

**B**ENEMÉRITA **U**NIVERSIDAD **A**UTÓNOMA DE **P**UEBLA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
COLEGIO DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA



“ANÁLISIS DE CALIDAD DE LAS OBSERVACIONES **GPS** Y SU  
IMPACTO EN EL POSICIONAMIENTO PRECISO. CASO DE ESTUDIO:  
REDES GEODÉSICAS **GNSS** DE LIBRE ACCESO EN **MÉXICO**”

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**INGENIERO TOPÓGRAFO-GEODESTA**

PRESENTA

**DANIEL HERNÁNDEZ ANDRADE**

Director de Tesis  
**M.V. MÁXIMO ÁVILA CRUZ**  
Co-Director de Tesis  
**DR. ROSENDO ROMERO ANDRADE**

Puebla, Pue.

agosto de 2021



Oficio No. SAC/1450/2021

**C. HERNÁNDEZ ANDRADE DANIEL**  
**PASANTE DE LA CARRERA DE 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; además siendo candidato a lograr Ad Honorem, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

**“ANÁLISIS DE CALIDAD DE LAS OBSERVACIONES GPS Y SU IMPACTO EN EL POSICIONAMIENTO PRECISO.**  
**CASO DE ESTUDIO: REDES GEODÉSICAS GNSS DE LIBRE ACCESO EN MÉXICO”.**

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como asesor 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 16 de agosto de 2021**

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



**M'ACGZ/barv**  
**C.c.p. Interesado**  
**C.c.p. Archivo**

**M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora**  
**Director de la Facultad de Ingeniería**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**Presente.**

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

**“ANÁLISIS DE CALIDAD DE LAS OBSERVACIONES GPS Y SU IMPACTO EN EL POSICIONAMIENTO PRECISO.  
CASO DE ESTUDIO: REDES GEODÉSICAS GNSS DE LIBRE ACCESO EN MÉXICO”.**

Presentada por el C. Daniel Hernández Andrade, pasante del Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica, y en atención al oficio No. SAC/1450/2021 con fecha de emisión 16 de agosto de 2021, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente es candidato a titularse por Ad Honorem, y no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

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

**Atentamente**  
**“Pensar bien, para vivir mejor”**  
**H. Puebla de Z. a 17 de agosto de 2021**



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

M'MAC/BARV  
C.c.p. Archivo

## AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por poner los medios y abrir las puertas para realizar este trabajo, así también por la vida de mi Familia quienes son mi principal apoyo, motivación e impulso en todo y para todo, quienes me han dado la confianza y sin cuestionamiento alguno me han respaldado para bien.

Al Dr. Rosendo Romero Andrade quien me mostró su apoyo, disponibilidad y confianza para realizar este trabajo, siendo paciente y flexible en todo momento, mi más sincero agradecimiento.

Al M.C. Juan Luis Cabanillas Zavala, por su excelente disposición y ánimo para el trabajo, compartiendo conocimiento, “que no pare la ciencia” Juan Luis.

Al M.C. Máximo Ávila Cruz por su tranquilidad y paciencia para enseñar.

A cada uno de los maestros por sus grandes enseñanzas: M.C. José de la Luz Ramírez Mendoza, Ing. Joel Panohaya Analco, M.I. Abraham Torres Méndez, M.I. Juan J. Benítez Suárez, Dr. Rogelio Ramos Aguilar, Ing. J. Irving Carcaño Soriano, Ing. Marcos Arellano Díaz, M.I. Ángel Cecilio Guerrero Zamora.

A mis amigos, quienes han hecho de este trayecto una estancia grata y con quienes sé que cuento para más que trabajo.

A la Dirección General de Desarrollo Internacional (DGDI) y a la Facultad de Ingeniería (FIBUAP) por colaborar en toda la vinculación para realizar mi estancia académica en la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio (FACITE) de la Universidad Autónoma de Sinaloa, donde he desarrollado gran parte de este trabajo final.

A UNAVCO, CORS, IGS, SOPAC por poner a disposición todos los datos crudos, sin los cuales este trabajo no hubiera sido posible.

*"This material is based on services provided by the GAGE Facility, operated by UNAVCO, Inc., with support from the National Science Foundation and the National Aeronautics and Space Administration under NSF Cooperative Agreement EAR-1724794."*

## RESUMEN

El presente trabajo tiene por objeto de estudio el análisis de calidad de las observaciones GPS y su impacto al posicionamiento preciso, considerando al efecto multitrayectoria como el principal degradador de la precisión. En este sentido, se realizó la evaluación estadística-comparativa de 65 estaciones de operación continua de libre acceso en México de enero de 2010 a enero de 2020, realizando el análisis de calidad a través del software TEQC, considerando cuatro indicadores de calidad en seis variables: efecto multitrayectoria en la banda  $L_1$  y  $L_2$ , relación señal-ruido en ambas bandas, saltos de ciclo por cada mil observaciones e integridad. El resultado de cada estación fue comparado respecto a normatividad internacional propuesta por el IGS para pertenecer a su red, con la finalidad de determinar la calidad y el grado de cumplimiento de cada estación. Así mismo, se ha seleccionado la estación de mayor y menor efecto multitrayectoria para evaluar el impacto al posicionamiento preciso, considerando software científico GAMIT/GLOBK y normatividad vigente en México mediante la evaluación de exactitud posicional para el establecimiento y densificación de un sistema geodésico nacional. Los resultados muestran respecto al análisis de calidad que las estaciones cumplen en promedio con 3.3 de las 6 variables evaluadas, donde: 6 estaciones cumplen con 5 de las 6 variables; 16 estaciones con 4; 35 con 3; 6 con 2 y 2 con una variable, mostrando mayor cantidad de efecto multitrayectoria en aquellas estaciones donde no se ha presentado cambio de antena, receptor o actualización de firmware. Finalmente, respecto al impacto al posicionamiento preciso, considerando a la estación INEG (menor efecto multitrayectoria) y MPR1 (mayor efecto multitrayectoria), no muestran degradación significativa en sesiones prolongadas con efecto de hasta 1 m, sin embargo, los valores de exactitud posicional horizontal y vertical muestran mejor desempeño en la estación con menor efecto multitrayectoria. En este sentido, las 65 estaciones son aptas para el establecimiento del sistema geodésico nacional, las cuales no muestran una relación directamente proporcional entre la exactitud posicional y los indicadores de calidad a excepción de INEG y TNMT.

## ABSTRACT

The aim of the work is the quality check GPS observation and their impact to precise positioning, considering the multipath effect as the main precision degrader. In this sense, the statistical-comparative evaluation was made of 65 continuous operating free access stations in México from January 2010 to January 2020. The quality check was carry out by using TEQC software, considering four quality indexes in six variables: multipath effect on L<sub>1</sub> and L<sub>2</sub> band, signal-to-noise ratio on both bands, cycle slips per thousand observations and integrity. The result of each station was comparing regard to international regulations, proposal by IGS in order to belong to its network, with the purpose of determining their quality and the level of meeting the standard of each station. Likewise, the greater and lesser multipath effect station has been selected to evaluate the precise positioning impact by means of scientific software GAMIT/GLOBK and the regulation in force in Mexico through the positional accuracy evaluated for the establishment and densification of a national geodetic system. The results show regard to the quality check that the station meeting on average with 3.3 of the 6 variables evaluated, where: 6 station meet 5 of 6 variables; 16 station with 4; 35 with 3; 6 with 2 and 2 with one variable, showing greater quantity of multipath effect in those station that had not antenna/receiver changing or firmware update. Finally, regard to the impact to precise positioning, considering the INEG station (lesser multipath effect) and MPR1 (greater multipath effect), does not show significant degradation in prolonged sessions with effect of up to 1 m, however, the values of horizontal and vertical accuracy positioning show better performance in the station with lesser multipath effect. In this sense, the 65 stations are suitable for the establishment of national geodetic system, which do not show a directly proportional relationship between the positional accuracy and quality indexes, with the exception of INEG and TNMT.

# ÍNDICE GENERAL

PÁG

|                                                                     |          |
|---------------------------------------------------------------------|----------|
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                                              | ix       |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                                              | xii      |
| <b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>                               | <b>1</b> |
| 1.1 Planteamiento del problema.....                                 | 4        |
| 1.2 Justificación .....                                             | 5        |
| 1.3 Objetivos .....                                                 | 6        |
| 1.3.1 Objetivo general .....                                        | 6        |
| 1.3.2 Objetivos particulares .....                                  | 6        |
| <b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....</b>                              | <b>7</b> |
| 2.1 GNSS .....                                                      | 7        |
| 2.1.1 GPS.....                                                      | 9        |
| 2.1.2 GLONASS.....                                                  | 12       |
| 2.1.3 GALILEO.....                                                  | 14       |
| 2.2 Gestores y Redes geodésicas GNSS de libre acceso en México..... | 16       |
| 2.2.1 Redes adscritas a UNAVCO .....                                | 17       |
| 2.2.2 Red de Estaciones de Referencia de Operación Continua.....    | 18       |
| 2.2.3 Red IGS .....                                                 | 18       |
| 2.3 Posicionamiento relativo estático.....                          | 20       |
| 2.4 Análisis de calidad de las observaciones GNSS .....             | 23       |
| 2.4.1 Efecto Multitrayectoria.....                                  | 28       |
| 2.4.2 Relación Señal-Ruido .....                                    | 30       |
| 2.4.3 Saltos de Ciclo.....                                          | 32       |
| 2.4.4 Integridad.....                                               | 34       |
| 2.5 Exactitud posicional.....                                       | 35       |

|                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....</b>                                        | <b>36</b>  |
| 3.1 Implementación de TEQC en Shell-C de Unix para el Análisis de Calidad... | 39         |
| <br>                                                                         |            |
| <b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....</b>                                          | <b>44</b>  |
| 4.1 Análisis estadístico del efecto multitrayectoria .....                   | 49         |
| 4.2 Análisis estadístico de la relación señal-ruido .....                    | 54         |
| 4.3 Análisis estadístico de los saltos de ciclo.....                         | 59         |
| 4.4 Análisis estadístico de la integridad.....                               | 62         |
| 4.5 Resultados del análisis de calidad por gestor.....                       | 65         |
| 4.5.1 NGS .....                                                              | 66         |
| 4.5.2 UNAVCO .....                                                           | 72         |
| 4.5.3 IGS.....                                                               | 77         |
| 4.6 Análisis del impacto en el posicionamiento preciso .....                 | 80         |
| 4.6.1 Evaluación de CEP y EPV .....                                          | 84         |
| 4.6.2 Estimación de la velocidad en las estaciones .....                     | 89         |
| <br>                                                                         |            |
| <b>CAPÍTULO V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>                             | <b>92</b>  |
| Trabajo futuro .....                                                         | 95         |
| Productos generados .....                                                    | 96         |
| <br>                                                                         |            |
| <b>ANEXOS.....</b>                                                           | <b>98</b>  |
| <br>                                                                         |            |
| <b>REFERENCIAS.....</b>                                                      | <b>101</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

PÁG

|                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Segmentos en los GNSS. Fuente: Llarana <i>et al.</i> (S/A) .....                                                                                                                                                    | 7  |
| <b>Figura 2.</b> Localización de Satélites y Planos Orbitales GPS. Fuente: (U.S. Coast Guard Navigation Center, 2020).....                                                                                                           | 10 |
| <b>Figura 3.</b> Precisión en la transición de la disponibilidad selectiva (SA). Fuente: (GPS.gov: Selective Availability, 2020). .....                                                                                              | 11 |
| <b>Figura 4.</b> Segmento control, GPS. Fuente:(GPS.gov: Space Segment, 2020). .....                                                                                                                                                 | 11 |
| <b>Figura 5.</b> Segmento espacial GLONASS. Fuente: (Revnivykh <i>et al.</i> , 2017). .....                                                                                                                                          | 13 |
| <b>Figura 6.</b> Localización y planos orbitales de Galileo. Fuente: (EGNSS Service Centre, 2020). .....                                                                                                                             | 14 |
| <b>Figura 7.</b> Segmento control de la constelación Galileo. Fuente: (Hofmann <i>et al.</i> , 2008). .....                                                                                                                          | 15 |
| <b>Figura 8.</b> Concepto de posicionamiento relativo. Fuente: (Hofmann-Wellenhof <i>et al.</i> , 2008). .....                                                                                                                       | 20 |
| <b>Figura 9.</b> Gráfico de Análisis de calidad del archivo de resumen (ineg0070.20S). .....                                                                                                                                         | 26 |
| <b>Figura 10.</b> Efecto multitrayectoria. ....                                                                                                                                                                                      | 28 |
| <b>Figura 11.</b> Esquema representativo de un salto de ciclo. Fuente: Hofmann-Wellenhof <i>et al.</i> (2008). .....                                                                                                                 | 32 |
| <b>Figura 12.</b> Metodología. ....                                                                                                                                                                                                  | 36 |
| <b>Figura 13.</b> Diagrama de flujo para la descarga de RINEX. ....                                                                                                                                                                  | 39 |
| <b>Figura 14.</b> Código para la descarga de RINEX. ....                                                                                                                                                                             | 40 |
| <b>Figura 15.</b> Diagrama de flujo para convertir de HATANAKA a RINEX. ....                                                                                                                                                         | 40 |
| <b>Figura 16.</b> Conversión Hatanaka – RINEX. ....                                                                                                                                                                                  | 41 |
| <b>Figura 17.</b> Diagrama de flujo para descarga de archivos log. ....                                                                                                                                                              | 41 |
| <b>Figura 18.</b> Descarga de archivos log. ....                                                                                                                                                                                     | 42 |
| <b>Figura 19.</b> Diagrama de flujo para el análisis de calidad.....                                                                                                                                                                 | 42 |
| <b>Figura 20.</b> Código para el análisis de calidad. ....                                                                                                                                                                           | 43 |
| <b>Figura 21.</b> Estaciones GNSS de libre acceso en México identificadas por gestor. Modelo de Relieve Global ETOPO1 (NOAA, 2008). Mapa generado mediante Generic Mapping Tools (Wessel <i>et al.</i> , 2019). .....                | 44 |
| <b>Figura 22.</b> Estaciones GNSS de libre acceso identificadas por red para el análisis de calidad. Modelo de Relieve Global ETOPO1 (NOAA, 2008). Mapa generado mediante Generic Mapping Tools (Wessel <i>et al.</i> , 2019). ..... | 45 |
| <b>Figura 23.</b> Total de días disponibles por estación del año 2010 a 2020. ....                                                                                                                                                   | 46 |
| <b>Figura 24.</b> Promedio global de efecto multitrayectoria por estación, MP1-RMS, MP2-RMS. La línea roja muestra el valor máximo permisible por el IGS para la cantidad de efecto multitrayectoria.....                            | 54 |
| <b>Figura 25.</b> Promedio global de la relación señal-ruido por estación, SNR1 y SNR2. ....                                                                                                                                         | 59 |
| <b>Figura 26.</b> Promedio global de saltos de ciclo por estación, CSR.....                                                                                                                                                          | 62 |
| <b>Figura 27.</b> Promedio global de integridad por estación. ....                                                                                                                                                                   | 64 |
| <b>Figura 28.</b> Series temporales de los índices de calidad para la estación MPR1. ....                                                                                                                                            | 66 |
| <b>Figura 29.</b> Localización de la estación MPR1.....                                                                                                                                                                              | 67 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 30.</b> Series temporales de los índices de calidad para la estación MMX1. ....                                                                                                                                                                                                                                    | 68 |
| <b>Figura 31.</b> Localización de la estación MMX1. ....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 68 |
| <b>Figura 32.</b> Series temporales de los índices de calidad para la estación MEXI. ....                                                                                                                                                                                                                                    | 69 |
| <b>Figura 33.</b> Monumento y vista general de la estación MEXI. Fuente (CORS,2020).<br>.....                                                                                                                                                                                                                                | 70 |
| <b>Figura 34.</b> Series temporales de los índices de calidad para la estación MTY2.....                                                                                                                                                                                                                                     | 71 |
| <b>Figura 35.</b> Monumento y vista general de la estación MTY2. Fuente: (CORS,2020).<br>.....                                                                                                                                                                                                                               | 71 |
| <b>Figura 36.</b> Series temporales de los índices de calidad para la estación TNMT. ....                                                                                                                                                                                                                                    | 72 |
| <b>Figura 37.</b> Localización y vista 3D de la estación TNMT.....                                                                                                                                                                                                                                                           | 73 |
| <b>Figura 38.</b> Series temporales de los índices de calidad para la estación PENA. ....                                                                                                                                                                                                                                    | 74 |
| <b>Figura 39.</b> Monumento y vista a) Norte, b) Sur, c) Este y d) Oeste de la estación<br>PENA. ....                                                                                                                                                                                                                        | 74 |
| <b>Figura 40.</b> Series temporales de los índices de calidad para la estación TNCM. ....                                                                                                                                                                                                                                    | 75 |
| <b>Figura 41.</b> Monumento y vista a) Norte, b) Sur y c) Oeste de la estación TNCM. .                                                                                                                                                                                                                                       | 76 |
| <b>Figura 42.</b> Monumento y vista a) Norte, b) Sur, c) Este y d) Oeste de la estación<br>PJZX. ....                                                                                                                                                                                                                        | 76 |
| <b>Figura 43.</b> Series temporales de los índices de calidad para la estación PJZX. ....                                                                                                                                                                                                                                    | 77 |
| <b>Figura 44.</b> Series temporales de los índices de calidad para la estación INEG. ....                                                                                                                                                                                                                                    | 78 |
| <b>Figura 45.</b> Monumento y vista general de la estación INEG, (21/07/2011).....                                                                                                                                                                                                                                           | 78 |
| <b>Figura 46.</b> Variables que cumplen los estándares establecidos por el IGS. Se asignan<br>los valores de: MP1 = 1; MP2 = 1, SNR1 = 1; SNR2 = 1; CSR = 1; INT = 1, si las<br>variables se cumplen. ....                                                                                                                   | 79 |
| <b>Figura 47.</b> Localización de estaciones geodésicas para estimación de velocidades y<br>posicionamiento. Modelo de Relieve Global ETOPO1 (NOAA, 2008). Mapa<br>generado mediante Generic Mapping Tools (Wessel <i>et al.</i> , 2019).....                                                                                | 81 |
| <b>Figura 48.</b> Velocidad de las estaciones INEG y MPR1. Modelo de Relieve Global<br>ETOPO1 (NOAA, 2008). Mapa generado mediante Generic Mapping Tools (Wessel<br><i>et al.</i> , 2019). ....                                                                                                                              | 83 |
| <b>Figura 49.</b> Desviaciones estándar de las soluciones diarias en las componentes Norte,<br>Este y Altura a) estación INEG, b) estación MPR1.....                                                                                                                                                                         | 84 |
| <b>Figura 50.</b> Comparativa de los Valores CEP95 y EPV95 de acuerdo a INEGI (2010).<br>.....                                                                                                                                                                                                                               | 85 |
| <b>Figura 51.</b> Series temporales del análisis de calidad y las desviaciones estándar de<br>las soluciones diarias de la estación INEG. ....                                                                                                                                                                               | 87 |
| <b>Figura 52.</b> Series temporales del análisis de calidad y las desviaciones estándar de<br>las soluciones diarias de la estación MPR1. ....                                                                                                                                                                               | 87 |
| <b>Figura 53.</b> Comparativa de los valores de exactitud posicional (CEP95 y EPV95)<br>procesado con software científico GAMIT/GLOBK y el número de variables que<br>cumple cada estación, derivado del análisis de calidad en función de los estándares<br>de IGS. ....                                                    | 88 |
| <b>Figura 54.</b> Series temporales de posición N, E, U ajustadas de la estación INEG..                                                                                                                                                                                                                                      | 89 |
| <b>Figura 55.</b> Series temporales de posición N, E, U ajustadas de la estación MPR1.                                                                                                                                                                                                                                       | 90 |
| <b>Figura 56.</b> Serie temporal de la estación INEG, donde se muestra los desplazamientos<br>co-sísmicos de cada componente (N, E, U). La línea magenta vertical, hace referencia<br>al sismo del 19 de septiembre de 2017 (7.1 M <sub>w</sub> ) localizado a 8 Km al noroeste de<br>Chiautla de Tapia, Puebla, México..... | 91 |

## ÍNDICE DE TABLAS

PÁG

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> Principales características de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite .....                            | 8  |
| <b>Tabla 2.</b> Bloques del segmento espacial de la constelación GPS .....                                                       | 9  |
| <b>Tabla 3.</b> Bloques del segmento espacial de la constelación GLONASS .....                                                   | 12 |
| <b>Tabla 4.</b> Productos finales IGS. Fuente: Ostini (2010).....                                                                | 19 |
| <b>Tabla 5.</b> Símbolos en el reporte de resumen .....                                                                          | 27 |
| <b>Tabla 6.</b> Indicador Estandarizado S/N. Fuente: Gurtner <i>et al.</i> (2013).....                                           | 31 |
| <b>Tabla 7.</b> Parámetros y características del procesamiento .....                                                             | 38 |
| <b>Tabla 8.</b> Disponibilidad de días por año .....                                                                             | 47 |
| <b>Tabla 9.</b> Estadística de las variaciones del efecto multitrayectoria MP1-RMS.....                                          | 49 |
| <b>Tabla 10.</b> Estadística de las variaciones del efecto multitrayectoria MP2-RMS.....                                         | 51 |
| <b>Tabla 11.</b> Estadística de las variaciones de la relación señal-ruido SNR1 .....                                            | 55 |
| <b>Tabla 12.</b> Estadística de las variaciones de la relación señal-ruido SNR2 .....                                            | 57 |
| <b>Tabla 13.</b> Estadística de las variaciones de los saltos de ciclo por cada 1000 observaciones (CSR) .....                   | 60 |
| <b>Tabla 14.</b> Estadística del porcentaje de Integridad .....                                                                  | 63 |
| <b>Tabla 15.</b> Estándares internacionales para el análisis de calidad.....                                                     | 65 |
| <b>Tabla 16.</b> Estadística de los índices de calidad.....                                                                      | 65 |
| <b>Tabla 17.</b> Estaciones analizadas.....                                                                                      | 80 |
| <b>Tabla 18.</b> Resumen de la posición estimada con GLOBK 10.71 .....                                                           | 82 |
| <b>Tabla 19.</b> Resumen de la velocidad estimada con GLOBK 10.71 .....                                                          | 82 |
| <b>Tabla 20.</b> Cálculo de Circulo de Error Probable y Exactitud Posicional Vertical...                                         | 85 |
| <b>Tabla A1.</b> Estadística del análisis de calidad de las 65 estaciones GPS de operación continua seleccionadas en México..... | 98 |

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Globales de Navegación Satelital GNSS (por sus siglas en inglés), están basados en un conjunto de satélites, los cuales proveen de coordenadas geocéntricas tridimensionales a un punto de medición (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008), dichos sistemas han sido ampliamente utilizados en la navegación, el posicionamiento y en la determinación precisa de la medida del tiempo (Leick *et al.*, 2015), algunas aplicaciones son: estudio de los fenómenos atmosféricos y pronósticos climatológicos (MacDonald *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020), localización y navegación (Leick *et al.*, 2015), manejo de recursos y evaluación de riesgos (terremotos, sismos, deslizamientos de laderas, deformación de la corteza) (Márquez *et al.*, 2009; Yanlong *et al.*, 2012; Murray *et al.*, 2019), trabajos de modelación geológica y geomorfológica (Sonnette *et al.*, 2010; Smith *et al.*, 2011), recursos hídricos (Foster, 2015), topográfica en el monitoreo de estructuras (Cao *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020). Siendo parte de los GNSS, el Sistema de Posicionamiento Global, GPS (por sus siglas en inglés), ampliamente utilizado por su robustez, cantidad de satélites, continuidad y aplicaciones, tanto civiles como militares, aunque en sus inicios fue de objetivo militar. En el año 2011 la constelación rusa, *GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM* GLONASS (por sus siglas en inglés), de acuerdo con Leick *et al.* (2015), se convierte en la segunda constelación en operación global junto con GPS, teniendo al menos 24 satélites en operación. También se han desarrollado nuevos sistemas de navegación y aumentación de señal tales como GALILEO, BeiDou, SBAS, IRNSS, y QZSS que aumentan la cantidad de satélites y señales, lo que beneficia en una mayor cobertura en los planos espaciales, mejora la geometría de los satélites y disminuye la dilución de la precisión (DOP), (Hegarty, 2012; Montenbruck *et al.*, 2017).

De acuerdo con Suárez (2012), el sistema GPS es la herramienta para la modernización de las redes geodésicas globales, nacionales y regionales con fines científico-técnicos. Hoy en día el *International GNSS Service* (IGS, por sus siglas en inglés), cuenta con más de 500 estaciones de operación continua en todo el mundo (Montenbruck *et al.*, 2017), siendo parte de su misión el apoyo al marco de referencia terrestre a través de la más alta calidad de los datos GNSS (IGS, 2019a). Existen más redes multipropósito como: las

Estaciones de Referencia de Operación Continua (CORS, por sus siglas en inglés) que involucra organizaciones gubernamentales, académicas y privadas. *Network of the Americas* (NOTA), adscrita a *University NAVstar Consortium* (UNAVCO), consorcio encargado de monitorear diferentes redes geodésicas de operación continua para conocer el estado en el que se encuentran, así como proporcionar de manera gratuita los datos que genera. Así mismo, redes regionales que están asociadas a los centros de calidad de la *International Association of Geodesy* (IAG), como la red EPN (*EUREF Permanent Network*) (Bruyninx *et al.*, 2019); asociadas con CORS, *Australian Regional GNSS Network* (ARGN), *South Pacific Regional GNSS Network*, (SPRGN), y *AuScope Network* que son redes de Australia.

México no es un país exento de esta tecnología ni tampoco ajeno a organismos internacionales como el IGS, NGS, UNAVCO y CORS. Por esta razón, es posible el desarrollo de trabajos científico-técnicos de alta precisión para evaluar el comportamiento geodinámico del territorio mexicano, teniendo en consideración el análisis de calidad de las estaciones de monitoreo continuo en las experimentaciones (Franco, 2006; Cabanillas-Zavala *et al.*, 2020).

En este sentido, la calidad de los datos crudos tiene gran relación con el posicionamiento preciso (Yeh *et al.*, 2008) y es así que las redes de monitoreo continuo alcanzan un nivel de confiabilidad para los usuarios, al saber que existe un análisis de calidad y monitoreo para la verificación del correcto funcionamiento (Brown *et al.*, 2002; Yeh *et al.*, 2008; García-Armenteros, 2020).

Con base en lo anterior, se realiza un análisis de calidad de las estaciones de libre acceso en la república mexicana, implementando el software TEQC (*Traslate/Edit/Quality Check*) (Estey y Meertens, 1999), considerando cuatro parámetros a evaluar, los cuales son: El efecto multitrayectoria en las bandas  $L_1$  y  $L_2$  correspondientes a la constelación de GPS, cantidad de saltos de ciclo (discontinuidad en la fase portadora), integridad (número de observaciones) y finalmente, relación señal-ruido (rendimiento y captura de la señal en el receptor GNSS), evidenciando integridad, disponibilidad y seguridad de las estaciones analizadas (Yeh *et al.*, 2007; Herrada *et al.*, 2010; Souto, 2014; Xiao *et al.*, 2020).

Finalmente se analizan las series temporales creadas por medio de software científico GAMIT/GLOBK (Herring *et al.*, 2018), del mejor y peor resultado estadístico de efecto

multitrayectoria, relación señal-ruido, saltos de ciclo e integridad, que reflejan la calidad de las coordenadas calculadas así como la calidad de las observaciones GPS, evaluando así, el impacto en el posicionamiento preciso en los casos extremos de los cuatro parámetros a evaluar con base en la norma técnica de estándares de exactitud posicional vigente en México (INEG, 2010), reflejando estabilidad en la estación o el caso contrario durante el periodo evaluado (Takacs *et al.*, 2001).

## 1.1 Planteamiento del problema

Actualmente los GNSS, son fundamentales para el mantenimiento del Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) en sus diferentes épocas, y éste a su vez, para la densificación de redes geodésicas globales y locales (Beutler, 2004; Dow *et al.*, 2009; Ostini, 2012), siendo así, redes multipropósito, gracias a las altas precisiones obtenidas, no obstante la señal se ve afectada por algunos fenómenos como refracción ionosférica, retraso troposférico, variación del centro de fase de la antena, multitrayectoria (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2016).

Dos componentes claves en la infraestructura geodésica son; el análisis de las observaciones crudas y el monitoreo de estabilidad (Brown *et al.*, 2002); también se muestra la estabilidad de recepción de la señal, saltos de ciclo y el efecto multitrayectoria como los principales índices de afectación al posicionamiento preciso (Yeh *et al.*, 2007, 2008); De acuerdo con Franco-Patiño *et al.* (2013) determina el efecto multitrayectoria como el degradador de señal de mayor relevancia en el impacto del posicionamiento preciso, mientras que Álvarez (2019), determina que las mayores variaciones son en la altitud, causadas por atenuación troposférica.

En este mismo énfasis el presente trabajo tiene por objeto el análisis de calidad de 65 estaciones de libre acceso en territorio mexicano considerando un periodo histórico de 10 años para determinar si las estaciones analizadas puedan ser consideradas para fines geodinámicos, como lo es la deformación de la corteza, con base en el análisis de calidad de los datos crudos y su impacto en la precisión del posicionamiento, evaluando estadísticamente los efectos de multitrayectoria, saltos de ciclo, integridad y la relación señal-ruido, a través del tratamiento de los archivos RINEX (Receiver Independent Exchange Format) de cada estación con el uso de efemérides transmitidas, implementando el software TEQC (Estey y Meertens, 1999) desarrollado por UNAVCO.

Finalmente, se realizan las series temporales en GAMIT/GLOBK, del mejor y peor resultado del efecto multitrayectoria derivado del análisis de calidad, para evaluar el impacto en la precisión y la relación de la calidad de los datos crudos y el posicionamiento preciso, mostrando el comportamiento de dichas estaciones en relación a los cuatro parámetros de calidad para este trabajo, reflejando el grado de estabilidad durante el periodo evaluado.

## 1.2 Justificación

Las estaciones geodésicas de monitoreo continuo GNSS, han marcado un punto de inflexión en el desarrollo de la infraestructura geodésica por la amplia gama de uso y optimización de actividades a nivel global y regional (Sonnette *et al.*, 2010; Smith *et al.*, 2011; Foster, 2014; Souto, 2014; Cao *et al.*, 2019; Murray *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020).

De acuerdo con Hilla *et al.* (2004); Vázquez *et al.* (2012); Vázquez *et al.* (2013) y Franco-Patiño *et al.* (2013) enfatizan el efecto multitrectoria como factor de impacto en la precisión del posicionamiento y una fuente de error crítica, dependiente del tiempo.

A través del análisis de calidad se busca determinar que estaciones son en mayor o menor medida afectadas por multitrectoria, saltos de ciclo, integridad y la relación señal-ruido, como parámetros de calidad en la recepción de la señal (Yeh *et al.*, 2007; Yeh *et al.*, 2008; Herrada *et al.*, 2010), además, relacionar estos factores al posicionamiento preciso en función de la generación de series temporales en las componentes este, norte y altura de la estación geodésica de libre acceso que presente mayor y menor afectación en México, teniendo así, dos estaciones a evaluar respecto a la confiabilidad y estabilidad de cada estación, en un adecuado comportamiento de la recepción de la señal GPS y el impacto que el efecto multitrectoria genera en el resultado esperado del posicionamiento (Brown *et al.*, 2002), siendo los casos extremos, mejor y peor comportamiento, con base al análisis estadístico del efecto multitrectoria.

En México existen pocos trabajos realizados de esta naturaleza, donde sólo ha sido analizado el efecto multitrectoria (Vázquez *et al.*, 2013); no obstante, otros parámetros son necesarios para determinar el impacto en el posicionamiento preciso. Por ello, el estudio se centra en el análisis de calidad considerando multitrectoria, saltos de ciclo, integridad y relación señal-ruido considerando sólo la constelación GPS desde el año 2010 a enero de 2020 con la finalidad de evaluar el impacto en el posicionamiento preciso, derivado del análisis de calidad, procesando el mejor y peor escenario de multitrectoria, a través de software científico GAMIT/GLOBK, y así evaluar el estado de los resultados.

## **1.3 Objetivos**

Con la tendencia de México en la implementación de redes geodésicas locales y regionales en apoyo y acceso al marco de referencia internacional (ITRF), se plantean los siguientes objetivos en relación a los sistemas globales de navegación por satélite.

### **1.3.1 Objetivo general**

- Analizar la calidad de las observaciones GPS y su impacto en el posicionamiento preciso de las redes geodésicas GNSS de libre acceso en México.

