 0.3 m	Hasta 100%	Retardo vertical; estimado debido a modelos a priori
	Ionosfera (de primer orden)	Hasta 30 m	-/1 m	Retardo vertical, hasta 3. Corregido mediante una combinación libre de ionosfera (PPP de 2 frecuencias)
	Ionosfera (de orden superior)	0-2 cm	1-2 mm	
	<b>Desplazamiento del sitio</b>			Corrección para expresar posiciones medidas en un marco de referencia terrestre convencional
	Movimiento de placas	Hasta 0.1 m/y	0.3 mm/y	
	Marea de la tierra	Hasta 0.4 m	1 mm	
	Carga oceánica (mareas)	1-10 cm	1-2 mm	
	Carga oceánica (nontidal)	Hasta 15 mm	1 mm	Relación no convencional

	Marea polar	25 mm	-	
	Carda atmosférica (marea)	Hasta 1.5 mm	-	
	Atm. loading (nontidal)	Hasta 20 mm	15%	Relación no convencional
<b>Receptor</b>	Desplazamiento del centro de fase	5-15 cm	-	Modelo IGS ANTEX
	Variaciones del centro de fase	Hasta 3 cm	1-2 mm	Modelo IGS ANTEX (valores convencionales)
<b>Otros</b>	Fase	10cm	Ver notas	Depende de la longitud de onda; corrección sujeta a la información del satélite / la orientación de la antena receptora

## 2.4. PPP con resolución de ambigüedad (PPP-AR)

### 2.4.1. Ambigüedad

Las ambigüedades o desviación de entero son difíciles de fijar o de resolver, ya que no son números enteros, además de que son desconocidas al iniciar una medición, estas dependen del retraso de la fase tanto del transmisor (satélite) como del receptor, aclarece que la ambigüedad es el número entero desconocido de ciclos (una onda completa de la portadora) en la medición de fase (Paniagua-Jiménez y Valverde-Calderón, 2017). El principal problema de las ambigüedades es el retardo del tiempo de convergencia (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

### 2.4.2. La importancia de la ambigüedad

Hablando sobre la técnica PPP-GNSS, la resolución de ambigüedad entera es de gran importancia para mitigar el tiempo de convergencia (Glaner y Weber, 2021), no hay que olvidar que la combinación de constelaciones (Multi-GNSS) también ha demostrado una disminución significativa en su tiempo de convergencia además de que mejora a un más la precisión (Angrisano et al., 2020). En este sentido el método absoluto se ha caracterizado por utilizar la integración de los productos precisos, para eliminar ciertos errores causados por el reloj de satélite y los parámetros orbitales (SP3, CLK, etc.) (Hofmann-Wellenhof et al., 2007; Yigit, 2016) que a su vez permiten fijar las ambigüedades de fase a su número entero.

### 2.4.3. Ambigüedad flotante

El procesamiento de vectores genera varias soluciones para el vector en diferentes épocas, durante este proceso un parámetro tiene solución el cual es la fijación de las ambigüedades. Las ambigüedades flotantes son valores reales, donde la solución del vector tiene valores sin determinarse, es decir que no llegan a ser enteros, dicho de otra manera, un valor flotante es generado cuando en el procesamiento de una línea base no se logró buscar la ambigüedad entera con fiabilidad o incluye una parte fraccionaria. Joosten y Tiberius, (2000) realizaron el cálculo de una línea base corta, para luego introducir las ambigüedades flotantes y ambigüedades fijas como valores dados, respectivamente, obteniendo, en el posicionamiento de un solo punto sobre una base época por época, una discrepancia en la precisión, con ambigüedades de valor real, las soluciones se dispersan en el rango de metros en los componentes norte, este y vertical, en el caso de la solución entera, la precisión de las coordenadas está por debajo del nivel de 1 cm. En ocasiones las soluciones pueden coincidir dentro de los milímetros empleando ambigüedades fijas y ambigüedades flotantes (Hofmann-Wellenhof et al., 2007), así mismo se debe de considerar que en "aplicaciones que no requieren precisiones superiores a unos pocos milímetros en la dimensión horizontal y aproximadamente 1 cm en la dimensión vertical, no es necesaria la resolución de la ambigüedad, siempre que el tiempo de observación sea del orden de 1 día" (Zumberge et al., 1997).

### 2.4.4. Ambigüedad entera

La resolución de ambigüedad entera puede mejorar significativamente la calidad del posicionamiento, especialmente en tiempo real o cuando el período de observación es corto. Aunque la resolución de la ambigüedad se ha realizado de forma rutinaria en el posicionamiento relativo, es solo, en los últimos años que la resolución de la ambigüedad en un solo receptor se ha desarrollado e implementado de forma preliminar en PPP (Collins, 2008).

Hasta la fecha, los métodos para la resolución de ambigüedades en un solo receptor se pueden clasificar en dos grupos: uno se basa en la determinación de FCB (*Fractional Cycle Bias*) y el otro se basa en la determinación de relojes de recuperación de números enteros (IRCs, por sus siglas en inglés). Los FCBs y los IRCs deben determinarse antes de que se puedan aplicar a una solución de un solo receptor para recuperar las propiedades enteras de las ambigüedades.

## 2.5. Fundamentos teóricos de PPP

En general, las mediciones de pseudodistancia y fase portadora de los GNSS no diferenciadas en la frecuencia ( $g= 1, 2$ ) entre el receptor  $i$  y el satélite  $k$  en una época particular pueden escribirse respectivamente como (Geng, 2011):

$$P_{gi}^k = \rho_i^k + ct_i^k + \frac{\mu_i^k}{f_g^2} + b_{gi}^k - e_{gi}^k$$

$$L_{gi}^k = \rho_i^k + ct_i^k - \frac{\mu_i^k}{f_g^2} + B_{gi}^k + \lambda_g N_{gi}^k - \varepsilon_{gi}^k \quad (2.1)$$

donde  $\rho_i^k$  es el retardo no disperso, incluida la distancia geométrica, el retardo troposférico y los efectos de la relatividad; las correcciones del centro de fase de la antena deben aplicarse a  $P_{gi}^k$  y  $L_{gi}^k$  antes de que  $\rho_i^k$  deje de estar asociado con la frecuencia;  $c$  representa la velocidad de la luz en el vacío;  $f_g$  es la frecuencia de la señal y  $\lambda_g$  la longitud de onda;  $t_i^k = t_i - t^k$  donde  $t_i$  y  $t^k$  representan los relojes del receptor y del satélite, respectivamente;  $\frac{\mu_i^k}{f_g^2}$  denota el retardo ionosférico de primer orden con los retardos de orden superior ignorados;  $b_{gi}^k$  y  $B_{gi}^k$  representan respectivamente los sesgos de hardware de pseudorange y fase portadora donde  $b_{gi}^k = b_{gi} - b_g^k$  y  $B_{gi}^k = B_{gi} - B_g^k$ ;  $b_{gi}$  y  $B_{gi}$  son para el receptor, mientras que  $b_g^k$  y  $B_g^k$  son para el satélite;  $N_{gi}^k$  denota la ambigüedad entera; finalmente,  $e_{gi}^k$  y  $\varepsilon_{gi}^k$  representan los errores residuales o no modelados; como los efectos de multipath, para las mediciones de pseudodistancia y fase portadora, respectivamente. Además, se debe enfatizar que los sesgos del hardware difieren para diferentes tipos de medición y frecuencia de señal (Geng, 2011).

Los observables combinados de la ionosfera libre se utilizan en PPP para eliminar los retrasos ionosféricos de primer orden en las mediciones de pseudodistancia y fase portadora (Hofmann-Wellenhof et al., 2012). Por lo tanto, las medidas utilizadas en el PPP convencional por Zumberge *et al.* (1997) son:

$$P_i^k = \rho_i^k + ct_i^k + b_i^k - e_i^k$$

$$\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{1i}^k - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{2i}^k = \rho_i^k + ct_i^k + \left( \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} B_{1i}^k - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} B_{2i}^k \right) + \left( \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} N_{1i}^k - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} N_{2i}^k \right) - \varepsilon_i^k \quad (2.2)$$

Donde la notación de frecuencia  $g$  para la pseudodistancia observable se ignora para implicar las cantidades relacionadas con los observables libres de ionosfera;

$P_i^k = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{1i}^k - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{2i}^k$  y esta relación también es válida para  $b_i^k$ ,  $e_i^k$  y  $\varepsilon_i^k$ . De acuerdo con la ley de propagación de errores, el ruido de las mediciones de la Ecuación 2.2 es aproximadamente tres veces mayor que el de las mediciones

originales de la Ecuación 2.1. Además, el término de ambigüedad nominal  $\frac{f_1^2}{f_1^2-f_2^2}N_{1i}^k - \frac{f_2^2}{f_1^2-f_2^2}N_{2i}^k$  ya no es un número entero multiplicado por una longitud de onda específica, y una estimación de ambigüedad real es en realidad una combinación de este término de ambigüedad y los sesgos del hardware, por ejemplo,  $\frac{f_1^2}{f_1^2-f_2^2}B_{1i}^k - \frac{f_2^2}{f_1^2-f_2^2}B_{2i}^k$  y  $b_i^k$  (Collins, 2008). Además, este término de ambigüedad nominal se puede descomponer en un término de *narrow-lane* y *wide-lane* (Dach et al., 2007), a saber:

$$\frac{\lambda_1 f_1^2}{f_1^2-f_2^2}N_{1i}^k - \frac{\lambda_1 f_2^2}{f_1^2-f_2^2}N_{2i}^k = \lambda_n N_{1i}^k + \frac{f_2}{f_1+f_2}\lambda_w N_{wi}^k \quad (2.3)$$

Donde  $\lambda_n = \frac{c}{f_1+f_2}$  y  $\lambda_w = \frac{c}{f_1-f_2}$  representan las longitudes de onda de *wide-lane* y *narrow-lane* que son aproximadamente 11 cm y 86 cm, respectivamente.  $N_{wi}^k = N_{1i}^k - N_{2i}^k$  se denomina ambigüedad de *wide-lane*, mientras que  $N_{1i}^k$  se denomina, en consecuencia, ambigüedad *narrow-lane*:

Melbourne (1985) y Wübbena y Hannover (1985) propusieron una combinación observable que teóricamente está libre tanto del retardo ionosférico como del retardo no dispersivo, a saber

$$L_{mi}^k = \lambda_w \left( \frac{L_{1i}^k}{\lambda_1} - \frac{L_{2i}^k}{\lambda_2} \right) - \frac{f_1 P_{1i}^k + f_2 P_{2i}^k}{f_1+f_2} = \lambda_w \left( N_{wi}^k + \frac{B_{1i}^k}{\lambda_1} - \frac{B_{2i}^k}{\lambda_2} - \frac{\lambda_n}{\lambda_w} \left( \frac{b_{1i}^k}{\lambda_1} + \frac{b_{2i}^k}{\lambda_2} \right) \right) \quad (2.4)$$

Donde se ignoran los errores residuales  $e_{gi}^k$  y  $\varepsilon_{gi}^k$ . Por lo tanto,  $N_{wi}^k$  más los sesgos de hardware se pueden aproximar con  $\frac{L_{mi}^k}{\lambda_w}$ . El promedio de varias épocas puede suavizar el gran ruido de la pseudodistancia y, por lo tanto, conducir a una estimación más precisa. Sustituyendo  $N_{wi}^k$  en la Ecuación 2.3 con la Ecuación 2.4, podemos obtener

$$\frac{\lambda_1 f_1^2}{f_1^2-f_2^2}N_{1i}^k - \frac{\lambda_2 f_2^2}{f_1^2-f_2^2}N_{2i}^k = \lambda_n N_{1i}^k + \frac{f_2 L_{mi}^k}{f_1+f_2} - \frac{c f_2}{f_1^2-f_2^2} \left( \frac{B_{1i}^k}{\lambda_1} - \frac{B_{2i}^k}{\lambda_2} - \frac{\lambda_n}{\lambda_w} \left( \frac{b_{1i}^k}{\lambda_1} + \frac{b_{2i}^k}{\lambda_2} \right) \right) \quad (2.5)$$

Finalmente, sustituyendo el término de ambigüedad de la Ecuación 2.2 con la Ecuación 2.5, podemos obtener

$$P_i^k = \rho_i^k + ct_i^k + b_i^k - e_i^k$$

$$L_i^k = \rho_i^k + ct_i^k + B_i^k + \lambda_n N_i^k - \varepsilon_i^k \quad (2.6)$$

Donde

$$L_i^k = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{1i}^k - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{2i}^k - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{mi}^k$$

$$B_i^k = \frac{f_1}{f_1 + f_2} B_{1i}^k + \frac{\lambda_n f_2}{f_1 + f_2} \left( \frac{b_{1i}^k}{\lambda_1} + \frac{b_{2i}^k}{\lambda_2} \right)$$

$$N_i^k = N_{1i}^k \quad (2.7)$$

Por lo tanto, la polarización del hardware de la fase de la portadora en la Ecuación 2.6 es una combinación de la polarización del hardware de la fase de la portadora y de la pseudodistancia de la Ecuación 2.1. Es de destacar que, finalmente, se introduce un término de ambigüedad con propiedad de número entero en las mediciones de fase portadora sin ionosfera y, por lo tanto, la resolución de la ambigüedad se vuelve posible en teoría. La estimación de la ambigüedad flotante basada en la Ecuación 2.6 contiene no solo  $\lambda_n N_i^k$ , si no también  $b_i^k$  y  $B_i^k$ . Además, vale la pena enfatizar que la Ecuación 2.6 es fundamental para los métodos basados en FCB y el método basado en IRC. La derivación de la Ecuación 2.6 también implica que la resolución de ambigüedad en un solo receptor se puede implementar realizando secuencialmente una resolución de ambigüedad *wide-lane* y *narrow-lane*.

## 2.6. Receptores GNSS de bajo costo

Los receptores GNSS realizan un gran desempeño en diversas aplicaciones de monitoreo, ya que, proporcionan series temporales densas de posiciones absolutas con gran estabilidad durante largos períodos; sin embargo, en algunos casos pueden resultar poco prácticos debido a su tamaño, consumo de energía o requisitos de software (Manzini et al., 2020). En general, para el seguimiento del estado de salud de una estructura artificial o natural, existen factores críticos a considerar como la precisión, el costo de la instrumentación, seguridad de las personas, la seguridad de los equipos y la infraestructura.

El SHM requiere de datos para evaluar y determinar el comportamiento dinámico y estático, local y global de una estructura, lo cual hace que la tecnología GNSS y sus técnicas de posicionamiento se vuelvan buenas candidatas en el estudio de obras civiles, tales como puentes o edificios altos, sin embargo, el costo de los equipos geodésicos requeridos es alto, haciendo que su utilización sea

limitada dando origen a los receptores GNSS de bajo costo, también llamados de alta sensibilidad (Tsakiri et al., 2017; Zamora-Maciel et al., 2020), ya que reciben señales más débiles (degradadas por edificios o que están por salir del área del receptor), esta peculiaridad causa un efecto *multipath* que a su vez afecta el posicionamiento logrando alcanzar precisiones de 10 metros (Romero-Andrade et al., 2019).