### **1.3.2 Objetivos particulares**

- Seleccionar las estaciones GNSS de libre acceso en México.
- Realizar el estudio estadístico del efecto multitrayectoria de las observaciones GPS.
- Realizar el estudio estadístico de la pérdida de saltos de ciclo en las estaciones GPS.
- Determinar la integridad de las estaciones GNSS.
- Determinar el grado de la relación señal-ruido (SNR).
- Establecer y homogeneizar el intervalo de observación de las estaciones GNSS.
- Crear las series temporales del efecto multitrayectoria, la relación SNR, pérdida de saltos de ciclo e integridad para las estaciones GNSS.
- Determinar si son estaciones aptas para ser consideradas en un estudio de deformación de la corteza acorde a la normatividad del IGS.
- Comparar la estación que representa una menor afectación por efecto multitrayectoria contra la peor, esto procesando con un software científico.
- Comparar la calidad de los RINEX y la precisión del posicionamiento en función de normatividad internacional y nacional.

## CAPÍTULO II

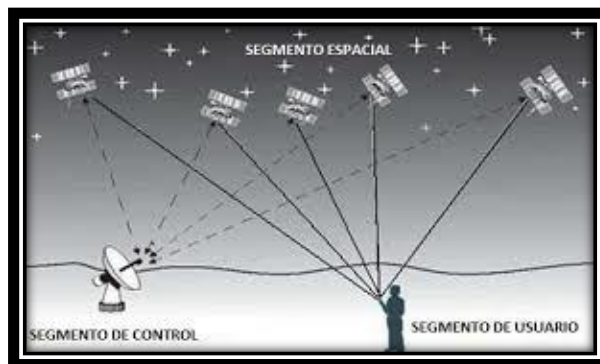
### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 GNSS

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite, son aquellos sistemas capaces de determinar espacial y temporalmente cualquier punto sobre o cercano a la superficie terrestre haciendo uso de una o más constelaciones satelitales a través del seguimiento y recepción de las señales transmitidas por los satélites artificiales (Hegarty *et al.*, 2008; Álvarez, 2008; Ostini, 2012).

Por otro lado, los GNSS, constan de tres componentes denominados segmentos (Figura 1), el segmento espacial que hace referencia a la constelación de satélites orbitando la superficie terrestre que envía la señal a través de ondas electromagnéticas al menos en dos frecuencias y proveen al receptor de las efemérides del satélite. Posteriormente el segmento control o segmento terrestre que es el encargado del monitoreo del segmento espacial, actualizando, corrigiendo y ajustando las órbitas de los satélites mantenido saludable el sistema. Este segmento consiste en un grupo de estaciones maestras y de monitoreo dispersas ya sea local o globalmente para el apoyo en la comunicación con los satélites. Finalmente, el segmento usuario consiste en los receptores GNSS tanto militares como civiles ya sean terrestres, marítimos, aéreos y espaciales (Teunissen *et al.*, 2017; Grewal *et al.*, 2020).

De acuerdo con Odolinski *et al.* (2020), para el año 2024 se tendrá acceso a un total de 110 satélites en un modelo multi-GNSS en diferentes frecuencias.



**Figura 1.** Segmentos en los GNSS. Fuente: Llarana *et al.* (S/A)

Generalmente los GNSS adoptan una configuración en su órbita, siendo para cobertura global los de órbita terrestre media (MEO) y como complemento en los sistemas regionales las órbitas de inclinación geosincrónicas (IGSO) y las geoestacionarias (GEO), por sus siglas en inglés. Actualmente son seis los GNSS en operación (Tabla 1): el sistema estadounidense GPS, el ruso GLONASS, BeiDou de China, Galileo de la Unión Europea y dos más como sistemas regionales Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) de Japón, e Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) perteneciente a la india, y finalmente los sistemas de aumento basados en satélites (SBAS), (Hegarty, 2012; Teunissen *et al.*, (2017); Johnston *et al.*, 2017). Con base en Hofmann *et al.* (2008) el aumento en los GNSS puede incrementar el número de observaciones y el número de satélites, por lo que la dilución de la precisión (DOP) decrece y aumenta la precisión del posicionamiento, beneficiando también la disponibilidad, integridad y continuidad dadas las mediciones redundantes.

**Tabla 1.** Principales características de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite

| <i>Sistema</i>                     | <i>GPS</i>                                                                 | <i>GLONASS</i>                                                              | <i>BeiDou</i>                                                               | <i>Galileo</i>                                                                                         | <i>QZSS</i>                                                                                          | <i>IRNSS/NavIC</i>                                                   |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <i>Órbita</i>                      | MEO                                                                        | MEO                                                                         | MEO,IGSO, GEO                                                               | MEO                                                                                                    | IGSO,GEO                                                                                             | IGSO, GEO                                                            |
| <i>Número nominal de satélites</i> | 24                                                                         | 24                                                                          | 27,3,5                                                                      | 30                                                                                                     | 3,1                                                                                                  | 4,3                                                                  |
| <i>Plano orbital</i>               | 6                                                                          | 3                                                                           | 3                                                                           | 3                                                                                                      | IGSO                                                                                                 | IGSO                                                                 |
| <i>Inclinación orbital</i>         | 56°                                                                        | 64.8°                                                                       | 55°                                                                         | 56°                                                                                                    | 43°                                                                                                  | 29°                                                                  |
| <i>Servicio</i>                    | SPS,PPS                                                                    | SPS,PPS                                                                     | OS,AS,WADS,SMS                                                              | OS,CS,PRS                                                                                              | GCS, GAS, PRS, EWS, MCS                                                                              | SPS,RS                                                               |
| <i>Inicio del servicio</i>         | Dic.1993                                                                   | Sep. 1993                                                                   | Dic. 2012                                                                   | 2016/2017                                                                                              | 2018                                                                                                 | 2016                                                                 |
| <i>Origen</i>                      | USA                                                                        | Rusia                                                                       | China                                                                       | Europa                                                                                                 | Japón                                                                                                | India                                                                |
| <i>Cobertura</i>                   | Global                                                                     | Global                                                                      | Global                                                                      | Global                                                                                                 | Regional este de Asia y Oceanía                                                                      | $-30^\circ < \varphi < 50^\circ$<br>$30^\circ < \lambda < 130^\circ$ |
| <i>Frecuencias (MHz)</i>           | L <sub>1</sub> 1575.42<br>L <sub>2</sub> 1227.60<br>L <sub>5</sub> 1176.45 | L <sub>1</sub> 1602.00<br>L <sub>2</sub> 1246.00<br>L <sub>3</sub> 1202.025 | B <sub>1</sub> 1561.098<br>B <sub>2</sub> 1207.14<br>B <sub>3</sub> 1268.52 | E <sub>1</sub> 1575.42<br>E <sub>5a</sub> 1176.45<br>E <sub>5b</sub> 1207.14<br>E <sub>6</sub> 1278.75 | L <sub>1</sub> 1575.42<br>L <sub>2</sub> 1227.60<br>L <sub>5</sub> 1176.45<br>E <sub>6</sub> 1278.75 | L <sub>5</sub> 1176.45<br>S 2492.028                                 |

SPS: Standard Position Service; PPS: Precise Positioning Service; OS: Open Service; AS: Authorized Service; WADS: Wide Area Differential Service; SMS: Short Message Service; CS: Commercial Service; PRS: Public Regulated Service; GCS: GPS Complementary Service; GAS: GPS Augmentation Service; EWS: Early Warning Service; MCS: Message Communications Service; PS: Precision Service; RS: Restricted Service

### 2.1.1 GPS

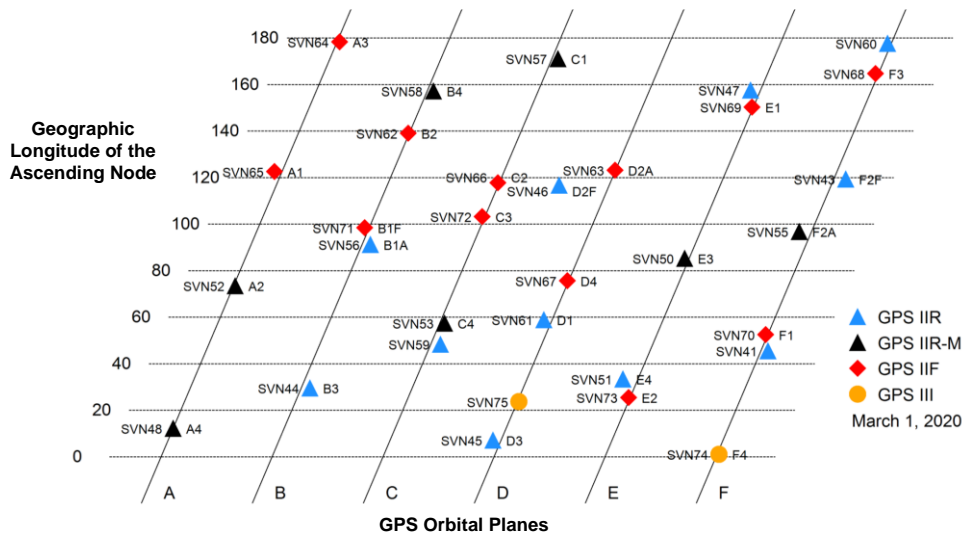
El Sistema de Posicionamiento Global, es un sistema de navegación satelital operado por el Departamento de Defensa (DoD) de los Estados Unidos de Norteamérica, cuyo origen está en el sistema TRANSIT que inicio en los años de 1960 con enfoque militar, siendo éste de cobertura global, pero sin acceso las 24 horas del día (Álvarez, 2008).

De acuerdo con Álvarez (2008) y Ostini (2012), el nombre original del proyecto es NAVSTAR, GPS (Navigation Satellite Timing and Ranking, Global Positioning System), iniciado en diciembre de 1973, siendo el primer lanzamiento hasta el año 1978, completando 11 satélites hasta el año 1985, pertenecientes al Bloque I con órbita terrestre media (MEO) a una altura de 20,200 km con ángulo de inclinación de  $63^\circ$ , con tiempo de vida estimado de 5 años durando más de lo previsto. La siguiente generación de satélites fue el denominado Bloque II, siendo lanzados 9 satélites del año 1989 a 1990, posteriormente se lanzaron 19 satélites del Bloque IIA entre los años 1990 y 1997, del año 1996 al 2004 se enviaron 13 del Bloque IIR, en el año 2005 se lanzaron 8 satélites del Bloque IIR-M, el Bloque IIF cuenta con 12 satélites en operación lanzados entre 2010 y 2016, actualmente el GPS III/IIIF tuvo lugar en el año 2018 al 2020 preparando el lanzamiento del tercer satélite para junio siendo sólo uno de ellos en operación (Ostini, 2012; GPS, 2020). En febrero del 2020 el segmento espacial cuenta con 31 satélites operacionales, sin tomar en cuenta los satélites fuera de órbita ni los repuestos en espera (Tabla 2).

**Tabla 2.** Bloques del segmento espacial de la constelación GPS

|                          | BLOQUE IIA                                                              | BLOQUE IIR                                                              | BLOQUE IIR-M                                                                   | BLOQUE IIF                                                                            | GPS III/IIIF                                                                                             |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SATÉLITES EN OPERACIÓN   | 0                                                                       | 11                                                                      | 7                                                                              | 12                                                                                    | 1                                                                                                        |
| SEÑAL                    | Código C/A en $L_1$ (Civil)<br>Código P(Y) en $L_1$ y $L_2$ , (Militar) | Código C/A en $L_1$ (Civil)<br>Código P(Y) en $L_1$ y $L_2$ , (Militar) | Código C/A en $L_1$ (Civil)<br>Código P(Y) en $L_1$ y $L_2$ , $L_2$ ( $L_2C$ ) | Código C/A en $L_1$ (Civil)<br>Código P(Y) en $L_1$ y $L_2$ , $L_2$ ( $L_2C$ ), $L_5$ | Código C/A en $L_1$ (Civil)<br>Código P(Y) en $L_1$ y $L_2$ , $L_2$ ( $L_2C$ ), $L_5$ , $L_1$ ( $L_1C$ ) |
| AÑOS DE LANZAMIENTO      | 1990-1997                                                               | 1997-2004                                                               | 2005-2009                                                                      | 2010-2016                                                                             | 2018- ...                                                                                                |
| TIEMPO DE VIDA DE DISEÑO | 7.5 años                                                                | 7.5 años                                                                | 7.5 años                                                                       | 12 años                                                                               | 15 años                                                                                                  |

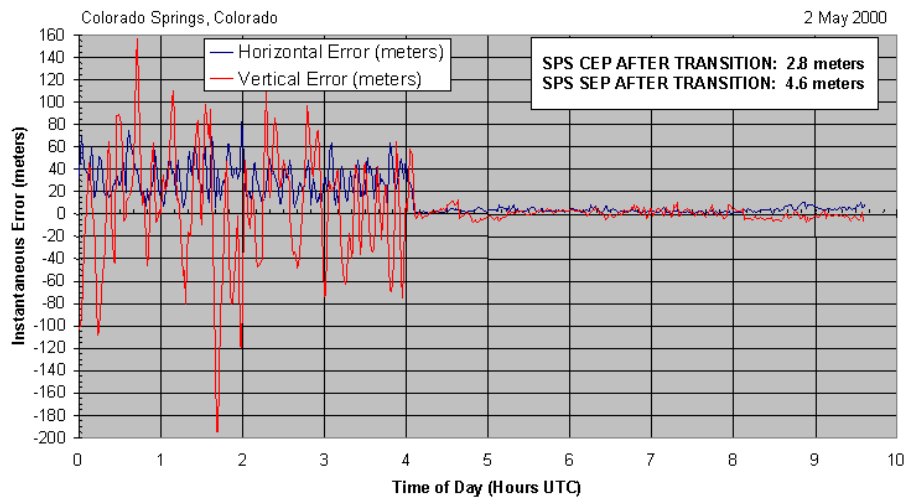
La constelación GPS, consta de 24 satélites localizados en 6 planos orbitales con una inclinación de  $55^\circ$  con respecto al ecuador con un rango de operación en  $\pm 3^\circ$  (Team, 2014), cada plano cuenta con 4 satélites y de acuerdo con Álvarez (2008), pueden ser visibles en cualquier punto y momento entre 5 y 11 satélites con geometría favorable con un tiempo máximo observable de un poco más de 4 horas. La constelación GPS está diseñada con espaciado asimétrico en función de la latitud entre satélites (Figura 2), mejorando el rendimiento y robustez del sistema contra fallas de los mismos satélites (Hegarty *et al.*, 2008).



**Figura 2.** Localización de Satélites y Planos Orbitales GPS. Fuente: (U.S. Coast Guard Navigation Center, 2020).

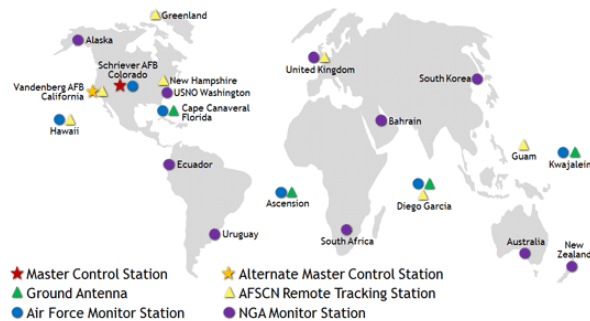
Actualmente GPS modula en tres frecuencias,  $L_1$  (1575.42 MHz),  $L_2$  (1227.60 MHz) y  $L_5$  (1176.45 MHz), de acuerdo con Hofmann *et al.* (2008), el código C/A (Coarse/Adquisition), de uso civil, sólo se modula en la frecuencia  $L_1$ , mientras que el código P, de uso militar y usuarios autorizados, se modula tanto en  $L_1$  como en  $L_2$ . El código C/A fue diseñado por el Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS) y el código P por el Servicio de Posicionamiento Preciso (PPS), siendo estos, los dos niveles de servicio de GPS. El SPS es el servicio de tiempo y posición para todo usuario a nivel global con precisiones de 100 m. en horizontal y 156 m. en vertical debido a la disponibilidad selectiva (SA), es decir, una degradación intencional de la señal previa al 2 de mayo de 2000 (Figura 3), quedando en desuso posterior a esta fecha mejorando la precisión, con al menos 4 satélites en vista de 10

a 20 m. El PPS es el servicio de alta precisión dirigido a usuarios autorizados, dando precisión de 2.2 m en horizontal y 27 m en vertical.



**Figura 3.** Precisión en la transición de la disponibilidad selectiva (SA). Fuente: (GPS.gov: Selective Availability, 2020).

El segmento control de GPS consiste en infraestructura terrestre que rastrea los satélites GPS, monitorean sus transmisiones, analizan y envían comandos y datos a la constelación. El Segmento de Control Operativo (OCS), por sus siglas en inglés, lo forma una estación maestra (MCS) y una estación maestra alternativa, once antenas de comando y control (GA) y dieciséis sitios de monitoreo (MS) como se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Segmento control, GPS. Fuente:(GPS.gov: Space Segment, 2020).

El segmento control hacer referencia a los equipos para recepcionar las señales emitidas por los satélites, generalmente una antena y un receptor o formando un sólo equipo (Huerta *et al.*, 2005).

## 2.1.2 GLONASS

GLONASS es el sistema de navegación global operado por la Federación Rusa, que está basado en su predecesor, el sistema de navegación y comunicación denominado Tsydon/Tsikada introducido en 1957 (Revnivykh *et al.*, 2017).

El desarrollo de GLONASS comenzó en el año de 1970, basado en la determinación de posición instantánea usando diferencias de tiempo entre receptor y satélites con tiempo sincronizado. El 12 de octubre de 1982 el primer conjunto de tres satélites fue lanzado sin entrar en operación, no fue sino hasta el 24 de septiembre de 1993 cuando el sistema inicio con capacidad operacional de 12 satélites siendo hasta el año de 1995 declarado con capacidad operacional completa, es decir, 24 satélites operativos (Hofmann *et al.*, 2008; Revnivykh *et al.*, 2017). No obstante de acuerdo con Hegarty (2012), estos satélites mostraron un tiempo de vida corto llegando a ser entre 6 a 8 satélites disponibles para el año 2001. Con el desarrollo de GLONASS-M, el tiempo de vida se extendió, recuperando el sistema a operativo hasta el año 2011.

GLONASS transmite señales de navegación en la banda L, haciendo referencia a la banda  $L_1$  y  $L_2$ , en un acceso de división multifrecuencia (FMDA) diseñado para estas dos bandas y el contraste utilizado por GPS, el acceso de división multicódigo (CDMA). Cada satélite transmite dos tipos de señales, la señal abierta de precisión estándar y la señal encriptada de alta precisión. En la Tabla 3 se muestran algunas características de cada bloque puesto en órbita.

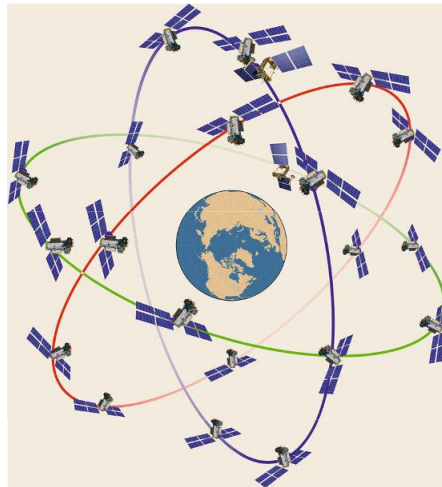
**Tabla 3.** Bloques del segmento espacial de la constelación GLONASS

| PARÁMETRO          | GLONASS    | GLONASS-M  | GLONASS-M+ | GLONASS-K1 | GLONASS-K1+ | GLONASS-K2      |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-----------------|
| AÑO DE LANZAMIENTO | 1982       | 2003       | 2014       | 2012       | 2017        | 2016            |
| FMDA SEÑAL         | $L_1, L_2$ | $L_1, L_2$ | $L_1, L_2$ | $L_1, L_2$ | $L_1, L_2$  | $L_1, L_2$      |
| CDMA SEÑAL         | -          | -          | $L_3$      | $L_3$      | $L_2, L_3$  | $L_1, L_2, L_3$ |
| TIEMPO DE VIDA     | 3          | 7          | 7          | 10         | 10          | >10             |
| RELOJ              | Rb, Cs     | Cs         | Cs         | Cs, Rb     | Cs, Rb      | Cs, Rb          |

La primera generación de satélites transmitía en la portadora  $L_1$  sólo la señal civil de precisión estándar, y la señal de precisión en ambas portadoras. El bloque GLONASS-M transmite adicionalmente en  $L_2$  la señal de precisión estándar. Actualmente el GLONASS-K incluye la señal CMDA que hace referencia a la banda  $L_3$ , siendo las frecuencias portadoras de  $L_1= 1602.00$  MHz;  $L_2=1246.00$  MHz;  $L_3=1202.025$  MHz.

Los dos servicios que provee, de acuerdo con Revnivykh *et al.* (2017) son: un servicio abierto sin señales encriptadas en las bandas  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$ , con disponibilidad global sin limitación alguna para cualquier usuario y un servicio sólo para personal autorizado con señales encriptada en las bandas  $L_1$  y  $L_2$ . A pesar de haber señales encriptadas el sistema, nunca contemplo en el diseño algo similar a la disponibilidad selectiva como en el sistema GPS que degradara la precisión.

El segmento espacial está constituido nominalmente por 24 satélites operacionales distribuidos en tres planos orbitales separados  $120^\circ$  con 8 satélites en cada plano (Figura 5). La inclinación orbital es aproximadamente de  $65^\circ$  con respecto al ecuador, en una órbita terrestre media (MEO), beneficiando al usuario en mayor cobertura celeste con un espacio de visibilidad reducido alrededor del polo celeste.



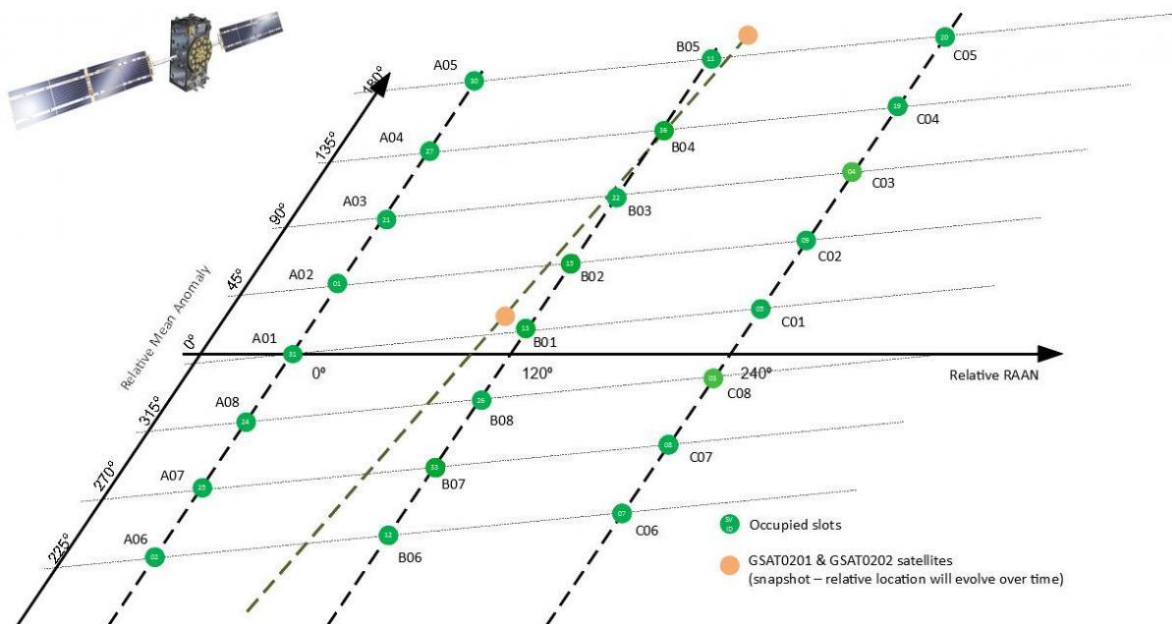
**Figura 5.** Segmento espacial GLONASS. Fuente: (Revnivykh *et al.*, 2017).

Los parámetros del modelo terrestre PZ-90 son utilizados para la determinación de las órbitas y el cálculo de las efemérides, no obstante, varios esfuerzos han sido realizados para estabilizar la transformación al Sistema Geodésico Global, WGS84, siendo la del año

2007 una notable mejora y consistencia de las órbitas transmitidas con el WGS84 y el ITRF (Hegarty, 2008; Revnivykh *et al.*, 2017).

### 2.1.3 GALILEO

El Sistema de Navegación Global Europeo denominado Galileo puso a disposición lo más pronto posible, su servicio de posicionamiento satelital a nivel global después de completar la misión en el año 2016. La constelación de Galileo está definida en una órbita terrestre media (MEO) con 24 satélites en tres planos orbitales separados  $120^\circ$  con una inclinación orbital de  $56^\circ$  respecto al ecuador, incluyendo en cada plano 8 satélites distribuidos de manera uniforme con separación de  $45^\circ$  como se muestra en la Figura 6. (European Commission, 2019).



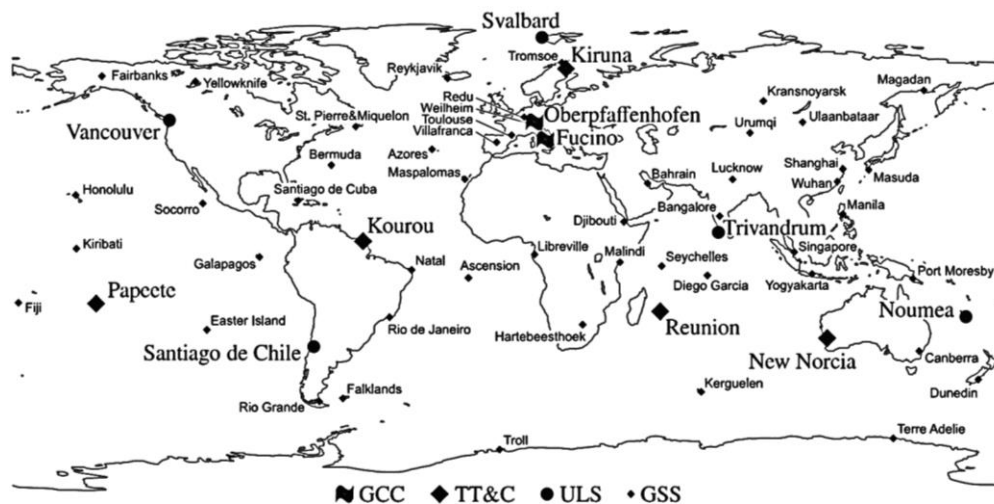
**Figura 6.** Localización y planos orbitales de Galileo. Fuente: (EGNSS Service Centre, 2020).

Con base en Tarrío Mosquera (2018) y European Commission (2019) el sistema Galileo ofrece cinco niveles de servicios los cuales son: el Servicio Abierto (*Open Service*, OS) de posicionamiento y tiempo para cualquier usuario; el Servicio Público Regulado (PRS), restringido a autoridades de gobierno y usuarios autorizados; el Servicio de Alta Precisión, servicio complementario al OS, mejorando la precisión en el posicionamiento a nivel sub métrico; el Servicio de Autenticación Comercial también complementario al OS

dando control de acceso y función de autenticación de usuario; y el Servicio de Búsqueda y Rescate que contribuye a COSPAS-SARSAT, un sistema de alerta y detección de desastres para la búsqueda y rescate.

Las bandas de frecuencias en las que transmite el sistema Galileo son cuatro:  $E_1$  en 1575.420 MHz;  $E_6$  en 1278.750 MHz;  $E_{5a}$  en 1176.450 MHz y  $E_{5b}$  en 1207.140 MHz. Estas frecuencias han sido asignadas en el espectro del servicio de radionavegación satelital (RNSS) y sólo las frecuencias de  $E_{5a}$ ,  $E_{5b}$  y  $E_1$  en el espectro del servicio de radionavegación aeronáutico (ARNS), proveyendo de un adecuado ancho de banda para la transmisión de las señales de Galileo (European Global Navigation Satellite Systems Agency, 2016).

El segmento control, de acuerdo con Hofmann *et al.* (2008), lo conforman dos centros de control terrestre (GCC), cinco estaciones de control, telemetría y seguimiento (TT&C), nueve estaciones de enlace ascendente en la banda C (USL) y alrededor de 40 estaciones de sensor Galileo (GSS) como se muestra en la Figura 7.



**Figura 7.** Segmento control de la constelación Galileo. Fuente: (Hofmann *et al.*, 2008).

De acuerdo con European Commission (2019), el marco de referencia terrestre de Galileo (GTRF) es de realización independiente al sistema internacional de referencia terrestre (ITRS), basado en la determinación de coordenadas de los sensores de las estaciones de Galileo (GSS), alineado al marco de referencia terrestre internacional (ITRF), teniendo como resultado una diferencia menor a 3 cm en las coordenadas. Respecto al sistema de tiempo de Galileo (GST) es alineado con el Tiempo Atómico Internacional (TAI), el cual

requiere ser transformado al tiempo universal coordinado (UTC) realizando dicha transformación a través del mensaje de navegación del servicio abierto de Galileo.

## **2.2 Gestores y Redes geodésicas GNSS de libre acceso en México**

En México las redes geodésicas han sido de relevancia en el desarrollo y avance tecnológico del país, siendo de gran valor en la investigación para las geociencias a través de la materialización del Sistema Geodésico Nacional y el acceso gratuito a redes GNSS multipropósito de organismos internacionales como UNAVCO, NGS e IGS, mediante protocolos de transferencia de archivos (FTP).

*University NAVstar Consortium* (UNAVCO), no es una red geodésica, es un consorcio sin fines de lucro, creado en respuesta al desafío de aplicar GPS a las geociencias en el año de 1984 (Miller *et al.*, 2017). A este consorcio están adscritas diferentes redes geodésicas proporcionándolas de mantenimiento y monitoreo.

El *National Geodetic Survey* (NGS) en oficinas de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) administra la Red de Estaciones de Referencia de Operación Continua (CORS) siendo un esfuerzo multipropósito que involucra organizaciones tanto gubernamentales, académicas y privadas (National Geodetic Survey, 2018).

El Servicio Internacional de GNSS (IGS), es una organización encargada de proveer de una base disponible de productos, servicios y datos GNSS de alta calidad desde 1994 (IGS, 2019a) en apoyo al marco de referencia terrestre, investigación y observación terrestre, posicionamiento, navegación y determinación del tiempo, definiendo el marco de referencia global para aplicaciones científicas, comerciales y educacionales.

### 2.2.1 Redes adscritas a UNAVCO

La Red Transfronteriza, Terrestre y Atmosférica de Colaboración y Observación, TLALOCNet por sus siglas en inglés, que es una red geodésica y meteorológica en México para el estudio de tierra sólida y proceso atmosféricos enfocada en el sur y oeste del país, que apoya en el análisis de acumulación y liberación de tensión en las zonas de subducción, transformación de las fallas del golfo de California, deformación de la corteza y estimaciones de vapor de agua (Cabral-Cano *et al.*, 2018).

La red *The Plate Boundary Observatory*, PBO, que estudia la deformación de los límites de la placa del Pacífico y la Norteamericana en el oeste de los Estados Unidos y Alaska así como apoyo para entender la magnitud de los desastres naturales, comportamiento de terremotos y volcanes (Anderson *et al.*, 2006), en este trabajo se evalúan 7 estaciones en México pertenecientes a esta red.

La red *Continuously Operating Caribbean Observation Network*, COCONet fundada en el año 2010 bajo un enfoque científico por la Fundación Nacional de Ciencia (NSF) en busca de la comprensión de los riesgos naturales del Caribe, formada por UNAVCO, Universidad Purdue, Universidad de Puerto Rico y la Corporación Universitaria de Investigación Atmosférica (UCAR). Los productos generados son provistos por UNAVCO (Braun *et al.*, 2012), en este trabajo sólo es evaluada una estación perteneciente a esta red.

Bajo el actual *Geodetic Facility for the Advancement of Geoscience* (GAGE) ha integrado y federado redes GNSS y meteorológicas en una sola red Pan-Americana compuesta por PBO, TLALOCNet y COCONet denominada Red de las Américas (NOTA, por sus siglas en inglés) que comprende alrededor de 1278 estaciones continuas GPS/GNSS, siendo las tasas de muestreo de 15 s y de altas velocidades de 1, 2 y 5 Hz (1Hz = 1 muestreo por segundo).