Los receptores denominados de bajo costo aparecieron por primera vez hace aproximadamente dos décadas volviéndose una alternativa más económica (Tsakiri et al., 2017), además de ser ligeros para su traslado, también tienen un bajo consumo de energía, por lo cual llama la atención el uso de estos equipos, lo que ha provocado que su crecimiento se haya extendido en los últimos años debido a varios avances tecnológicos, alcanzando proporcionar una precisión del orden del centímetro, motivando a la idea de volverse una alternativa económica al reemplazar los instrumentos geodésicos utilizados en los procesos SHM (Romero-Andrade et al., 2021). En la Tabla 3 se puede observar la comparativa de los costos que tienen los receptores de orden geodésico y los de bajo costo.

**Tabla 3.** Comparación de características de los receptores.

Receptor	Geomax Zenith 25	Leica GS18	Hi-Target V60	Low cost (ZED-F9P)
Constelación	GPS, GLONASS, SBAS	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, NavIC, SBAS	GPS, GLONASS, Galileo, BDS, QZSS, SBAS	GPS, GLONASS, Galileo, BDS, QZSS, SBAS
Frecuencia de muestreo	20Hz (permiso), 5Hz	5 Hz / 20 Hz	1 Hz-50 Hz	20 Hz
Costo	\$389,201.76	\$800,000.00	\$184,299.48	\$5,288.76
Canales	120	555	220	184
Dimensiones	95 mm, 198 mm	173 mm, 173 mm, 109 mm	182 mm, 98 mm	17 mm, 22 mm, 2.4 mm
Peso	1.2 kg incl. Batería y radio	1.20 kg	1.25 kg sin batería interna	100 g
Antena externa	Si	Si	Si	Si
Posicionamiento RTK	Si	Si	Si	Si

## CAPÍTULO 3

### 3. Metodología

#### 3.1. Materiales

En este capítulo se dan a conocer los principales recursos, softwares, herramientas y plataformas en línea que se emplearon durante todo el proyecto, estos materiales se dividen en secciones que explican el funcionamiento y sus principales características.

##### 3.1.1. Geomax Zenith 25

Como se expuso en la sección 2.1, los GNSS están constituidos por tres segmentos, de esta manera, en el caso del segmento del usuario abarca los receptores GNSS empleados para recibir la señal emitida por los satélites.

Dicho lo anterior, en el presente trabajo se utilizaron dos receptores Geomax Zenith 25, fungiendo como receptor-base y como rover.

En la Figura 5 se muestra el receptor GNSS y en la Tabla 4 se describen sus respectivas especificaciones técnicas.



Figura 5. Receptor GNSS Geomax Zenith 25.

**Tabla 4.** Características técnicas del receptor Geomax Zenith 25. Fuente: GeoMax AG, 2012.

Canales	120, doble frecuencia
GPS	L1, L2, L2C
GLONASS	L1, L2
SBAS	EGNOS, WAAS, MSAS, GAGAN
Frecuencia de muestreo máxima	20Hz (permiso), 5Hz
<b><i>Precisión del receptor</i></b>	
Estático horizontal	5 mm ± 0.5 ppm (rms)
Estático vertical	10 mm ± 0.5 ppm (rms)
Estático horizontal largo	3 mm ± 0.1 ppm (rms)
Estático vertical largo	3.5 mm ± 0.4 ppm (rms)
Cinemático horizontal	10 mm ± 1 ppm (rms)
Cinemático vertical	20 mm ± 1 ppm (rms)

### 3.1.2. Receptor ZED-F9P

El receptor ZED-F9P (ver Figura 6 (a)) cuenta con la plataforma receptora u-blox F9P e incluye soporte base móvil. Lo componen tecnologías RTK de banda múltiple u-blox para una precisión de nivel centimétrico, además permite la operación de multi-banda, multi-constelación (el diagrama de bloques en la Figura 7 muestra la funcionalidad clave). Puede emplearse como operador de base, proporciona datos de corrección RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) a un rover o bien puede ser un operador rover, recibe datos de corrección RTCM desde una base operativa ZED-F9P, o desde un proveedor de servicios de referencia virtual que opera una red de receptores base, en la Tabla 5 se presentan sus principales características (u-blox, 2021). En la Figura 6 (b) se muestra la antena de bajo costo (ANN-MB).

**Tabla 5.** Características técnicas del receptor ZED-F9P. Fuente: u-blox, 2021.

Canales	184, doble frecuencia
GPS	L1 C/A, L2C
GLONASS	L1, L2
Galileo	E1B/C E5b
BDS	B1I B2I
QZSS	L1C/A L1S L2C
SBAS	L1 C/A
Frecuencia de muestreo máxima	20 Hz
<b><i>Precisión del receptor</i></b>	
RTK horizontal	1 cm ± 1 ppm (rms)
RTK vertical	1 cm ± 1 ppm (rms)



a)



b)

**Figura 6.** Equipo de bajo costo: (a) receptor ZED-F9P, (b) antena ANN-MB.

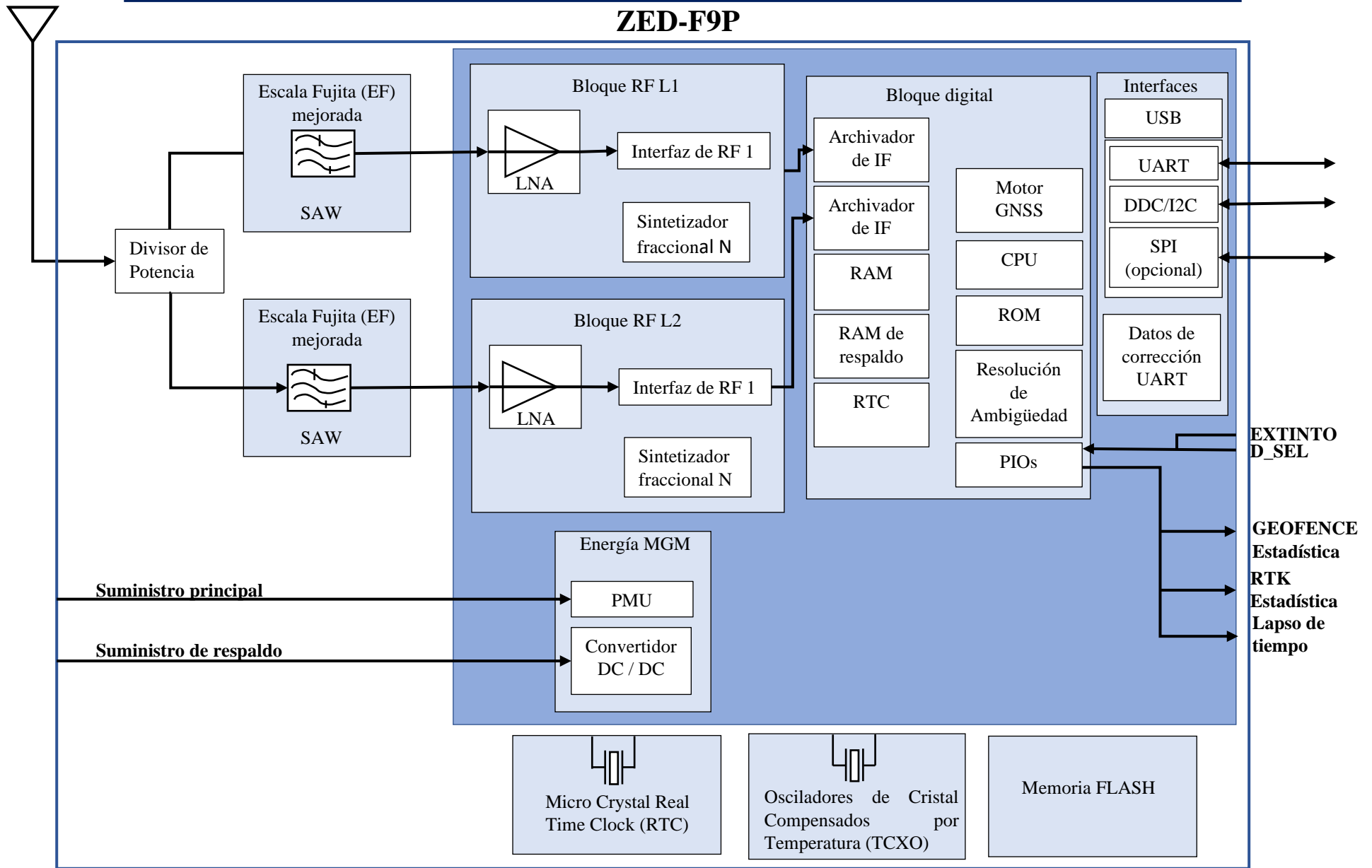


Figura 7. Diagrama de bloques ZED-F9P-02B. Fuente: Traducido al Español de u-blox, 2021.

### 3.1.3. ANUBIS

Para obtener resultados fiables, es necesario utilizar herramientas para realizar un oportuno control de calidad (QC, por sus siglas en inglés) a los archivos recopilados (RINEX), el cual nos ayuda a determinar si la información GNSS adquirida es efectiva y confiable, ya que, la calidad no solo depende de los equipos instalados, sino, también de su ubicación física y la estabilidad del monumento (en caso de la estación de referencia) donde se colocan (García-Armenteros, 2020).

El QC contiene tres características esenciales para una eficiente operatividad, las cuales son: integridad, disponibilidad y seguridad de los datos GNSS (Souto, 2014), los 4 indicadores que se describen a continuación, abarcan las tres características mencionadas anteriormente, las cuales aseguran la eficiencia de los datos (García-Armenteros, 2020; Hernández-Andrade et al., 2020; Y. Xiao et al., 2020).

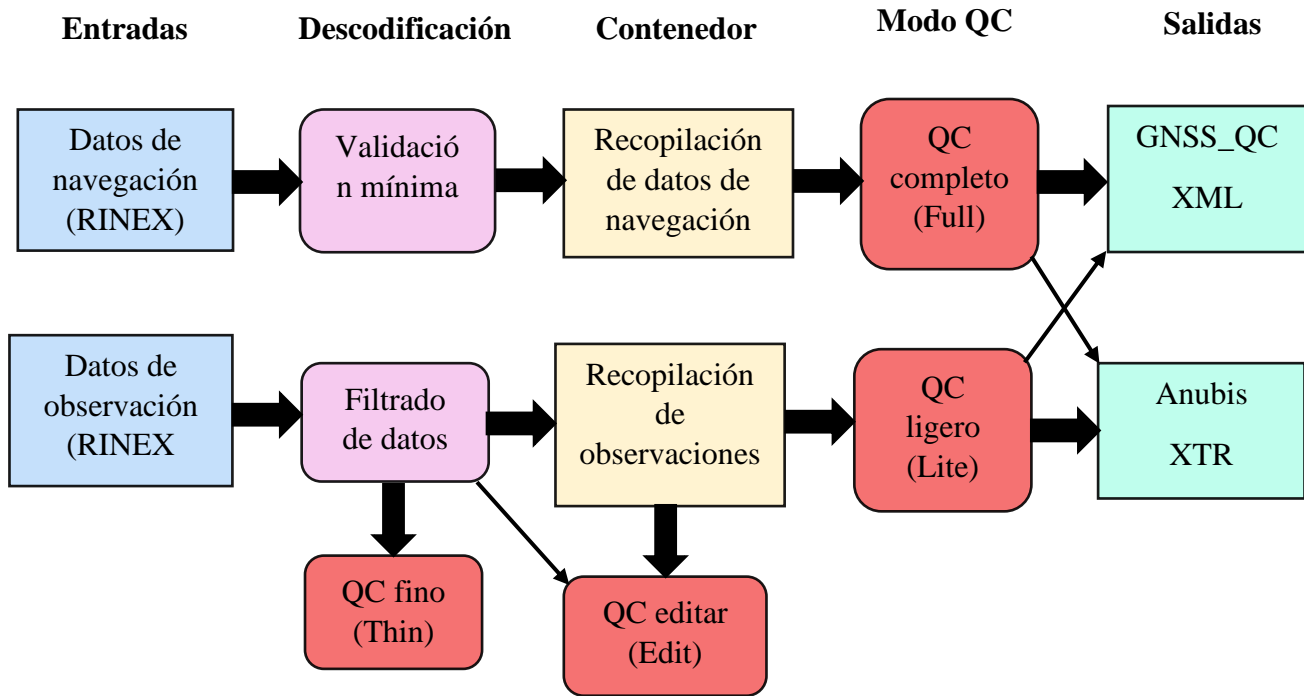
1. **Salto de ciclo:** principalmente son causados por objetos físicos tanto artificiales (puentes, edificios) y como naturales (árboles, montañas) que obstaculizan la recepción de la señal, en segundo lugar, se puede derivar de la debilidad de la relación señal-ruido originario de malas condiciones ionosféricas, el efecto multitrayectoria, baja elevación del satélite o mal funcionamiento del satélite.
2. **Multipath:** Depende de la geometría del satélite y del entorno circundante de la antena GNSS, así como del tipo de antena (Vázquez et al., 2013). Es originado por la pérdida de la señal del satélite reflejante y directa, dando como resultado una mala precisión en las observaciones. Este efecto también puede medir la calidad de datos GNSS. Se deriva en dos efectos: *Multipath* de pseudodistancia y *Multipath* de fase portadora, este último tiene un valor nulo, por lo cual solo se considera como indicador al *Multipath* de pseudodistancia.
3. **Integridad:** se refiere a los datos completos obtenidos contra los esperados, para ello se necesita que los satélites cuenten con efemérides conocidas por lo que es necesario el archivo de navegación. Este parámetro se expresa en porcentaje, de esta manera debe de estar por arriba del 90% para que los datos sean fiables para realizar una determinada operación.
4. **Relación señal ruido (SNR, por sus siglas en inglés):** es el parámetro que define la calidad de la señal observada por receptores GNSS, entre mayor sea la relación entre la fuerza de la señal (s) y la fuerza del ruido (N) la calidad aumenta. Según la clasificación, una señal fuerte va por encima de los 40 dBHz, si esta se encuentra por debajo de los 28 dBHz, se le denomina señal débil.

En la literatura se exponen diferentes herramientas como lo es Anubis y Teqc, Xiao et al. (2020) recomienda al software Anubis, dado que ha demostrado realizar una mejor inspección a los archivos tratados.

Anubis es una herramienta informática desarrollada por G-Nut Software s.r.o del Instituto de Investigación de Geodesia, Topografía y Cartografía, lanzado en agosto de 2013 y actualizado en noviembre del mismo año. Ha sido utilizada para la comparación y control cuantitativo, cualitativo y de calidad de los datos ingresados, los formatos compatibles de entradas son: RINEX 2/3 y BNC OBS (datos de observación); RINEX 2/3 (datos de navegación); SP3 (efemérides precisas); SINEX (metadatos); por otro lado, los formatos de salida obtenidos, en el caso de QC, son tres (Dousa y Václavovic, 2021):

- XTR nativo de Anubis, este archivo esta ordenado en secciones basadas en los resultados del QC, en cada sección se introduce una cadena de inicio (=====), estas son utilizadas para la búsqueda, manipulación y filtrado del QC.
- XML (*eXtensible Markup Language*) donde se encuentra el resumen del QC con los parámetros más importantes, su estructura la constituyen cuatro elementos; META, generación de metadatos en la salida XML; NAVI, disponibilidad de datos de navegación (indicadores de control cualitativos); DATA, parámetros QC cuantitativos/ cualitativos dependientes/ independientes del sistema y HEAD, metadatos del encabezado del archivo de RINEX.
- JSON (*JavaScript Object Notation*), es un formato donde se intercambian datos ligeros, este ha sido perfeccionado para una óptima visualización de productos, como skyplots, gráficos de posicionamiento o series temporales. A este formato lo estructuran dos elementos; META, metadatos sobre el archivo XML; DATOS, partes que contienen datos de salida dependientes del tiempo, del sistema, del satélite y de la señal.