### 2.2.2 Red de Estaciones de Referencia de Operación Continua

La CORS proporciona de manera gratuita datos GNSS para posicionamiento tridimensional, datos meteorológicos y aplicaciones geofísicas consistiendo en mediciones tanto de fase y código, con intervalos de muestreo de 30, 15, 5 o 1 s con ángulo de elevación de 5° y 0° preferentemente, no sólo para Estados Unidos sino para otros países, dentro de los cuales se encuentra México (*CORS - National Geodetic Survey, 2020; National Geodetic Survey, 2018*).

El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) forma parte de las agencias extranjeras asociadas a la red de CORS, presente con 10 estaciones de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) la cual materializa el Sistema Geodésico Nacional y da acceso al Marco de Referencia Terrestre Internacional, ITRF08 época 2010.0 (INEGI, 2015). La RGNA ha sido ajustada a las condiciones y necesidades del país, siendo las aplicaciones más relevantes de acuerdo con INEGI (2017): actualización catastral, cartografía, límites nacionales e internacionales, subsidencia y deslizamiento de terrenos, tectónica de placas, prevención de desastres, actualización del marco de referencia terrestre internacional y regional, en general todo proyecto que requiera de una ubicación precisa.

INEGI pone a disposición los archivos de navegación y observación de las 28 estaciones que conforman la RGNA en formato RINEX 2.11 (Receiver Independent Exchange Format, Gurtner *et al.*, 2013) con tasas de muestreo a 15 s y máscara de elevación de 10°, ya sea en el sitio web o en el servidor FTP de manera pública por un periodo de 90 días, posterior a este lapso tendrán que ser solicitados.

### 2.2.3 Red IGS

El IGS es un elemento clave en el Sistema de Observación Geodésico Global (GGOS) en la densificación y mejora de la distribución de la red geodésica global, así como de proveer al segmento usuario el acceso al ITRF. Los principales productos (Tabla 4) son: efemérides de los satélites GNSS, parámetros de rotación de la Tierra, coordenadas y velocidades de las estaciones, información del reloj satelital y de las estaciones, estimación del retraso troposférico y mapas globales de ionósfera, estos productos son útiles para el

monitoreo de deformación de la corteza, monitoreo de rotación del polo, monitoreo de tropósfera y ionósfera, así como en la densificación y mejora del ITRF soportado por el sistema internacional de rotación terrestre (IERS), (IGS, 2019b; Johnston *et al.*, 2017).

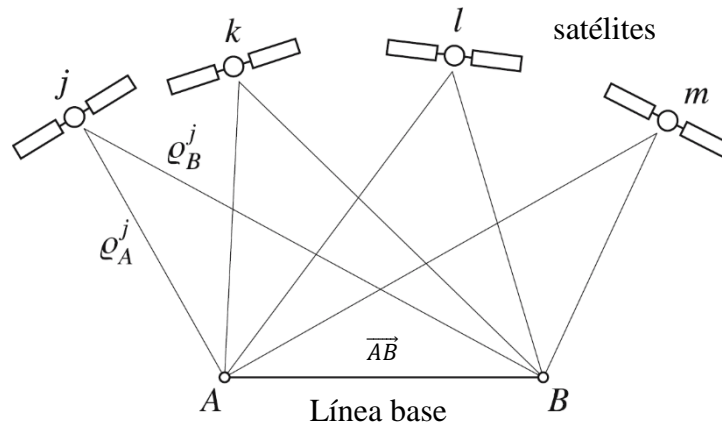
**Tabla 4.** Productos finales IGS. Fuente: Ostini (2010).

| <b>Producto</b>              | <b>Tipo</b> | <b>Sistema</b> | <b>Precisión</b> | <b>Latencia</b> | <b>Muestreo</b> |
|------------------------------|-------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|
| <i>Órbita satelital</i>      | Transmitida | GPS            | ~100 cm          | Tiempo real     | Diario          |
| <i>Reloj satelital</i>       | Transmitida | GPS            | ~5 ns            | Tiempo real     | Diario          |
| <i>Órbita satelital</i>      | Final       | GPS            | ~2.5 cm          | 12-18 días      | 15 min          |
| <i>Reloj satelital</i>       | Final       | GPS            | ~75 ps           | 12-18 días      | 30 s            |
| <i>Órbita satelital</i>      | Final       | GLONAS         | ~2.5 cm          | 12-18 días      | 15 min          |
| <i>ERP</i>                   | Final       |                | 10 $\mu$ s       | 11-17 días      | Diario          |
| <i>Troposfera</i>            | Final       |                | 4 mm             | < 4 semanas     | 2 h             |
| <i>Mapa Ionosférico</i>      | Final       |                | 2-8 TECU         | ~11 días        | 2 h             |
| <i>TEC</i>                   | Final       | Horizontal     | 3 mm             | 11-17 días      | Semanal         |
| <i>Posición</i>              | Final       | Vertical       | 6 mm             | 11-17 días      | Semanal         |
| <i>Velocidad de estación</i> | Final       | Horizontal     | 2 mm/año         | 11-17 días      | Semanal         |
| <i>Velocidad de estación</i> | Final       | Vertical       | 3 mm/año         | 11-17 días      | Semanal         |

La red Geodésica Global de IGS está compuesta por encima de 450 estaciones de operación continua de calidad geodésica (Johnston *et al.*, 2017) con recepción de señales GPS, GLONNAS, Galileo, BeiDou, QZSS y SBAS. Las estaciones de la red IGS deben apegarse a los estándares tanto físicos como operacionales establecidos por el mismo organismo para asegurar la alta precisión de los datos GNSS (IGS, 2015). En México sólo una estación GNSS forma parte de la red IGS que es la estación INEG, localizada en Aguascalientes que también forma parte de la RGNA.

### 2.3 Posicionamiento relativo estático

De acuerdo con Huerta *et al.* (2005) y Hofmann-Wellenhof *et al.* (2008), el objetivo del posicionamiento relativo es determinar las coordenadas de un punto desconocido respecto a uno conocido, generalmente fijo. El posicionamiento relativo determina el vector entre ambos puntos denominado vector de línea base o simplemente línea base (Figura 8).



**Figura 8.** Concepto de posicionamiento relativo. Fuente: (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Suponiendo que A es el punto de coordenadas conocidas o base y B el punto incógnito, las componentes de la línea base son:

$$\vec{AB} = \begin{bmatrix} x_B - x_A \\ y_B - y_A \\ z_B - z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_{AB} \\ \Delta y_{AB} \\ \Delta z_{AB} \end{bmatrix}$$

Introduciendo el correspondiente vector de posición, las coordenadas de B se obtienen como:

$$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_{AB} \\ \Delta y_{AB} \\ \Delta z_{AB} \end{bmatrix}$$

El posicionamiento relativo estático requiere de observaciones simultaneas a los mismos satélites desde ambos puntos durante un periodo de tiempo, permitiendo formar combinaciones lineales, conduciendo a formar simples diferencias, dobles diferencias y triples diferencias considerando observaciones desde A y B a los satélites K y J. Estas diferencias pueden realizarse de tres maneras: a través del receptor, a través de los satélites y a través del tiempo. Las simples diferencias de fase corresponden a las diferencias a través del receptor, las dobles diferencias corresponden a las diferencias a través de receptor y de satélites y las triples diferencias corresponden a las diferencias a través del receptor, satélites y el tiempo (Huerta *et al.*, 2005; Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Las Ecuaciones de fase en donde se ven involucrados dos receptores y un satélite, designando A y B a los receptores y j al satélite, se muestran en las Ecuaciones (1) y (2):

$$\Phi_A^j(t) + f^j \delta^j(t) = \frac{1}{\lambda^j} \varrho_A^j(t) + N_A^j + f^j \delta_A(t) \quad (1)$$

$$\Phi_B^j(t) + f^j \delta^j(t) = \frac{1}{\lambda^j} \varrho_B^j(t) + N_B^j + f^j \delta_B(t) \quad (2)$$

Donde  $\Phi(t)$  son las mediciones de fase,  $f^j$  es la frecuencia del satélite,  $\delta^j(t)$  error o desfase del reloj del satélite,  $\delta_A(t)$  error o desfase del reloj del receptor,  $N$  es la ambigüedad y  $\varrho(t)$  son las mediciones de código.

La resta de las Ecuaciones (1) y (2) resulta en la Ecuación (3) conocida como ecuación de simples diferencias, donde el error correspondiente al reloj del satélite se ha cancelado.

$$\Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t) = \frac{1}{\lambda^j} [\varrho_B^j(t) - \varrho_A^j(t)] + N_B^j - N_A^j + f^j [\delta_B(t) - \delta_A(t)] \quad (3)$$

La Ecuación (3), puede reescribirse como la Ecuación (4).

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda^j} \varrho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j + f^j \delta_{AB}(t) \quad (4)$$

Aplicando las Ecuaciones de simples diferencias para dos receptores en los puntos A y B y dos satélites j y k, se tienen las Ecuaciones (5) y (6)

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda^j} \varrho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j + f^j \delta_{AB}(t) \quad (5)$$

$$\Phi_{AB}^k(t) = \frac{1}{\lambda^j} \varrho_{AB}^k(t) + N_{AB}^k + f^k \delta_{AB}(t) \quad (6)$$

Para obtener dobles diferencias se restan las simples diferencias, obteniendo la Ecuación (7) como resultado, asumiendo que  $f = f^j = f^k$ .

$$\Phi_{AB}^k(t) - \Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda^j} [\varrho_{AB}^k(t) - \varrho_{AB}^j(t)] + N_{AB}^k - N_{AB}^j \quad (7)$$

La Ecuación (7) puede reescribirse como la ecuación (8):

$$\Phi_{AB}^{jk}(t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^{jk}(t) + N_{AB}^{jk} \quad (8)$$

Las dobles diferencias eliminan los errores provenientes de los relojes de los receptores, siendo la principal razón por la cual es utilizada, asumiendo que  $\lambda = \lambda^j = \lambda^k$ .

Para eliminar las ambigüedades, que son independientes del tiempo, Remondi, (1984), propuso diferenciar las dobles diferencias entre dos épocas  $t_1$  y  $t_2$  teniendo las Ecuaciones (9) y (10) como las dobles diferencias entre dos épocas.

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_1) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^{jk}(t) + N_{AB}^{jk} \quad (9)$$

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_2) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^{jk}(t) + N_{AB}^{jk} \quad (10)$$

De manera simplificada en la Ecuación (11) se presentan las triples diferencias, la cual tiene por ventaja la eliminación de las ambigüedades, eliminando la necesidad de su determinación.

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_{12}) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^{jk}(t_{12}) \quad (11)$$

Los errores en la propagación de la señal (ionosfera y troposfera) afectan de manera similar a dos estaciones que utilizan los mismos satélites, dado que la distancia entre receptores es muy pequeña comparada con la distancia a los satélites, inclusive si fueran 500 km, la porción de atmosfera que atraviesan las señales del mismo satélite es prácticamente la misma y las simples diferencias de fase posibilitan una importante reducción tanto de errores orbitales como de ionosfera y troposfera. De forma similar los errores en cada satélite (reloj, órbita) son comunes para ambas estaciones y son eliminados por dobles diferencias y a través de triples diferencias se eliminan las ambigüedades (Huerta *et al.*, 2005).

De acuerdo con Huerta *et al.* (2005), las sucesivas diferencias contribuyen de dos maneras: reduciendo el número de incógnitas y eliminando o minimizando los errores sistemáticos. No obstante, produce una disminución en la precisión de las soluciones.

Finalmente, los softwares de postproceso usan estas tres diferentes técnicas; simples, dobles y triples diferencias, no obstante, las dobles diferencias de fase son las más utilizadas, permitiendo soluciones fijas (ambigüedades enteras) (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Debe considerarse que esta técnica no elimina todos los errores del posicionamiento satelital, aún quedan los propios de cada estación, la multitrayectoria y la corrección de cada receptor (Morillo Barragán, 2013; Huerta *et al.*, 2005), no obstante la precisión en la estimación de la posición del receptor se ve mejorada llegando a  $5\text{mm} \pm 0.5 \text{ ppm}$  incrementando con la longitud de la línea base.

## **2.4 Análisis de calidad de las observaciones GNSS**

El análisis de calidad de las estaciones GNSS, es un componente clave en la verificación del funcionamiento de toda una infraestructura geodésica respecto a los datos crudos y el monitoreo de la estabilidad (Herrada *et al.*, 2010; Brown *et al.*, 2002). De acuerdo con Souto *et al.* (2014), el análisis de calidad se basa en tres características fundamentales: integridad, disponibilidad y seguridad de los datos crudos de las estaciones de operación continúa, mismo que evidencia una operación eficiente. De este modo el análisis de calidad en este estudio se centra en cuatro indicadores: multitrayectoria, relación señal-ruido, saltos de ciclo e integridad de las observaciones en las bandas  $L_1$  y  $L_2$  de la constelación GPS, indicadores que han sido aplicados en diversos estudios para la verificación de redes geodésica y que engloban las tres características fundamentales (Xiao *et al.*, 2020; Brown *et al.*, 2002; Takacs *et al.*, 2001; Herrada *et al.*, 2010; Souto *et al.*, 2014; Yeh *et al.*, 2007, 2008).

Con base en Estey y Meertens (1999), el software TEQC, diseñado, desarrollado y mantenido por UNAVCO es idóneo para sus tres principales funciones: Traslado, Edición y Análisis de Calidad, los cuales pueden ser utilizados de manera simultánea o separados soportando observables de GPS y GLONASS. TEQC, es un software no interactivo con

interfaz de líneas de comando, modelado en comandos comunes en UNIX. Así todos los parámetros los establece el usuario a través de la interfaz, permitiendo el uso de TEQC en scripts para la ejecución de rutinas.

TEQC no hace posicionamiento puntual preciso y tampoco es utilizado para encontrar precisión en el posicionamiento de la antena, TEQC calcula la posición de la antena, pudiendo tener un error de 10 m o más, ya que no genera un cambio significativo en la dirección a los satélites vistos desde el receptor (Estey y Wier, 2014).

TEQC se encuentra disponible de manera gratuita para diferentes sistemas operativos, para aplicar alguna de sus funcionalidades como lo es el traslado de los formatos binarios que provee un determinado receptor a formatos RINEX. La edición en cuatro tipos de edición: Edición del encabezado del RINEX, ventanas de tiempo, empalme o unión de archivos y edición de satélites y canales. Finalmente, el análisis de calidad (QC) para GPS y GLONNAS de doble frecuencia estático y cinemático con o sin archivos de navegación.

Los datos adquiridos por el receptor, así como las efemérides transmitidas, permiten la ejecución automatizada del análisis de calidad de las observaciones, siendo el resultado estadístico un filtrado de la información previo al procesamiento. Durante el QC, de acuerdo con Estey y Meertens (1999), se utiliza una combinación lineal de observaciones de pseudorango y fase portadora para calcular la multitrayectoria en el pseudorango de  $L_1$  para las observaciones de código C/A o P, la multitrayectoria en el pseudorango de  $L_2$  para las observaciones del código P, efectos de fase inosférica y la tasa de cambio de retraso inosférico. Información respecto a los saltos del reloj del receptor, saltos de ciclo, multitrayectoria, ángulo de elevación y azimut del satélite, relación señal-ruido, están presentes en el archivo de resumen.

Para el modelado de las medidas de fase y pseudorango es utilizada la Ecuación (12) y (13);

$$L_i = R + c(dt_r + dt_s) - I_i + N + m_i + n_i \lambda_i \quad (12)$$

$$P_i = R + c(dt_r + dt_s) + I_i + N + M_i \quad (13)$$

Donde:

$L_i$  es la observable de fase para la frecuencia  $i$ ;  $P_i$  es la observable de Pseudorange para la frecuencia  $i$ ;  $R$  es distancia entre satélite y la antena;  $c$  es la velocidad de la luz;  $dt_r$  es el error de reloj del receptor;  $dt_s$  el error del reloj del satélite;  $I_i$  el rango de error ionosférico para la frecuencia  $i$ ;  $N$  es el retraso atmosférico;  $m_i$  es la multitrayectoria de la fase (portadora) para la frecuencia  $i$ ;  $M_i$  es la multitrayectoria del pseudorange para la frecuencia  $i$ ;  $n_i \lambda_i$  es la ambigüedad entera de la longitud de onda de la fase para la frecuencia  $i$ .

El rango de error ionosférico es debido a la dispersión en las frecuencias y asumiendo que la trayectoria es similar para ambas frecuencias se tiene la Ecuación (14) y (15):

$$I_1 + \frac{1}{\alpha-1} [n_1 \lambda_1 - n_2 \lambda_2 + m_1 + m_2] = \frac{1}{\alpha-1} (L_1 - L_2) \quad (14)$$

$$I_2 + \frac{1}{\alpha-1} [n_1 \lambda_1 - n_2 \lambda_2 + m_1 + m_2] = \frac{1}{\alpha-1} (L_1 - L_2) \quad (15)$$

Donde:

$$\alpha \equiv \frac{f_1^2}{f_2^2}$$

Se define en la Ecuación (16) la tasa de cambio derivado del retraso ionosférico el cual es calculado y monitoreado época por época para detectar grandes cambios en las ambigüedades, es decir, saltos en el seguimiento de  $L_1$  o  $L_2$ :

$$I_2 OD \equiv \frac{\alpha}{\alpha-1} [(L_1 - L_2)_j - (L_1 - L_2)_{j-1}] / (t_j - t_{j-1}) \quad (16)$$

La obtención de la ecuación de multitrayectoria se hace a través de una combinación lineal como se muestra en la Ecuación (17) y (18):

$$MP1 \equiv P_1 - \left(1 + \frac{2}{\alpha-1}\right) L_1 + \left(\frac{2}{\alpha-1}\right) L_2 = M_1 + B_1 - \left(1 + \frac{2}{\alpha-1}\right) m_1 + \left(\frac{2}{\alpha-1}\right) m_2 \quad (17)$$

$$MP2 \equiv P_2 - \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1}\right) L_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1} - 1\right) L_2 = M_2 + B_2 - \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1}\right) m_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1} - 1\right) m_2 \quad (18)$$



El análisis de calidad completo (QC-full) requiere del archivo de navegación a diferencia del análisis de calidad ligero (QC-lite) que no lo requiere.

De acuerdo con Estey y Wier (2014), los símbolos utilizados indican problema o éxito en la observación (Tabla 5).

**Tabla 5.** Símbolos en el reporte de resumen

|                                     |                                                                           |          |                                                                                        |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>C</b>                            | Salto en el reloj del receptor                                            | .        | No A/S, C <sub>1</sub> ; c no A/S, L <sub>1</sub> C <sub>1</sub> ;                     |
| <b>m</b>                            | n-msec asenso de multitrayectoria;                                        | :        | No A/S, L <sub>1</sub> P <sub>1</sub> ; = L <sub>1</sub> C <sub>1</sub> C <sub>2</sub> |
| <b>I</b>                            | Salto de fase por Ionosfera                                               | <b>z</b> | L <sub>1</sub> C <sub>1</sub> C <sub>5</sub>                                           |
| <b>M</b>                            | Salto de MP1 y MP2 o MP15 y MP51                                          | ~        | No A/S, L <sub>1</sub> C <sub>1</sub> L <sub>2</sub> P <sub>2</sub>                    |
| <b>1</b>                            | Sólo saltos de multitrayectoria de MP1;                                   | *        | No A/S, L <sub>1</sub> P <sub>1</sub> L <sub>2</sub> P <sub>2</sub> ;                  |
| <b>2</b>                            | Sólo saltos de multitrayectoria de MP2;                                   | ,        | A/S on, C <sub>1</sub>                                                                 |
| <b>Z</b>                            | Sólo saltos de multitrayectoria de MP15                                   | <b>a</b> | A/S on, L <sub>1</sub> C <sub>1</sub>                                                  |
| <b>5</b>                            | Sólo saltos de multitrayectoria de MP51                                   | ;        | A/S on, L <sub>1</sub> P <sub>1</sub>                                                  |
| -                                   | Vehículos satelitales por encima de la mascar de elevación pero sin datos | <b>e</b> | L <sub>1</sub> C <sub>1</sub>  P <sub>1</sub> L <sub>2</sub> C <sub>2</sub>            |
| ?                                   | Orbitas satelitales inciertas                                             | <b>N</b> | Datos presentes, pero sin QC                                                           |
| +                                   | Datos del satélite por debajo de la máscara de elevación                  | -        | Sin datos y por debajo de la máscara de elevación.                                     |
| ^                                   | Datos parciales del satélite por debajo de la máscara de elevación;       |          |                                                                                        |
| <b>Línea de posición "Pos"</b>      |                                                                           |          |                                                                                        |
| ^                                   | Grandes cambios de posición                                               | >        | Mediciones cinemáticas correctas;                                                      |
| <b>X</b>                            | Posición inversa de código fallida                                        | <b>o</b> | Mediciones estáticas correctas;                                                        |
| <b>C</b>                            | Posición sin convergencia                                                 | <b>O</b> | Observables insuficientes                                                              |
| <b>H</b>                            | Gran incertidumbre horizontal                                             | <b>E</b> | Efemérides insuficientes                                                               |
| <b>V</b>                            | Gran incertidumbre vertical                                               | <b>S</b> | Vehículos satelitales insuficientes                                                    |
| <b>T</b>                            | Gran incertidumbre total                                                  |          |                                                                                        |
| <b>Reloj del receptor "Clk"</b>     |                                                                           |          |                                                                                        |
| ^ Perdida en épocas de observación. |                                                                           |          |                                                                                        |

### 2.4.1 Efecto Multitrayectoria

La multitrayectoria (múltiples trayectos), tiene lugar cuando la misma señal llega al receptor por diferentes direcciones o trayectorias, interfiriendo con la señal directa, mediante la reflexión o difracción, dado por alguna superficie reflejante cercana al receptor (estructura, edificio, auto, árbol, etc.), llegando con un retraso relativo a la señal directa ya que realiza un recorrido adicional, como se muestra en la Figura 10 (Kamatham *et al.*, 2013; Seeber, 2008; Bilich *et al.*, 2008, 2007; Souto, 2014; Kamatham, 2018).

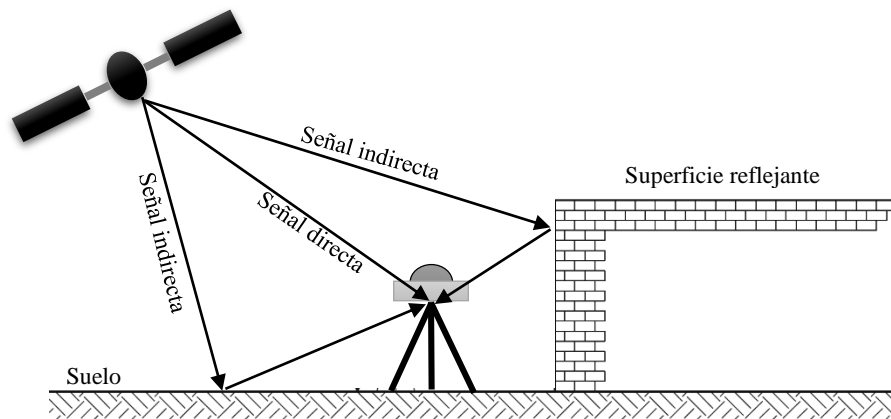


Figura 10. Efecto multitrayectoria.

De acuerdo con Bilich *et al.* (2007); Kamatham *et al.* (2013), existen dos categorías, la primera la multitrayectoria difusa, donde la señal incide en una superficie rugosa dispersando la señal en diferentes direcciones que no son correlacionadas en el tiempo y que tiene un comportamiento similar al ruido y la segunda, la multitrayectoria especular, donde la señal incide sobre una superficie relativamente lisa resultando en una alta correlación con errores sistemáticos que varía lentamente en las mediciones de pseudorange y de fase portadora. Este error sistemático es sustancial, pudiendo llevar a errores del orden métrico para la pseudodistancia y algunos centímetros para las mediciones de fase (Bilich *et al.*, 2008, 2007; Vázquez *et al.*, 2013). Geométricamente, las señales recibidas por satélites de elevación baja son más susceptibles a multitrayectoria que las señales de elevaciones altas,

siendo más afectadas por multitrayectoria las mediciones de código que las de fase portadora (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

En el receptor, la multitrayectoria es caracterizada en relación a la señal directa a través de parámetros, tales como, la amplitud de la señal indirecta, retraso de trayecto, cantidad de la fase reflejada y velocidad de la fase (Kamatham, 2018), no obstante, es una fuente de error que no es mitigada fácilmente, degradando la precisión en el posicionamiento (Smyrniotis *et al.*, 2013; Zuo *et al.*, 2019). De acuerdo con Ray y Senior (2003), diferentes tipos de receptor tienen distinto tipo de comportamiento, es por ello que no adquiere un significado absoluto la cantidad de multitrayectoria, ya que no sólo está en función del ambiente multitrayecto en la estación, sino también de la versión de firmware y tipo de antena (Herrada *et al.*, 2010; Vázquez *et al.*, 2013), es por ello que la comparación entre un sitio y otro no es tan sencillo, sin embargo, fuertes variaciones pueden indicar problemas de configuración o problemas del sitio.

Varias técnicas han sido desarrolladas para la mitigación del efecto multitrayectoria, de acuerdo con Hofmann-Wellenhof *et al.* (2008); Strode y Groves (2016), se clasifican en tres grupos: los basados en mitigación a través de la antena (Krantz *et al.*, 2001); mitigación basado en el receptor (Braasch, 2001; Closas *et al.*, 2009) y el tercero basado en el procesamiento. Las antenas Choke Ring (Smyrniotis *et al.*, 2013) han sido diseñadas para este propósito, donde el patrón de ganancia de la antena está diseñado para detectar señales de circulo-polarización de mano derecha (RHCP) y rechazar las de circulo-polarización de mano izquierda (LHCP), de acuerdo con Vázquez *et al.* (2012, 2013), este tipo de antena reduce el efecto multitrayectoria en la banda  $L_1$ . Respecto a los basados en el receptor, estos son modificados para incrementar la discriminación de la resolución de código y así distinguir de mejor manera tanto la señal directa como la señal reflejada. Sin embargo, ninguno de estos mitiga el problema completamente. Con base en IGS (2015), se espera que las estaciones de monitoreo continuo tengan un nivel bajo de multitrayectoria preferentemente  $< 0.30$  m.

Para la estimación del efecto multitrayectoria el software TEQC se basa en una combinación lineal de pseudorango y fase portadora para la estimación del error medio cuadrático de las variaciones de multitrayectoria a través de las Ecuaciones (17) y (18).

## 2.4.2 Relación Señal-Ruido

La relación señal-ruido definida como SNR o S/N describe el rendimiento y la potencia de la señal P y la potencia del ruido N, como se muestra en la Ecuación 19 (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008):

$$S/N = 10 \log_{10} \frac{P}{N} \quad [dB] \quad (19)$$

La SNR, puede ser usada para medir la capacidad de recepción de la señal en el receptor GNSS, y así reflejar el rendimiento del seguimiento y captura de la señal (Xiao *et al.*, 2020), gran parte de los receptores denotan la relación señal-ruido como C/N<sub>0</sub> en decibeles Hertz, Ecuación 20:

$$C/N_0 = 10 \log_{10} \frac{P_r}{N_0} \quad [dBHz] \quad (20)$$

La SNR, S/N, C/N<sub>0</sub> en las observaciones GPS, miden la magnitud de la señal recibida en el receptor de la antena (P<sub>r</sub>), la cual hace referencia a la relación de la señal-ruido en un dispositivo electrónico o en un sistema electrónico (Zhang *et al.*, 2017). La señal se refiere a una señal generada por un dispositivo externo, mientras que el ruido se refiere a la señal originada por el mismo dispositivo (N<sub>0</sub>) y que generalmente va acompañada de una señal irregular (Zuo *et al.*, 2019).

La relación señal-ruido es un parámetro que influye en el rendimiento y el estado operativo del sistema (receptor, antena, señal), sin embargo, las variaciones en la SNR son principalmente por la potencia de la señal satelital, la ganancia de la antena, estado del receptor y el efecto multitrayectoria (Zuo *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2017).

Generalmente el rango de medición de los receptores GNSS en el exterior es de 35 a 55 dBHz, con base a esta clasificación numérica (Tabla 6), las señales por encima de 36 dBHz son llamadas señales fuertes, mientras que las señales por debajo de 36 dBHz son llamadas señales débiles (Xiao *et al.*, 2020; Gurtner *et al.*, 2013). De esta manera cuanto más grande sea la relación señal-ruido mayor será la calidad de la señal observada (Zuo *et al.*, 2019; Xiao *et al.*, 2020).

**Tabla 6.** Indicador Estandarizado S/N. Fuente: Gurtner *et al.* (2013).

| Relación señal-ruido (dbHZ) | Indicador SNR (Rinex) | Intensidad de señal |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------|
| <12                         | 1                     | Débil               |
| 12-17                       | 2                     | Débil               |
| 18-23                       | 3                     | Débil               |
| 24-29                       | 4                     | Débil               |
| 30-35                       | 5                     | Débil               |
| 36-41                       | 6                     | Fuerte              |
| 42-47                       | 7                     | Fuerte              |
| 48-53                       | 8                     | Fuerte              |
| $\geq 54$                   | 9                     | Fuerte              |

Kamatham (2018), muestra que la relación señal-ruido es inversamente proporcional al efecto multitrayectoria, es decir, cuando la señal recibida es fuerte el efecto multitrayectoria es bajo, mientras que, si la señal es débil el efecto multitrayectoria es alto.

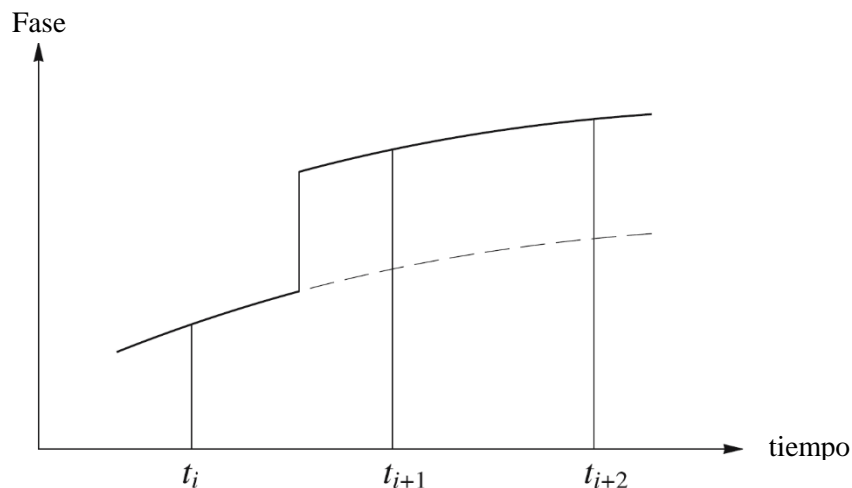
Generalmente la SNR ha sido utilizada para analizar la calidad de recepción de la señal en las observaciones GNSS (Zimmermann *et al.*, 2019; Tian *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2018), no obstante ha sido también aplicada en otros ámbitos: determinación de la profundidad de la nieve (Zhang *et al.*, 2017; Larson *et al.*, 2016) basado en la SNR de las frecuencias  $L_1C/A$  y  $L_2P$ , Zhou *et al.* (2019) estima la profundidad de la nieve agregando la frecuencia  $L_5$ ; en la determinación del nivel medio del mar (Löfgren *et al.*, 2014); correlación SNR-precipitación-vapor de agua (Mao *et al.*, 2017); incluso en el monitoreo de estructuras (Peppas *et al.*, 2018).

Rost *et al.* (2009), utiliza la relación señal-ruido para corregir errores del efecto multitrayectoria en la fase portadora; Bilich *et al.* (2007), utiliza la magnitud y frecuencia de la relación señal-ruido para representar el medioambiente multitrayectoria a través de mapeo espectral de potencia (Power Spectral Mapping), y así determinar el error de multitrayectoria. En contraste, Strode y Groves (2016), investiga a través de triples

frecuencias, el uso de la SNR para detección de multitrayectoria en tiempo real, evitando el postproceso como es el caso de Ros *et al.* (2009). Bilich *et al.* (2007) y Zuo *et al.* (2019), muestran un análisis comparativo entre los saltos de ciclo y la relación señal-ruido, en el cual los saltos de ciclo se ven reflejados en la SNR, siendo más estable la frecuencia  $L_1$  que la frecuencia  $L_2$ .

### 2.4.3 Saltos de Ciclo

Los saltos de ciclo son debidos a una pérdida en la recepción de la señal de la fase portadora debido a saltos bruscos en la recepción de la señal (Figura 11), siendo una discontinuidad en el número entero de ciclos de la fase, efecto similar en la ambigüedad (Henning, 2011; Yeh *et al.*, 2007; Herrada *et al.*, 2010; Torge y Müller, 2012; Souto, 2014).



**Figura 11.** Esquema representativo de un salto de ciclo. Fuente: Hofmann-Wellenhof *et al.* (2008).

De acuerdo con Yeh *et al.* (2007,2008); Hofmann-Wellenhof *et al.* (2008); Souto (2014); Herrada *et al.* (2010), los saltos de ciclo son causados por obstrucciones de la señal debidas a árboles, edificios, puentes, montañas, siendo estas las fuentes más frecuentes. La segunda fuente de saltos de ciclo es debida a la baja relación señal-ruido (SNR), consecuencia de malas condiciones ionosféricas, multitrayectoria, o baja elevación del satélite. La tercer fuente de error, es la falla en el software del receptor, permitiendo procesar una señal incorrecta.

Con base en Souto (2014), al producirse una pérdida de ciclo para un determinado satélite y frecuencia, se ven afectadas todas las observaciones de dicho satélite y frecuencia desde el momento de la pérdida, siendo un error acumulativo para la misma señal.

La relación entre los datos observados y los saltos de ciclo se expresa como “o/slps” y los saltos de ciclo por cada mil observaciones como “CSR” (Zuo *et al.*, 2019; Xiao *et al.*, 2020) donde “o” es el número de observaciones y “slps” el número de saltos de ciclo como se muestra en las Ecuaciones (21) y (22).

$$o/slps = \frac{o}{slps} \quad (21)$$

$$CSR = \frac{1000}{o/slps} \quad (22)$$

De acuerdo con Yeh *et al.* (2008) y Tarrío (2018), actualmente los programas de postproceso, poseen algoritmos para la corrección en cantidad reducidas, llegando a ser imposible, en saltos de ciclo de larga duración.

Con base en IGS (2015), se espera que las estaciones pertenecientes al IGS, presenten un número bajo de saltos de ciclo por cada mil observaciones, siendo lo recomendado, menos de un salto de ciclo por cada mil observaciones (< 1 por cada 1000 observaciones). No obstante, Zuo *et al.* (2019), menciona que el análisis de calidad en estaciones del IGS, muestra saltos de ciclo menores a cinco en la mitad de sus estaciones y por debajo de diez saltos de ciclo en 2/3 de sus estaciones.

#### 2.4.4 Integridad

La integridad hace referencia a la cantidad de datos obtenidos contra los pronosticados, expresado en porcentaje (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008; Álvarez, 2008) siendo un concepto fundamental en la navegación y característica en el análisis de calidad (Souto, 2014).

Con base en Zuo *et al.* (2019), la integridad debe estar por encima del 90%, si fuese menor es necesario analizar sistemáticamente los factores externos en el medio ambiente así como las condiciones del receptor, siendo un indicador la SNR, entre más grande sea la SNR, mejor será la calidad de la señal observada.

Para cuantificar la integridad se requiere de la cantidad de datos utilizados, si la integridad de los datos no es suficiente, se reflejará no sólo en el posicionamiento, sino que se presentaran efectos negativos en el rendimiento en general. La Ecuación (23), representa la relación de los datos observados (R), donde  $N_1$  es el número de observaciones recibidas y  $N_0$  representa el número de observaciones posibles (Zuo *et al.*, 2019; Xiao *et al.*, 2020).

$$R = \frac{N_1}{N_0} * 100 \quad (23)$$

En el reporte de resumen generado por TEQC, la relación de las observaciones logradas esta dado en porcentaje en la línea SUM (Estey y Wier, 2014). Con base en el estándar internacional de IGS, la integridad para las estaciones debe estar por encima del 95% (IGS, 2015).

## 2.5 Exactitud posicional

La norma técnica de estándares de exactitud posicional vigente en México (INEGI, 2010), establece las disposiciones mínimas, referente a operaciones de posicionamiento horizontal y vertical a través de la evaluación del Circulo de Error Probable (CEP) y Exactitud de Posicionamiento Vertical (EPV) en una incertidumbre del 95 % empleando el valor estadístico de las Ecuaciones 24 y 25. Para el caso de nivelación GNSS se considerará la Ecuación 26 (introducción del modelo geoidal GGM10).

$$CEP_{95} = 1.2238 (\sigma_{\phi} + \sigma_{\lambda}) \quad (24)$$

$$EPV_{95} = 1.9600\sigma \quad (25)$$

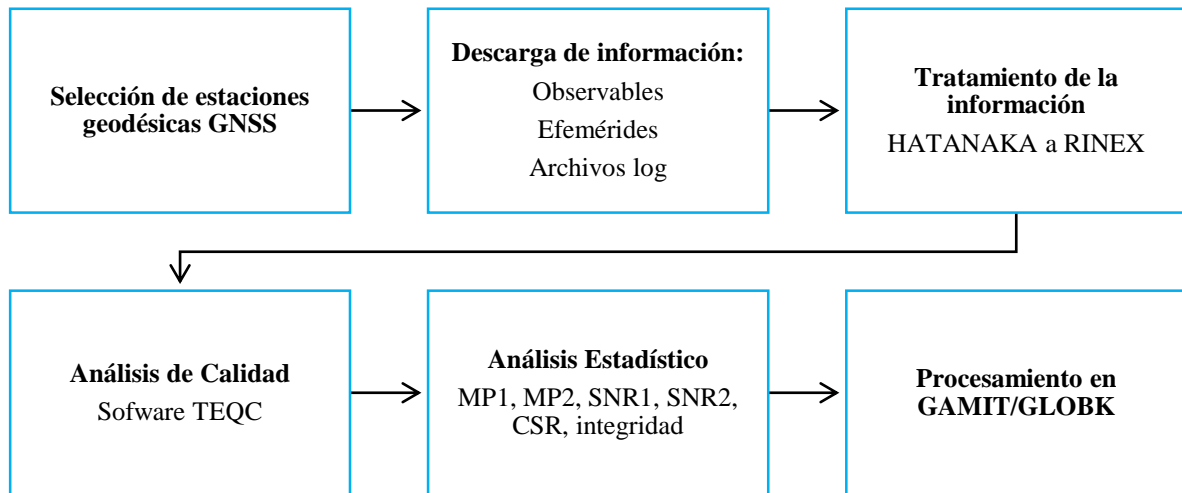
$$EPV_{95} = 1.9600(\sigma_{GNSS}^2 + \sigma_N^2)^{1/2} \quad (26)$$

Donde  $\sigma_{\phi}$  y  $\sigma_{\lambda}$  son las desviaciones estándar de la latitud y longitud respectivamente dada en metros,  $\sigma$  la desviación estándar de la altura geodésica y  $\sigma_N^2$  la desviación estándar del modelo de alturas geoidales.

Con base en la Norma Técnica (INEGI, 2010) dispone que, para exactitud posicional horizontal, el orden de 5 cm para trabajos encaminados a establecer el sistema geodésico de referencia nacional fundamental y orden de 1 dm para la densificación del sistema de referencia geodésico nacional básico. Para el caso del EPV se establecen diferentes órdenes y clases en función del kilometraje nivelado, sin embargo, al no realizar nivelaciones GNSS se considerará el criterio del Circulo de Error Probable.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA



**Figura 12.** Metodología.

Como se muestra en la Figura 12, la primer etapa es la selección de estaciones geodésicas GNSS, delimitada en aquellas que se encuentren dentro de territorio mexicano sin limitación al acceso de los datos que genera cada estación, para ello se utilizaron los servidores de UNAVCO<sup>1</sup>, IGS<sup>2</sup> y CORS<sup>3</sup>, para la localización estación por estación y así generar la base de datos de aquellas estaciones disponibles para el análisis de calidad, organizando los bloques de estaciones en función del gestor, contabilizando en total 65 estaciones pertenecientes a diferentes redes geodésicas.

La siguiente etapa, referente a la descarga de la información, se realizó a través de la implementación de scripts en Shell-C en UNIX, para la descarga automatizada de los archivos de observación, teniendo en consideración el FTP, así como la fecha de inicio (01/01/2010) y fin (28/01/2020) de los datos requeridos. De forma similar se descargaron los archivos “log”, los cuales contienen la información histórica general de cada estación en

<sup>1</sup> <https://www.unavco.org/instrumentation/networks/map/map.html>

<sup>2</sup> <http://www.igs.org/network>

<sup>3</sup> [https://www.ngs.noaa.gov/CORS\\_Map/](https://www.ngs.noaa.gov/CORS_Map/)

ficheros de texto, únicos para cada estación. Las efemérides transmitidas fueron descargadas de SOPAC (Scripps Orbits and Permanent Array Center).

La tercer etapa, respecto al tratamiento de la información, en primer lugar se descomprime, ya que la combinación de un compresor de texto y el formato Hatanaka puede reducir el tamaño de los archivos hasta un 38 %, en segundo lugar se realizó la conversión de los archivos de observación de formato Hatanaka a RINEX utilizando un script junto con el software RNXCMP en su herramienta CRX2RNX (Hatanaka, 2008).

La cuarta etapa referente al análisis de calidad, se realizó a través de la implementación de un script y el software TEQC, eliminando constelaciones a excepción de GPS, al ser la constelación de mayor robustez y antigüedad con operación continua desde sus inicios, así como por sus aplicaciones, y al ser la constelación que todos los receptores de las estaciones tienen en común, de este modo, se estandariza a una sola constelación evitando sesgos para el análisis de calidad e inconstancias para el procesamiento, debido a que hasta el momento sólo 12 de las 65 estaciones reciben más de una constelación. Se establece el orden de las observables deseadas y el estandarizado de la tasa de muestreo a 30 s ya que en las estaciones varía entre 1, 15 y 30 s, asimismo GAMIT procesa en ese intervalo de muestreo, así como una máscara de elevación a 10° dado que las señales por debajo de esta elevación, generalmente, se ven obstruidas por obstáculos artificiales o naturales, así como una mayor afectación por tropósfera (Leick *et al.*, 2015; Ning y Elgered, 2012).

Modificados los RINEX, se realizó el análisis de calidad siendo necesarios los archivos de navegación, generando el archivo de resumen con terminación “S”, del cual se extrajeron los valores de multitrayectoria en ambas bandas, relación señal-ruido, saltos de ciclo e integridad.

A través del análisis estadístico de las estaciones geodésicas, se obtienen los valores máximos, mínimos, promedios y desviaciones estándar que cada estación genera, de este modo, se demuestra el comportamiento en cada parámetro MP1, MP2, SNR1, SNR2, CSR e integridad, generando todas las series temporales de cada indicador.

En la última etapa se procesa con software GAMIT/GLOBK versión 10.71, sólo dos estaciones que corresponden a la estación con mayor y menor efecto multitrayectoria, con la

finalidad de evaluar el impacto en el posicionamiento preciso, con base en la norma técnica de estándares de exactitud posicional vigente en México (INEGI, 2010) evaluando CEP y EPV en una incertidumbre del 95 %. Considerando 17 estaciones de referencia del IGS, con base en la geometría y el tiempo mínimo de operación de 2.5 años (Blewitt y Lavallée, 2002) evitando así, sesgos en la estimación de la velocidad en la estación.

Para dicho procesamiento el módulo GAMIT permite estimar un sistema tridimensional de coordenadas mínimamente constreñidas con el uso de órbitas precisas, modelos troposféricos, retardo inosférico y parámetros de rotación (Tabla 7) procesando en modo relativo estático pudiendo encontrar diferencias significativas en coordenadas, velocidades y amplitudes en las series temporales (Legrand *et al.*, 2012). Con el módulo GLOBK, se estima la velocidad de la estación, con la implementación del filtro de Kalman (Herring *et al.*, 2018).

Finalmente, a través de TSVIEW (Herring, 2003) se visualizan las series temporales en sus tres componentes; Este, Norte y Altura, para eliminar errores que superen tres veces la incertidumbre del procesamiento, ajustando la tendencia lineal y señales periódicas.

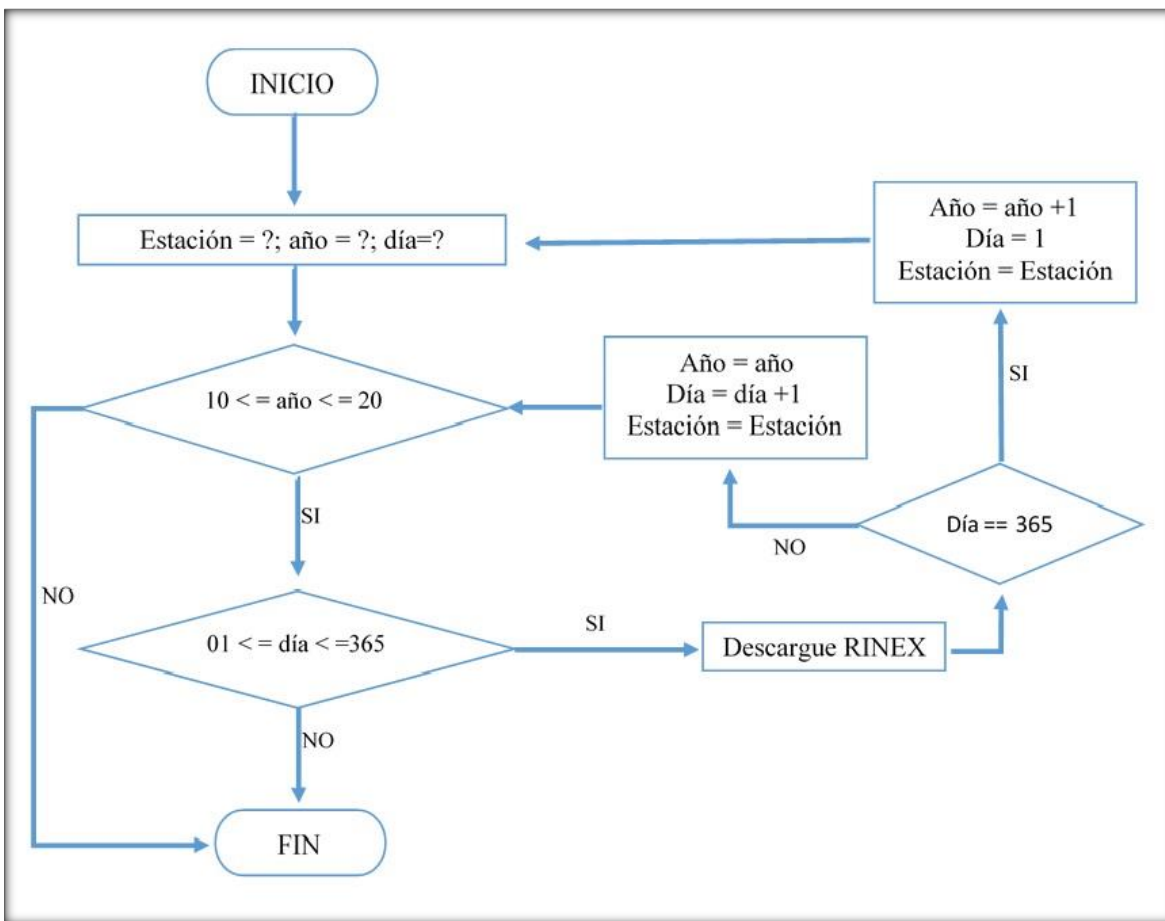
**Tabla 7.** Parámetros y características del procesamiento

|                               |                                                                                                          |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Pre-procesamiento</b>      | Eliminación de constelaciones, edición de observables                                                    |
| <b>Tazas de muestreo</b>      | 30 s                                                                                                     |
| <b>Ángulo de elevación</b>    | 10°                                                                                                      |
| <b>Carga oceánica</b>         | FES2004                                                                                                  |
| <b>Marea terrestre sólida</b> | IERS03                                                                                                   |
| <b>Órbitas</b>                | Precisas (finales .sp3) de SOPAC                                                                         |
| <b>Calibración de antena</b>  | IGS08                                                                                                    |
| <b>Observables</b>            | Doble diferencia, combinación libre de ionósfera de L <sub>1</sub> y L <sub>2</sub> en la fase portadora |

### 3.1 Implementación de TEQC en Shell-C de Unix para el Análisis de Calidad

De acuerdo con Fernández y Muños (2018), el intérprete de comandos o Shell permite al usuario interactuar con el sistema, procesando las ordenes que se le indiquen a través de comandos propios de Shell y externos por ejemplo ejecutables. Un Shell-script o guion de órdenes es un documento de texto que contiene un conjunto de comandos y ordenes interpretables por el Shell.

En la Figura 13 se muestra el diagrama de flujo para la descarga de archivos RINEX y en la Figura 14 se muestra el código implementado (script) para la descarga de los archivos RINEX, en función del FTP correspondiente a cada gestor, donde el comando “wget” permite acceder para descargar o recuperar contenido del servidor, en este caso, los archivos RINEX, depositados en el correspondiente FTP.



**Figura 13.** Diagrama de flujo para la descarga de RINEX.

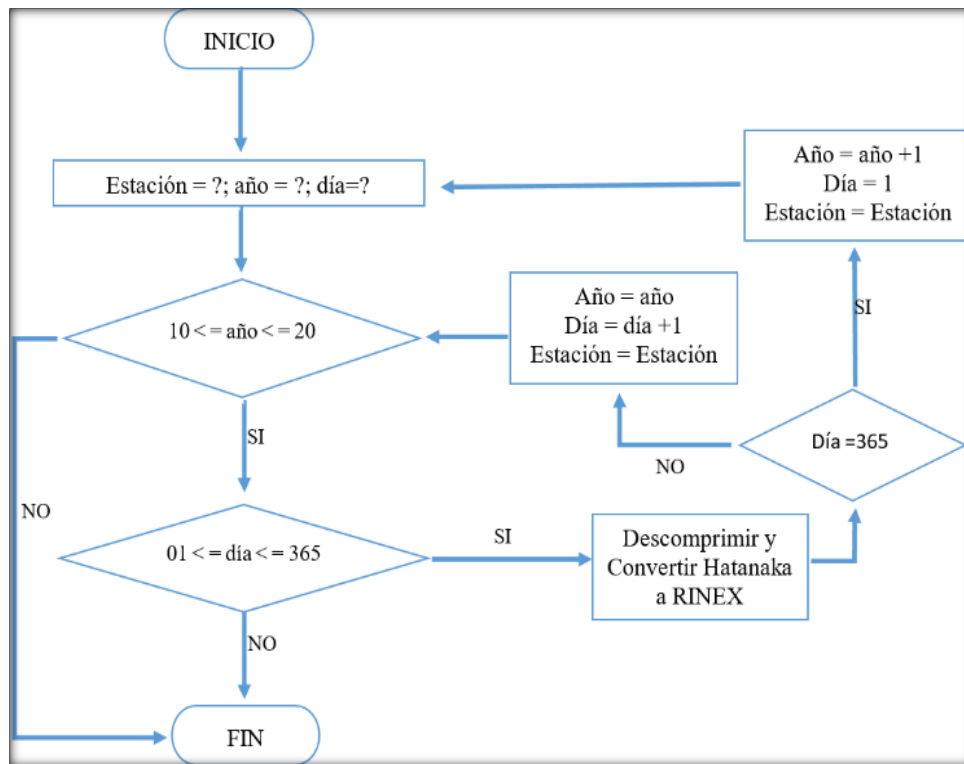
```

Descarga.sh
#!/bin/bash
for estacion in ineg
do
for ano in {10..20}
do
for dia in {001..365}
do
wget ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/data/20"$ano"/"$dia"/"$estacion""$dia"0."$ano"d.Z
wget ftp://data-out.unavco.org/pub/rinex/obs/20"$ano"/"$dia"/"$estacion""$dia"0."$ano"d.Z
wget ftp://geodesy.noaa.gov/cors/rinex/20"$ano"/"$dia"/"$estacion"/"$estacion""$dia"0."$ano"d.Z
done
done
done

```

**Figura 14.** Código para la descarga de RINEX.

En la Figura 15 se muestra el diagrama de flujo para descomprimir y convertir de formato Hatanaka a RINEX, de manera similar en la Figura 16 se muestra el script implementado para dicho proceso de conversión, dando como resultado archivos con terminación “o”, es decir, archivos de observación.

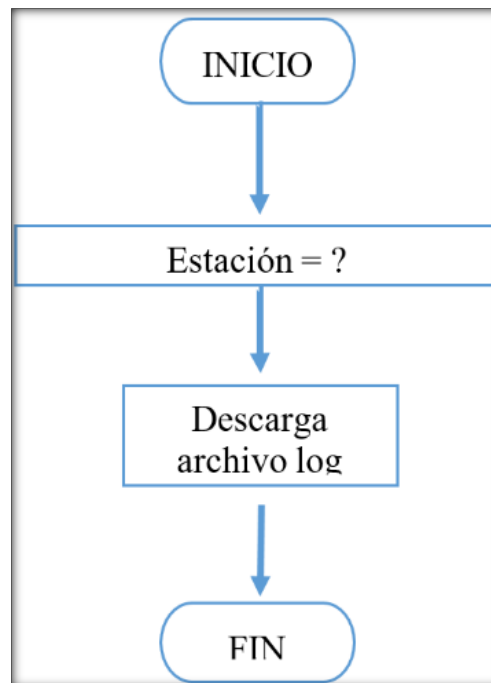


**Figura 15.** Diagrama de flujo para convertir de HATANAKA a RINEX.

```
Des.sh
#!/bin/bash
for estacion in meri
do
for ano in {10..20}
do
for dia in {001..365}
do
gunzip *Z
./CRX2RNX -d "$estacion"$dia"0."$ano"d
done
done
done
```

**Figura 16.** Conversión Hatanaka – RINEX.

En la Figura 17 se muestra el diagrama de flujo para la descarga de los archivos log donde sólo se requiere del nombre de la estación para el acceso al FTP de descarga. En la Figura 18 se muestra el código para la descarga por bloque de estaciones, pertenecientes a un mismo gestor, siendo el formato de descarga un archivo de texto.



**Figura 17.** Diagrama de flujo para descarga de archivos log.

```

Deslog.sh
#!/bin/bash
for estacion in guax oxpe oxth oxum pena teco tnal tnam tnat tnba tncc tnem tnfn tnct tnfy tngf tnhm tnif
tnlc tnmo tnmq tnmr tnms tnmt tnz tnpn tnpx tnpy tnqj tnpp tnqj tnrb tnrm tnsm tnuc tnuc tnuc tnuc tnuc
do
wget ftp://data-out.unavco.org/pub/logs/"$estacion"log.txt
done
    
```

Figura 18. Descarga de archivos log.

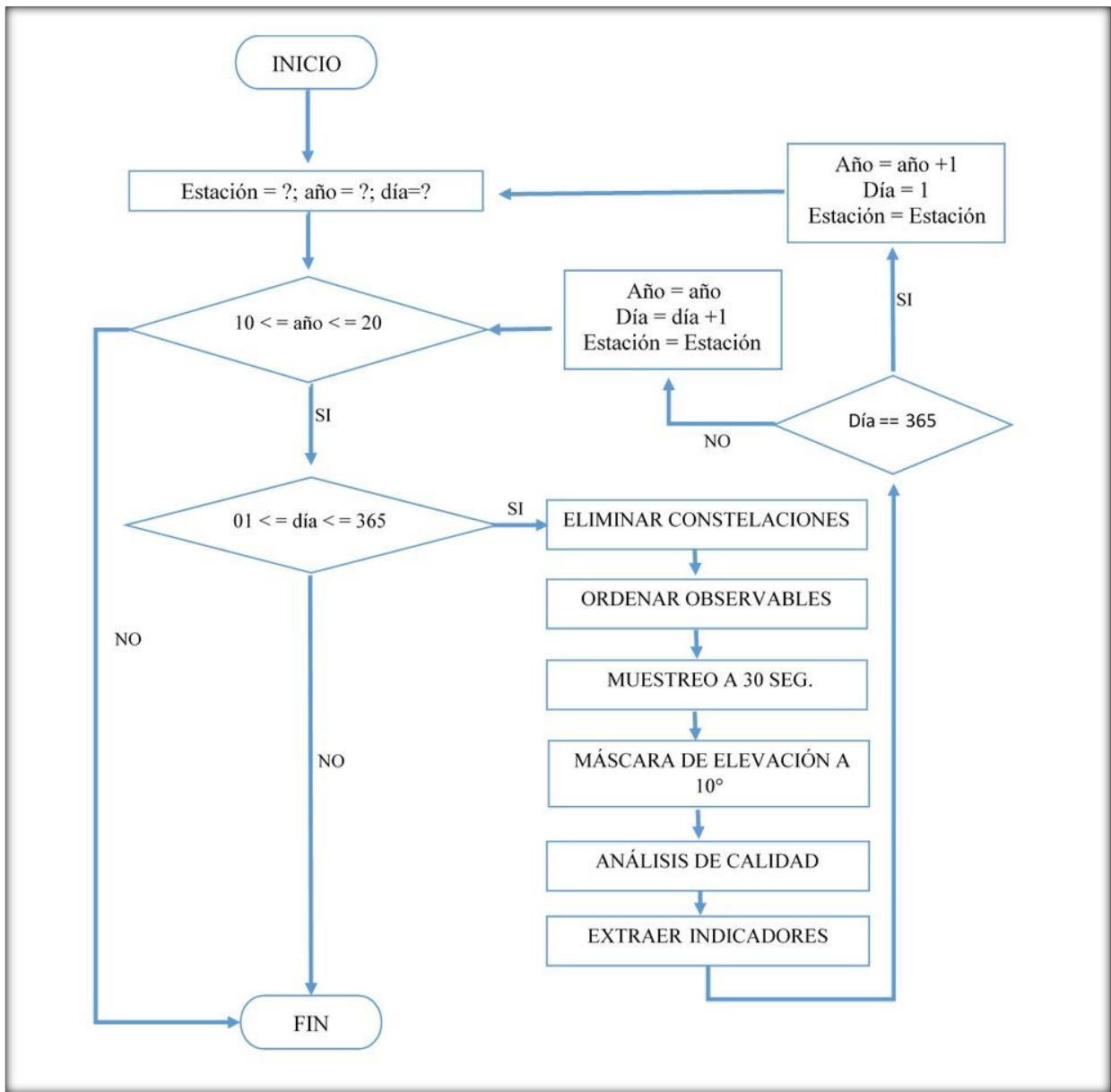


Figura 19. Diagrama de flujo para el análisis de calidad.

En la Figura 19 se muestra el diagrama de flujo para el análisis de calidad y en la Figura 20 se muestra el código implementado, en el cual se eliminan las constelaciones de Galileo (-E), GLONASS (-R) y SBAS (-S) conservando sólo GPS para estandarizar aquellas estaciones que hasta el momento continúan como CGPS y así no generar sesgos en el análisis de calidad dada la cantidad de estaciones CGPS (53 estaciones) respecto de las GNSS (12 estaciones), posteriormente, se ordenan las observables, se cambian las tasas de muestreo a 30 s con una máscara de elevación de 10° y así se procede a utilizar los archivos de navegación y observables editados para el análisis de calidad, siendo el resultado, un archivo de resumen (terminación "S") por día, del cual se extrae cada parámetro a evaluar en archivos de texto.

```

QC.sh

#!/bin/bash
for estacion in ineg
do
for ano in {10..20}
do
for dia in {001..365}
do
./teqc -E -R -S "$estacion""$dia"0."$ano"o > "$estacion""$dia"01."$ano"o
./teqc -O.obs L1C1L2P2D1 "$estacion""$dia"01."$ano"o > "$estacion""$dia"02."$ano"o
./teqc -O.int .15 -O.dec 30 "$estacion""$dia"02."$ano"o > "$estacion""$dia"03."$ano"o
cat "$estacion""$dia"03."$ano"o > "$estacion""$dia"0."$ano"o
rm "$estacion""$dia"01."$ano"o
rm "$estacion""$dia"02."$ano"o
rm "$estacion""$dia"03."$ano"o
./teqc +qc -nav brdc"$dia"0."$ano"n "$estacion""$dia"0."$ano"o
done
grep 'SUM ' *."$ano"S | awk '{print $15,$16}' > multipath"$estacion""$ano".txt
grep 'SUM ' *."$ano"S | awk '{print 1000/$17}' > oslps"$estacion""$ano".txt
grep 'SUM ' *."$ano"S | awk '{print $14}' > integridad"$estacion""$ano".txt
grep 'Mean S1 ' *."$ano"S | awk '{print $4}' > S1"$estacion""$ano".txt
grep 'Mean S2 ' *."$ano"S | awk '{print $4}' > S2"$estacion""$ano".txt
done
done

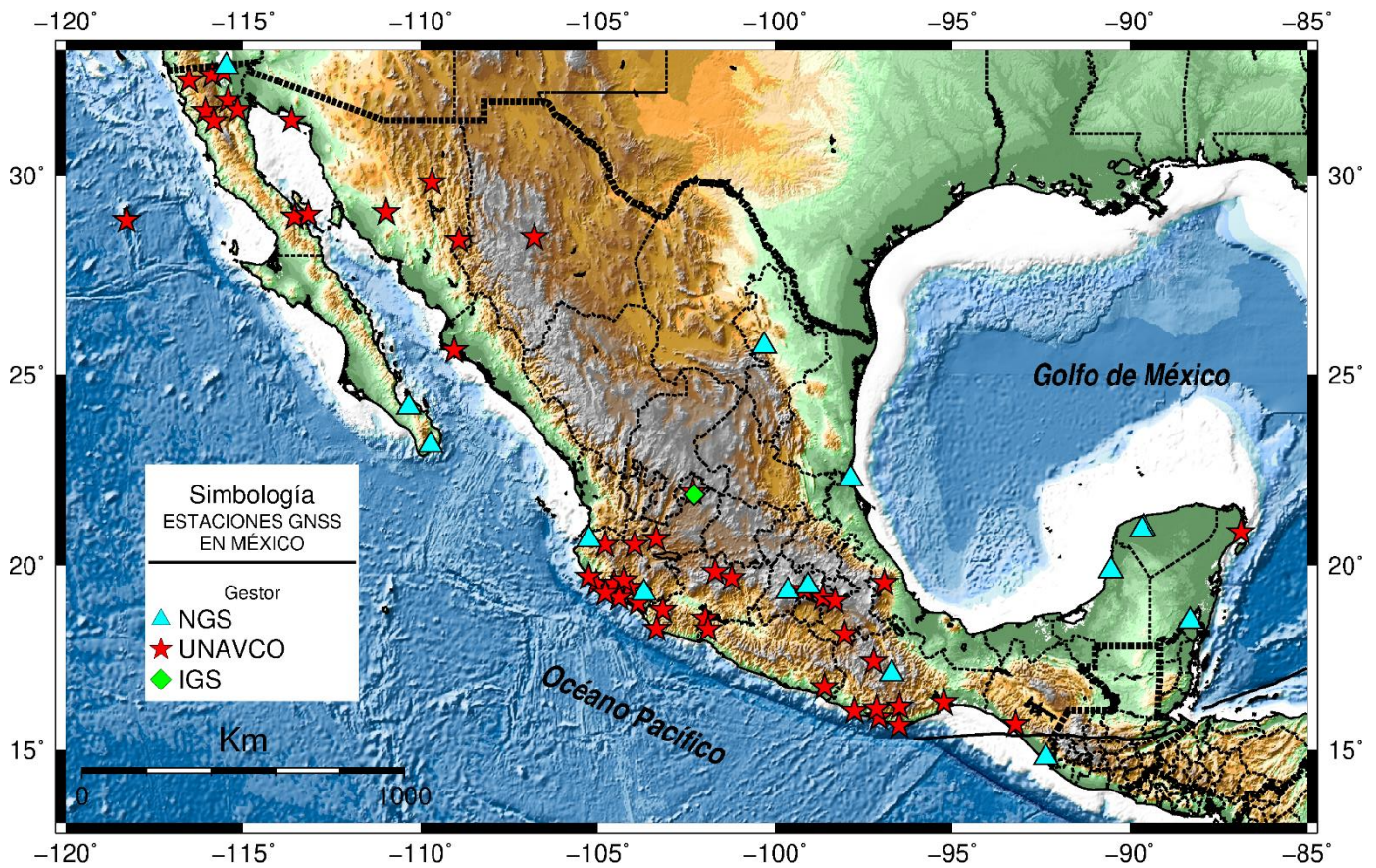
```

**Figura 20.** Código para el análisis de calidad.

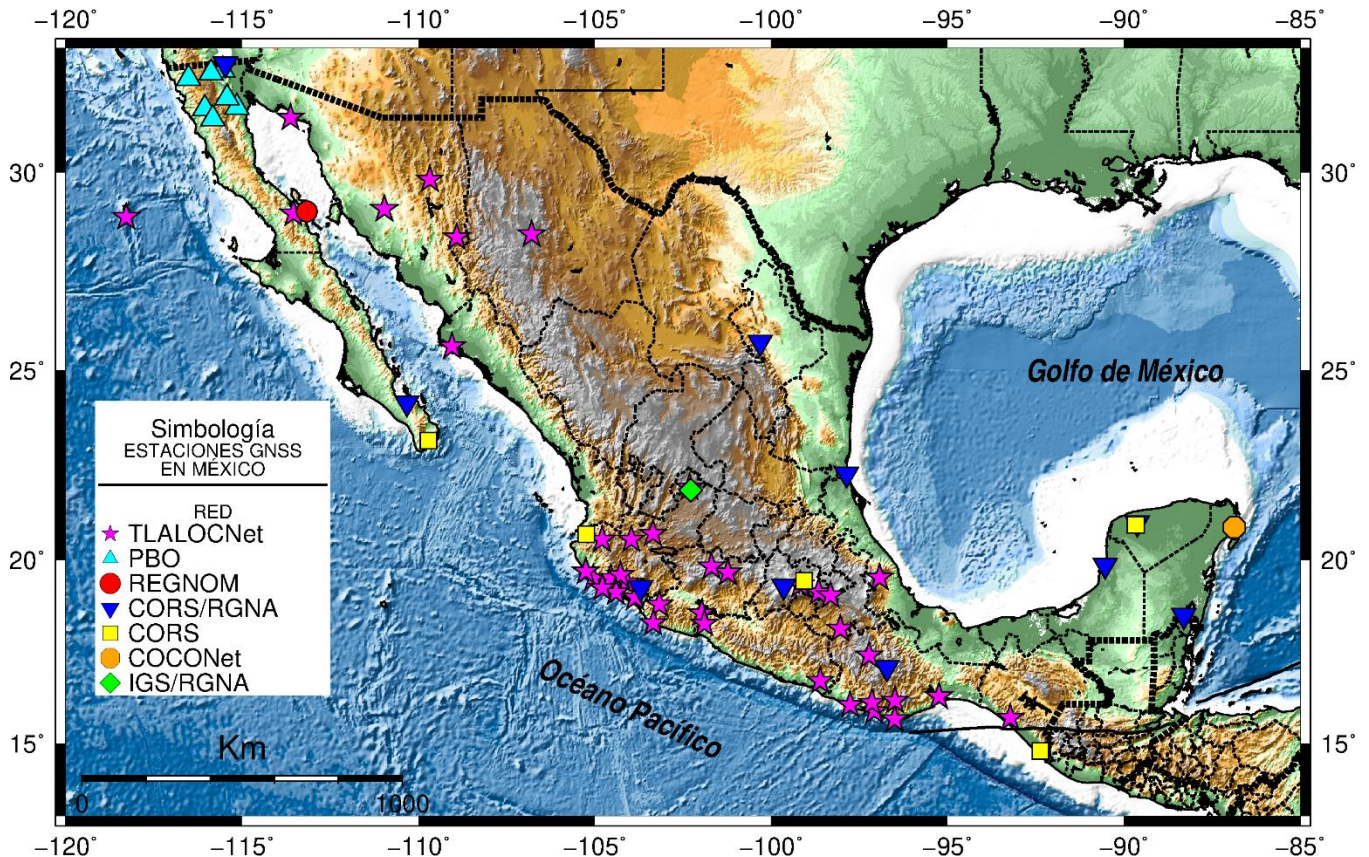
## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

El análisis de calidad se ha realizado en 65 estaciones geodésicas de libre acceso pertenecientes a tres principales gestores: UNAVCO, IGS y NGS, como se muestra en la Figura 21 dentro de territorio mexicano, dicho análisis comprende del primero de enero de 2010 al 28 de enero del 2020 siendo un periodo de 10.07 años y un total de 155,324 días disponibles evaluados, considerando el efecto multitrayectoria en las bandas  $L_1$  y  $L_2$ , la relación señal-ruido en  $L_1$  y  $L_2$ , saltos de ciclo por cada mil observaciones, así como la integridad de los datos, con tasas de muestreo a 30 s y máscara de elevación a  $10^\circ$ .