En la Figura 8 se puede observar el funcionamiento de Anubis.



**Figura 8.** Modo del funcionamiento de Anubis y relación con entradas, salidas y procedimientos internos. Fuente: Traducido al Español de Dousa y Václavovic, 2021.

### 3.1.4. Servicio online CSRS-PPP

El servicio CSRS-PPP (Sistema de Referencia Espacial Canadiense) comenzó sus funciones en el año 2013, proporcionado por NRCan (*Natural Resources Canada*), es una plataforma online gratuita que ofrece el servicio de procesamiento PPP, se ha vuelto una herramienta muy utilizada en varias ramas del conocimiento, ya que en un par de minutos genera estimaciones sobre la posición o trayectoria de los datos ingresados, junto con estimaciones de calidad y un informe para el control de calidad visual.

Actualmente CSRS-PPP versión 3 ha modificado sus algoritmos para integrar la resolución de ambigüedad (PPP-AR), principalmente hace uso de órbitas satelitales precisas, correcciones de reloj, estimaciones de sesgo de retardo del equipo y parámetros de orientación de la tierra derivados de una red global de receptores GNSS, estos se han integrado en tres productos de corrección descritos en la Tabla 6 permitiendo soluciones PPP-AR, de esta manera proporciona precisiones del orden del centímetro (Banville et al., 2021).

**Tabla 6.** Productos de los parámetros de la órbita del satélite, el reloj, el sesgo y la orientación de la tierra utilizados en CSRS-PPP. Fuente: Traducido al Español de Banville et al, 2021.

Productos	Código del producto	Disponibilidad	Latencia
-----------	---------------------	----------------	----------

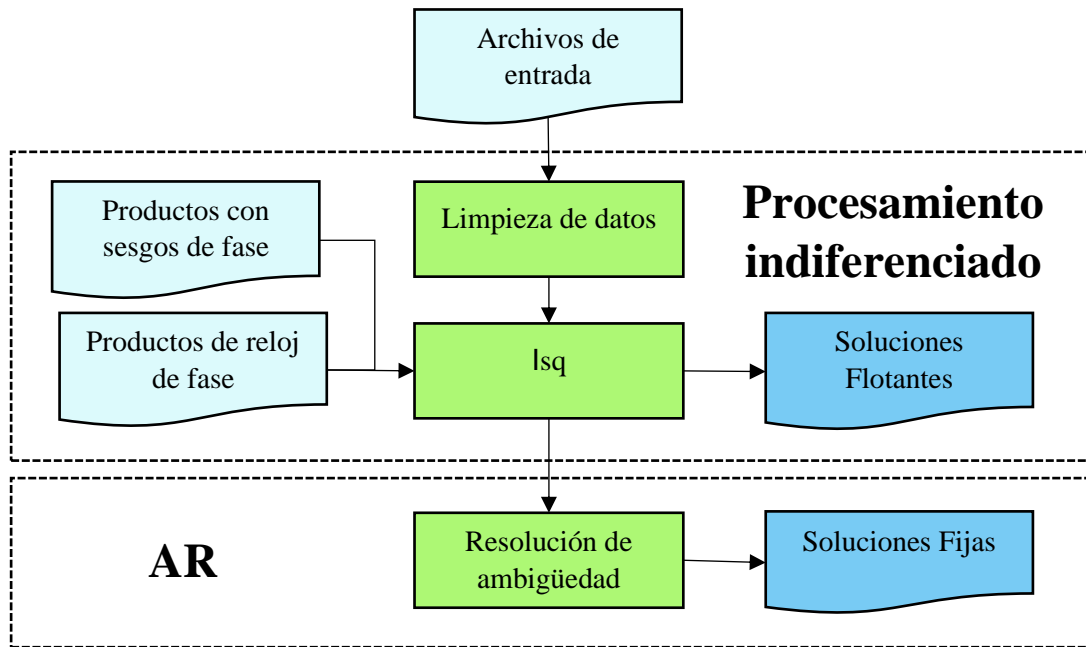
<b>Ultrarrápidos</b>	DCU	Por hora	60 minutos después de la hora
<b>Rápidos</b>	DCR	Diario	12-18 horas después del final del día
<b>Final</b>	DCF	Semanal	12-15 días después del final de la semana

### 3.1.5. PRIDE-PPPAR

PRIDE PPP-AR fue diseñado siguiendo los principios de legibilidad, modularidad, extensibilidad y mantenibilidad, estos elementos permiten que el software se utilice de forma más flexible y cómoda. Para el desarrollo se utilizó un lenguaje de programación procedimental, FORTRAN-95, que es especialmente adecuado para cálculos numéricos y científicos. Para facilitar PPP-AR, junto con el software también se lanzan scripts por lotes relevantes y herramientas fáciles de usar para la recopilación de datos. En la actualidad, PRIDE PPP-AR es compatible con los sistemas operativos Linux y Mac OS.

#### Estructura de PRIDE PPP-AR

PRIDE PPP-AR se compone principalmente de procesamiento indiferenciado y resolución de ambigüedad entera (En la Figura 9 se resume la estructura del software PRIDE PPP-AR). El módulo de procesamiento indiferenciado incluye limpieza de datos y estimación de parámetros y está a cargo de generar ambigüedades *wide-lane* y *narrow-lane*. Posteriormente, se pueden obtener soluciones flotantes de PPP. Con base en las estimaciones de ambigüedad, el módulo de resolución de ambigüedad utiliza los productos de sesgo del reloj de fase para corregir las ambigüedades de los números enteros y, finalmente, se logra una solución PPP-AR.



**Figura 9.** Estructura general de PRIDE PPP-AR. Fuente: Traducido al Español de Geng et al, 2019.

### Procesamiento indiferenciado

El procesamiento indiferenciado tiene dos funciones: limpieza de datos y ajuste por mínimos cuadrados. La limpieza de datos se utiliza para identificar mediciones incorrectas y detectar saltos de ciclo. Posteriormente, el ajuste por mínimos cuadrados se utiliza para procesar mediciones sin procesar y estimar parámetros desconocidos. El módulo de procesamiento indiferenciado se compone principalmente de *tedit* (turboedit), *lsq* (ajuste por mínimos cuadrados) y *redig* (diagnóstico residual a posteriori).

- **Tedit** (turboedit) En el software PRIDE PPP-AR, *tedit* se usa para identificar mediciones incorrectas y deslizamientos de ciclo en un archivo de observación RINEX. El módulo *tedit* se basa principalmente en los algoritmos de preprocesamiento de Blewitt (1990) denominados “TurboEdit”; sin embargo, para satisfacer los criterios de detección de deslizamiento de ciclo, *TurboEdit* requiere varios minutos de datos de fase continua antes y después de un salto de ciclo (Huang et al., 2016; Xiao et al., 2018). *Tedit* mejora el algoritmo de preprocesamiento de detección de saltos de ciclo, eliminación de datos cortos e identificación de brechas (falta) de datos. A pesar de esto, es posible que no se identifiquen algunos saltos de ciclo pequeños cuando hay variaciones ionosféricas rápidas o efectos serios de *multipath* (Blewitt, 1990; de Lacy et al., 2008; Liu, 2011).

- **Isq** (ajuste por mínimos cuadrados) El módulo de *Isq* es usado para procesar mediciones crudas y estimar parámetros desconocidos como la posición, reloj del receptor, retrasos troposféricos y ambigüedades. Es la parte central de PRIDE PPP-AR, y la mayor parte del procesamiento de datos de PPP se implementa dentro de este módulo. Las soluciones flotantes PPP se pueden obtener a través de este módulo.

En general, todos los parámetros a estimar se introducen para un solo receptor. Debido a que PRIDE PPP-AR usa datos del receptor de doble frecuencia de forma predeterminada, la combinación observable libre de ionosfera se usa para eliminar los retrasos ionosféricos de primer orden (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2012). Los impactos de los retrasos de orden superior en las posiciones son normalmente mínimos y, por lo tanto, se ignoran actualmente en PRIDE PPP-AR. Además, los retrasos troposféricos se corrigen primero con el modelo de Saastamoinen para retrasos húmedos y secos a priori (Saastamoinen, 1973). Luego, los retrasos residuales del zenith se estiman como parámetros constantes por partes o de caminata para cada época con la función de mapeo global (GMF, por sus siglas en inglés) o la función de mapeo de Viena 1. Finalmente, el reloj del receptor se estima como un parámetro similar al ruido blanco y las ambigüedades se estiman como constantes de valor real sobre cada arco continuo. Las ambigüedades de *wide-lane* se estiman en el módulo *Isq* utilizado las medidas de combinación de *Hatch-Melbourne-Wubben* (Hatch, 1983; Melbourne, 1985; Wübbena, 1985).

Además de esta estrategia de estimación, PPP se complica por el desplazamiento y la variación del centro de fase de la antena, el efecto *phase wind-up*, el efecto relativista, los efectos de desplazamiento de la estación y los sesgos de pseudodistancia intrafrecuencia.

- **Redig** (diagnostico residual a posteriori) El módulo *redig* se utiliza para analizar a posteriori los residuos de medición derivados de *Isq* con el fin de identificar los saltos de ciclo pequeños restantes y las mediciones incorrectas. Este módulo tiene tres funciones: la primera es eliminar enormes residuos; la segunda, elimina períodos cortos de datos (e.g.. < 10 min); la tercera, comprobara los grandes saltos entre épocas adyacentes y marca una nueva ambigüedad en esta época. Se realizan iteraciones entre los módulos *Isq* y *redig* hasta que no se detecten nuevas ambigüedades. Después de analizar los residuos a posteriori, el archivo *rhd* se actualizará en consecuencia.

### 3.1.6 Topcon Tools v.7.5.1

Topcon Tools es definido como un software comercial, emitido por la empresa Topcon. Para el procesamiento de datos GNSS, este software requiere como

entrada datos de medición (RINEX) para realizar el post-proceso en modo estático y cinemático, ajuste por mínimos cuadrados, análisis de red y alineación. La visualización de datos es en tablas (contiene información sobre los puntos) y una vista de mapa (representación gráfica de los puntos y vectores usados en el trabajo) (Carrillo-Chávez, 2015).

### 3.1.7 TRACK

*TRACK* es el módulo de procesamiento GPS cinemático de GAMIT que fue desarrollado en el instituto tecnológico de Massachusetts (IMT, por sus siglas en inglés). *TRACK* utiliza observaciones LC (L3) de punto flotante y la combinación *wide-lane Melbourne-Wubben*, con restricciones de retardo ionosférico, para determinar ambigüedades enteras en cada época, adoptando el filtrado de Kalman al tiempo que estima los retardos atmosféricos. *TRACK* realiza un posicionamiento cinemático relativo y requiere al menos una estación de referencia y una o más estaciones cinemáticas (en movimiento) (Herring et al., 2010).

### 3.1.8 MATLAB

Es un software extenso desarrollado por MathWorks y fundado por Cleve Moler, Jack Little y Steve Bangert en 1984. A través de su lenguaje de programación y sus elementos permite realizar cálculos matemáticos o escribir su propio código para la resolución de los mismos, entre otros productos, ayudando a visualizar e interpretar los datos, el entorno de trabajo de Matlab ofrece ocho ventanas de las cuales solo tres se pueden observar en su interfaz: ventana de comandos (*Command Window*), ventana de directorio actual (*Current Directory Window*) y la ventana del historial de comandos (*Command History Window*).

Por lo descrito anteriormente se utilizó este programa para realizar las diferentes tablas y graficar para explicar los desplazamientos, series de tiempo y los cuatro indicadores resultantes del QC.

## 3.2. Filtros digitales

Para la elaboración de las series de tiempo es necesario emplear filtros que ayuden a depurar el ruido dentro de estas (Topal y Akpınar, 2021), por lo general son filtros pasa-altas (deja pasar altas frecuencias y rechaza las frecuencias bajas) pasa-bajo (deja pasar frecuencias bajas y rechaza frecuencias elevadas), pasada-banda (deja pasar frecuencias dentro de una banda de frecuencia y bloquea o atenúa las frecuencias fuera de la banda) y rechaza-banda (deja pasar frecuencias fuera de una banda de frecuencia y bloquea o atenúa frecuencias dentro de la banda) (Alexander y Sadiku, 2009).

### 3.2.1. Media móvil

Este filtro tiene por objetivo suavizar y disminuir la dispersión de los desplazamientos, en este caso los del eje vertical ( $U$ ), en las series de tiempo para que el comportamiento de estas refleje una conducta semejante a la de los desplazamientos reales de la estructura. El método realiza un remplazo, el valor de un punto espectral por el promedio de los puntos circundantes, dentro de la ventana de suavizado para posteriormente repetir el cálculo en el nuevo punto, como se muestra a continuación (Vazquez-Ontiveros et al., 2021).

$$y(i) = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x(i+j) \quad (3.1)$$

donde  $x(i+j)$  es la señal de entrada ( $U$ ),  $y(i)$  es la señal de salida y  $M$  corresponde al total de las señales o el tamaño de la ventana, en este caso es de 18,000 señales, correspondiente a una hora de medición con una frecuencia de muestreo de 5Hz.

### 3.2.2. Hampel

Este filtro no lineal, está compuesto por una ventana móvil ( $w_k = 200$ ), que contiene los puntos anteriores ( $k$ ), el punto de datos de interés, y los puntos sucesivos de datos ( $k$ ). Es utilizado para detectar y limpiar las series de tiempo, eliminando los datos con valores por debajo o encima del dominio de la frecuencia, es decir, excluye los valores atípicos cuando su valor es mayor que un número  $t$  dentro de la escala MAD (Desviación de la Mediana Absoluta) con respecto a la mediana de las observaciones circundantes ( $2k + 1$ ) (Quintero-Rincón et al., 2012), para sustituirlos por la Mediana de estas mismas observaciones (ecuación 3.2), de lo contrario, se deja sin cambios.

$$y_k = \begin{cases} x_k & |x_k| - |m_k| \leq tS_k \\ m_k & |x_k| - |m_k| > tS_k \end{cases} \quad (3.2)$$

donde  $m_k$  es la mediana de  $w_k$  y  $S_k$  es la estimación de la escala MAD, definida como:

$$S_k = 1,4826 \times \text{mediana}_{j \in [-K, K]} \{ |x_k - j - m_k| \} \quad (3.3)$$

El factor 1,4826 hace que la estimación de la escala MAD sea una estimación insesgada de la desviación estándar de los datos gaussianos. Por otro lado, cuando  $t=0$  el filtro Hampel tiende a reducirse al filtro mediano estándar (ecuación 3.4) (Pearson et al., 2016).

$$y_{k|t} = 0 = m_k \quad (3.4)$$

### 3.2.3. De-trended

Durante el lapso de tiempo que dura la medición pueden surgir tendencias, esto debido a los factores humanos y naturales, generando cambios decrecientes o crecientes a lo largo de las series de tiempo. Este mecanismo de tendencia estadística es calculado por una función polinómica (cada valor de la entrada proporciona un valor que se calcula con un polinomio), como se expresa en la ecuación 3.5, para eliminar las tendencias y generar nuevas series temporales limpias de tendencias (Topal y Akpınar, 2021).

$$y(ti)_{Trend} = \sum_{k=1}^m c_k t_i^{k-1} \quad (3.5)$$

donde  $c_k$ , ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) son los parámetros que dependen del grado de función.