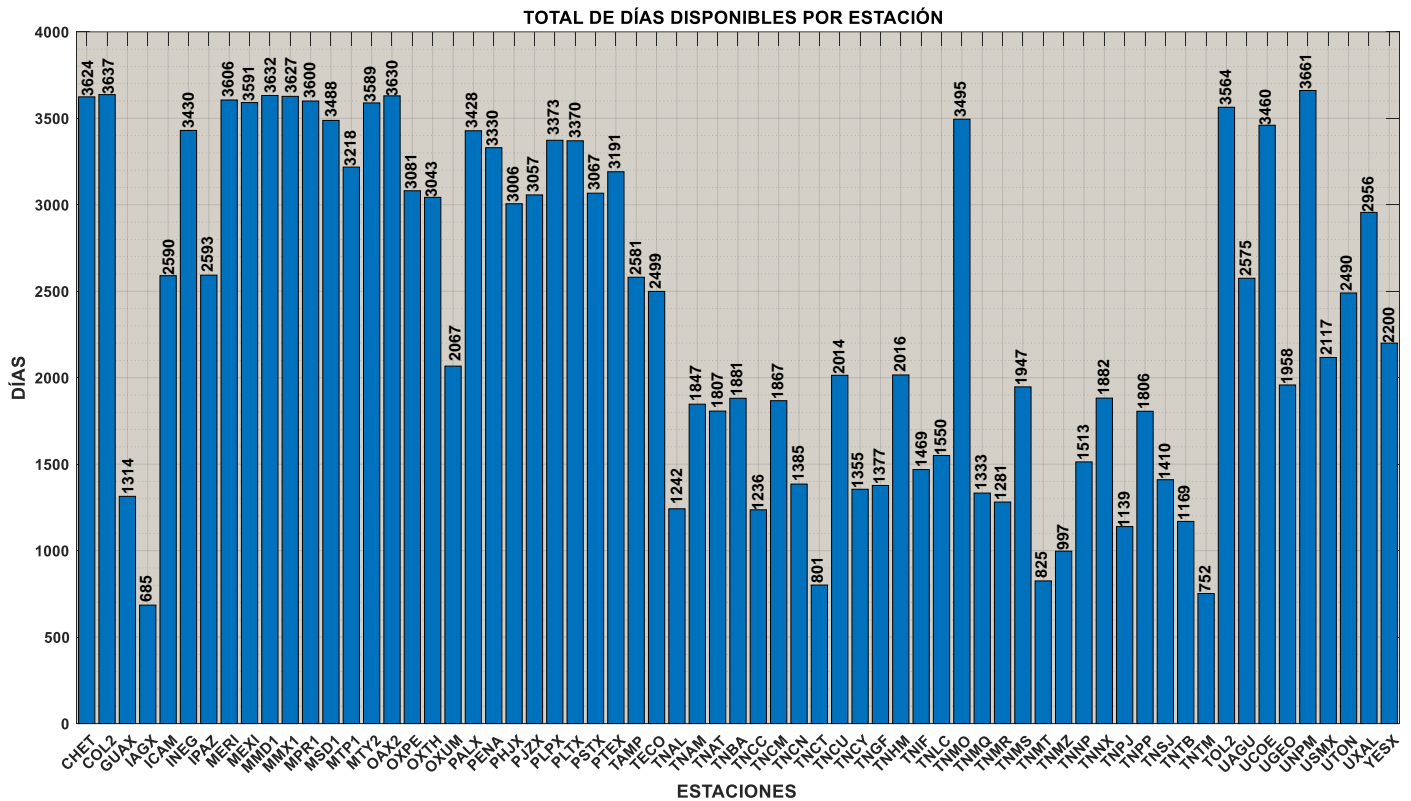


De las 65 estaciones geodésicas analizadas: 49 estaciones son gestionadas por UNAVCO en sus diferentes redes geodésicas (REGNOM, TLALOCNet, COCONet, PBO); 15 estaciones las gestiona el NGS a través de la red CORS, de las cuales diez forman parte de la RGNA; y una última estación perteneciente al IGS y forma parte de la RGNA como se muestra en la Figura 22.



**Figura 22.** Estaciones GNSS de libre acceso identificadas por red para el análisis de calidad. Modelo de Relieve Global ETOPO1 (NOAA, 2008). Mapa generado mediante Generic Mapping Tools (Wessel *et al.*, 2019).

En la Figura 23 se muestra el total de días disponibles por estación, siendo la menor cantidad de días disponibles de 685 días de la estación IAGX y la estación con mayores días disponibles es UNPM con 3661 días, el promedio global de días disponibles es de 2389.6 días.



**Figura 23.** Total de días disponibles por estación del año 2010 a 2020.

La disponibilidad de RINEX por días del año se desglosa en la Tabla 8 contabilizando un total de 155,324 días disponibles de RINEX correspondientes a las 65 estaciones geodésicas, de las cuales sólo 33 estaciones están por encima del promedio global de días analizados, es decir, mayor a 2389.6 días. Dentro de estas 33 estaciones, se encuentran todas la correspondientes a NGS (15 estaciones) e IGS (una estación), las 17 estaciones restantes corresponden a UNAVCO y en un rango de 685 días a 2200 días corresponden a las 32 estaciones gestionadas por UNAVCO.

En la Tabla 8, las estaciones se han ordenado respecto a los días totales disponibles de menor a mayor al igual que el periodo evaluado en años. Así mismo, los guiones representan días no disponibles y a partir de la línea roja las estaciones que tienen mayor cantidad de días disponibles al promedio global (>2389.6 días).

Tabla 8. Disponibilidad de días por año

| ESTACIÓN | GESTOR | LOCALIZACIÓN                              | AÑO  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | TOTAL (DÍAS) | TOTAL (AÑOS) |      |
|----------|--------|-------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|--------------|------|
|          |        |                                           | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |              |              |      |
| IAGX     | UNAVCO | Isla Ángel de la Guarda, BAJA CALIFORNIA  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 298  | 359  | 28           | 685          | 1.88 |
| TNTM     | UNAVCO | Tamarindo, JALISCO                        | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 365  | 359  | 28           | 752          | 2.06 |
| TNCT     | UNAVCO | Chalacatepec, JALISCO                     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 350  | 245  | 206  | -            | 801          | 2.19 |
| TNMT     | UNAVCO | Manantlán, JALISCO                        | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 73   | 365  | 359  | 28           | 825          | 2.26 |
| TNMZ     | UNAVCO | Manzanillo, COLIMA                        | -    | -    | -    | -    | -    | 191  | 357  | 344  | 105  | -    | -    | -            | 997          | 2.73 |
| TNPJ     | UNAVCO | Pijijiapan, CHIAPAS                       | -    | -    | -    | -    | 44   | 365  | 231  | 313  | 186  | -    | -    | -            | 1139         | 3.12 |
| TNTB     | UNAVCO | Topolobampo, SINALOA                      | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 365  | 365  | 365  | 365  | 74   | -            | 1169         | 3.20 |
| TNCC     | UNAVCO | Coalcomán, MICHOACÁN                      | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 172  | 352  | 365  | 319  | 28   | -            | 1236         | 3.39 |
| TNAL     | UNAVCO | Altzomoni, PUEBLA                         | -    | -    | -    | -    | 139  | 363  | 332  | 364  | 44   | -    | -    | -            | 1242         | 3.40 |
| TNMR     | UNAVCO | Maruata, MICHOACÁN                        | -    | -    | -    | -    | 113  | 342  | 349  | 291  | 186  | -    | -    | -            | 1281         | 3.51 |
| GUAX     | UNAVCO | Isla Guadalupe, BAJACALIFORNIA            | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 198  | 365  | 365  | 358  | 28   | -            | 1314         | 3.60 |
| TNMQ     | UNAVCO | Marquelia, GUERRERO                       | -    | -    | -    | -    | -    | 37   | 341  | 363  | 364  | 200  | 28   | -            | 1333         | 3.65 |
| TNCY     | UNAVCO | Coyuche, OAXACA                           | -    | -    | -    | -    | -    | 33   | 365  | 357  | 365  | 207  | 28   | -            | 1355         | 3.71 |
| TNGF     | UNAVCO | CDMX                                      | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 260  | 365  | 365  | 359  | 28   | -            | 1377         | 3.77 |
| TNCN     | UNAVCO | Las Cañas, MICHOACÁN                      | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 314  | 319  | 365  | 359  | 28   | -            | 1385         | 3.79 |
| TNSJ     | UNAVCO | San José del Pacífico, OAXACA             | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 294  | 365  | 364  | 359  | 28   | -            | 1410         | 3.86 |
| TNIF     | UNAVCO | La Concepción, JALISCO                    | -    | -    | -    | -    | -    | 75   | 277  | 365  | 365  | 359  | 28   | -            | 1469         | 4.02 |
| TNNP     | UNAVCO | Nopala, OAXACA                            | -    | -    | -    | -    | -    | 31   | 365  | 365  | 365  | 359  | 28   | -            | 1513         | 4.15 |
| TNLC     | UNAVCO | Morelia, MICHOACÁN                        | -    | -    | -    | -    | -    | 68   | 365  | 365  | 365  | 359  | 28   | -            | 1550         | 4.25 |
| TNPP     | UNAVCO | Puerto Peñasco, SONORA                    | -    | -    | -    | -    | -    | 324  | 365  | 365  | 365  | 359  | 28   | -            | 1806         | 4.95 |
| TNAT     | UNAVCO | Acatlán, PUEBLA                           | -    | -    | -    | -    | 48   | 365  | 297  | 356  | 354  | 359  | 28   | -            | 1807         | 4.95 |
| TNAM     | UNAVCO | Ameca, JALISCO                            | -    | -    | -    | -    | -    | 365  | 365  | 365  | 365  | 359  | 28   | -            | 1847         | 5.06 |
| TNCM     | UNAVCO | Chamela, JALISCO                          | -    | -    | -    | -    | 115  | 307  | 341  | 352  | 365  | 359  | 28   | -            | 1867         | 5.12 |
| TNBA     | UNAVCO | Bahía de los Ángeles, BAJA CALIFORNIA SUR | -    | -    | -    | -    | 34   | 365  | 365  | 365  | 365  | 359  | 28   | -            | 1881         | 5.15 |
| TNNX     | UNAVCO | Nochixtlan, OAXACA                        | -    | -    | -    | -    | 47   | 365  | 365  | 353  | 365  | 359  | 28   | -            | 1882         | 5.16 |
| TNMS     | UNAVCO | Mascota, JALISCO                          | -    | -    | -    | -    | 117  | 365  | 365  | 348  | 365  | 359  | 28   | -            | 1947         | 5.33 |
| UGEO     | UNAVCO | Guadalajara, JALISCO                      | 238  | 112  | -    | -    | -    | 318  | 365  | 335  | 203  | 359  | 28   | -            | 1958         | 5.36 |
| TNCU     | UNAVCO | Cauhtémoc, Chihuahua                      | -    | -    | -    | -    | 167  | 365  | 365  | 365  | 365  | 359  | 28   | -            | 2014         | 5.52 |
| TNHM     | UNAVCO | Presa Infiernillo, Jalisco                | -    | -    | -    | -    | 169  | 365  | 365  | 365  | 365  | 359  | 28   | -            | 2016         | 5.52 |
| OXUM     | UNAVCO | Puerto Ángel, OAXACA                      | -    | -    | -    | 99   | 332  | 236  | 296  | 365  | 365  | 346  | 28   | -            | 2067         | 5.66 |
| USMX     | UNAVCO | Moctezuma, SONORA                         | -    | -    | -    | -    | 270  | 365  | 365  | 365  | 365  | 359  | 28   | -            | 2117         | 5.80 |
| YESX     | UNAVCO | Yecora, SONORA                            | 143  | 185  | -    | -    | 25   | 365  | 365  | 365  | 365  | 359  | 28   | -            | 2200         | 6.03 |
| UTON     | UNAVCO | Tonanzintla, PUEBLA                       | 32   | -    | 27   | 348  | 284  | 365  | 365  | 365  | 364  | 321  | 19   | -            | 2490         | 6.82 |
| TECO     | UNAVCO | Tecomán, COLIMA                           | 357  | 365  | 136  | -    | -    | 350  | 365  | 364  | 365  | 169  | 28   | -            | 2499         | 6.85 |
| UAGU     | UNAVCO | Aguascalientes, AGUASCALIENTES            | 264  | -    | 350  | 258  | 97   | 306  | 334  | 252  | 356  | 330  | 28   | -            | 2575         | 7.05 |

|      |        |                                       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |      |       |
|------|--------|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|------|-------|
| TAMP | NGS    | Tampico,<br>TAMAULIPAS                | -   | -   | 55  | 360 | 362 | 363 | 348 | 356 | 359 | 350 | 28 | 2581 | 7.07  |
| ICAM | NGS    | Campeche,<br>CAMPECHE                 | -   | -   | 56  | 365 | 365 | 363 | 347 | 355 | 363 | 348 | 28 | 2590 | 7.10  |
| IPAZ | NGS    | La Paz, Baja<br>California Sur        | -   | -   | 56  | 365 | 365 | 365 | 348 | 346 | 365 | 355 | 28 | 2593 | 7.10  |
| UXAL | UNAVCO | Jalapa, Veracruz                      | 109 | 364 | 352 | 215 | 153 | 313 | 365 | 365 | 365 | 327 | 28 | 2956 | 8.10  |
| PHJX | UNAVCO | Mexicali, BAJA<br>CALIFORNIA          | -   | 64  | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 359 | 28 | 3006 | 8.24  |
| OXTH | UNAVCO | Tehuantepec,<br>OAXACA                | 357 | 115 | 207 | 234 | 346 | 365 | 343 | 325 | 364 | 359 | 28 | 3043 | 8.34  |
| PJZX | UNAVCO | La Rumorosa, BAJA<br>CALIFORNIA       | -   | 324 | 365 | 365 | 365 | 365 | 209 | 312 | 365 | 359 | 28 | 3057 | 8.38  |
| PSTX | UNAVCO | San Isidro,<br>CALIFORNIA             | 124 | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 144 | 222 | 365 | 359 | 28 | 3067 | 8.40  |
| OXPE | UNAVCO | Puerto Escondido,<br>OAXACA           | 307 | 364 | 238 | 325 | 365 | 192 | 267 | 287 | 349 | 359 | 28 | 3081 | 8.44  |
| PTEX | UNAVCO | Tecate, BAJA<br>CALIFORNIA            | -   | 249 | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 359 | 28 | 3191 | 8.74  |
| MTP1 | NGS    | Tapachula,<br>CHIAPAS                 | 190 | 220 | 361 | 364 | 365 | 317 | 365 | 310 | 343 | 356 | 27 | 3218 | 8.82  |
| PENA | UNAVCO | Pena Colorada,<br>COLIMA              | 357 | 365 | 365 | 365 | 365 | 362 | 365 | 354 | 286 | 118 | 28 | 3330 | 9.12  |
| PLTX | UNAVCO | Mexicali, BAJA<br>CALIFORNIA          | 63  | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 359 | 28 | 3370 | 9.23  |
| PLPX | UNAVCO | San Felipe, BAJA<br>CALIFORNIA        | 66  | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 359 | 28 | 3373 | 9.24  |
| PALX | UNAVCO | El Álamo,<br>BAJACALIFORNIA           | 121 | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 365 | 359 | 28 | 3428 | 9.39  |
| INEG | IGS    | Aguascalientes,<br>AGUASCALIENTES     | 355 | 322 | 341 | 347 | 352 | 353 | 287 | 355 | 349 | 347 | 22 | 3430 | 9.40  |
| UCOE | UNAVCO | Coeneo, Michoacán                     | 356 | 336 | 219 | 365 | 340 | 364 | 363 | 365 | 365 | 359 | 28 | 3460 | 9.48  |
| MSD1 | NGS    | San José del Cabo,<br>BAJA CALIFORNIA | 356 | 364 | 361 | 365 | 358 | 350 | 244 | 363 | 349 | 351 | 27 | 3488 | 9.56  |
| TNMO | UNAVCO | Morelia,<br>MICHUACÁN                 | 301 | 364 | 362 | 348 | 365 | 273 | 365 | 365 | 365 | 359 | 28 | 3495 | 9.58  |
| TOL2 | NGS    | Toluca,<br>EDO.MEXICO                 | 354 | 364 | 362 | 363 | 364 | 365 | 351 | 359 | 346 | 336 | -  | 3564 | 9.76  |
| MTY2 | NGS    | Monterrey, NUEVO<br>LEON              | 357 | 365 | 360 | 365 | 365 | 365 | 359 | 349 | 318 | 358 | 28 | 3589 | 9.83  |
| MEXI | NGS    | Mexicali, BAJA<br>CALIFORNIA          | 349 | 365 | 363 | 364 | 358 | 365 | 338 | 340 | 365 | 358 | 26 | 3591 | 9.84  |
| MPR1 | NGS    | Puerto Vallarta,<br>JALISCO           | 356 | 364 | 358 | 336 | 365 | 362 | 365 | 365 | 347 | 355 | 27 | 3600 | 9.86  |
| MERI | NGS    | Mérida, YUCATAN                       | 357 | 365 | 365 | 358 | 347 | 359 | 354 | 350 | 365 | 358 | 28 | 3606 | 9.88  |
| CHET | NGS    | Chetumal,<br>QUINTANA ROO             | 355 | 361 | 364 | 364 | 364 | 365 | 352 | 353 | 359 | 359 | 28 | 3624 | 9.93  |
| MMX1 | NGS    | CDMX                                  | 356 | 364 | 356 | 365 | 365 | 361 | 365 | 365 | 348 | 355 | 27 | 3627 | 9.94  |
| OAX2 | NGS    | Oaxaca, OAXACA                        | 357 | 365 | 365 | 365 | 365 | 355 | 353 | 355 | 365 | 358 | 27 | 3630 | 9.95  |
| MMD1 | NGS    | Mérida, YUCATAN                       | 356 | 363 | 361 | 365 | 365 | 362 | 365 | 365 | 347 | 356 | 27 | 3632 | 9.95  |
| COL2 | NGS    | Colima, COLIMA                        | 357 | 364 | 365 | 365 | 365 | 361 | 357 | 351 | 365 | 359 | 28 | 3637 | 9.96  |
| UNPM | UNAVCO | Puerto Morelos,<br>QUINTANA ROO       | 357 | 365 | 365 | 365 | 362 | 365 | 365 | 365 | 365 | 359 | 28 | 3661 | 10.03 |

*Nota: A partir de la línea roja son las estaciones que superan el promedio global de días analizados.*

#### 4.1 Análisis estadístico del efecto multitrayectoria

El análisis del efecto multitrayectoria se basa en la combinación lineal de pseudorange y fase portadora para la estimación del error medio cuadrático (RMS) en las bandas  $L_1$  correspondiente a la multitrayectoria MP1 y en la banda  $L_2$  correspondiente a la multitrayectoria MP2 de la constelación de GPS.

La Tabla 9 muestra el resultado estadístico de las variaciones del efecto multitrayectoria MP1 en la banda  $L_1$ , de las 65 estaciones analizadas, ordenadas de mayor a menor afectación con base al promedio de MP1 respecto de cada estación, entre 0.14 m a 1.00 m, así mismo los valores máximos en el rango de 0.33 m a 6.11 m y mínimos entre 0.04 m a 0.80 m.

**Tabla 9.** Estadística de las variaciones del efecto multitrayectoria MP1-RMS

| Estación | No. de días | Max (m) | Min (m) | Promedio (m) | $\sigma$ (m) | Receptor      | Tipo de Antena  | Radomo | Gestor | Red            |
|----------|-------------|---------|---------|--------------|--------------|---------------|-----------------|--------|--------|----------------|
| MPR1     | 3600        | 1.29    | 0.63    | 1.00         | 0.04         | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| MTP1     | 3218        | 1.20    | 0.39    | 0.98         | 0.05         | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| MSD1     | 3488        | 1.29    | 0.43    | 0.94         | 0.05         | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| TNMT     | 825         | 1.11    | 0.8     | 0.92         | 0.04         | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| MMD1     | 3632        | 0.93    | 0.44    | 0.79         | 0.03         | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| YESX     | 2200        | 0.95    | 0.35    | 0.72         | 0.15         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UTON     | 2490        | 1.68    | 0.33    | 0.68         | 0.20         | TRIMBLE NETR9 | TRM55971.00     | NONE   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMR     | 1281        | 1.08    | 0.52    | 0.66         | 0.07         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCU     | 2014        | 0.91    | 0.54    | 0.65         | 0.05         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNGF     | 1377        | 1.03    | 0.56    | 0.64         | 0.08         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PENA     | 3330        | 3.42    | 0.27    | 0.64         | 0.48         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIS   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNPJ     | 1139        | 1.21    | 0.52    | 0.61         | 0.06         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| MMX1     | 3627        | 0.77    | 0.41    | 0.59         | 0.02         | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| TECO     | 2499        | 0.89    | 0.3     | 0.58         | 0.18         | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00     | UNKN   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMS     | 1947        | 0.84    | 0.49    | 0.58         | 0.03         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNAL     | 1242        | 0.83    | 0.42    | 0.57         | 0.07         | TRIMBLE NETRS | TRM57971.00     | NONE   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCY     | 1355        | 0.93    | 0.43    | 0.55         | 0.05         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNNX     | 1882        | 1.17    | 0.45    | 0.53         | 0.04         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNSJ     | 1410        | 0.76    | 0.42    | 0.53         | 0.02         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNNP     | 1513        | 1.37    | 0.45    | 0.52         | 0.04         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OXPE     | 3081        | 0.88    | 0.3     | 0.52         | 0.09         | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNTM     | 752         | 0.65    | 0.46    | 0.51         | 0.03         | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| USMX     | 2117        | 0.65    | 0.45    | 0.50         | 0.02         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |

|      |      |      |      |      |      |               |             |      |        |                |
|------|------|------|------|------|------|---------------|-------------|------|--------|----------------|
| PHJX | 3006 | 0.55 | 0.44 | 0.50 | 0.01 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TNLC | 1550 | 0.6  | 0.44 | 0.49 | 0.02 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCN | 1385 | 0.77 | 0.41 | 0.49 | 0.04 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OXUM | 2067 | 0.69 | 0.31 | 0.49 | 0.07 | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCM | 1867 | 1.15 | 0.42 | 0.47 | 0.03 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNIF | 1469 | 0.63 | 0.37 | 0.47 | 0.02 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMH | 2016 | 0.75 | 0.44 | 0.46 | 0.01 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMQ | 1333 | 0.96 | 0.38 | 0.45 | 0.04 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCT | 801  | 0.58 | 0.40 | 0.45 | 0.02 | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCC | 1236 | 0.59 | 0.38 | 0.44 | 0.03 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNAT | 1807 | 0.94 | 0.40 | 0.44 | 0.02 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNPP | 1806 | 0.60 | 0.40 | 0.44 | 0.02 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNAM | 1847 | 1.01 | 0.40 | 0.44 | 0.03 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OXTH | 3043 | 0.58 | 0.22 | 0.44 | 0.05 | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00 | UNKN | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UXAL | 2956 | 0.64 | 0.24 | 0.43 | 0.07 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| GUAX | 1314 | 0.54 | 0.39 | 0.43 | 0.02 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNTB | 1169 | 0.48 | 0.35 | 0.42 | 0.01 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UAGU | 2575 | 0.48 | 0.29 | 0.42 | 0.07 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | UNKN | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UCOE | 3460 | 0.67 | 0.25 | 0.41 | 0.09 | TRIMBLE NETR9 | TRM55971.00 | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNBA | 1881 | 0.62 | 0.39 | 0.41 | 0.01 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMZ | 997  | 0.45 | 0.13 | 0.41 | 0.02 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | UNKN | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UGEO | 1958 | 0.45 | 0.22 | 0.40 | 0.02 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| IAGX | 685  | 0.51 | 0.35 | 0.39 | 0.03 | TRIMBLE NETR8 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/REGNOM    |
| PTEX | 3191 | 0.43 | 0.35 | 0.39 | 0.01 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| UNPM | 3661 | 0.63 | 0.26 | 0.39 | 0.10 | TRIMBLE NETR9 | TRM41249.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/COCOnet   |
| PLTX | 3370 | 0.41 | 0.35 | 0.38 | 0.01 | TRIMBLE NETRS | TRM29659.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TNMO | 3495 | 0.40 | 0.32 | 0.34 | 0.01 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PSTX | 3067 | 0.43 | 0.30 | 0.34 | 0.01 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| PALX | 3428 | 0.35 | 0.29 | 0.32 | 0.01 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| PJZX | 3057 | 0.33 | 0.09 | 0.30 | 0.01 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| IPAZ | 2593 | 0.43 | 0.09 | 0.29 | 0.10 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| TAMP | 2581 | 0.46 | 0.09 | 0.28 | 0.10 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| PLPX | 3373 | 0.34 | 0.16 | 0.24 | 0.01 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.80 | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| ICAM | 2590 | 0.44 | 0.08 | 0.24 | 0.09 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| CHET | 3624 | 0.50 | 0.10 | 0.24 | 0.10 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| MERI | 3606 | 0.43 | 0.08 | 0.22 | 0.10 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| TOL2 | 3566 | 0.35 | 0.07 | 0.20 | 0.06 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| OAX2 | 3630 | 0.35 | 0.08 | 0.19 | 0.05 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| MYT2 | 3586 | 6.11 | 0.07 | 0.19 | 0.25 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| COL2 | 3637 | 0.36 | 0.12 | 0.18 | 0.04 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| MEXI | 3591 | 0.57 | 0.08 | 0.18 | 0.03 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| INEG | 3430 | 0.34 | 0.04 | 0.14 | 0.03 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | IGS    | IGS/RGNA       |

La Tabla 10 muestra el resultado estadístico de las variaciones del efecto multitrayectoria MP2 en la banda L<sub>2</sub>, de las 65 estaciones analizadas, ordenadas de mayor a menor afectación con base al promedio de MP2 respecto de cada estación, entre 0.19 m a 0.94 m, así mismo los valores máximos en el rango de 0.30 m a 6.32 m y mínimos entre 0.05 m a 0.48 m.

**Tabla 10.** Estadística de las variaciones del efecto multitrayectoria MP2-RMS

| Estación | No. de días | Max (m) | Mín (m) | Promedio (m) | $\sigma$ (m) | Receptor      | Tipo de Antena  | Radomo | Gestor | Red            |
|----------|-------------|---------|---------|--------------|--------------|---------------|-----------------|--------|--------|----------------|
| MPR1     | 3600        | 1.18    | 0.43    | 0.94         | 0.04         | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| MSD1     | 3488        | 1.42    | 0.38    | 0.87         | 0.08         | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| MTP1     | 3218        | 1.23    | 0.23    | 0.86         | 0.05         | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| PENA     | 3330        | 3.77    | 0.48    | 0.75         | 0.42         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIS   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| MMD1     | 3632        | 1.01    | 0.37    | 0.71         | 0.03         | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| MMX1     | 3627        | 0.94    | 0.34    | 0.60         | 0.03         | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| TNMT     | 825         | 0.63    | 0.47    | 0.55         | 0.03         | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNAL     | 1242        | 0.74    | 0.4     | 0.52         | 0.04         | TRIMBLE NETRS | TRM57971.00     | NONE   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| YESX     | 2200        | 0.66    | 0.34    | 0.52         | 0.07         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UTON     | 2490        | 1.23    | 0.3     | 0.51         | 0.12         | TRIMBLE NETR9 | TRM55971.00     | NONE   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMR     | 1281        | 0.81    | 0.41    | 0.49         | 0.05         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNGF     | 1377        | 0.83    | 0.43    | 0.49         | 0.05         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OXPE     | 3081        | 0.72    | 0.35    | 0.48         | 0.04         | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UXAL     | 2956        | 0.63    | 0.37    | 0.46         | 0.05         | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00     | NONE   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNPJ     | 1139        | 1.16    | 0.38    | 0.45         | 0.05         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TECO     | 2499        | 0.57    | 0.39    | 0.45         | 0.02         | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00     | UNKN   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UGEO     | 1958        | 0.51    | 0.24    | 0.43         | 0.02         | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00     | NONE   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCU     | 2014        | 0.58    | 0.32    | 0.42         | 0.05         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PHJX     | 3006        | 0.48    | 0.38    | 0.42         | 0.01         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TNMS     | 1947        | 0.81    | 0.3     | 0.42         | 0.04         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCY     | 1355        | 0.78    | 0.24    | 0.41         | 0.04         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OXUM     | 2067        | 0.56    | 0.31    | 0.41         | 0.04         | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| IPAZ     | 2593        | 0.57    | 0.22    | 0.40         | 0.07         | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| TNTM     | 752         | 0.52    | 0.3     | 0.40         | 0.05         | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UAGU     | 2575        | 0.48    | 0.35    | 0.39         | 0.03         | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00     | UNKN   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNNP     | 1513        | 0.98    | 0.27    | 0.38         | 0.04         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCN     | 1385        | 0.59    | 0.24    | 0.38         | 0.05         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNIF     | 1469        | 0.55    | 0.26    | 0.38         | 0.05         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UNPM     | 3661        | 0.67    | 0.29    | 0.38         | 0.04         | TRIMBLE NETR9 | TRM41249.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/COCOnet   |
| TNSJ     | 1410        | 0.7     | 0.25    | 0.37         | 0.06         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNLC     | 1550        | 0.5     | 0.26    | 0.37         | 0.04         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |

|      |      |      |      |      |      |               |             |      |        |                |
|------|------|------|------|------|------|---------------|-------------|------|--------|----------------|
| TNCM | 1867 | 1.03 | 0.25 | 0.37 | 0.03 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| GUAX | 1314 | 0.48 | 0.21 | 0.37 | 0.04 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCT | 801  | 0.6  | 0.26 | 0.36 | 0.04 | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMO | 3495 | 0.44 | 0.31 | 0.36 | 0.03 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNTB | 1169 | 0.43 | 0.25 | 0.36 | 0.03 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OXTH | 3043 | 0.46 | 0.15 | 0.36 | 0.03 | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00 | UNKN | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TAMP | 2581 | 0.51 | 0.17 | 0.36 | 0.05 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| COL2 | 3637 | 0.65 | 0.14 | 0.36 | 0.13 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| UCOE | 3460 | 0.73 | 0.26 | 0.35 | 0.04 | TRIMBLE NETR9 | TRM55971.00 | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| USMX | 2117 | 0.61 | 0.24 | 0.35 | 0.07 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| CHET | 3624 | 0.59 | 0.22 | 0.34 | 0.06 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| TNMQ | 1333 | 1.01 | 0.16 | 0.34 | 0.05 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNAT | 1807 | 0.99 | 0.23 | 0.34 | 0.05 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNBA | 1881 | 0.45 | 0.23 | 0.33 | 0.04 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCC | 1236 | 0.46 | 0.22 | 0.33 | 0.05 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMH | 2016 | 0.73 | 0.23 | 0.33 | 0.05 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| IAGX | 685  | 0.52 | 0.3  | 0.32 | 0.02 | TRIMBLE NETR8 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/REGNOM    |
| TNMZ | 997  | 0.36 | 0.09 | 0.32 | 0.01 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | UNKN | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNAM | 1847 | 0.95 | 0.23 | 0.32 | 0.05 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNPP | 1806 | 0.49 | 0.2  | 0.32 | 0.06 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| MERI | 3606 | 0.48 | 0.19 | 0.32 | 0.05 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| PTEX | 3191 | 0.36 | 0.28 | 0.32 | 0.01 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| ICAM | 2590 | 0.5  | 0.18 | 0.32 | 0.04 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| TNNX | 1882 | 0.71 | 0.2  | 0.32 | 0.06 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PLTX | 3370 | 0.35 | 0.27 | 0.29 | 0.01 | TRIMBLE NETRS | TRM29659.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TOL2 | 3566 | 0.58 | 0.17 | 0.29 | 0.05 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| MEXI | 3591 | 0.53 | 0.12 | 0.29 | 0.07 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| PALX | 3428 | 0.3  | 0.24 | 0.27 | 0.01 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| MYT2 | 3586 | 6.32 | 0.14 | 0.27 | 0.26 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| OAX2 | 3630 | 0.56 | 0.13 | 0.27 | 0.06 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| PSTX | 3067 | 0.38 | 0.23 | 0.26 | 0.01 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| PJZX | 3057 | 0.32 | 0.09 | 0.26 | 0.01 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| PLPX | 3373 | 0.73 | 0.17 | 0.23 | 0.05 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.80 | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| INEG | 3430 | 0.47 | 0.05 | 0.19 | 0.04 | LEICA GR10    | LEIAR10     | NONE | IGS    | IGS/RGNA       |

La estación MPR1 perteneciente a la red CORS presenta los valores promedios más elevados de MP1 y MP2 de todas las estaciones con 1.00 m y 0.94 m respectivamente, ocupando el primer lugar en las Tablas 9 y 10. En contraste la estación INEG de la red IGS y RGNA, muestra la menor afectación con 0.14 m en MP1 y 0.19 m para MP2, siendo la estación menos afectada de las 65 evaluadas ocupando el último lugar en ambas Tablas.

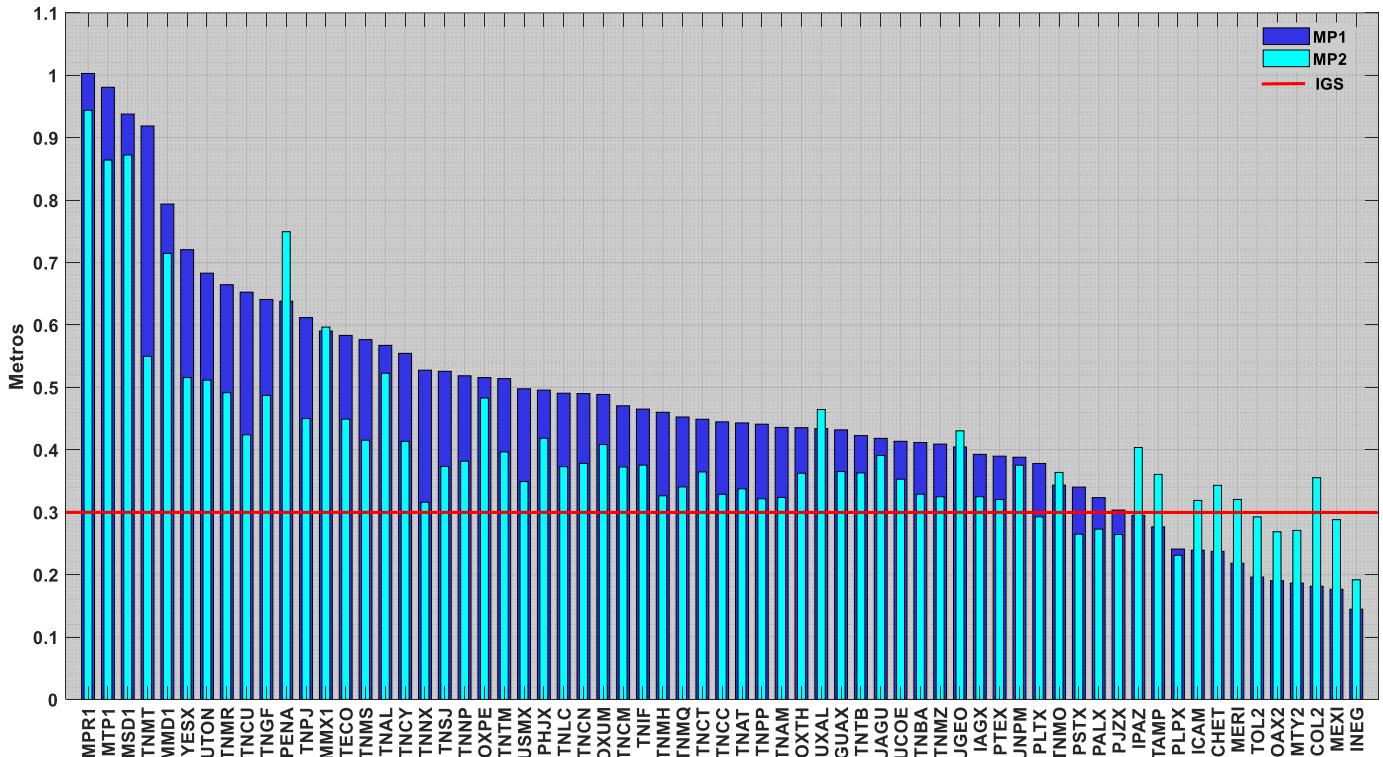
Ambas estaciones tienen diferentes cantidades de días evaluados, no obstante, los valores no varían en gran medida, 3600 días para MPR1 y 3430 para INEG, lo que refleja un comportamiento constante en la cantidad de efecto multitrayectoria en ambas bandas para cada estación.

Las estaciones con menor grado de afectación en MP1, son aquellas estaciones pertenecientes al NGS estando en las últimas 12 posiciones, todas con el mismo tipo de receptor LEICA GR10 y mismo tipo de antena LEIAR10, no obstante, las tres principales estaciones con mayor efecto multitrayectoria en MP1 también pertenecen al NGS siendo las estaciones MPR1, MTP1 y MSD1 con el 1.<sup>ro</sup>, 2.<sup>do</sup> y 3.<sup>er</sup> lugar respectivamente, MMD1 el 5.<sup>to</sup> lugar y el 13.<sup>vo</sup> lugar MMX1 que de manera similar comparten el mismo tipo de receptor NOV WAASGII y antena MPL\_WAAS\_2225NW. El grado de afectación en MP2 incrementa para la estación MMX1 llegando al 6.<sup>to</sup> lugar, MSD1 sube al 2.<sup>do</sup> y MTP1 al 3.<sup>er</sup> lugar. Respecto de las estaciones con menor efecto multitrayectoria en MP1, sólo 5 permanecen dentro de las últimas 12 posiciones de MP2. Dicho comportamiento puede estar relacionado a las actualizaciones de hardware y software (Ray y Senior, 2003; Herrada *et al.*, 2010; Vázquez *et al.*, 2013), si bien las estaciones que menor efecto multitrayectoria reflejan son aquellas que han tenido actualizaciones recientes, entre los años 2016 y 2017, caso contrario a las estaciones de mayor grado de afectación, ya que desde su instalación no se ha registrado actualización en ninguno de sus componentes. Sin embargo, la cantidad de multitrayectoria que registran ha sido en cantidades constantes sin mostrar saltos bruscos, lo que puede estar relacionado también con el ambiente multitrayecto.

De las estaciones pertenecientes a UNAVCO, 33 cuentan con antena tipo Chock Ring (TRM59800.00, TRM59800.80, TRM29659.00), antenas diseñadas para la mitigación del efecto multitrayectoria en  $L_1$ , siendo el rango presente entre 0.24 m a 0.72 m y 16 antenas Trimble Zephyr Geodetic (TRM 41249.00, TRM55971.00) con valores de 0.34 m a 0.92 m para MP1 siendo la estación TNMT con 0.92 m de efecto multitrayectoria ocupando el 4.<sup>to</sup> lugar de afectación en la Tabla 9 y el séptimo en MP2 (Tabla 10). La estación menos afectada en MP1 es PLPX con 0.24 m y en MP2 con 0.23 m.

La Figura 24 presenta los valores promedios por estación, ordenados de mayor a menor respecto del efecto multitrayectoria en la banda  $L_1$ , considerando que el efecto

multitrayectoria MP1, generalmente, es menor a MP2, sin embargo, este comportamiento sólo se presenta en 16 estaciones y el resto presenta valores de MP1 mayores a MP2. Con base en IGS (2015), el valor recomendado máximo permisible es de 0.30 m (representado por la línea roja horizontal), evidenciando aquellas estaciones que cumplen con este estándar internacional, siendo sólo siete estaciones (INEG, MEXI, MTY2, OAX2, TOL2, PLPX, PJZX), así como aquellas que sobrepasan dicho valor e incluso llegan a triplicarlo.



**Figura 24.** Promedio global de efecto multitrayectoria por estación, MP1-RMS, MP2-RMS. La línea roja muestra el valor máximo permisible por el IGS para la cantidad de efecto multitrayectoria.

## 4.2 Análisis estadístico de la relación señal-ruido

Del análisis de calidad que proporciona la relación señal-ruido se presentan señales fuertes en  $L_1$  con valores de indicador SNR mayores o iguales a 6 (Xiao *et al.*, 2020; Gurtner *et al.*, 2013), entre 6.46 a 7.90 en las 65 estaciones como se muestra en la Tabla 11. En la banda  $L_2$  se registran 48 estaciones con señales débiles con valor mínimo de 4.52 de indicador SNR pertenecientes a UNAVCO y 17 estaciones con señales fuertes con valor máximo de 7.13 (Tabla 11); 15 de NGS, 1 de IGS y 1 de UNAVCO.

Las Tablas 11 y 12 estan ordenadas en función de los valores promedio, de mayor a menor, ya que entre más grande sea la relación señal-ruido, mejor recepción de la señal refleja la estación.

**Tabla 11.** Estadística de las variaciones de la relación señal-ruido SNR1

| Estación | No. de días | Max (indicador) | Min (indicador) | Promedio (indicador) | $\sigma$ (indicador) | Receptor      | Tipo de Antena  | Radomo | Gestor | Red            |
|----------|-------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|---------------|-----------------|--------|--------|----------------|
| MMD1     | 3632        | 8.12            | 7.63            | 7.90                 | 0.14                 | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| MMX1     | 3627        | 8.15            | 7.65            | 7.89                 | 0.14                 | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| MTP1     | 3218        | 8.22            | 7.68            | 7.89                 | 0.15                 | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| MSD1     | 3488        | 8.10            | 6.96            | 7.81                 | 0.31                 | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| MPR1     | 3600        | 8.01            | 7.55            | 7.79                 | 0.82                 | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| TNMR     | 1281        | 7.91            | 7.03            | 7.38                 | 0.29                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PTEX     | 3191        | 7.35            | 7.14            | 7.27                 | 0.05                 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| USMX     | 2117        | 7.92            | 7.1             | 7.24                 | 0.15                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PLTX     | 3370        | 7.36            | 7.09            | 7.24                 | 0.05                 | TRIMBLE NETRS | TRM29659.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| PIZX     | 3057        | 7.77            | 7.08            | 7.24                 | 0.05                 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| PALX     | 3428        | 7.43            | 7.08            | 7.23                 | 0.04                 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| PSTX     | 3067        | 7.33            | 7.08            | 7.23                 | 0.05                 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TNCU     | 2014        | 7.3             | 7.09            | 7.21                 | 0.05                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNPJ     | 1139        | 7.71            | 6.95            | 7.18                 | 0.24                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| YESX     | 2200        | 7.27            | 7.03            | 7.16                 | 0.06                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PLPX     | 3373        | 7.35            | 6.98            | 7.16                 | 0.07                 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.80     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TNSJ     | 1410        | 7.23            | 7.03            | 7.14                 | 0.04                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNNX     | 1882        | 7.24            | 7.01            | 7.13                 | 0.06                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNPP     | 1806        | 7.2             | 7               | 7.12                 | 0.05                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PHJX     | 3006        | 7.21            | 6.97            | 7.11                 | 0.05                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TNMQ     | 1333        | 7.40            | 6.7             | 7.09                 | 0.06                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMH     | 2016        | 7.17            | 6.96            | 7.08                 | 0.05                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNAT     | 1807        | 7.18            | 6.95            | 7.08                 | 0.06                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNBA     | 1881        | 7.17            | 6.94            | 7.07                 | 0.05                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| GUAX     | 1314        | 7.18            | 6.97            | 7.07                 | 0.06                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMS     | 1947        | 7.23            | 6.97            | 7.07                 | 0.05                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCM     | 1867        | 7.24            | 6.95            | 7.06                 | 0.05                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UAGU     | 2575        | 7.17            | 6.92            | 7.06                 | 0.05                 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00     | UNKN   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCC     | 1236        | 7.15            | 6.96            | 7.05                 | 0.05                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UGEO     | 1958        | 7.29            | 6.83            | 7.05                 | 0.08                 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00     | NONE   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNTB     | 1169        | 7.15            | 6.94            | 7.05                 | 0.05                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNAM     | 1847        | 7.14            | 6.94            | 7.05                 | 0.05                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMO     | 3495        | 7.17            | 6.92            | 7.04                 | 0.05                 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00     | NONE   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |

|      |      |      |      |      |      |                  |             |      |        |                |
|------|------|------|------|------|------|------------------|-------------|------|--------|----------------|
| TNIF | 1469 | 7.19 | 6.93 | 7.03 | 0.05 | TRIMBLE<br>NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNAL | 1242 | 7.26 | 6.82 | 7.03 | 0.08 | TRIMBLE<br>NETRS | TRM57971.00 | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UXAL | 2956 | 7.22 | 6.74 | 7.02 | 0.05 | TRIMBLE<br>NETRS | TRM41249.00 | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UNPM | 3661 | 7.16 | 6.89 | 7.02 | 0.04 | TRIMBLE<br>NETR9 | TRM41249.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/COCOnet   |
| TNGF | 1377 | 7.41 | 6.84 | 7.01 | 0.17 | TRIMBLE<br>NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMT | 825  | 7.17 | 6.95 | 7.01 | 0.04 | TRIMBLE<br>NETR9 | TRM57971.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCN | 1385 | 7.11 | 6.88 | 7.01 | 0.04 | TRIMBLE<br>NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNNP | 1513 | 7.10 | 6.91 | 7.01 | 0.04 | TRIMBLE<br>NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| IAGX | 685  | 7.15 | 6.94 | 7.00 | 0.03 | TRIMBLE<br>NETR8 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/REGNOM    |
| TNMZ | 997  | 7.23 | 6.85 | 7.00 | 0.02 | TRIMBLE<br>NETRS | TRM41249.00 | UNKN | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OXUM | 2067 | 7.29 | 6.83 | 7.00 | 0.03 | TRIMBLE<br>NETR9 | TRM57971.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNLC | 1550 | 7.09 | 6.81 | 7.00 | 0.05 | TRIMBLE<br>NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCY | 1355 | 7.21 | 6.64 | 6.98 | 0.05 | TRIMBLE<br>NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UCOE | 3460 | 7.24 | 6.77 | 6.97 | 0.09 | TRIMBLE<br>NETR9 | TRM55971.00 | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OXTH | 3043 | 7.22 | 6.74 | 6.95 | 0.06 | TRIMBLE<br>NETR9 | TRM57971.00 | UNKN | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TECO | 2499 | 7.05 | 6.82 | 6.95 | 0.06 | TRIMBLE<br>NETR9 | TRM57971.00 | UNKN | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCT | 801  | 7.03 | 6.8  | 6.94 | 0.06 | TRIMBLE<br>NETR9 | TRM57971.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PENA | 3330 | 7.12 | 6.82 | 6.94 | 0.06 | TRIMBLE<br>NETR9 | TRM59800.00 | SCIS | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UTON | 2490 | 7.09 | 5.28 | 6.90 | 0.18 | TRIMBLE<br>NETR9 | TRM55971.00 | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNTM | 752  | 6.99 | 6.8  | 6.87 | 0.04 | TRIMBLE<br>NETR9 | TRM57971.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OXPE | 3081 | 7.13 | 6.62 | 6.84 | 0.08 | TRIMBLE<br>NETRS | TRM41249.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| ICAM | 2590 | 8.04 | 5.72 | 6.83 | 1.00 | LEICA GR10       | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| TAMP | 2581 | 7.93 | 5.65 | 6.81 | 0.99 | LEICA GR10       | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| IPAZ | 2593 | 7.92 | 5.7  | 6.81 | 1.03 | LEICA GR10       | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| INEG | 3430 | 8.97 | 5.42 | 6.60 | 0.97 | LEICA GR10       | LEIAR10     | NONE | IGS    | IGS/RGNA       |
| MEXI | 3591 | 7.91 | 5.66 | 6.60 | 0.89 | LEICA GR10       | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| TOL2 | 3566 | 8.09 | 4.87 | 6.56 | 0.97 | LEICA GR10       | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| MERI | 3606 | 7.93 | 5.64 | 6.56 | 0.96 | LEICA GR10       | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| OAX2 | 3630 | 7.99 | 5.54 | 6.54 | 1.02 | LEICA GR10       | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| MYT2 | 3586 | 7.93 | 5.14 | 6.51 | 0.83 | LEICA GR10       | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| CHET | 3624 | 8.05 | 2.84 | 6.48 | 1.11 | LEICA GR10       | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| COL2 | 3637 | 7.91 | 5.48 | 6.46 | 0.99 | LEICA GR10       | LEIAR10     | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |

**Tabla 12.** Estadística de las variaciones de la relación señal-ruido SNR2

| Estación | No. de días | Max (indicador) | Min (indicador) | Promedio (indicador) | $\sigma$ (indicador) | Receptor      | Tipo de Antena  | Radomo | Gestor | Red            |
|----------|-------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|---------------|-----------------|--------|--------|----------------|
| INEG     | 3430        | 7.81            | 6.35            | 7.13                 | 0.50                 | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | IGS    | IGS/RGNA       |
| MMX1     | 3627        | 7.53            | 6.09            | 7.06                 | 0.15                 | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| MPR1     | 3600        | 7.59            | 6.82            | 7.06                 | 0.91                 | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| MSD1     | 3488        | 7.57            | 6.78            | 7.06                 | 0.14                 | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| MTP1     | 3218        | 7.54            | 6.86            | 7.05                 | 0.16                 | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| MMD1     | 3632        | 7.48            | 6.78            | 7.02                 | 0.14                 | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |
| MYT2     | 3586        | 7.36            | 2.24            | 6.85                 | 0.49                 | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| MERI     | 3606        | 7.8             | 5.8             | 6.84                 | 0.49                 | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| OAX2     | 3630        | 7.35            | 6.24            | 6.82                 | 0.36                 | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| CHET     | 3624        | 7.39            | 6.01            | 6.79                 | 0.47                 | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| MEXI     | 3591        | 7.36            | 5.71            | 6.74                 | 0.53                 | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| IPAZ     | 2593        | 7.27            | 5.85            | 6.74                 | 0.39                 | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| COL2     | 3637        | 7.22            | 6.05            | 6.73                 | 0.38                 | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| TOL2     | 3566        | 7.27            | 6.13            | 6.71                 | 0.33                 | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| ICAM     | 2590        | 7.5             | 5.89            | 6.70                 | 0.43                 | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| TAMP     | 2581        | 7.33            | 6.09            | 6.67                 | 0.46                 | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| TNGF     | 1377        | 6.74            | 5.62            | 6.20                 | 0.27                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMR     | 1281        | 6.55            | 4.66            | 5.52                 | 0.77                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PLTX     | 3370        | 6.37            | 5.22            | 5.40                 | 0.08                 | TRIMBLE NETRS | TRM29659.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| PALX     | 3428        | 6.4             | 5.24            | 5.38                 | 0.07                 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| PTEX     | 3191        | 6.37            | 5.22            | 5.38                 | 0.07                 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| PJZX     | 3057        | 6.62            | 5.17            | 5.35                 | 0.07                 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| PSTX     | 3067        | 6.31            | 5.04            | 5.34                 | 0.07                 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| USMX     | 2117        | 6.88            | 4.96            | 5.24                 | 0.43                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PLPX     | 3373        | 6.23            | 3.00            | 5.20                 | 0.13                 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.80     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TNCU     | 2014        | 6.29            | 4.93            | 5.13                 | 0.19                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| GUAX     | 1314        | 6.14            | 4.76            | 5.07                 | 0.44                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNSJ     | 1410        | 6.2             | 4.88            | 5.06                 | 0.28                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNNX     | 1882        | 6.2             | 4.83            | 5.03                 | 0.25                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| YESX     | 2200        | 6.14            | 4.76            | 5.01                 | 0.23                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCC     | 1236        | 6.18            | 4.8             | 5.00                 | 0.31                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMH     | 2016        | 6.24            | 4.77            | 4.99                 | 0.25                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OXTH     | 3043        | 5.98            | 4.36            | 4.97                 | 0.55                 | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00     | UNKN   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMQ     | 1333        | 6.15            | 4.33            | 4.96                 | 0.24                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNPJ     | 1139        | 6.06            | 4.74            | 4.96                 | 0.09                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNPP     | 1806        | 5.9             | 4.8             | 4.96                 | 0.08                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCM     | 1867        | 6.18            | 4.78            | 4.95                 | 0.17                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| IAGX     | 685         | 5.9             | 4.85            | 4.95                 | 0.08                 | TRIMBLE NETR8 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/REGNOM    |
| TNBA     | 1881        | 6.19            | 4.72            | 4.95                 | 0.26                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMS     | 1947        | 6.13            | 4.77            | 4.93                 | 0.25                 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |

|      |      |      |      |      |      |               |             |      |        |                |
|------|------|------|------|------|------|---------------|-------------|------|--------|----------------|
| TNAM | 1847 | 6.17 | 4.73 | 4.93 | 0.26 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNAT | 1807 | 5.89 | 4.73 | 4.93 | 0.10 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNTB | 1169 | 5.78 | 4.75 | 4.87 | 0.08 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMT | 825  | 6.04 | 4.67 | 4.86 | 0.38 | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNNP | 1513 | 6.07 | 4.59 | 4.86 | 0.29 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNIF | 1469 | 6.06 | 4.65 | 4.85 | 0.29 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UGEO | 1958 | 5.55 | 4.56 | 4.83 | 0.18 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNLC | 1550 | 6.08 | 4.56 | 4.82 | 0.29 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PHJX | 3006 | 5.8  | 4.56 | 4.82 | 0.11 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TNCY | 1355 | 6.03 | 4.28 | 4.79 | 0.24 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UAGU | 2575 | 5.72 | 4.57 | 4.79 | 0.07 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | UNKN | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNAL | 1242 | 5.14 | 4.28 | 4.74 | 0.21 | TRIMBLE NETRS | TRM57971.00 | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UXAL | 2956 | 5.71 | 4.49 | 4.73 | 0.06 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCN | 1385 | 5.68 | 4.51 | 4.73 | 0.07 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMO | 3495 | 5.61 | 4.54 | 4.71 | 0.07 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OXUM | 2067 | 5.63 | 4.33 | 4.67 | 0.09 | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UTON | 2490 | 6.11 | 4.31 | 4.66 | 0.14 | TRIMBLE NETR9 | TRM55971.00 | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMZ | 997  | 5.09 | 4.16 | 4.65 | 0.04 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | UNKN | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UCOE | 3460 | 5.58 | 4.45 | 4.64 | 0.09 | TRIMBLE NETR9 | TRM55971.00 | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TECO | 2499 | 5.55 | 4.29 | 4.63 | 0.10 | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00 | UNKN | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UNPM | 3661 | 5.44 | 4.34 | 4.62 | 0.16 | TRIMBLE NETR9 | TRM41249.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/COCOnet   |
| TNTM | 752  | 5.83 | 4.33 | 4.56 | 0.44 | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PENA | 3330 | 5.84 | 2.00 | 4.55 | 0.69 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00 | SCIS | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OXPE | 3081 | 5.5  | 4.05 | 4.53 | 0.07 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCT | 801  | 5.44 | 4.32 | 4.52 | 0.09 | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00 | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |

En la Figura 25 se presentan los valores promedios de SNR1 y SNR2 para cada estación en valores de indicador SNR para ambas bandas, de esta manera y con base en la clasificación de señales fuertes ( $SNR \geq 6$ ) y débiles ( $SNR < 6$ ), denotando este valor con una línea horizontal roja (Figura 25), solamente 17 estaciones reciben señales fuertes en ambas bandas y 48 estaciones presentan señales fuertes en  $L_1$  y débiles en  $L_2$ .

Un caso particular es el de las estaciones: MPR1, MTP1, MSD1, MMD1 y MMX1 pertenecientes a la red CORS las cuales presentan un grado elevado de efecto multitrayectoria (descrito en la sección anterior) sin reflejar una relación inversamente proporcional de SNR y MP como describe Kamatham (2018), lo cual puede estar relacionado con el ambiente multitrayectoria, así como de las características del receptor (hardware o firmware) siendo esta una de las principales respuestas a este comportamiento

ya que estas 5 estaciones comparten el mismo tipo de receptor NOV WAASGII, mismo tipo de antena MPL\_WAAS\_2225NW y hasta la fecha no han tenido cambio de receptor, antena ni tampoco actualización de firmware desde su instalación, basados en la última actualización de los archivos log.

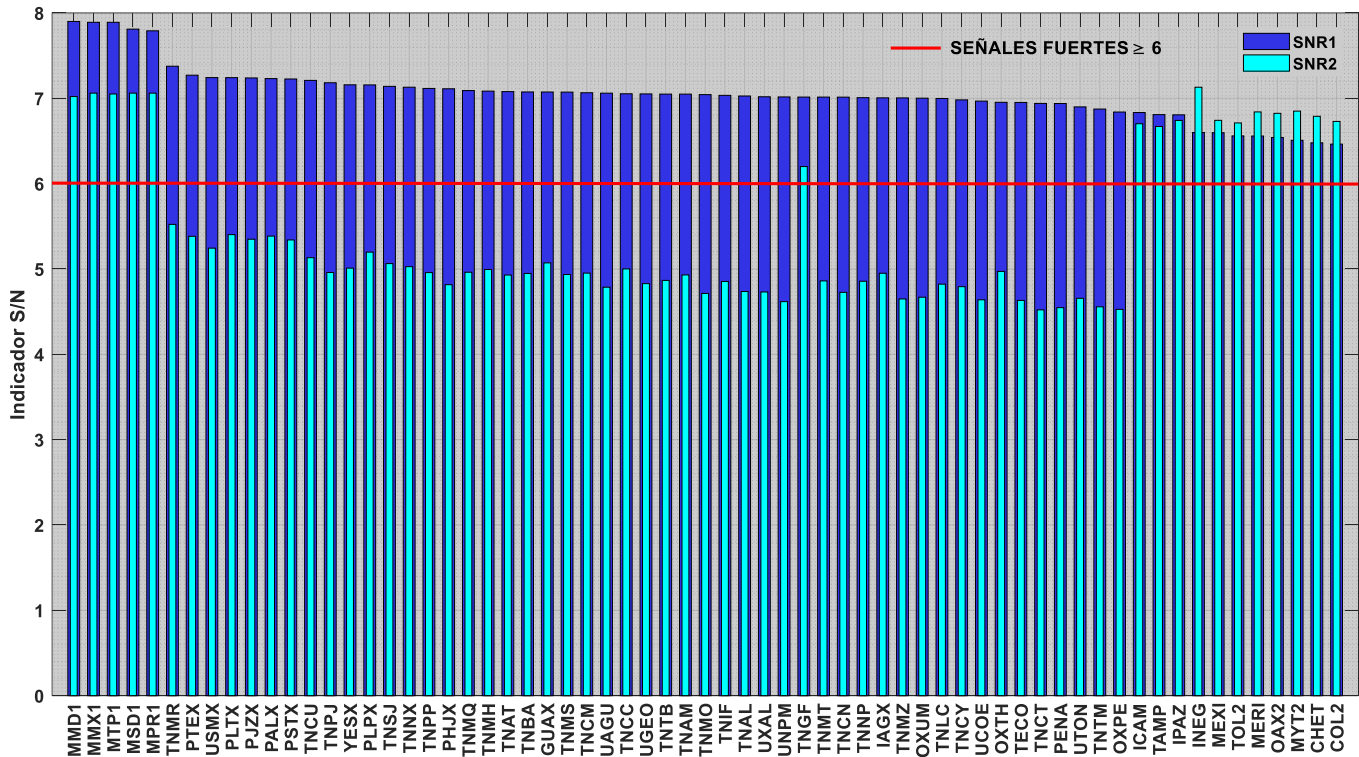


Figura 25. Promedio global de la relación señal-ruido por estación, SNR1 y SNR2.

### 4.3 Análisis estadístico de los saltos de ciclo

Los valores promedios de saltos de ciclo fueron obtenidos por cada 1000 observaciones, en la Tabla 13 se presentan la estadística descriptiva de los valores presentes en cada estación ordenados de manera descendente, empezando por la estación de mayor pérdida de la fase portadora, siendo MTY2 con un máximo de 500 CSR y un mínimo de 0.0387 CSR con un promedio de 5.8053 CSR, seguido por la estación PENA con 5.2778 CSR, siendo la estación TNPP la que presenta menor pérdida de saltos de ciclo con 0.0551 CSR.

Las estaciones pertenecientes a la red CORS/RGNA, que han presentado valores bajos de multitrayectoria (sección 4.1) y señales fuertes (sección 4.2) son las mismas estaciones que presentan la mayor cantidad de saltos de ciclo en promedio, sin embargo, se esperaría una menor cantidad de saltos de ciclo ya que tanto la multitrayectoria como la baja relación señal-ruido son los principales factores para la ocurrencia de los saltos de ciclo, no obstante, también pueden ser ocasionados por falla en el software del receptor.