### 3.2.4 Desplazamientos aparentes

Las coordenadas de salida de los diferentes softwares utilizados están en coordenadas ECEF o geodésicas. Estas coordenadas se representan en series de tiempo, y se les aplica el filtro de la media móvil, el filtro hampel y una función de-trend, esto con el fin de limpiarlas del ruido de frecuencias altas, tendencias lineales crecientes y decrecientes, y valores atípicos. Sin embargo, es necesario llevar estas series de tiempo alrededor de un cero relativo que represente el nivel de referencia del punto de monitoreo. Para llevar a cabo este proceso, se utiliza la Ecuación siguiente (Moschas y Stiros, 2011):

$$P_i = h_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (3.6)$$

Con  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , siendo  $n$  el número total de datos muestreados,  $h_i$  representa la componente de interés (X, Y, Z) y  $P_i$  el desplazamiento aparente.

## 3.3. Métodos

### 3.3.1 Descripción del experimento

Para evaluar el desempeño de un receptor GNSS de bajo costo en aplicaciones de Monitoreo de la Salud Estructural sobre un puente a través de la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso con resolución de ambigüedad entera, fue necesario diseñar un experimento estratégico. Este consistió en medir las deflexiones en la componente vertical sobre el puente Isla Musalá causadas por el tráfico (carga viva). Se colocó un receptor de orden geodésico Geomax Zenith 25 montado en un bastón (ver Figura 10 (a)) sobre el primer claro (15 metros) del

puente, ya que es la zona donde se presentan las mayores deflexiones. La altura del equipo fue de 2 metros con respecto a la base del puente, esto con el objetivo de evitar fuentes de error *multipath* que puedan deteriorar la solución. Por otro lado, en la azotea de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio (FACITE) de la Universidad Autónoma de Sinaloa, sobre un monumento de centrado forzoso y con coordenadas conocidas (estas coordenadas se obtuvieron con mediciones anteriores al experimento), se colocó un receptor de la misma marca con el objetivo de servir como estación de referencia (ver Figura 10 (b)). La configuración de medición para ambos receptores fue de 5 Hz (para determinar con una alta resolución de los desplazamientos dinámicos), con una máscara de elevación de 10° y seguimiento a las constelaciones GPS y GLONASS. Las condiciones atmosféricas fueron óptimas para las mediciones. El experimento inició a las 07:00 hrs, para la medición de la base y a las 07:40 hrs para el rover (sobre el puente), y ambos culminaron a las 09:00 hrs, con el propósito de corresponder a uno de los horarios donde el tránsito vehicular aumenta sobre la zona (08:00-09:00 hrs) (Vazquez-Becerra et al., 2017). Esta primera campaña de medición se llevó a cabo el 05 de octubre de 2021. En dicho experimento se consideró medir simultáneamente entre el receptor convencional y del bajo costo; sin embargo, en el caso del receptor de bajo costo, la antena externa presentó un problema técnico ocasionando que las mediciones se cortarían, por lo cual, el autor decidió llevar a cabo una nueva medición posteriormente en el mismo horario. Esta segunda campaña se realizó con el receptor ZED-F9P de bajo costo el día 19 de octubre de 2021, considerando la misma configuración de medición utilizada en la primera campaña. Para este caso, se utilizó una antena GNSS de bajo costo y en lugar de posicionarla sobre un bastón, se colocó directamente sobre el parapeto del puente como se ilustra en la Figura 11. La instalación de la antena consistió en colocar un disco de metal sobre la barra de protección y encima del mismo se situó la antena de bajo costo, ajustándose a la barra con ayuda de la base imantada que contiene. El disco de metal tiene como objetivo ser un plano de tierra y ayudar a mitigar el *multipath*. Para mantener la horizontalidad y verticalidad de la antena de bajo costo, fue necesario nivelar la antena considerando la siguiente estrategia: Con ayuda de dos niveles tubulares, estos se colocaron de manera perpendicular entre sí sobre el disco y se buscó centrar la burbuja de ambos niveles. Esta estrategia de nivelación fue probada utilizando una base nivelante de orden profesional. En la Figura 12 se observa la estrategia de nivelación utilizada sobre la antena de bajo costo y en la Figura 13 se resume la metodología empleada.



a)



b)

**Figura 10.** Configuración del experimento para la primera campaña de medición: **a)** receptor Geomax Zenith 25 como rover sobre el primer claro del puente Isla Musalá, **b)** estación de referencia.

### 3.3.2 Procesamiento de datos

Para la primera campaña de medición, se manipularon dos archivos de observación a 5 Hz, teniendo en común un período de medición de 80 minutos. Fueron procesados a través de la técnica de DD con el software científico TRACK. De las coordenadas resultantes, solamente se consideraron las que estuvieran dentro de la ventana de tiempo de interés de 08:00-09:00 hrs y se establecieron como referencia para los posteriores procesamientos y análisis. Después, el archivo de observación de la medición del puente correspondiente a 80 minutos fue procesado con la técnica PPP-AR en el software PRIDE-PPPAR y el servicio en línea CSRS-PPP. De los archivos de salida que contienen las coordenadas, fueron seleccionadas solamente las que estuvieron dentro de la ventana de tiempo de interés. Una vez que se tienen las coordenadas correspondientes a la ventana de interés, para el caso de las coordenadas geodésicas, estas fueron convertidas a ECEF (*Earth-Centered Earth-Fixed*) geocéntricas para facilitar los cálculos posteriores.



**Figura 11.** Antena ANN-MB-00 de U-blox colocada sobre el parapeto en el primer claro del puente Isla Musalá.

En el caso de la segunda campaña de medición, el archivo de observación del receptor de bajo costo se procesó con la técnica de DD en el software Topcon Tools, ya que los archivos de observación no son compatibles con TRACK. La estación que se utilizó como referencia fue la colocada sobre un monumento de centrado forzoso en la azotea de la FACITE. Posteriormente, este mismo archivo de observación fue procesado con el software PRIDE-PPPAR y el servicio en línea CSRS-PPP. Como en el caso de la primera campaña de medición, las coordenadas resultantes de estos procesos fueron convertidas a ECEF geocéntricas y ubicadas dentro de la ventana de interés.

Considerando los procesos mencionados anteriormente, se tienen dos conjuntos de coordenadas ECEF geocéntricas pertenecientes a una ventana de tiempo de 08:00-09:00 hrs. El primer conjunto corresponde a las mediciones del receptor de orden geodésico Geomax Zenith 25 y está constituido por 3 subconjuntos correspondientes a un método de procesamiento: DD (TRACK) y PPP (PRIDE-PPPAR, CSRS-PPP), y el segundo conjunto, a las mediciones del receptor de bajo costo, de la misma manera se conforma 3 subconjuntos: DD (Topcon Tools) y PPP (PRIDE-PPPAR, CSRS-PPP). Para el análisis de los resultados con los receptores de bajo costo, se tomó como referencia los resultados de los receptores de orden geodésico. Para esto, se identificaron los desplazamientos máximos sobre el puente sometido a cargas similares para diferentes épocas de medición. Además,

se compararon los resultados de diferentes métodos de procesamiento GNSS (DD y PPP-AR).



**Figura 12.** Estrategia de nivelación de la antena de bajo costo: a) prueba de nivelación con una base nivelante profesional, b) nivelación de la antena sobre el puente Isla Musalá.

Las coordenadas ECEF están centradas en la Tierra, sin embargo, en SHM, el uso directo de la coordenada ECEF no es adecuada para evaluar el comportamiento del desplazamiento vertical (u horizontal) de la estructura debido a su naturaleza (Yigit, 2016). Para solucionar este problema, diversos autores han establecido que las coordenadas geocéntricas XYZ deben transformarse en un sistema de coordenadas topocéntricas ENU (este, norte, arriba) (sistema cartesiano 3D local). Dadas las coordenadas geocéntricas del origen topocéntrico ( $X_0, Y_0, Z_0$ ), las coordenadas geocéntricas ( $X_t, Y_t, Z_t$ ) en la época t se pueden convertir en coordenadas topocéntricas ( $E_t, N_t, U_t$ ) utilizando la siguiente fórmula:

$$\begin{bmatrix} E_t \\ N_t \\ U_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda_0) & \cos(\lambda_0) & 0 \\ -\sin(\theta_0) \cos(\lambda_0) & -\sin(\theta_0) \sin(\lambda_0) & \cos(\theta_0) \\ \cos(\theta_0) \cos(\lambda_0) & \cos(\theta_0) \sin(\lambda_0) & \sin(\theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_t - X_0 \\ Y_t - Y_0 \\ Z_t - Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

donde  $\theta_0$  y  $\lambda_0$  corresponden a la latitud geodésica y la longitud del origen topocéntrico, respectivamente, que se deriva de sus coordenadas geocéntricas ( $X_0, Y_0, Z_0$ ). Para esta investigación, el origen del sistema de coordenadas

topocéntricas es seleccionado por el claro del puente, donde se colocaron los receptores GNSS sobre el puente. Es importante resaltar, que para este estudio solamente se consideró la componente vertical, ya que es la más crítica en la evaluación de puentes.

Los dos conjuntos de coordenadas ECEF para la componente vertical (U) constituyen los resultados crudos de los diferentes softwares utilizados, sin embargo, para un mejor entendimiento de las series temporales que definen el comportamiento vertical del puente Isla Musalá, fue necesario llevar a cabo un análisis de series de tiempo. El primer paso en el análisis de series de tiempo es crear gráficamente series de tiempo en el dominio del tiempo. Luego, se aplican algunos algoritmos de filtrado a estas series de tiempo para eliminar la influencia del ruido y los valores atípicos en la serie y mostrar las tendencias importantes, así como los componentes periódicos de la serie. El algoritmo hampel con una ventana  $wk = 200$  y el filtro de la media móvil con una ventana de  $nw = 10$  muestras fueron utilizados para eliminar los valores atípicos mayores a 3 sigmas y el ruido de frecuencias bajas, respectivamente.

Por otro lado, en el análisis de series de tiempo, se debe determinar si existe algún componente de tendencia en la serie después del filtrado. Los cambios observados en la dirección decreciente o creciente debido a cualquier factor, como pueden ser los efectos humanos o los naturales en observaciones consecutivas, se denominan tendencias (Topal y Akpinar, 2021). Al examinar series de tiempo, es necesario determinar estadísticamente si hay un componente de tendencia, esto se determina a partir de lo descrito en la Sección 3.2.3.

En la Tabla 7 se muestra, para cada software, un resumen de la configuración que se siguió para el procesamiento.

**Tabla 7.** Parámetros de los softwares empleados.

Descripción	TRACK	Topcon Tools	PRIDE-PPPAR	CSRS-PPP
<b>Modo</b>	Dinámico	Cinemático	Cinemático	Cinemático
<b>Sistema GNSS</b>	GPS + GLONASS	GPS + GLONASS	GPS + GLONASS	GPS + GLONASS
<b>Observaciones</b>	Fase y código	Fase y código	Fase y código	Fase y código
<b>Efemérides</b>	Producto final IGS	Producto final IGS	Producto final IGS	Producto final IGS
<b>Entrada de productos</b>	RINEX- NAV/OBS	RINEX- NAV/OBS	RINEX- NAV/OBS	RINEX- NAV/OBS

<b>Frecuencia de observación</b>	Doble	Doble	Doble	Doble
<b>Máscara de elevación</b>	10°	10°	10°	10°
<b>Modelo ionosférico</b>	Global ionosférico	-	Combinación libre de ionósfera	Combinación libre de ionósfera
<b>Modelo de resolución de ambigüedad</b>	<i>Wide-lane</i> y <i>Narrow-lane</i>	-	Entera LAMBDA	Entera-desacoplamiento del reloj
<b>Modelos troposféricos</b>	GPT3_1	-	Saastamoinen (para retardo húmedos y secos)	Davis (GPT) por retraso hidrostático Hopf (GPT) para retraso húmedo
<b>Marco de referencia</b>	ITRF2014	Definido por el usuario	ITRF2014	ITRF2014
<b>Coordenadas finales</b>	Geodésicas	Geodésicas	ECEF	Geodésicas

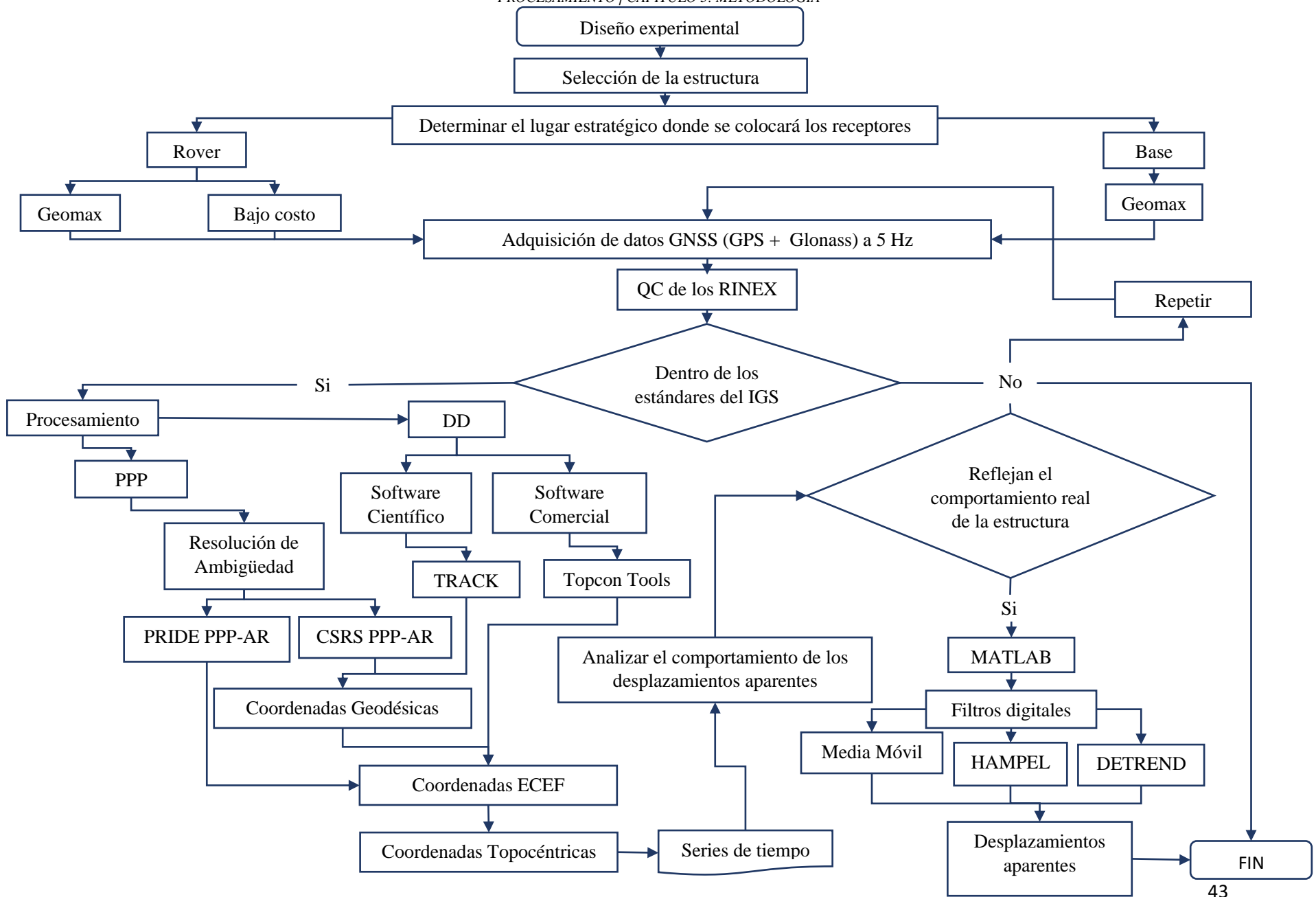


Figura 13. Esquemama de la metodología empleada.