**Tabla 13.** Estadística de las variaciones de los saltos de ciclo por cada 1000 observaciones (CSR)

| Estación | No. de días | Max (CSR) | Min (CSR) | Promedio (CSR) | $\sigma$ (CSR) | Receptor      | Tipo de Antena | Radomo | Gestor | Red            |
|----------|-------------|-----------|-----------|----------------|----------------|---------------|----------------|--------|--------|----------------|
| MTY2     | 3586        | 500.0000  | 0.0387    | 5.8053         | 23.6340        | LEICA GR10    | LEIAR10        | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| PENA     | 3330        | 83.3333   | 0.0914    | 5.2778         | 16.9573        | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00    | SCIS   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OAX2     | 3630        | 20.4082   | 0.0377    | 5.0514         | 3.7153         | LEICA GR10    | LEIAR10        | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| COL2     | 3637        | 12.1951   | 0.0378    | 4.9695         | 3.6835         | LEICA GR10    | LEIAR10        | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| CHET     | 3624        | 20.0000   | 0.0381    | 4.9258         | 3.6323         | LEICA GR10    | LEIAR10        | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| MERI     | 3606        | 9.0090    | 0.0387    | 4.8546         | 3.3988         | LEICA GR10    | LEIAR10        | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| INEG     | 3430        | 17.5439   | 0.0383    | 4.4208         | 3.4938         | LEICA GR10    | LEIAR10        | NONE   | IGS    | IGS/RGNA       |
| ICAM     | 2590        | 11.4943   | 0.0382    | 3.7999         | 3.7339         | LEICA GR10    | LEIAR10        | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| TAMP     | 2581        | 25.6410   | 0.0385    | 3.5944         | 3.6334         | LEICA GR10    | LEIAR10        | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| TNMR     | 1281        | 12.8205   | 0.0440    | 2.3810         | 2.2278         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00    | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| MEXI     | 3591        | 23.8095   | 0.0388    | 2.0383         | 2.1039         | LEICA GR10    | LEIAR10        | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| OXPE     | 3081        | 29.4118   | 0.0784    | 2.0116         | 1.8957         | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00    | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UTON     | 2490        | 11.2360   | 0.1948    | 1.9487         | 1.6085         | TRIMBLE NETR9 | TRM55971.00    | NONE   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMT     | 825         | 4.3478    | 0.2208    | 1.6960         | 0.5139         | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00    | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNPJ     | 1139        | 9.0090    | 0.3782    | 1.2407         | 0.9434         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00    | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TOL2     | 3566        | 14.2857   | 0.0381    | 1.1028         | 1.2644         | LEICA GR10    | LEIAR10        | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| IPAZ     | 2593        | 19.6078   | 0.0380    | 1.0823         | 1.1624         | LEICA GR10    | LEIAR10        | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| UGEO     | 1958        | 8.6207    | 0.0398    | 1.0412         | 0.5364         | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00    | NONE   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMS     | 1947        | 5.6497    | 0.2728    | 0.7598         | 0.3232         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00    | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UXAL     | 2956        | 9.0909    | 0.1172    | 0.6884         | 0.6313         | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00    | NONE   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCY     | 1355        | 71.4286   | 0.0393    | 0.6766         | 2.9798         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00    | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TECO     | 2499        | 5.7471    | 0.1152    | 0.6313         | 0.3696         | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00    | UNKN   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNAL     | 1242        | 6.4516    | 0.0402    | 0.5199         | 0.4390         | TRIMBLE NETRS | TRM57971.00    | NONE   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMZ     | 997         | 50.0000   | 0.0758    | 0.4778         | 2.2679         | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00    | UNKN   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCN     | 1385        | 4.9020    | 0.0380    | 0.4331         | 0.3146         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00    | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNGF     | 1377        | 3.2468    | 0.0386    | 0.4143         | 0.2116         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00    | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OXTH     | 3043        | 38.4615   | 0.0375    | 0.3949         | 1.5188         | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00    | UNKN   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PLPX     | 3373        | 250.0000  | 0.0383    | 0.3897         | 5.4868         | TRIMBLE NETRS | TRM59800.80    | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| OXUM     | 2067        | 11.4943   | 0.0373    | 0.3751         | 0.9624         | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00    | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNSJ     | 1410        | 3.4602    | 0.0383    | 0.2882         | 0.2268         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00    | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| YESX     | 2200        | 4.2553    | 0.0386    | 0.2264         | 0.1788         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00    | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |

|      |      |         |        |        |        |               |                 |      |        |                |
|------|------|---------|--------|--------|--------|---------------|-----------------|------|--------|----------------|
| PJZX | 3057 | 76.9231 | 0.0384 | 0.2217 | 1.6596 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TNMO | 3495 | 2.3923  | 0.0388 | 0.2215 | 0.1585 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00     | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNLC | 1550 | 5.0251  | 0.0378 | 0.2135 | 0.2678 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCM | 1867 | 8.0000  | 0.0375 | 0.2029 | 0.4129 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNAT | 1807 | 8.7719  | 0.0377 | 0.1905 | 0.4796 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCC | 1236 | 4.8309  | 0.0384 | 0.1865 | 0.3384 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNNP | 1513 | 9.3458  | 0.0379 | 0.1789 | 0.3078 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNIF | 1469 | 4.3103  | 0.0379 | 0.1769 | 0.2646 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UAGU | 2575 | 4.3290  | 0.0378 | 0.1669 | 0.2019 | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00     | UNKN | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNNX | 1882 | 9.0909  | 0.0370 | 0.1565 | 0.5132 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| MTP1 | 3218 | 8.8496  | 0.0371 | 0.1395 | 0.3933 | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE | NGS    | CORS           |
| PALX | 3428 | 2.8902  | 0.0390 | 0.1378 | 0.1218 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| MSD1 | 3488 | 62.5000 | 0.0375 | 0.1369 | 1.4627 | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE | NGS    | CORS           |
| MPR1 | 3600 | 62.5000 | 0.0374 | 0.1317 | 1.3658 | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE | NGS    | CORS           |
| TNMQ | 1333 | 25.6410 | 0.0376 | 0.1317 | 0.8131 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNAM | 1847 | 7.4627  | 0.0374 | 0.1292 | 0.4502 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UNPM | 3661 | 3.7453  | 0.0385 | 0.1271 | 0.1801 | TRIMBLE NETR9 | TRM41249.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/COCOnet   |
| USMX | 2117 | 5.7143  | 0.0394 | 0.1262 | 0.3961 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UCOE | 3460 | 8.0645  | 0.0361 | 0.1246 | 0.3397 | TRIMBLE NETR9 | TRM55971.00     | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| GUAX | 1314 | 1.7483  | 0.0386 | 0.1127 | 0.1149 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| MMX1 | 3627 | 62.5000 | 0.0374 | 0.1098 | 1.3789 | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE | NGS    | CORS           |
| PTEX | 3191 | 1.7731  | 0.0394 | 0.1011 | 0.0854 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| MMD1 | 3632 | 50.0000 | 0.0383 | 0.0819 | 0.8734 | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE | NGS    | CORS           |
| TNTM | 752  | 0.7576  | 0.0378 | 0.0810 | 0.0714 | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCU | 2014 | 5.9880  | 0.0385 | 0.0803 | 0.1667 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| IAGX | 685  | 0.4728  | 0.0386 | 0.0790 | 0.0686 | TRIMBLE NETR8 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/REGNOM    |
| PLTX | 3370 | 3.1949  | 0.0388 | 0.0742 | 0.0969 | TRIMBLE NETRS | TRM29659.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TNCT | 801  | 2.5381  | 0.0377 | 0.0686 | 0.1217 | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMH | 2016 | 3.7453  | 0.0384 | 0.0679 | 0.1085 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PSTX | 3067 | 4.7847  | 0.0383 | 0.0671 | 0.1321 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TNBA | 1881 | 2.4039  | 0.0384 | 0.0653 | 0.0973 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNTB | 1169 | 0.6519  | 0.0383 | 0.0630 | 0.0540 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PHJX | 3006 | 1.3755  | 0.0387 | 0.0556 | 0.0572 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TNPP | 1806 | 0.7722  | 0.0389 | 0.0551 | 0.0529 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |

Con base a lo establecido por el Servicio Internacional de GNSS (IGS, 2015), son 18 estaciones geodésicas que están por encima del valor permisible, es decir, pérdida de un salto de ciclo por cada 1000 observaciones (CSR) como se muestra en la Figura 26, siendo la línea roja el límite del valor recomendado para CSR, con un total de 47 estaciones por debajo de este valor, es decir, un adecuado comportamiento, pertenecientes principalmente a la red TLALOCNet, PBO, COCOnet, REGNOM y CORS.

La estación INEG, es la única en México, hasta el momento, perteneciente a la red IGS, por lo que se espera que cumpla con el valor recomendado por dicho organismo, no obstante, presenta un valor promedio de 4.4208 CSR, es decir, superior a 1 CSR, esto no significa que no pueda estar dentro de la red ya que no es el único parámetro a considerar.

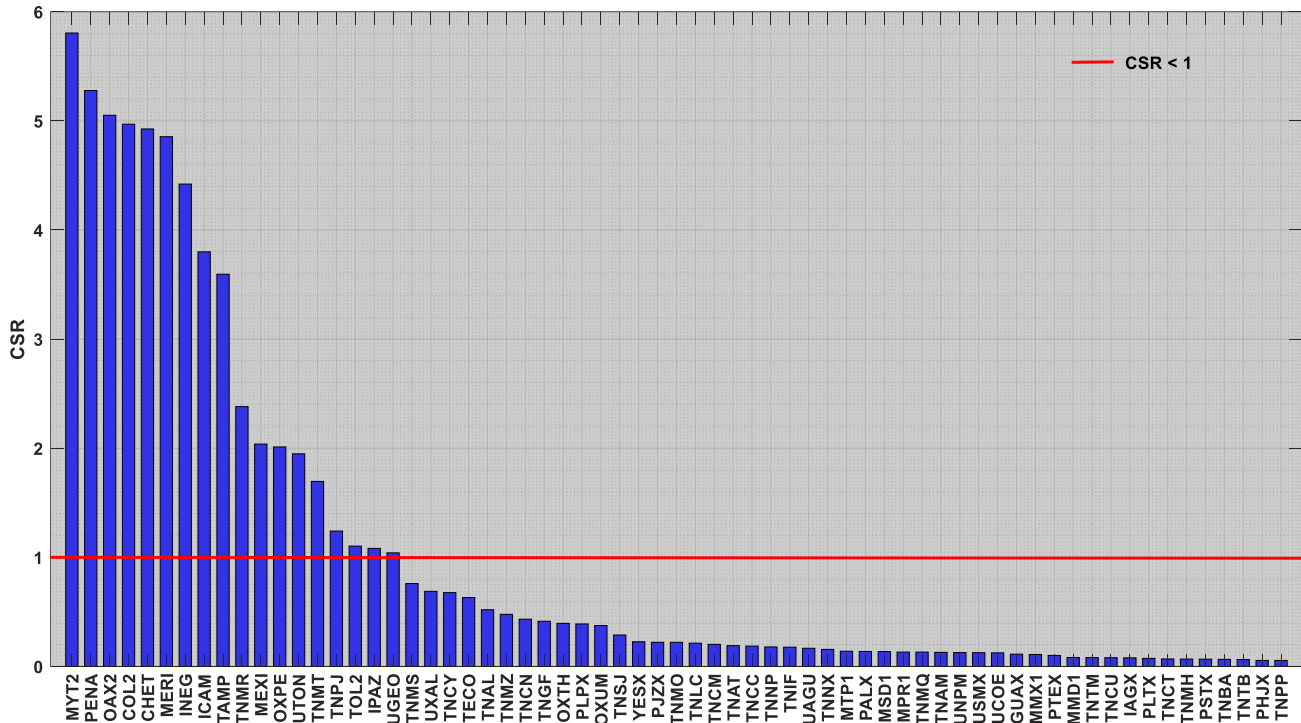


Figura 26. Promedio global de saltos de ciclo por estación, CSR.

#### 4.4 Análisis estadístico de la integridad

Los valores de integridad correspondientes a cada estación, expresados en porcentaje, están ordenados de mayor a menor en la Tabla 14, la cual muestra que 64 estaciones logran completar más del 90 % de las observaciones posibles y sólo la estación TNMT logra concretar el 77.45 % de sus observaciones posibles.

La estación IAGX es la que mejor porcentaje de integridad presenta con un 99.93% sin embargo, son 31 estaciones que presentan un porcentaje entre 99.00% y 99.93%, 19 estaciones entre 98% y 98.9%, 6 estaciones entre 97% y 97.9%, 2 estaciones entre 96% a 96.9% y finalmente 3 entre 95% y 95.9%, las 4 restantes están por debajo del 95% de integridad.

**Tabla 14.** Estadística del porcentaje de Integridad

| Estación | No. de días | Max (%) | Min (%) | Promedio (%) | $\sigma$ (%) | Receptor      | Tipo de Antena  | Radomo | Gestor | Red            |
|----------|-------------|---------|---------|--------------|--------------|---------------|-----------------|--------|--------|----------------|
| LAGX     | 685         | 100     | 98      | 99.93        | 0.29         | TRIMBLE NETR8 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/REGNOM    |
| GUAX     | 1314        | 100     | 97      | 99.91        | 0.35         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNBA     | 1881        | 100     | 96      | 99.90        | 0.39         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNTB     | 1169        | 100     | 97      | 99.89        | 0.40         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMH     | 2016        | 100     | 96      | 99.88        | 0.44         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNNX     | 1882        | 100     | 95      | 99.86        | 0.48         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PSTX     | 3067        | 100     | 37      | 99.86        | 2.04         | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TNCM     | 1867        | 100     | 73      | 99.86        | 0.86         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCU     | 2014        | 100     | 93      | 99.86        | 0.54         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNAM     | 1847        | 100     | 79      | 99.84        | 0.69         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UCOE     | 3460        | 100     | 27      | 99.84        | 1.75         | TRIMBLE NETR9 | TRM55971.00     | NONE   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMO     | 3495        | 100     | 93      | 99.83        | 0.42         | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00     | NONE   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNAT     | 1807        | 100     | 96      | 99.79        | 0.61         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| IPAZ     | 2593        | 100     | 82      | 99.75        | 0.91         | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| TNCT     | 801         | 100     | 43      | 99.74        | 2.89         | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCN     | 1385        | 100     | 91      | 99.73        | 0.65         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OXTH     | 3043        | 100     | 66      | 99.67        | 1.60         | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00     | UNKN   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| MYT2     | 3586        | 100     | 24      | 99.63        | 3.57         | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| ICAM     | 2590        | 100     | 81      | 99.62        | 1.48         | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| UNPM     | 3661        | 100     | 71      | 99.61        | 1.06         | TRIMBLE NETR9 | TRM41249.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/COCOnet   |
| TNMZ     | 997         | 100     | 0       | 99.57        | 5.37         | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00     | UNKN   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| MEXI     | 3591        | 100     | 0       | 99.55        | 2.98         | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| TNLC     | 1550        | 100     | 96      | 99.44        | 0.64         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PJZX     | 3057        | 100     | 48      | 99.43        | 3.78         | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| UXAL     | 2956        | 100     | 0       | 99.41        | 3.63         | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00     | NONE   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| YESX     | 2200        | 100     | 96      | 99.39        | 0.62         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNTM     | 752         | 100     | 96      | 99.34        | 0.61         | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| INEG     | 3430        | 101     | 1       | 99.25        | 4.02         | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | IGS    | IGS/RGNA       |
| COL2     | 3637        | 100     | 26      | 99.24        | 2.55         | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| OAX2     | 3630        | 100     | 49      | 99.08        | 2.45         | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| PHJX     | 3006        | 100     | 95      | 99.00        | 0.38         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TNPP     | 1806        | 99      | 96      | 98.94        | 0.28         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TAMP     | 2581        | 101     | 0       | 98.93        | 6.49         | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| TNGF     | 1377        | 100     | 58      | 98.85        | 1.22         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| CHET     | 3624        | 101     | 65      | 98.85        | 4.40         | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE   | NGS    | CORS/RGNA      |
| PLTX     | 3370        | 99      | 96      | 98.82        | 0.42         | TRIMBLE NETRS | TRM29659.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| UAGU     | 2575        | 100     | 54      | 98.76        | 5.86         | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00     | UNKN   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNIF     | 1469        | 100     | 2       | 98.74        | 8.43         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OXUM     | 2067        | 100     | 63      | 98.73        | 5.49         | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNNP     | 1513        | 99      | 94      | 98.60        | 0.67         | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| MMX1     | 3627        | 100     | 3       | 98.60        | 7.26         | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CORS           |

|      |      |     |    |       |       |               |                 |      |        |                |
|------|------|-----|----|-------|-------|---------------|-----------------|------|--------|----------------|
| TNMS | 1947 | 100 | 91 | 98.56 | 0.69  | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TOL2 | 3566 | 100 | 67 | 98.56 | 3.55  | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| TNAL | 1242 | 100 | 31 | 98.46 | 2.89  | TRIMBLE NETRS | TRM57971.00     | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| MPR1 | 3600 | 100 | 2  | 98.46 | 7.94  | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE | NGS    | CORS           |
| MMD1 | 3632 | 100 | 2  | 98.44 | 8.01  | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE | NGS    | CORS           |
| MSD1 | 3488 | 100 | 3  | 98.43 | 7.73  | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE | NGS    | CORS           |
| MERI | 3606 | 100 | 50 | 98.42 | 2.53  | LEICA GR10    | LEIAR10         | NONE | NGS    | CORS/RGNA      |
| MTP1 | 3218 | 100 | 1  | 98.28 | 8.35  | NOV WAASGII   | MPL_WAAS_2225NW | NONE | NGS    | CORS           |
| TECO | 2499 | 99  | 94 | 98.08 | 0.75  | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00     | UNKN | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNCC | 1236 | 100 | 93 | 97.78 | 0.58  | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| USMX | 2117 | 98  | 92 | 97.71 | 0.73  | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PALX | 3428 | 99  | 88 | 97.68 | 0.66  | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TNSJ | 1410 | 99  | 86 | 97.61 | 1.00  | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| OXPE | 3081 | 100 | 48 | 97.12 | 2.67  | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PTEX | 3191 | 98  | 94 | 97.06 | 0.43  | TRIMBLE NETRS | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| UTON | 2490 | 99  | 64 | 96.43 | 1.42  | TRIMBLE NETR9 | TRM55971.00     | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMQ | 1333 | 100 | 0  | 96.43 | 15.88 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| UGEO | 1958 | 98  | 71 | 95.93 | 1.34  | TRIMBLE NETRS | TRM41249.00     | NONE | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNPJ | 1139 | 99  | 72 | 95.61 | 1.52  | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMR | 1281 | 100 | 42 | 95.50 | 2.59  | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PLPX | 3373 | 100 | 0  | 94.26 | 20.86 | TRIMBLE NETRS | TRM59800.80     | SCIT | UNAVCO | NOTA/PBO       |
| TNCY | 1355 | 97  | 1  | 92.50 | 14.30 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| PENA | 3330 | 100 | 6  | 91.82 | 23.38 | TRIMBLE NETR9 | TRM59800.00     | SCIS | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |
| TNMT | 825  | 86  | 73 | 77.45 | 1.07  | TRIMBLE NETR9 | TRM57971.00     | SCIT | UNAVCO | NOTA/TLALOCNet |

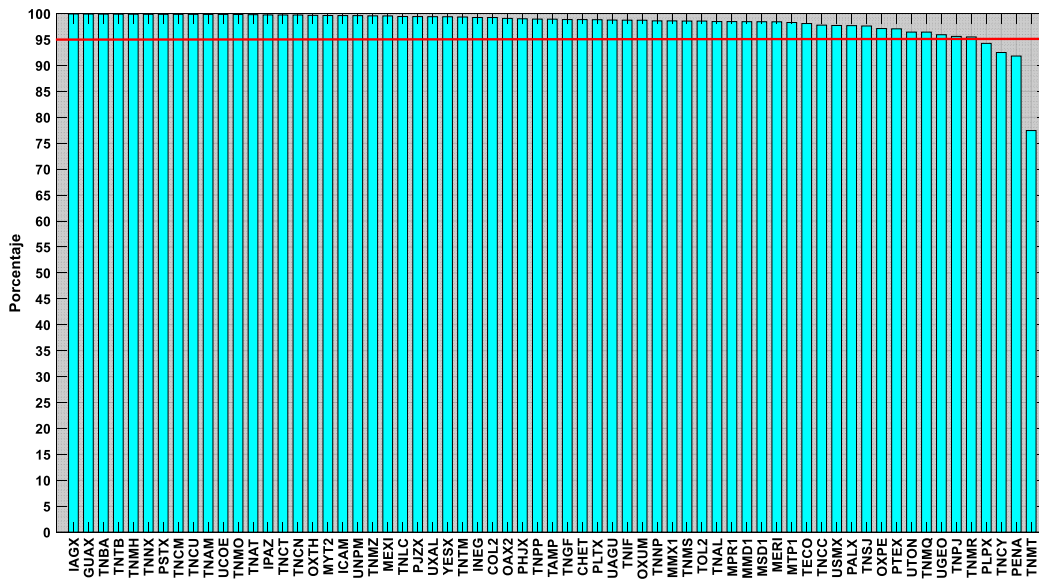


Figura 27. Promedio global de integridad por estación.

La Figura 27 refleja el porcentaje de cada estación, así mismo la línea roja respresenta el valor recomendado por el IGS, es decir, mayor al 95 % de integridad, de este modo sólo las estaciones PLPX, TNCY, PENA y TNMT, se localizan por debajo del valor recomendado, siendo un total de 61 estaciones con un porcentaje de integridad aceptable por el IGS.

#### 4.5 Resultados del análisis de calidad por gestor

De acuerdo con Franco *et al.* (2013); Yeh *et al.* (2007, 2008); Hilla *et al.* (2004); Vázquez *et al.* (2012); Vázquez *et al.* (2013), mencionan al efecto multitrayectoria como el principal degradador de la señal, por ello en esta sección se muestra el resultado de la evaluación en conjunto de las series temporales, correspondientes a los cuatro parámetros o indicadores de calidad ordenados en función de la cantidad de efecto multitrayectoria, seleccionando aquellas estaciones que por gestor muestran un grado elevando de afectación, un grado medio y un adecuado comportamiento con base en los cuatro indicadores de calidad en los 10.07 años, los cuales se evalúan de manera conjunta a estándares internacionales (Tabla 15). La Tabla A1 (anexos) muestra las 65 estaciones ordenadas de mayor a menor grado de afectación en los cuatro parámetros evaluados, de las cuales se analizarán las que se muestran en la Tabla 16, ordenadas con base en el grado de afectación por gestor.

**Tabla 15.** Estándares internacionales para el análisis de calidad

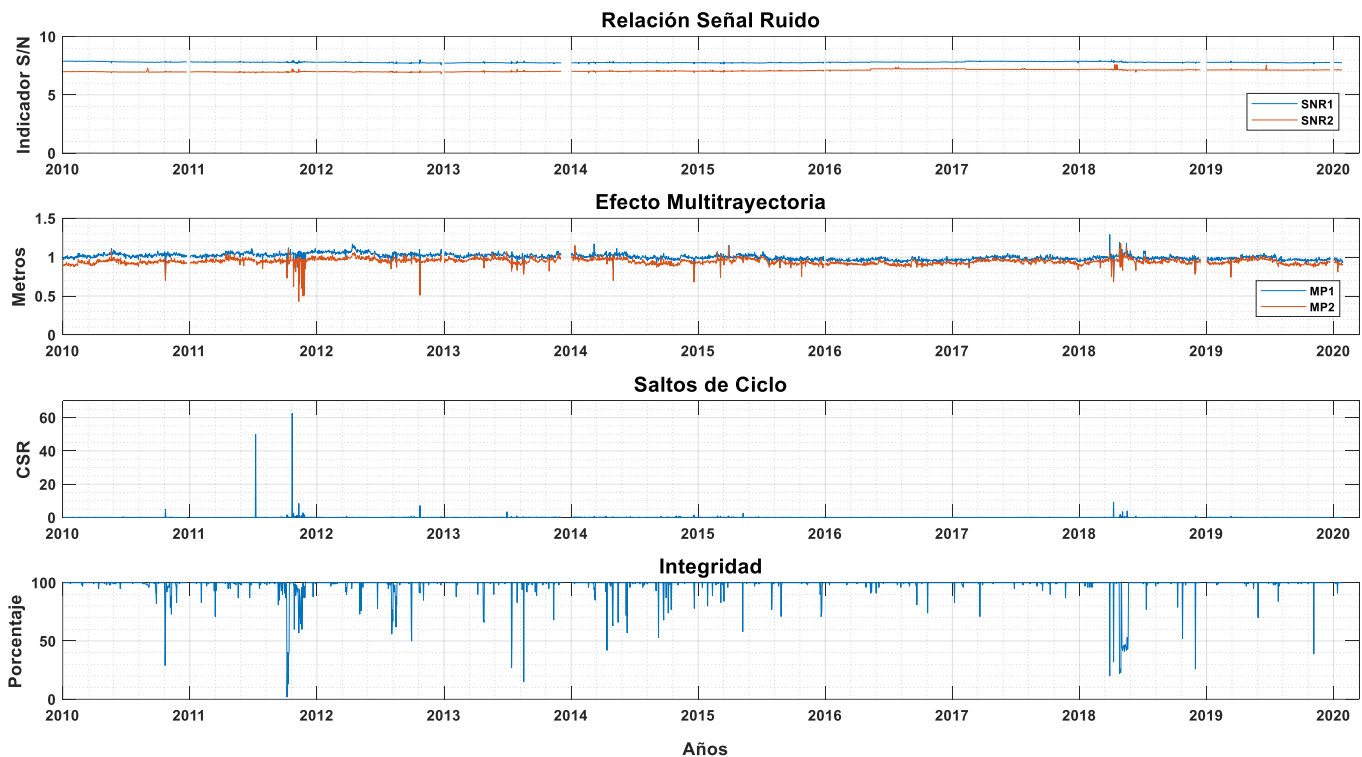
| MP            | SNR      | CSR       | INTEGRIDAD |
|---------------|----------|-----------|------------|
| $\leq 0.30$ m | $\geq 6$ | $< 1$ CSR | $> 95$ %   |

**Tabla 16.** Estadística de los índices de calidad

| Estación | No. de días | MP1 (m) | MP2 (m) | CSR  | Integridad (%) | S/N1 | S/N2 | Tipo de Receptor | Tipo de Antena  | Radomo | Gestor | Localización                   |
|----------|-------------|---------|---------|------|----------------|------|------|------------------|-----------------|--------|--------|--------------------------------|
| MPR1     | 3600        | 1.00    | 0.94    | 0.13 | 98.46          | 7.79 | 7.06 | NOV WAASGII      | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | Puerto Vallarta, JALISCO       |
| MMX1     | 3627        | 0.59    | 0.60    | 0.11 | 98.60          | 7.89 | 7.06 | NOV WAASGII      | MPL_WAAS_2225NW | NONE   | NGS    | CDMX                           |
| MEXI     | 3591        | 0.18    | 0.29    | 2.04 | 99.55          | 6.60 | 6.74 | LEICA GR10       | LEIAR10         | NONE   | NGS    | Mexicali, BAJA CALIFORNIA      |
| MTY2     | 3586        | 0.19    | 0.27    | 5.81 | 99.63          | 6.51 | 6.85 | LEICA GR10       | LEIAR10         | NONE   | NGS    | Monterrey, NUEVO LEON          |
| TNMT     | 825         | 0.92    | 0.55    | 1.70 | 77.45          | 7.01 | 4.86 | TRIMBLE NETR9    | TRM57971.00     | SCIT   | UNAVCO | Manantlán, JALISCO             |
| PENA     | 3330        | 0.64    | 0.75    | 5.28 | 91.82          | 6.94 | 4.55 | TRIMBLE NETR9    | TRM59800.00     | SCIS   | UNAVCO | Pena Colorada, COLIMA          |
| TNCM     | 1867        | 0.47    | 0.37    | 0.20 | 99.86          | 7.06 | 4.95 | TRIMBLE NETR9    | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | Chamela, JALISCO               |
| PJZX     | 3057        | 0.30    | 0.26    | 0.22 | 99.43          | 7.24 | 5.35 | TRIMBLE NETRS    | TRM59800.00     | SCIT   | UNAVCO | La Rumorosa, BAJA CALIFORNIA   |
| INEG     | 3430        | 0.14    | 0.19    | 4.42 | 99.25          | 6.60 | 7.13 | LEICA GR10       | LEIAR10         | NONE   | IGS    | Aguascalientes, AGUASCALIENTES |

### 4.5.1 NGS

La estación MPR1 es la estación que presenta la mayor cantidad de efecto multitrayectoria, manteniendo constante este comportamiento, como se muestra en la serie temporal correspondiente en la Figura 28, tal rendimiento de acuerdo con Kamatham (2018), reflejaría una relación señal-ruido baja, no obstante, la SNR se presenta con señales fuertes en ambas bandas. Un comportamiento inesperado es el de los saltos de ciclo ya que altos niveles de multitrayectoria propician mayor cantidad de saltos de ciclo, en cambio, la estación refleja un promedio de 0.13 CSR y algunos saltos de ciclo atípicos a mediados y finales del año 2011. La integridad de la estación a pesar de tener algunos descensos significativos reflejando un comportamiento similar en la multitrayectoria y en los saltos de ciclo para el último trimestre del año 2011, aún se mantiene con un adecuado porcentaje de integridad con un promedio de 98.46%.



**Figura 28.** Series temporales de los índices de calidad para la estación MPR1.

No se puede asumir que el comportamiento sea debido en su totalidad al hardware o software de la estación, pero no ha habido cambios en ningún componente desde su instalación, es por ello que basado en el nivel de integridad, la cantidad reducida de saltos

de ciclo por cada mil observaciones y un registro de señales fuertes de SNR pero con un grado elevado de efecto multitrayectoria, es muy probable que el ambiente que lo rodea sea la principal fuente de afectación, ya que grandes cantidades de multitrayectoria pueden indicar problemas del sitio, dicha estación se localiza en la torre del Aeropuerto Internacional de Puerto Vallarta Jalisco (Figura 29), donde la imagen de la derecha da un mejor panorama de lo que puede suceder en la torre ya que de acuerdo con el National Geodetic Survey (2018), la señales recibidas por el receptor y la antena pueden verse perjudicialmente afectadas por otras fuentes de radio frecuencia, como es el caso que se denota en la cima de la torre al no ser la única infraestructura colocada.