## CAPÍTULO 4

### 4. Resultados

#### 4.1. Análisis de calidad

El IGS (*International GNSS Service*) proporciona especificaciones de recomendación para que las estaciones proporcionen los mejores datos posibles, esto se relaciona a que entre mayor calidad en las observables mejor será el posicionamiento. Por lo anterior, para que los datos proporcionados por un receptor GNSS se consideren confiables, el usuario debe utilizar programas de análisis de la calidad de los datos, como TEQC. El trabajo realizado por Vázquez et al. (2013) analiza la calidad de las señales, pero solo con respecto al efecto *multipath* donde hace uso del software TEQC; sin embargo, diferentes autores señalan que se deben considerar otros parámetros en el proceso de verificación (análisis de calidad), un trabajo de ello es el de Hernández-Andrade et al. (2020) en el que se centra en cuatro indicadores (efecto *multipath*, relación señal-ruido, saltos de ciclo e integridad), extraídos mediante el software TEQC.

Para el análisis de calidad de los datos GNSS, proporcionados por los receptores empleados en este experimento, descritos anteriormente en las secciones 3.1.1. y 3.1.2., se recurrió al software Anubis (sección 3.1.3.), esta verificación se basa en cuatro indicadores con sus respectivos estándares de calidad impuesto por el IGS (2015), en la Tabla 8 se observan sus valores estándar.

**Tabla 8.** Valores establecidos por el IGS. Fuente: IGS, 2015.

Efecto	Valores
Multipath	< 0.30 m
Relación señal/ruido (SNR)	débiles <36 dBHz y fuertes $\geq$ 36 dBHz
Saltos de ciclo	< 1 por 1000 observaciones, expresado como $CRS=1000(0/slps)$
Integridad	Número de observaciones > 95% de las esperadas

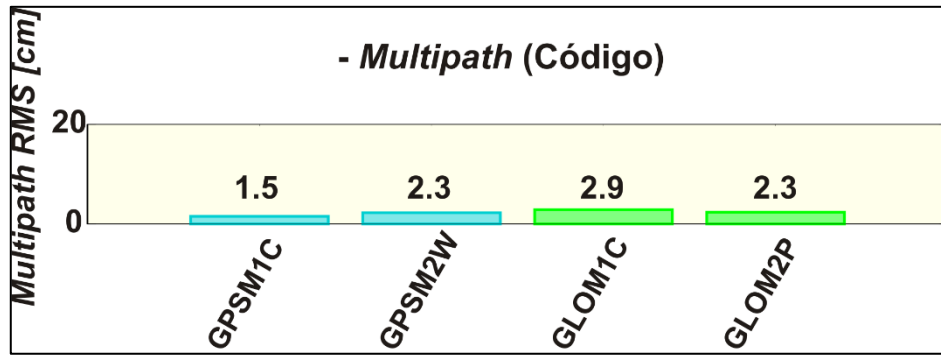
En la Figura 14 se observan los efectos del *multipath* para las mediciones con el receptor Geomax Zenith 25 (base y rover) y el receptor de bajo costo ZED-F9P (antena ANN-MB-00). Se puede ver que los valores están muy por debajo de lo establecido por el IGS, esto indica que la localización donde se colocaron los

equipos estuvo despejada de cualquier superficie reflectora, ayudando a disminuir el error de posicionamiento. La antena ANN-MB-00 mostró un valor más grande con respecto a Geomax Zenith 25 (aun con disco de plano de tierra), esto se puede relacionar a la baja calidad de la mitigación del *multipath* que contiene la electrónica de la antena. Sin embargo, las diferencias entre los valores de *multipath* para el Geomax Zenith 25 y el ZED-F9P fueron menores a 5 cm. La señal GPS fue la que menor *multipath* obtuvo, siendo L2 la que presentó los valores mayores. Por otro lado, la señal L1 de GLONASS tuvo valores menores solamente con las mediciones del Geomax, y caso contrario para las mediciones del ZED-F9P, quien mostró valores más altos de *multipath* en L2.

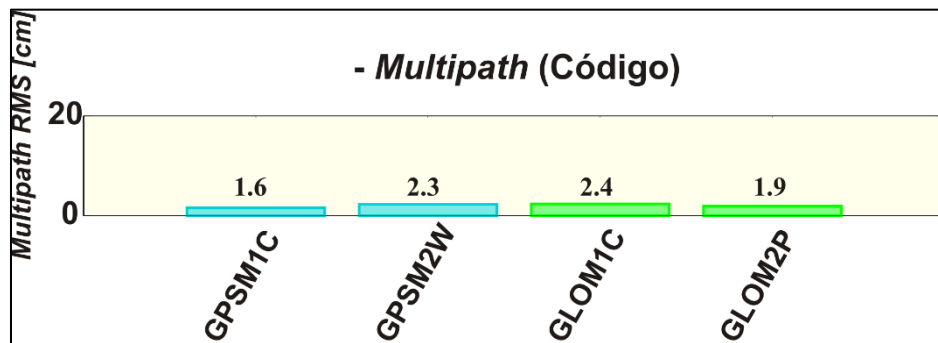
Con respecto al valor establecido por el IGS para el efecto SNR ( $\geq 36$  dBHz), en la Figura 15 se puede ver que la señal GPS y GLONASS estuvieron dentro del estándar. Para GPS, L1 mostró la mejor ganancia con respecto a L2 para los dos receptores (Geomax Zenith 25 y ZED-F9P), y para el caso de GLONASS, L2 presentó mejor ganancia que L1 para el Geomax Zenit 25 y viceversa para el ZED-F9P, L1 fue mejor que L2.

En la Figura 16 se muestra el seguimiento de los satélites disponibles durante la medición. Para el caso de la estación de referencia Geomax se observa una mayor trayectoria de los satélites, esto debido a que el periodo de medición fue mayor a las mediciones llevadas a cabo sobre el puente. Se observan trayectorias de satélites en ángulos de elevación altos, favoreciendo a los efectos del *multipath*, que estos sean bajos. En todos los casos de medición, siempre estuvieron más satélites disponibles de GPS que GLONASS. Por otro lado, los diferentes bloques de satélites de la constelación GPS han sido lanzados al espacio en diferentes años, por lo cual, no todas las bandas de satélites son compatibles. Esto se observa en las mediciones del receptor de bajo costo, que no es capaz de registrar ambas señales (L1 y L2). Los satélites G02, G13, G16 y G20 pertenecen al bloque IIR que fueron puestos en órbita desde 1997 hasta el 2004. En GLONASS, el satélite R06 fue el único que no fue compatible con ambos receptores GNSS. Para el receptor Geomax Zenith 25, la mayoría de las bandas están disponibles, tanto para GPS como GLONASS. En la Figura 17 se observan las bandas observadas por los receptores GNSS.

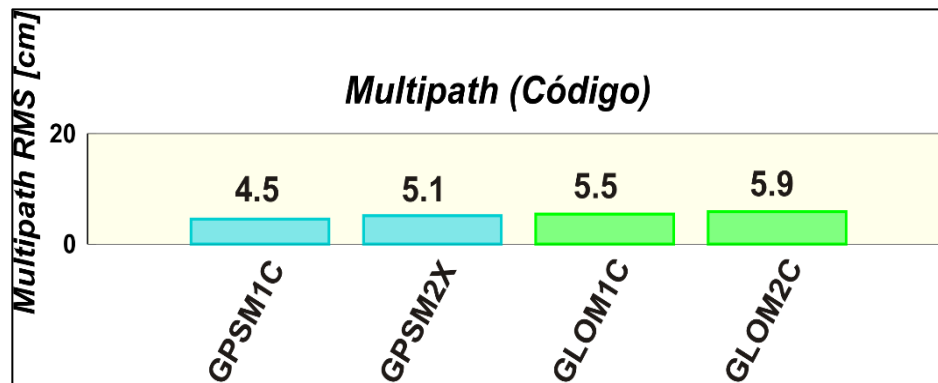
En general, el análisis de calidad indica que las mediciones GNSS presentaron un alto desempeño, disminuyendo fuentes de error como el *multipath* y los satos de ciclo, indicadores claves al momento del procesamiento de los datos, principalmente en PPP.



a)

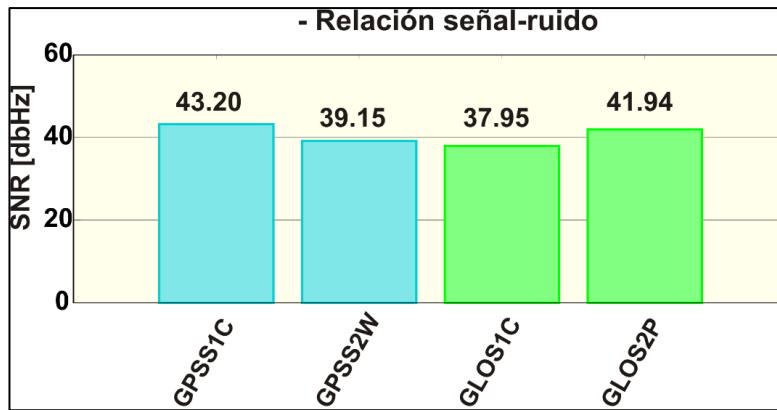


b)

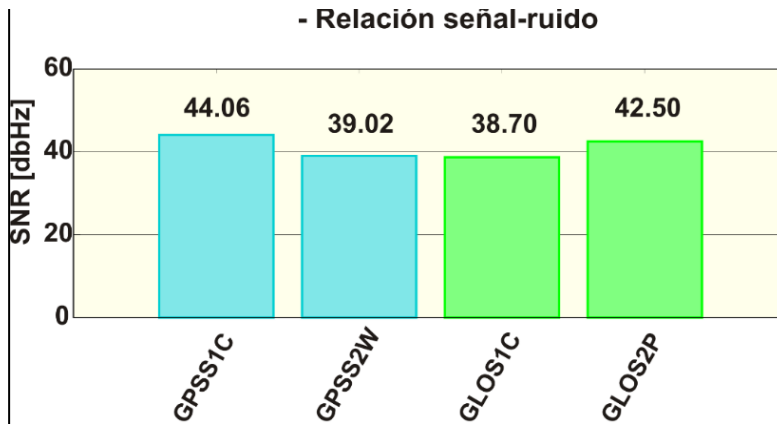


c)

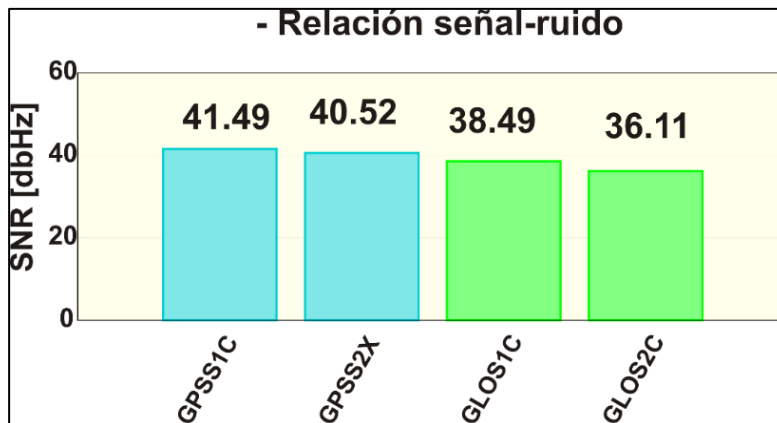
**Figura 14.** Efecto multitrayectoria en la banda L1 y L2 de las constelaciones GPS y GLONASS, respectivamente: (a) receptor base Geomax, (b) receptor rover Geomax, (c) receptor de bajo costo.



a)

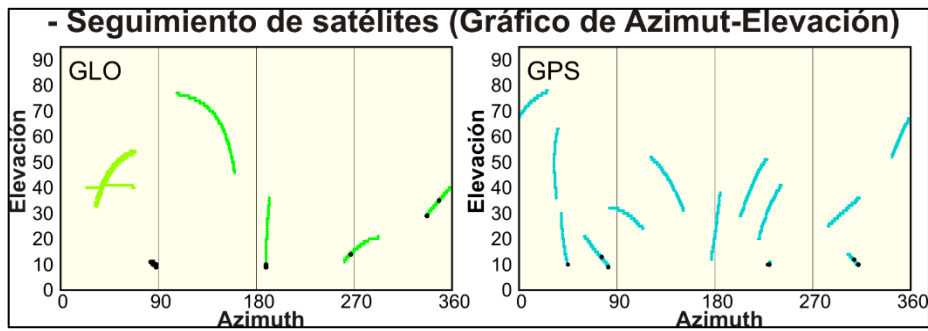


b)

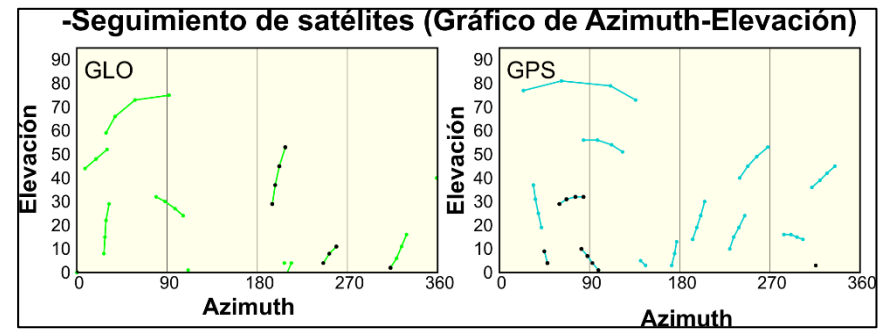


c)

**Figura 15.** Efecto SNR en la banda L1 y L2 de las constelaciones GPS y GLONASS, respectivamente: (a) receptor base Geomax, (b) receptor rover Geomax, (c) receptor de bajo costo.

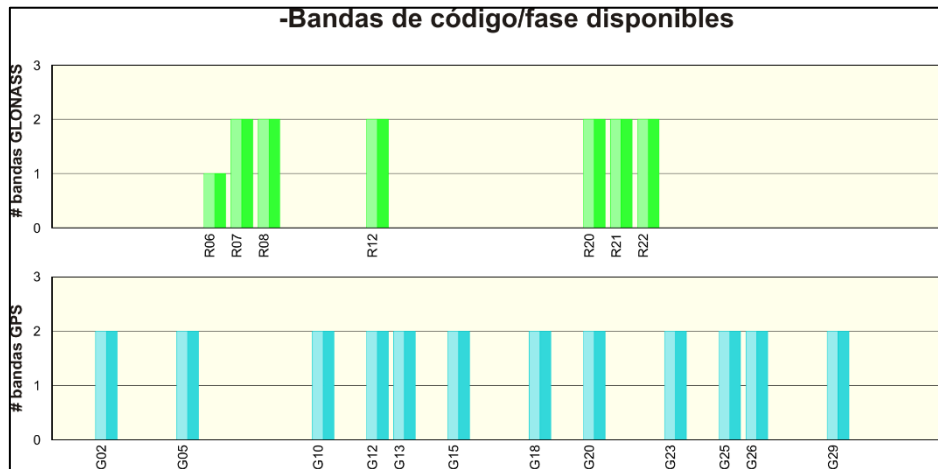


a)

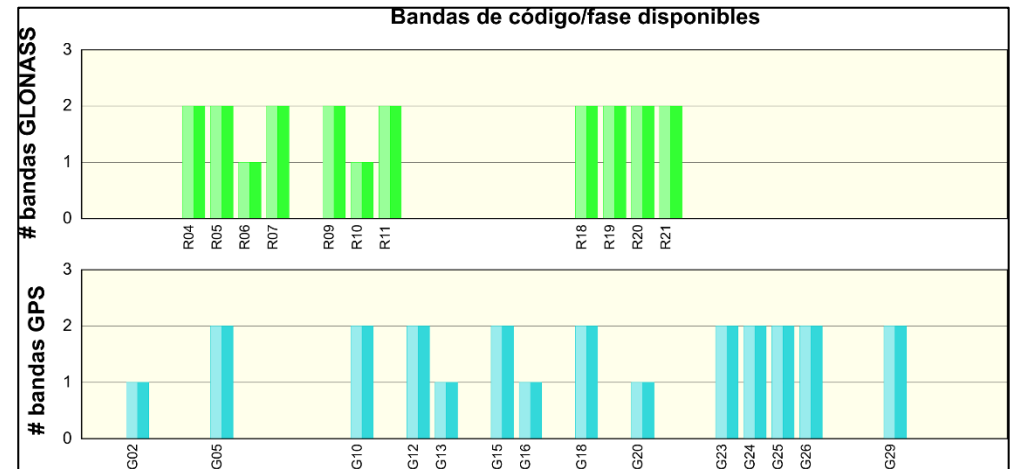


b)

Figura 16. Skyplot: (a) receptor base y rover Geomax, (b) receptor de bajo costo.



a)



b)

Figura 17. Bandas disponibles en los satélites de las constelaciones GPS y GLONASS: (a) receptor base y rover Geomax, (b) receptor de bajo costo.

## 4.2. Desplazamientos aparentes

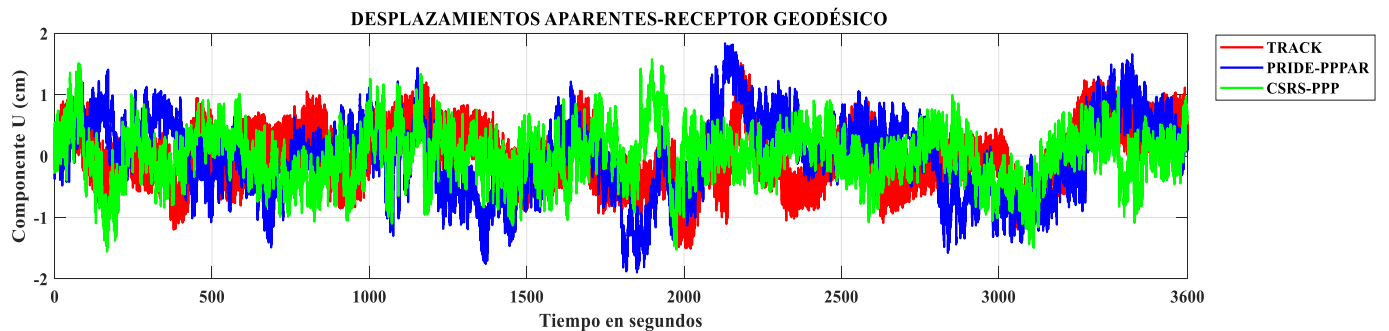
Para estimar las diferencias en la determinación de los desplazamientos que más se asemejan a la realidad en el eje vertical que sufre la estructura, empleando instrumentos de bajo costo, fue necesario tomar como referencia las soluciones de un receptor GNSS de orden geodésico. Como se mencionó anteriormente, las campañas se realizaron en diferentes días para cada receptor, con duración de una hora, ambos receptores se colocaron en el primer claro del puente Isla Musalá. En la Figura 19 se muestra los desplazamientos verticales de la estructura en el dominio del tiempo, donde por cada receptor se tienen tres vectores, resultantes de los tres subconjuntos, los cuales representan al software de procesamiento, siendo: TRACK, PRIDE-PPPAR y CSRS-PPP para el receptor geodésico y Topcon Tools, PRIDE-PPPAR y CSRS-PPP para el receptor de bajo costo. Cada vector se muestra con un previo tratamiento, que incluye la conversión de coordenadas, las cuales fueron llevadas de coordenadas geocéntricas a un sistema de coordenadas topocéntricas con un origen topocéntrico sobre la estructura para evaluar adecuadamente el comportamiento de los desplazamientos verticales de la misma, además se aplicaron tres diferentes filtros para suavizar las señales, esto con la finalidad de una mejor interpretación y una apropiada comparación del trabajo que realizan ambos instrumentos. En la Tabla 9 se observan los valores de las deflexiones máximas y mínimas, registradas en el lapso de tiempo donde existe mayor carga sobre el puente para ambas campañas de medición. Así mismo, para cada receptor se tomó de referencia los desplazamientos generados por la técnica DD, procesados con TRACK y Topcon Tools, teniendo desplazamientos aparentes en un rango aproximado de  $\pm 1.5$  cm para el receptor geodésico (Figura 18 (a)) y en el caso de receptor de bajo costo (Figura 18 (b)), los desplazamientos tienen un comportamiento de  $\pm 2.3$  cm.

Por otro lado, la técnica PPP, empleando los softwares PRIDE y CSRSPPP, se convirtió en una adecuada metodología para este tipo de estudios, ya que los equipos utilizados registraron desplazamientos aparentes con un buen comportamiento, debido a que la diferencia en sus magnitudes es menor de  $\pm 5$  milímetros aproximadamente, con respecto a los valores de referencia (DD).

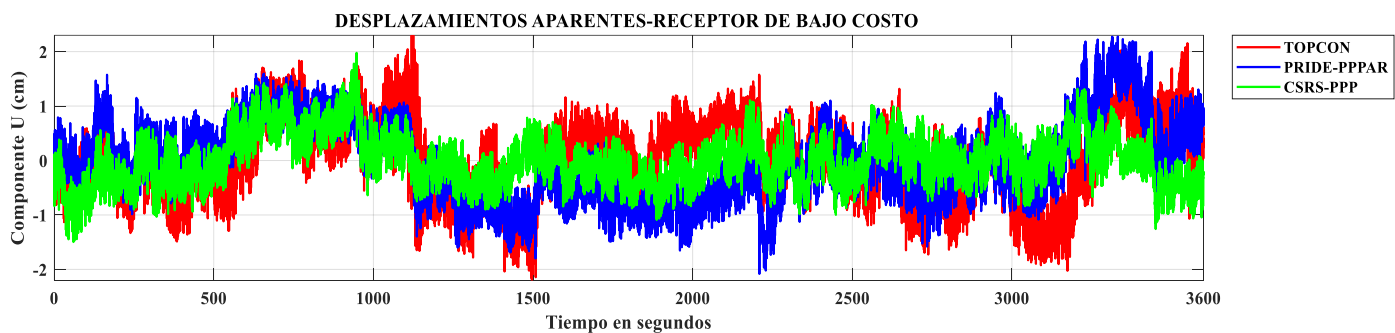
**Tabla 9.** Comparación de los desplazamientos máximos y mínimos de las series resultantes.

Equipo	Método	Software	Desplazamientos (cm)	
			Máximos	Mínimos
Geodésico	DD	TRACK	1.51	-1.51
	PPP	PRIDE-PPP AR	1.84	-1.90
		CSRS-PPP	1.58	-1.56
Bajo costo	DD	Topcon Tools	2.32	-2.21

PPP	PRIDE-PPP AR	2.28	-2.08
	CSRS-PPP	1.98	<b>-1.50</b>



a)



b)

**Figura 18.** Series de tiempo de la componente vertical (U): (a) Receptor GNSS Geomax Zenith 25, (b) Receptor GNSS ZED-F9P.

### 4.3. Comparación estadística de los desplazamientos aparentes

En la Tabla 10 se muestra un resumen de la desviación estándar de las soluciones obtenidas por cada receptor, así como también para cada caso de procesamiento, encontrando que la mayoría de los desplazamientos se encuentran dispersos dentro de  $\pm 1$  cm, es decir, que el 68% del total de las muestras registradas durante el tiempo de medición, tienen valores por debajo de  $\pm 1$  cm. Por otra parte, se encuentra una semejanza entre los valores de la desviación estándar obtenida por los softwares TRACK y CSRS-PPP (para ambos receptores). En este sentido, los valores obtenidos de la desviación estándar del receptor de bajo costo con la técnica DD deberían ser menores que con la técnica de PPP, sin embargo, esto no sucedió, dado que la desviación estándar obtenida del receptor GNSS de bajo costo con el software Topcon Tools es de 0.74 cm, convirtiéndolo en el peor

caso, esto es debido, a que el software carece de herramientas para un mejor procesamiento.

**Tabla 10.** Desviación estándar de los desplazamientos aparentes obtenidos por los cinco softwares utilizados.

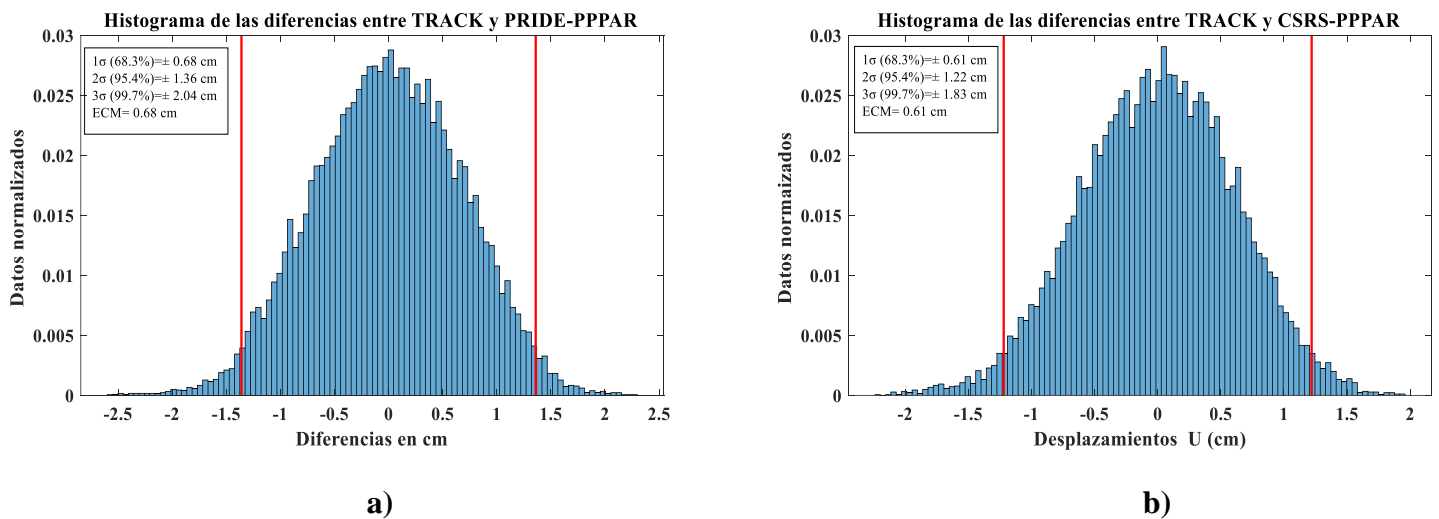
Método	Software	Desviación estándar (cm)	
		Geomax Zenith 25	ZED-F9P
DD	TRACK	0.47	-
	Topcon Tools	-	0.74
PPP	PRIDE	0.64	0.73
	CSRS	0.44	0.47

Por otro lado, para analizar los valores de ambas mediciones, se tomó como base las magnitudes de las deflexiones obtenidas por el método DD con su respectivo software, siendo estos denominados como desplazamientos reales de la estructura, es decir, los desplazamientos que más se asemejan a los reales, lo anterior se realizó para estimar el error medio cuadrático (ECM), que nos indica la diferencia entre el valor conocido y los valores estimados, es decir, nos da a conocer las diferencias entre los desplazamientos reales y los aparentes (PPP), de esta manera se busca encontrar el indicador de proximidad a lo real, por lo tanto, para el receptor geodésico, tenemos un ECM de 0.68 y de 0.61 cm para la comparación de TRACK-PRIDE y TRACK-CSRS-PPP, respectivamente. Los valores obtenidos del ECM para el caso del receptor de bajo costo son de 0.76 cm, 0.73 cm (ver Tabla 11). De esta manera, el valor más bajo del ECM se encuentra en las soluciones obtenidas por el receptor geodésico, específicamente en la comparativa entre TRACK y CSRS-PPP, lo cual significa que los desplazamientos proporcionados por CSRS-PPP están más cerca de los valores reales, ya que, entre más bajo sea el valor del promedio cuadrático de los errores, los valores pronosticados están cerca de los valores conocidos.

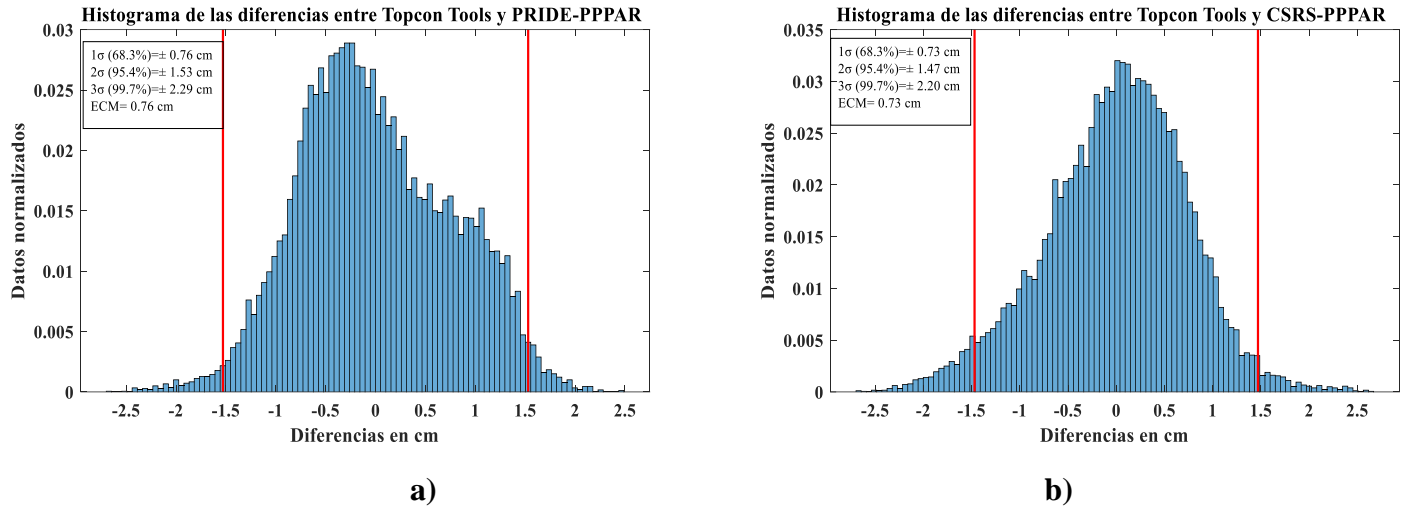
Adicional al análisis anterior, se calculó la desviación estándar de las diferencias obtenidas al comparar los desplazamientos reales con los aparentes para cada receptor, con el propósito de visualizar la dispersión de los datos en las discrepancias estimadas. En la Figura 20 se muestran dos histogramas, el primer histograma corresponde a las diferencias de TRACK-PRIDE (ver Figura 19 (a)) y el segundo pertenece a TRACK-CSRS-PPP (ver Figura 19 (b)), donde se puede visualizar que el 95% del total de los datos (delimitado por las líneas rojas) se encuentra dentro del rango de  $\pm 1.4$  y  $\pm 1.2$  cm, respectivamente. Para el receptor

GNSS de bajo costo, también se generaron dos histogramas para cada comparación de los desplazamientos, en este caso, para las dos comparativas (Topcon Tools-PRIDE y Topcon Tools-CSRSPPP), la mayoría (95%) de las soluciones tiene una diferencia de  $\pm 1.5$  cm (ver Figura 20) respecto a lo real.

En la Tabla 11 se observa un resumen de los resultados derivados de los planteamientos descritos previamente, el análisis de los resultados muestra que los desplazamientos aparentes estimados por el servicio online CSRS-PPP, se asemejan más a los desplazamientos reales obtenidos por el software TRACK, debido a que el 95% de los datos presentan una diferencia de  $\pm 1.2$  cm, siendo esta la diferencia mínima de todas las comparativas, además de presentar el ECM más bajo, siendo este de 0.61 cm, en este sentido, se reafirma la razón dada “si el ECM es bajo, los valores pronosticados se acercaran más a lo real (DD) ”.



**Figura 19.** Histogramas de las diferencias de los desplazamientos obtenidos por el equipo geodésico: **(a)** discrepancias entre el software científico (TRACK) y el software académico-científico (PRIDE-PPPAR), **(b)** discrepancias entre TRACK y CSRS-PPP.



**Figura 20.** Histogramas de las diferencias de los desplazamientos obtenidos por el equipo de bajo costo: (a) diferencias entre el software comercial (Topcon Tools) y el software académico-científico (PRIDE-PPPAR), (b) diferencias entre Topcon Tools y CSRS-PPP.

**Tabla 11.** Comparación de la desviación estándar calculada a partir de la diferencia entre los diferentes softwares empleados.

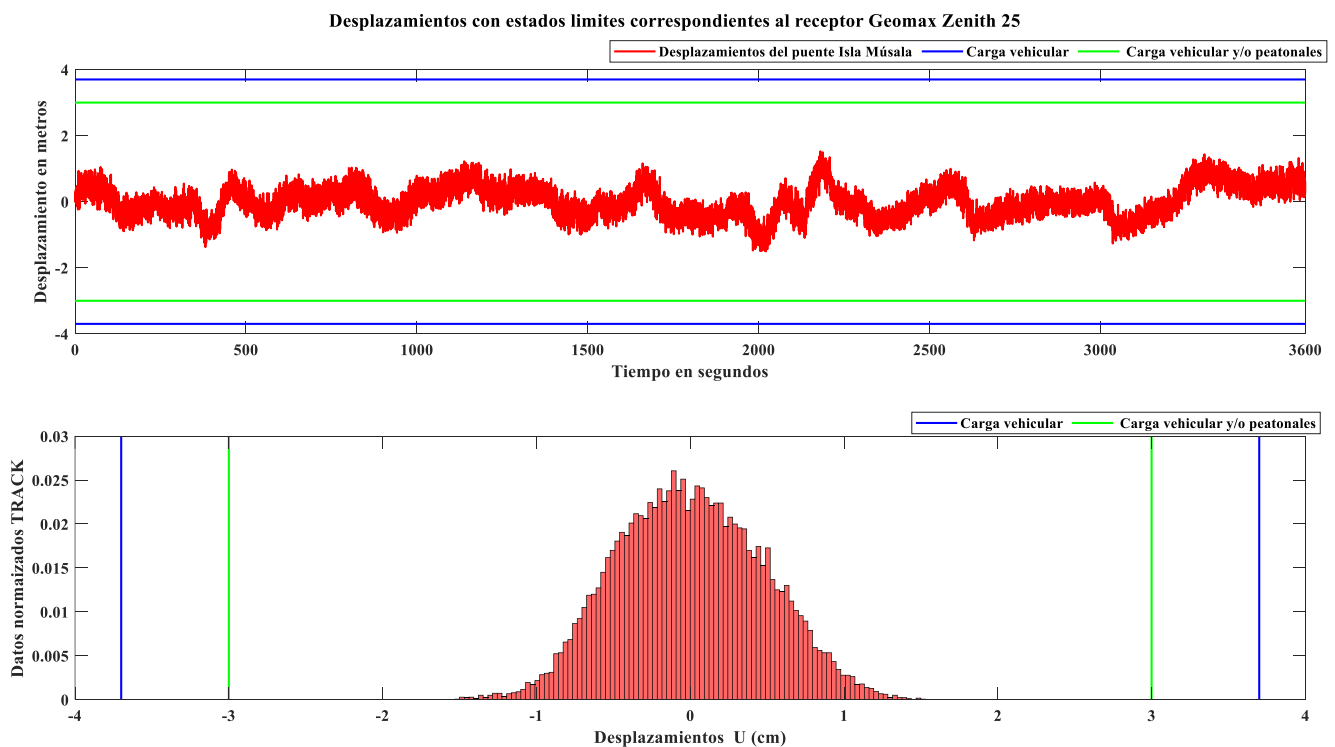
Receptor	Diferencia	Desviación estándar (cm)	Error medio cuadrático (cm)
<b>Geodésico (Geomax Zenith 25)</b>	TRACK y PRIDE-PPPAR	± 1.36	0.68
	TRACK y CSRS-PPPAR	±1.22	0.61
<b>Bajo costo (ZED-F9P)</b>	Topcon Tools y PRIDE-PPPAR	±1.53	0.76
	Topcon Tools y CSRS-PPP	± 1.47	0.73

#### 4.4. Estados límite de diseño.

Para la elaboración y construcción de nuevos proyectos, se deben de emplear normas y recomendaciones que ayudan a cumplir con las especificaciones generales requeridas. En México, para el diseño de puentes, se emplean normativas emitidas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) y las Normas Técnicas Complementarias (NTC). No obstante, nuestro país no cuenta con un reglamento propio para el diseño y revisión

de puentes, por lo que se han empleado códigos de diseño extranjeros, como el norteamericano AASHTO (Crespo et al., 2014; Rascón et al., 1997).

La Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO, por sus siglas en inglés), es el órgano encargado de establecer normas para el diseño y construcción de autopistas en Estados Unidos. AASHTO (2010) indica especificaciones para el diseño, evaluación y rehabilitación de puentes carreteros fijos y móviles siguiendo la metodología del Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD, por sus siglas en inglés), cuyos factores fueron desarrollados a partir de la teoría de la confiabilidad, basada en conocimientos estadísticos de cargas y comportamiento de estructuras. De esta manera, establece cuatro límites de deflexión para estructuras de acero, aluminio y/o concreto. Para evaluar los desplazamientos verticales del puente Isla Musalá obtenidos con el receptor geodésico y procesados con el software TRACK, se consideraron dos estados límites  $L/800$  (carga vehicular) y  $L/1000$  (cargas vehiculares y/o peatonales), donde  $L$  es la longitud del claro. En la Figura 21 se muestran los desplazamientos procesados con el software TRACK y los estados límite  $L/800$  y  $L/1000$  con sus valores de deflexión, siendo estos de  $\pm 3.75$  cm y  $\pm 3$  cm, respectivamente (ver Tabla 12).



**Figura 21.** Histogramas y serie de tiempo del receptor geodésico con los estados límite.

**Tabla 12.** Desviación estándar de los desplazamientos aparentes obtenidos por los cuatro softwares utilizados.

Carga	Estado limite	Longitud del claro (m)	Limites (cm)
Vehicular	$L/800$	30	$\pm 3.75$
Vehicular y/o peatonal	$L/1000$	30	$\pm 3$

El éxito del monitoreo estructural depende en gran medida de la interpretación de la información, detección de daño, obtención de índices de confiabilidad de las estructuras y el establecimiento de pronósticos de falla (Carrión et al., 2011), por lo cual, y de acuerdo con el criterio de estados límite, el monitoreo del puente Isla Musalá fue satisfactorio, ya que está en condiciones apropiadas para cumplir con las funciones o requisitos para la que fue proyectada, dado que todos los desplazamientos registrados durante la hora de medición (con una aplicación de carga parecida para ambos días), cumplen con las especificaciones que solicita AASHTO, teniendo valores de deflexión por debajo de lo establecido.

## CAPÍTULO 5

### 5. Conclusiones

El principal objetivo del presente trabajo es implementar una metodología adecuada para evaluar el desempeño de un receptor de bajo costo, en la detección de desplazamientos verticales sobre un puente. Los datos geoespaciales se procesaron empleando las técnicas de Diferencias Dobles y la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso, con diferentes softwares. De esta manera, con los resultados mencionados anteriormente, se pueden presentar las siguientes conclusiones:

1. Es importante llevar a cabo procesos de análisis de calidad sobre las observaciones GPS, para cuantificar la calidad de la medición y posteriormente tomar decisiones adecuadas al momento del post-proceso.
2. Los desplazamientos obtenidos con el receptor geodésico, procesados con los tres softwares (TRACK, PRIDE-PPPAR y CSRS-PPP), se encuentran dentro del rango de  $\pm 2$  cm, siendo el software TRACK el más preciso, ya que los desplazamientos están dentro de  $\pm 1.5$  cm, sin embargo, la diferencia que existe con respecto a los que proporciona la técnica de PPP es de apenas 5 milímetros.
3. Para el caso del receptor de bajo costo los desplazamientos máximos y mínimos se encuentran entre el rango de 2.3 y -2.2 cm, teniendo una solución poco esperada, debido a que los desplazamientos con valores altos, (tanto en el eje vertical positivo como negativo) se encuentran dentro de la serie de tiempo obtenida con la técnica DD, siendo esta una técnica con mejor precisión en el posicionamiento GNSS, este resultado se le puede atribuir al software empleado, dado que es de uso comercial, por lo cual carece de algoritmos para un adecuado procesamiento. En este sentido el servicio online CSRS-PPP presenta un mejor comportamiento, esta precisión se le puede adjudicar a su nueva versión que integra la resolución de ambigüedad, teniendo un desplazamiento máximo y mínimo de 2.0 y -1.5 cm, respectivamente.
4. De acuerdo con los estados límite de deflexión que puede sufrir una estructura respecto a la longitud del claro, establecidos por (AASHTO, 2010), siendo, en este caso, de  $\pm 3.7$  cm (L/800), y  $\pm 3$  cm (L/1000), los desplazamientos medidos por ambos receptores y con las respectivas técnicas de procesamiento GNSS, están dentro de estos parámetros, ya que

en general no se tienen desplazamientos mayores de  $\pm 2.5$  cm para la ventana de medición de esta investigación.

5. Se puede observar en los desplazamientos máximos y mínimos, que para el receptor GNSS de bajo costo, la técnica PPP fue más precisa, acercándose a los valores de los desplazamientos obtenidos con el receptor geodésico que a su vez fueron procesados con DD, esto debido principalmente al software de procesamiento para la técnica de DD utilizando observaciones de receptores de bajo costo.
6. Es posible utilizar estos equipos para trabajos de monitoreo, pero es importante aclarar que se debe de considerar una cuidadosa metodología de procesamiento de las observaciones y además de usar un software adecuado a lo requerido, de esta manera la tecnología de bajo costo demostró ser adecuado y una gran alternativa económica para trabajos de esta índole.

Finalmente, las observaciones registradas por los receptores de bajo costo tienen una menor calidad en referencia a uno de orden geodésico, debido al hardware y firmware de los equipos. Ocasionando que el posicionamiento final este degradado. Por otro lado, la técnica de procesamiento de datos GNSS y el software donde se ejecuta, son la base de un procesamiento óptimo cuando los archivos de observación presentan una calidad alta en la medición. Si bien, considerando las diferencias encontradas con el método DD utilizando receptores geodésicos y el método PPP con el receptor de bajo costo, es recomendable utilizar receptores GNSS sobre procesos de evaluación en estructuras y procesar los datos con la técnica PPP aplicando el software PRIDE-PPPAR o enviando los datos al servicio en línea CSRS-PPP.

## REFERENCIAS

- AASHTO. (2010). *Manual*, H. S. Washington, DC, 529.
- Alexander, C. K., y Sadiku, M. N. O. (2009). *Fundamentos de Circuitos Eléctricos 3th edition*.
- Andersen, J. E., y Vesterinen, A. (2006). *Structural health monitoring system*. COWI - Futurtec. [http://www.shms.dk/COWI\\_ISBN-87-91044-04-9.pdf](http://www.shms.dk/COWI_ISBN-87-91044-04-9.pdf)
- Angrisano, A., Dardanelli, G., Innac, A., Pisciotta, A., Pipitone, C., y Gaglione, S. (2020). *Performance Assessment of PPP Surveys with Open Source Software Using the GNSS GPS – GLONASS – Galileo Constellations*. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/16/5420/htm>
- Banville, S., Hassen, E., Lamothe, P., Farinaccio, J., Donahue, B., Mireault, Y., Goudarzi, M. A., Collins, P., Ghoddousi-Fard, R., y Kamali, O. (2021). Enabling ambiguity resolution in CSRS-PPP. *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, 68(2), 433–451. <https://doi.org/10.1002/navi.423>
- Bennetts, J. (2019). *The management of bridges*. [Doctoral dissertation, University of Bristol].
- Bennetts, J., Vardanega, P. J., Taylor, C. A., y Denton, S. R. (2020). Survey of the use of data in UK bridge asset management. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering*, 173(4), 211–222. <https://doi.org/10.1680/jbren.18.00050>
- Blewitt, G. (1990). An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, 17(3), 199–202.
- Brinckerhoff, P. (1993). *Bridge Inspection and Rehabilitation: A Practical Guide*. Wiley y Sons.
- Carrillo-Chávez, M. (2015). *Procesamiento y análisis de mediciones GPS de la red geodésica urbana de la ciudad de Culiacán empleando un software comercial*. [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Sinaloa].
- Carrión, F., Quintana, A., y López, A. (2011). *Diseño y estrategia para un centro de monitoreo de puentes y estructuras inteligentes de México*.
- Cina, A., y Piras, M. (2015). Performance of low-cost GNSS receiver for landslides monitoring: test and results. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(5–7), 497–514. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.889046>

- Collins, P. (2008). Isolating and estimating undifferenced GPS integer ambiguities. *Proceedings of the 2008 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA.*, 720–732.
- Crespo, S. S. E., Rodríguez, N. D., Viramontes, C. F., y Quintana, R. J. A. (2014). Análisis de efectos longitudinales y transversales en puentes debidos a cargas vivas vehiculares. *Publicación Técnica*, 398.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., Meindl, M., Beutler, G., Bock, H., Gade, A., Jaggi, A., Prange, L., Schaer, S., Springer, T., Urschl, C., y Walser, P. (2007). Bernese GPS software Version 5.0. *Astronomical Institute, University of Bern, Bern*.
- de Lacy, M. C., Reguzzoni, M., Sansò, F., y Venuti, G. (2008). The Bayesian detection of discontinuities in a polynomial regression and its application to the cycle-slip problem. *Journal of Geodesy*, 82(9), 527–542. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0203-8>
- Defraigne, P., y Bruyninx, C. (2007). On the link between GPS pseudorange noise and day-boundary discontinuities in geodetic time transfer solutions. *GPS Solutions*, 11(4), 239–249. <https://doi.org/10.1007/s10291-007-0054-z>
- Dousa, J., y Václavovic, P. (2021). *G -Nut / Anubis*.
- García-Armenteros, J. A. (2020). Monitorización Y Control De Calidad De Las Estaciones De La Red CGPS Topo-Iberia-UJA. *European Scientific Journal ESJ*, 16(24). <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n24p1>
- Geng, J. (2011). *Rapid integer ambiguity resolution in GPS precise point positioning* [Doctoral dissertation, University of Nottingham]. <http://etheses.nottingham.ac.uk/2116/>
- Geng, J. H., Shi, C., Zhao, Q. L., Ge, M. R., y Liu, J. N. (2008). *Integrated Adjustment of LEO and GPS in Precision Orbit Determination BT - VI Hotine-Marussi Symposium on Theoretical and Computational Geodesy* (P. Xu, J. Liu, y A. Dermanis (eds.); pp. 133–137). Springer Berlin Heidelberg.
- GeoMax AG. (2012). *Receptor Geomax Zenith25*. [www.geomax-positioning.com](http://www.geomax-positioning.com)
- Glaner, M., y Weber, R. (2021). PPP with integer ambiguity resolution for GPS and Galileo using satellite products from different analysis centers. *GPS Solutions*, 25(3), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01140-z>
- Guzmán-Acevedo, G. M. (2017). *Evaluación de desplazamientos Semi-estaticos, dinámicos y frecuencias fundamentales del puenete Juárez usando tecnología*

GPS. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Sinaloa].

- Hamza, V., Stopar, B., Ambrožič, T., y Sterle, O. (2021). Performance evaluation of low-cost multi-frequency gnss receivers and antennas for displacement detection. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/app11146666>
- Hamza, V., Stopar, B., Ambrožič, T., Turk, G., y Sterle, O. (2020). *Testing Multi-Frequency Low-Cost GNSS Receivers for Geodetic Monitoring Purposes*.
- Hamza, V., Stopar, B., y Sterle, O. (2021). Testing the performance of multi-frequency low-cost gnss receivers and antennas. *Sensors*, 21(6), 2029.
- Hatch, R. (1983). The synergism of GPS code and carrier measurements. In. *International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning*, 2, 1213–1231.
- Hernández-Andrade, D., Romero-Andrade, R., Cabanillas-Zavala, J. L., Ávila-Cruz, M., Trejo-Soto, M. E., y Vega-Ayala, A. (2020). Análisis de calidad de las observaciones GPS en estaciones de operación continua de libre acceso en México. *European Scientific Journal ESJ*, 16(33). <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p332>
- Hernández-Pajares, M., Juan, J. M., Sanz, J., Orus, R., Garcia-Rigo, A., Feltens, J., Komjathy, A., Schaer, S. C., y Krankowski, A. (2009). The IGS VTEC maps: A reliable source of ionospheric information since 1998. *Journal of Geodesy*, 83(3–4), 263–275. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0266-1>
- Herring, T. A., King, R. W., y McClusky, S. C. (2010). *GAMIT reference manual, release 10.4. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge*.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Collins, J. (2012). *Global Positioning System: Theory and Practice*. Springer Science y Business Media.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle, E. (2007). *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer Science y Business Media*. (Vol. 148).
- Huang, L., Lu, Z., Zhai, G., Ouyang, Y., Huang, M., Lu, X., Wu, T., y Li, K. (2016). A new triple-frequency cycle slip detecting algorithm validated with BDS data. *GPS Solutions*, 20(4), 761–769. <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0487-8>
- Huerta, E., Mangiaterra, A., y Noguera, G. (2005). GPS Posicionamiento Satelital. In Universidad Nacional de Rosario (Ed.), *Angewandte Chemie International*.
- IGS. (2015). IGS Site Guidelines. *Organization, July*, 1–9. <https://kb.igs.org/hc/en>

us/articles/202011433-Current-IGS-Site-Guidelines

- Joosten, P., y Tiberius, C. (2000). Fixing the ambiguities – are you sure they're right? *GPS World*, 11(5), 46–51.
- Kim, D., Serrano, L., y Langley, R. (2006). INNOVATION-Phase Wind-Up Analysis-Assessing Real-Time Kinematic Performance. *GPS World*, 17(9), 58–64.
- Kouba, J. (2009). A simplified yaw-attitude model for eclipsing GPS satellites. *GPS Solutions*, 13(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10291-008-0092-1>
- Kouba, J., y Héroux, P. (2001). Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*, 5(2), 12–28. <https://doi.org/10.1007/PL00012883>
- Li, X., Rizos, C., Ge, L., Tamura, Y., y Yoshida, A. (2005). The complementary characteristics of GPS and accelerometer in monitoring structural deformation. *Proceedings of the Institute of Navigation, National Technical Meeting*, 911–920.
- Liu, Z. (2011). A new automated cycle slip detection and repair method for a single dual-frequency GPS receiver. *Journal of Geodesy*, 85(3), 171–183. <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0426-y>
- MacDonald, A. E., y Platzer, P. (2020). Systems and methods for improved atmospheric monitoring and GPS positioning utilizing GNSS tomographic refractivity - U.S. Patent and Trademark Office. *New York*.
- Manzini, N., Orcesi, A., Thom, C., Brossault, M. A., Botton, S., Ortiz, M., y Dumoulin, J. (2020). Performance analysis of low-cost GNSS stations for structural health monitoring of civil engineering structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 0(0), 1–17. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1849320>
- Martinez-Felix, C. A., Vazquez-Becerra, G. E., Geremia-Nievinski, F., Millan-Almaraz, J. R., Franco-Ochoa, C., Melgarejo-Morales, A., y Gaxiola-Camacho, J. R. (2021). Tidal measurements in the Gulf of Mexico: intercomparison of coastal tide gauge, insular GNSS reflectometry and SAR altimetry. *GPS Solutions*, 26(1), 22. <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01207-x>
- McCarthy, D. D., y Petit, G. (2004). *IERS conventions (2003)*. Verlag des Bundesamts f'ur Kartographie und Geod'asie Frankfurt am Main.
- Melbourne, W. G. (1985). *The case for ranging in GPS-based geodetic systems*. In *Proceedings, First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System*. U.S. Department of Commerce Rockville, Maryland.
- Meng, X. (2002). *Real-time Deformation Monitoring of Bridges Using*

- GPS/Accelerometers. [Tesis Doctoral, University of Nottingham].
- Moschas, F., y Stiros, S. (2011). Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer. *Engineering Structures*, 33(1), 10–17.
- Paniagua-Jiménez, D., y Valverde-Calderón, J. (2017). *Comparación de los resultados en la resolución de ambigüedades para una red de estaciones GNSS en Europa con el uso de datos GPS y la combinación con datos GLONASS , utilizando el programa de procesamiento Bernese*. 31(2), 1–17.
- Pearson, R. K., Neuvo, Y., Astola, J., y Gabbouj, M. (2016). Generalized Hampel Filters. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2016(1). <https://doi.org/10.1186/s13634-016-0383-6>
- Petrie, E. J., King, M. A., Moore, P., y Lavallée, D. A. (2010). Higher-order ionospheric effects on the GPS reference frame and velocities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B3), 1–8. <https://doi.org/10.1029/2009JB006677>
- Pipinato, A. (2021). *Innovative Bridge Design Handbook: Construction, Rehabilitation and Maintenance*. Elsevier Science.
- Quintero-Rincón, A., Risk, M., y Liberczuk, S. (2012). *Preprocesamiento de EEG con Filtros Hampel*. 89, 1–6.
- Radomski, W. (2002). *Bridge rehabilitation*. Imperial College Press.
- Rascón, O. A., Barousse, M. M., y Ventura, G. (1997). Análisis normativo y estadístico de cargas vivas en puentes en México. Publicación Técnica No. 97. *Instituto Mexicano Del Transporte IMT*.
- Romero-Andrade, R., Trejo-Soto, M. E., Vázquez-Ontiveros, J. R., Hernández-Andrade, D., y Cabanillas-Zavala, J. L. (2021). Sampling rate impact on precise point positioning with a low-cost gnss receiver. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(16). <https://doi.org/10.3390/app11167669>
- Romero-Andrade, R., Zamora-Maciél, A., Uriarte-Adrián, J. de J., Pivot, F., y Trejo-Soto, M. E. (2019). Comparative analysis of precise point positioning processing technique with GPS low-cost in different technologies with academic software. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.100>
- Romero, A. (2015). *Evaluación del potencial de técnicas del posicionamiento GNSS para la obsevación de ondas sísmicas superficiales*. [Tesis de Grado,

Universidad Nacional de la PLata].

- Saastamoinen, J. (1973). *Contributions to the theory of atmospheric refraction. Part II. Refraction corrections in satellite geodesy.* *Bull Geodesique*, 107(1), 13–34. <https://doi.org/10.1038/1841916b0>
- Schmid, R., Steigenberger, P., Gendt, G., Ge, M., y Rothacher, M. (2007). Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas. *Journal of Geodesy*, 81(12), 781–798. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0148-y>
- Sony, S., Laventure, S., y Sadhu, A. (2019). A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(3), e2321.
- Souto, M. S. (2014). Análisis de calidad y preprocesamiento de datos GNSS de la estación permanente UCOR (Córdoba, Argentina). *Revista de La Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 1(1), 91. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/6971>
- Tabibi, S., Geremia-Nievinski, F., Francis, O., y van Dam, T. (2020). Tidal analysis of GNSS reflectometry applied for coastal sea level sensing in Antarctica and Greenland. *Remote Sensing of Environment*, 248(May), 111959. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111959>
- Teunissen, P. J., y Montenbruck, O. (2014). Springer Handbook of Global navigation satellite systems. In *International Ocean Systems* (Vol. 18, Issue 6). <https://doi.org/10.4324/9781315610139-12>
- Topal, O. G., y Akpinar, B. (2021). High Rate Gnss Kinematic Ppp Method Performance for Monitoring the Engineering Structures: Shake Table Tests Under Different Satellite Configurations. *Measurement*, November, 110451. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110451>
- Tsakiri, M., Sioulis, A., y Piniotis, G. (2017). Compliance of low-cost, single-frequency GNSS receivers to standards consistent with ISO for control surveying. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 8. <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2017006>
- u-blox. (2021). *ZED-F9P-02B Data sheet*. 1–24. [www.u-blox.com%0AUBX-21023276](http://www.u-blox.com%0AUBX-21023276)
- Vazquez-Becerra, G. E., Gaxiola-Camacho, J. R., Bennett, R., Guzman-Acevedo, G. M., y Gaxiola-Camacho, I. E. (2017). Structural evaluation of dynamic and semi-static displacements of the Juarez Bridge using GPS technology.

- Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 110, 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.06.026>
- Vazquez-Ontiveros, J. R., Martinez-Felix, C. A., Vazquez-Becerra, G. E., Gaxiola-Camacho, J. R., Melgarejo-Morales, A., y Padilla-Velazco, J. (2021). Monitoring of local deformations and reservoir water level for a gravity type dam based on GPS observations. *Advances in Space Research*. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.09.018>
- Vazquez-Ontiveros, J. R., Vazquez-Becerra, G. E., Quintana, J. A., Carrion, F. J., Guzmán-Acevedo, G. M., y Gaxiola-Camacho, J. R. (2021). Implementation of PPP-GNSS measurement technology in the probabilistic SHM of bridge structures. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 173(November), 108677. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108677>
- Vázquez, G. E., Bennett, R., y Spinler, J. (2013). Assessment of Pseudorange Multipath at Continuous GPS Stations in Mexico. *Positioning*, 04(03), 253–265. <https://doi.org/10.4236/pos.2013.43025>
- Wu, J. T., Wu, S. C., Hajj, G. A., Bertiger, W. I., y Lichten, S. M. (1992). Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Astrodynamics* 1991, 1647–1660.
- Wübbena, G. (1985). *Software developments for geodetic positioning with GPS using TI-4100 code and carrier measurements*. In: *Proceedings, First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville*. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service.
- Wübbena, G., y Hannover, U. (1985). *Software developments for geodetic positioning with GPS*. In *Positioning with GPS-1985: Proceedings, First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, Maryland, April 15-19, 1985*. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service.
- Xiao, G., Mayer, M., Heck, B., Sui, L., Zeng, T., y Zhao, D. (2018). Improved time-differenced cycle slip detect and repair for GNSS undifferenced observations. *GPS Solutions*, 22(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0677-7>
- Xiao, Y., Yao, M. H., Tang, S. H., Liu, H. F., Xing, P. W., y Zhang, Y. (2020). DATA QUALITY CHECK and VISUAL ANALYSIS of CORS STATION BASED on ANUBIS SOFTWARE. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(3/W10), 1295–1300. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W10-1295-2020>

- Yi, T. H., Li, H. N., y Gu, M. (2010). Recent research and applications of GPS based technology for bridge health monitoring. *Science China Technological Sciences*, 53(10), 2597–2610. <https://doi.org/10.1007/s11431-010-4076-3>
- Yigit, C. O. (2016). Experimental assessment of post-processed kinematic Precise Point Positioning method for structural health monitoring. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(1), 360–383. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.917724>
- Yigit, C. O., y Gurlek, E. (2017). Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 893–904. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1284160>
- Zamora-Maciel, A., Romero-Andrade, R., Moraila-Valenzuela, C. R., y Pivot, F. (2020). Evaluación de receptores GPS de bajo costo de alta sensibilidad para trabajos geodésicos. Caso de estudio: línea base geodésica. *CIENCIA Ergo Sum*, 27(1), e73. <https://doi.org/10.30878/ces.v27n1a5>
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., y Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3), 5005–5017. <https://doi.org/10.1029/96jb03860>