**Figura 29.** Localización de la estación MPR1.

Un comportamiento similar son las series temporales de la estación MMX1, la cual comparte el mismo tipo de receptor, antena y firmware que la estación MPR1, mejorando considerablemente el efecto multitrayectoria para este sitio, siendo en promedio de 0.59 m para MP1 y de 0.60 m MP2 y que se refleja contante en la serie temporal correspondiente de la Figura 30. De este modo es de esperar un decremento en los saltos de ciclo, comportamiento que sí ocurre siendo en promedio de 0.11 CSR, así como un porcentaje de integridad un poco mayor a MPR1 del 98.60% y una relación señal-ruido fuerte en ambas bandas, lo que refleja una correcta recepción de las señales, de este modo y con base en la calidad de los saltos de ciclo, indicando pérdidas mínimas de la fase portadora y una integridad favorable ( $> 95\%$ ), el grado de efecto multitrayectoria puede asumirse al medio

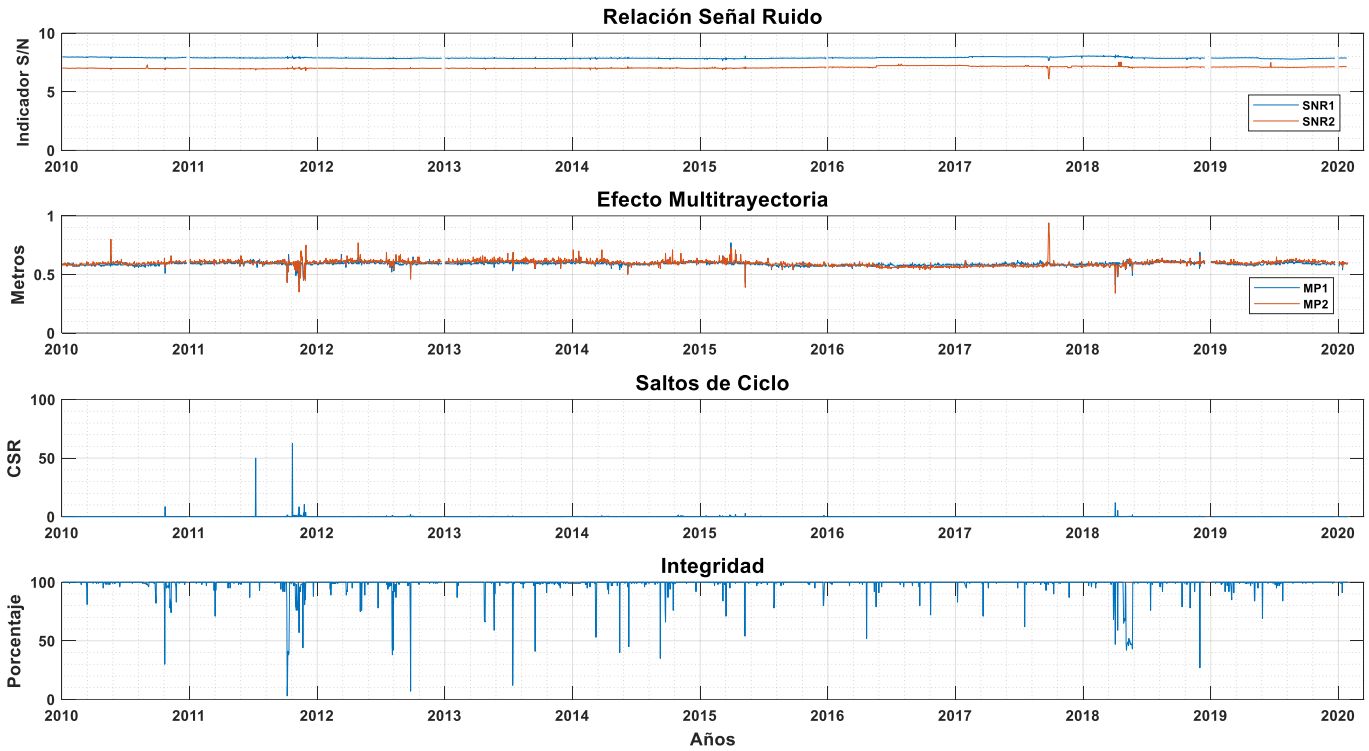


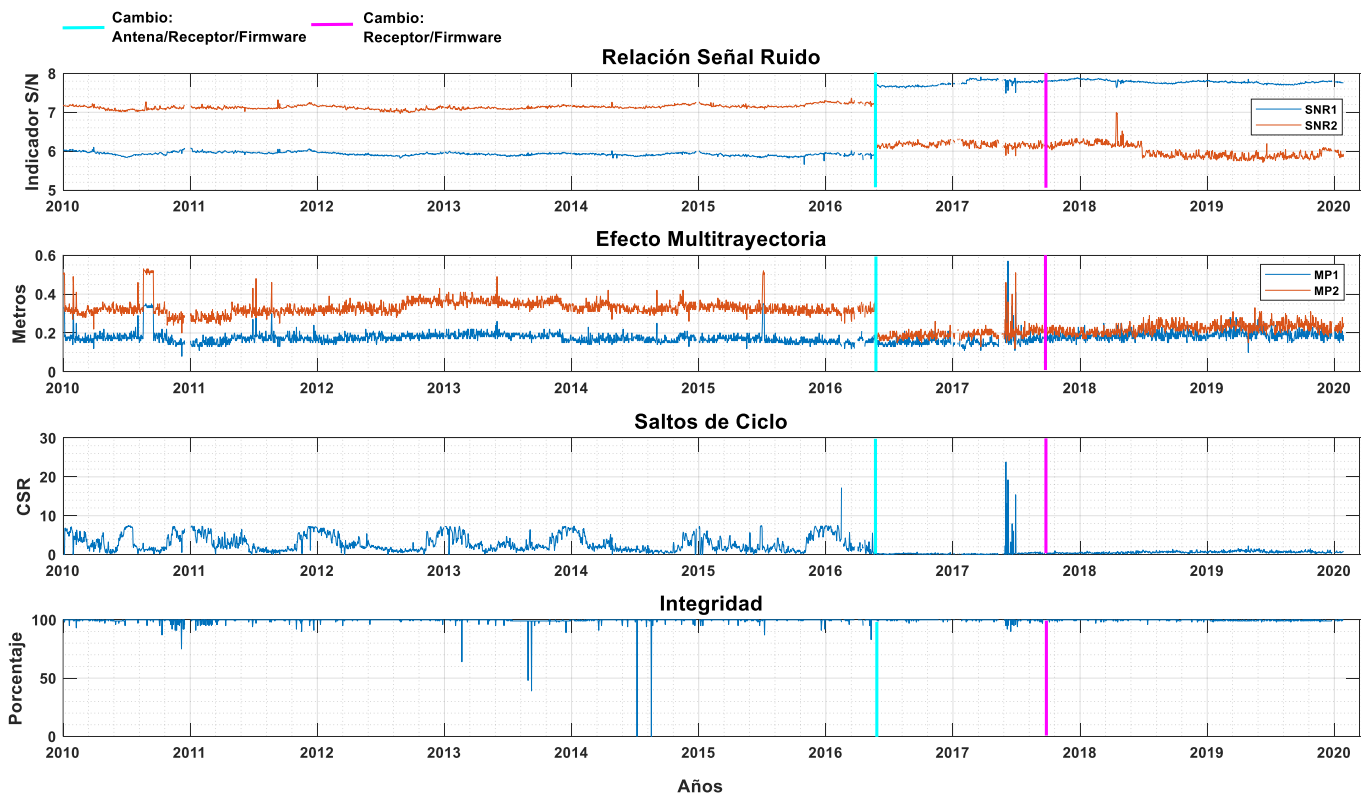
Figura 30. Series temporales de los índices de calidad para la estación MMX1.

ambiente que circunda la estación, como se muestra en la Figura 31, pudiendo ser la superficie reflejante de los espejos del tragaluz o alguna fuente de radiofrecuencia extra, al encontrarse en instalaciones del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.



Figura 31. Localización de la estación MMX1.

La estación MEXI presenta índices de calidad apegados a los estándares internacionales como se muestra en las series temporales de la Figura 32, sin embargo, los saltos de ciclo son los únicos que superan el valor permisible de 1 CSR, presentando 2.0383 CSR en promedio en los 10.07 años analizados y un valor máximo registrado de 23.8095 CSR mostrando ascensos a finales de año, a partir del 2011 y descensos a inicios del año, a partir del 2012, siendo periódicos como se muestra en la serie temporal hasta el año 2016 cuando se presenta un cambio a finales de mayo de 2016 de receptor TRIMBLE 5700 a LEICA GR10, de antena TRM41249.00 a LEIAR10 y actualización de firmware 1.24 a 3.22/6.521, lo que mejora drásticamente los saltos de ciclo, como se ve en la serie temporal, de igual manera se nota una inversión en la intensidad de la recepción de las señales, sin embargo, éstas se mantienen como señales fuertes disminuyendo el efecto multitrayectoria en la banda  $L_2$  y manteniendo la cantidad en la banda  $L_1$  propiciando un valor por debajo del máximo permisible de 0.30 m de acuerdo con IGS (2015).



**Figura 32.** Series temporales de los índices de calidad para la estación MEXI.

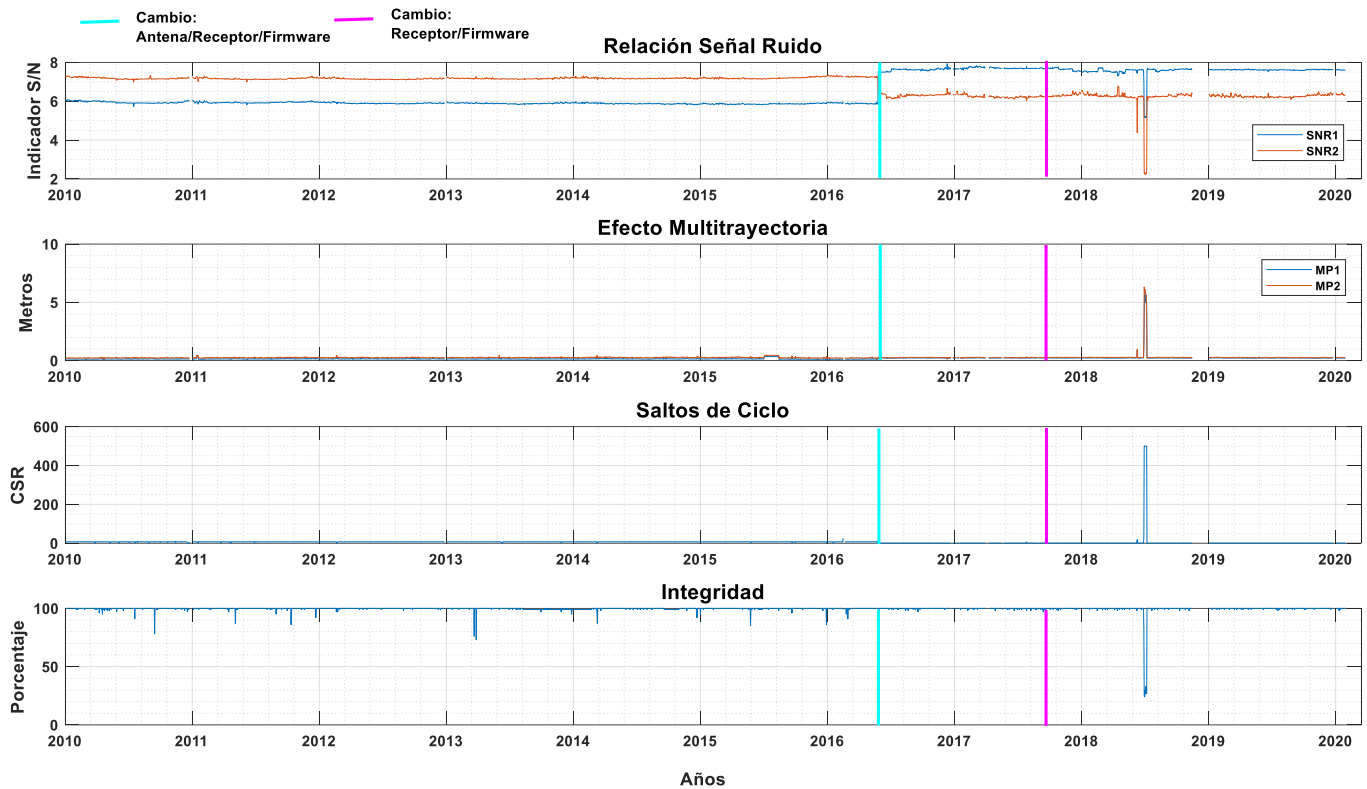
La última actualización en la estación se presenta en septiembre del 2017, posterior a un comportamiento atípico en las series temporales a mediados del mismo año, actualizando la versión de firmware a la 4.11/6.523 y al mismo tipo de receptor LEICA GR10. Finalmente, la integridad de la estación es la que mejor comportamiento presenta mostrándose más estable en la serie temporal con un 99.55% de integridad, valores de 0.18 y 0.29 m para MP1 y MP2, respectivamente, así como señales fuertes para ambas bandas correspondiendo a 6.60 de indicador para SNR1 y 6.74 de indicador para SNR2. Este adecuado comportamiento en los índices de calidad es favorecido también por la localización de la estación (Figura 33), con el poco ambiente multitrayecto visible.



**Figura 33.** Monumento y vista general de la estación MEXI. Fuente (CORS,2020).

La estación MTY2 y MEXI, con base al análisis de calidad realizado, son las estaciones que mejor comportamiento han presentado, correspondientes al gestor NGS, el cual puede visualizarse en las series temporales, para la estación MTY2 en la Figura 34 presentando señales fuertes para ambas bandas de 6.51 y 6.85 de indicador SNR1 y SNR2 respectivamente, bajo efecto multitrayectoria de 0.19 m para  $L_1$  y 0.27 m en  $L_2$ , así como una integridad del 99.63% siendo los saltos de ciclo los únicos que superan en promedio el valor recomendado de 1 CSR con 5.81 CSR.

Una inversión de la relación señal-ruido se presenta en mayo de 2016, posterior al cambio de receptor TRIMBLE 5700 a LEICA GR10, de antena TRM41249.00 a LEIAR10 y actualización de firmware 1.24 a 3.22/6.521, sin embargo, se mantiene como señales fuertes, la multitrayectoria sólo incrementa ligeramente en  $L_1$  y los saltos de ciclo se reducen, así como el porcentaje de integridad, mejorando la calidad de la estación, presentando una última actualización sólo de firmware a la versión 4.11/6.523 y al mismo tipo de receptor



**Figura 34.** Series temporales de los índices de calidad para la estación MTY2.

en septiembre de 2017, este cambio no presenta modificaciones significativas (Figura 34), manteniendo la calidad y disponibilidad de los datos, mostrándose un salto atípico a mediados del año 2018 el cual se muestra en las cuatro series temporales, disminuyendo la calidad de recepción de las señales, se incrementa el efecto multitrayectoria, así como los saltos de ciclo y decrece la integridad, que puede estar relacionado a algún factor externo ya que posteriormente, las series temporales se estabilizan. En la Figura 35 se muestra la monumentación de la estación para una mejor comprensión de su estabilidad.

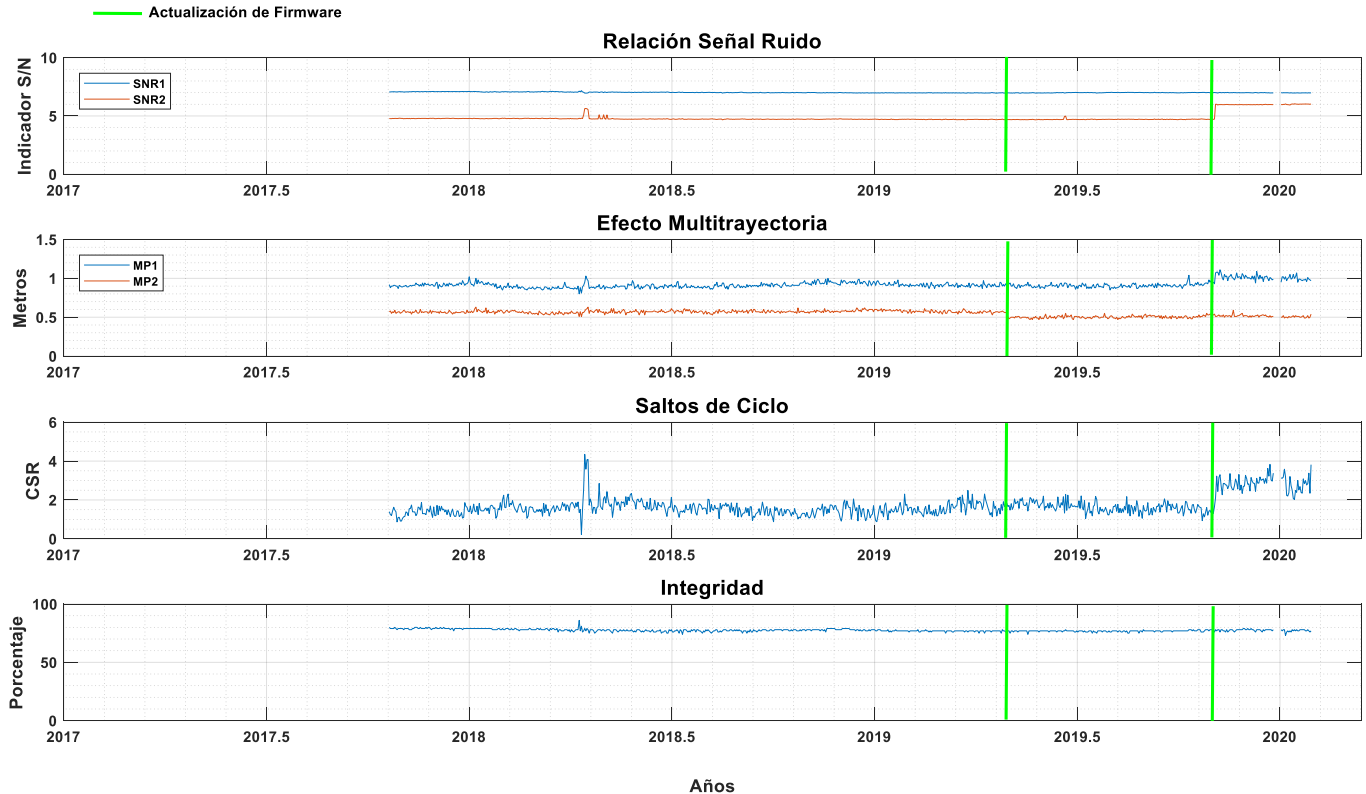


**Figura 35.** Monumento y vista general de la estación MTY2. Fuente: (CORS,2020).

## 4.5.2 UNAVCO

La estación TNMT instalada en octubre del 2017, presenta el grado más elevado de multitrayectoria en ambas bandas, respecto del núcleo de estaciones de UNAVCO. A pesar de presentar una SNR1 fuerte, con promedio de 7.01 de indicador de S/N, la cantidad de MP1 es elevada con promedio de 0.92 m, no cumpliéndose el comportamiento inversamente proporcional, descrito por Kamatham (2018), entre la SNR y el efecto multitrayectoria, en comparación con la SNR2 que se presenta como señal débil de 4.86 de indicador S/N y un MP2 de 0.55 m superior al valor recomendado por el IGS. De igual manera, los saltos de ciclo superan el estándar propuesto, manteniendo un promedio 1.70 CSR, así como un bajo porcentaje de integridad, logrando completar el 77.45% de sus observaciones posibles (Figura 36).

La estación sólo ha presentado dos actualizaciones, la primera de firmware 5.22 a 5.37 lo cual mejora ligeramente el efecto multitrayectoria en L<sub>2</sub> y la segunda de 5.37 a 5.42 mejorando la recepción de la señal L<sub>2</sub> como se muestra en la Figura 36.



**Figura 36.** Series temporales de los índices de calidad para la estación TNMT.

La estación se encuentra localizada en una zona baja respecto a los cerros que la circundan, siendo este uno de los factores del comportamiento descrito respecto de sus series temporales ya que en ellas se muestra continuidad, así mismo puede deberse a la vegetación de su entorno (Figura 37).

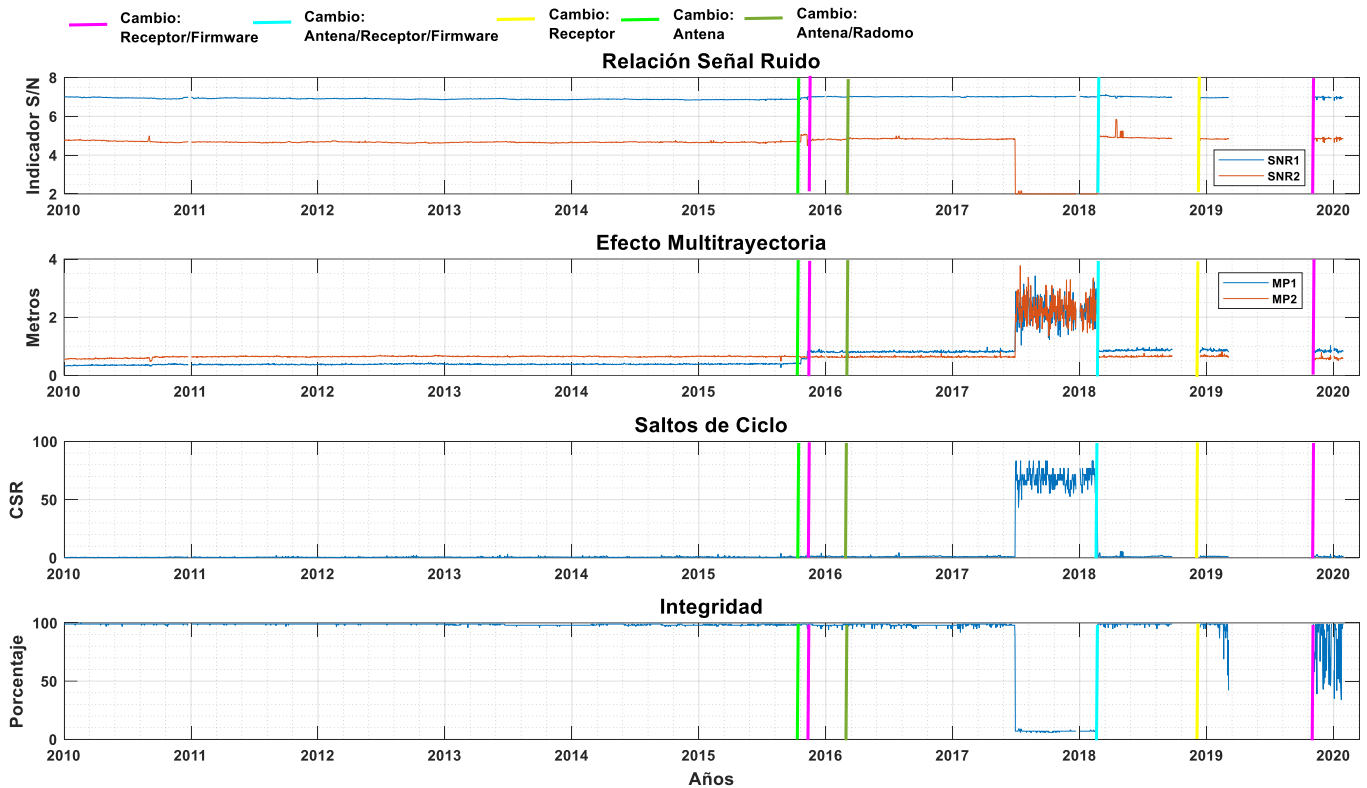


Figura 37. Localización y vista 3D de la estación TNMT.

La Figura 38 presenta las series temporales de los índices de calidad de la estación PENA los cuales reflejan una SNR1 fuerte durante todo el periodo analizado, siendo el único valor de la estación que se apega a los estándares internacionales.

Evaluando desde el año 2010 hasta el primer cambio de antena a finales del 2015 las cuatro series temporales se visualizan constantes, con valores de multitrayectoria de 0.33 y 0.55 m de MP1 y MP2, respectivamente, los saltos de ciclo no mayores a uno, así como valores de integridad del 99%, este cambio de antena TRM41249.00 a TRM59800.00 incrementa ligeramente la SNR2 y MP1, la siguiente actualización sólo de receptor TRIMBLE NETRS a NETR9 y de firmware 1.1-2 a 4.85, no muestra cambios significativos en la integridad y saltos de ciclo, incrementando el valor de MP1 y reduciendo la SNR2. El siguiente cambio de antena y radomo a TRM59800.00 SCIS no muestra cambios significativos en las series temporales presentando una mínima reducción en el porcentaje de integridad. Para mediados del año 2017 se presenta un salto brusco en todas las series temporales a excepción de la SNR1, de acuerdo con Ray y Senior (2003) fuertes variaciones de efecto multitrayectoria pueden indicar problemas de configuración o de sitio, esto se

confirma con el cambio de antena (TRM59800.00), receptor (TRIMBLE NETR9) y firmware (5.22) a finales de febrero del 2018 estabilizando el comportamiento reflejado en las series temporales, el siguiente cambio de receptor (TRIMBLE NETR9) en diciembre del 2018 mantiene el comportamiento, previo a la falta de datos, aunque después de febrero de 2019 no se presentan datos en la estación hasta la última actualización en noviembre de 2019 (receptor TRIMBLE NETR9 y firmware 5.42) el cual refleja una baja calidad en la integridad, por debajo del 50 %, manteniendo los otros parámetros.



**Figura 38.** Series temporales de los índices de calidad para la estación PENA.

PENA presenta en promedio un grado elevado de efecto multitrayectoria en ambas bandas, 0.64 m y 0.75 m, lo cual también puede estar relacionado con el ambiente de la estación como se muestra en Figura 39.



**Figura 39.** Monumento y vista a) Norte, b) Sur, c) Este y d) Oeste de la estación PENA.

La estación TNCM presenta un índice de integridad deseable, promediando con 99.86% de integridad, sin saltos bruscos en la serie temporal (Figura 40) con 0.20 CSR. Respecto a la recepción de las señales, la intensidad en  $L_1$  se presenta como señal fuerte mientras para  $L_2$  es débil con 7.06 y 4.95 de indicador SNR, respectivamente. El efecto multitrayectoria se mantiene por encima del valor recomendado siendo de 0.47 m para  $L_1$  y 0.37 m para  $L_2$ . Dichos comportamientos se muestran en las series temporales de la Figura 40, donde la serie temporal de los saltos de ciclo muestra mayor inestabilidad previa al cambio de receptor TRIMBLE NETR9 en noviembre de 2015, el cual mejora significativamente la cantidad de saltos de ciclo manteniendo constantes las demás series, la siguiente actualización de receptor TRIMBLE NETR9 y firmware 4.85 a 5.10, se da posterior a una pérdida de datos, mejorando ligeramente MP1, finalmente se presentan dos actualizaciones de firmware, la primera de la versión 5.10 a 5.22 y la segunda a la versión 5.42 presentándose una relación inversamente proporcional de SNR y MP (Kamatham, 2018), mejorando la recepción en SNR2 y disminuyendo el efecto multitrayectoria de la banda  $L_2$ .

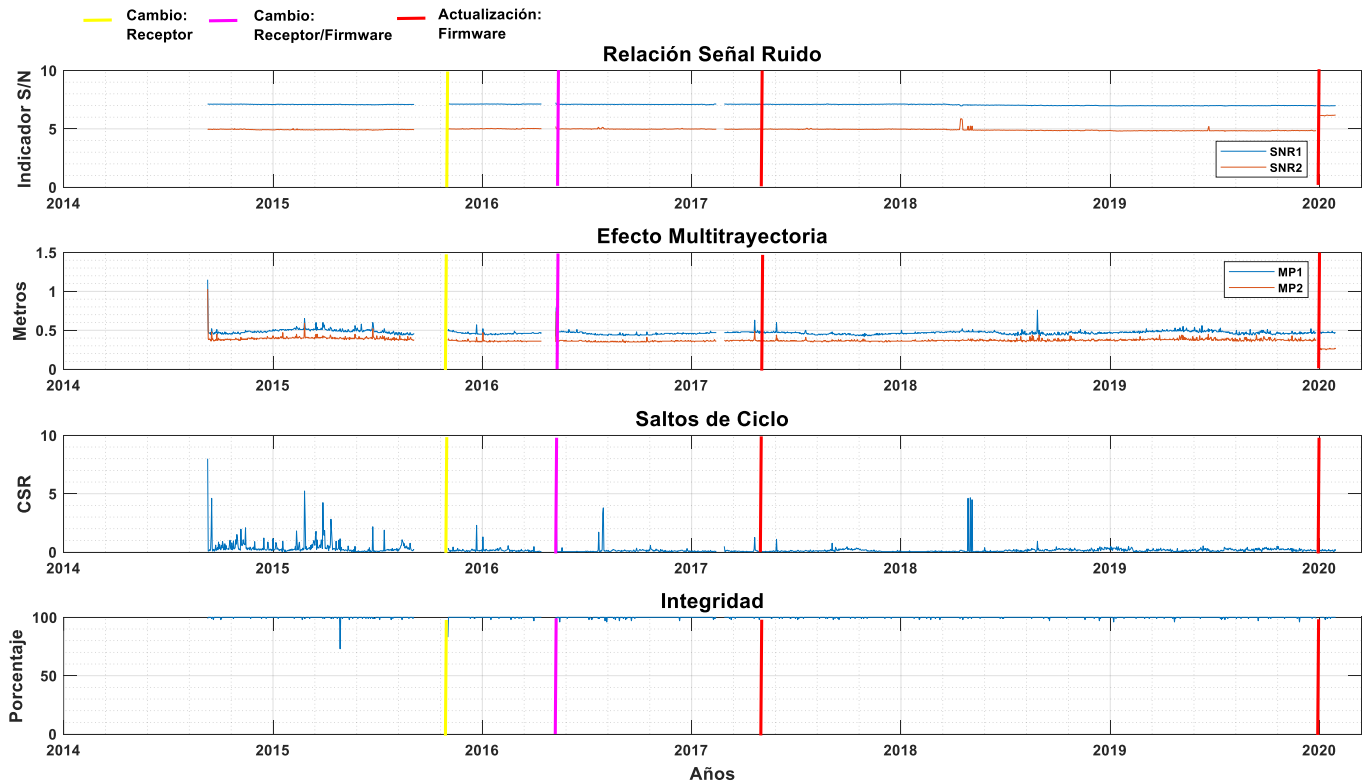


Figura 40. Series temporales de los índices de calidad para la estación TNCM.

La Figura 41 muestra las vistas disponibles de la estación, mostrando un ambiente multitrayecto mínimo pero que se muestra constante de acuerdo a la serie temporal correspondiente, mejorando con la última actualización de firmware.



**Figura 41.** Monumento y vista a) Norte, b) Sur y c) Oeste de la estación TNCM.

La estación PJZX es la estación del bloque de UNAVCO que presenta los mejores valores en los índices de calidad, reflejadas en las series temporales casi lineales (Figura 43), sin embargo, se presenta un periodo a partir de febrero de 2019 con baja integridad, mayor cantidad de saltos de ciclo y multitrayectoria, lo cual se estabiliza con la actualización de firmware 1.3-0 a 1.3-2. A pesar de este comportamiento la estación refleja una correcta integridad de 99.43%, 0.22 CSR, efecto multitrayectoria justo en el límite para la banda  $L_1$  con 0.30 m y 0.26 m para MP2, con una relación señal-ruido fuerte para la banda  $L_1$  de 7.24 de indicador SNR y una señal débil para SNR2 con 5.35 de indicador.

La alta calidad de la estación PJZX también refleja una estabilidad de los datos analizados, relacionados a la localización y ambiente multitrayecto mínimo que se visualiza en la Figura 42.



**Figura 42.** Monumento y vista a) Norte, b) Sur, c) Este y d) Oeste de la estación PJZX.

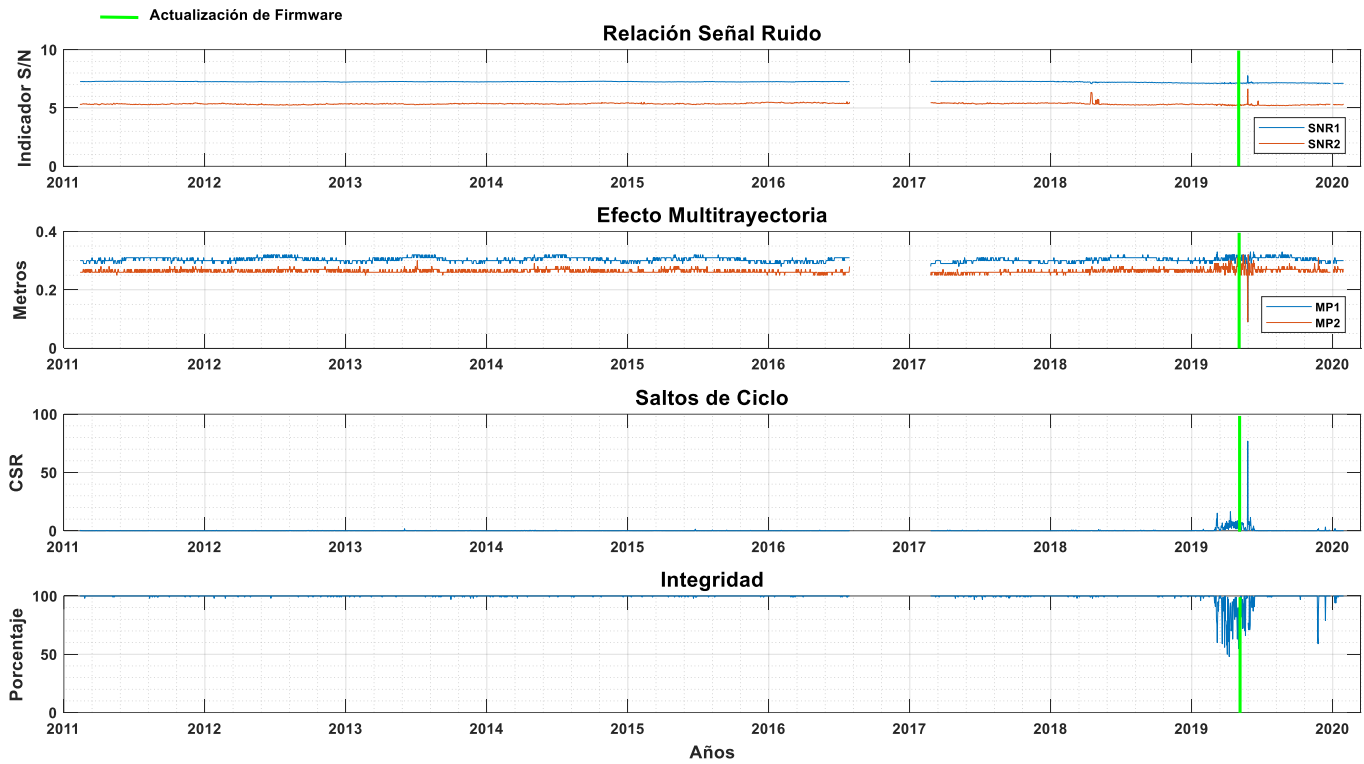
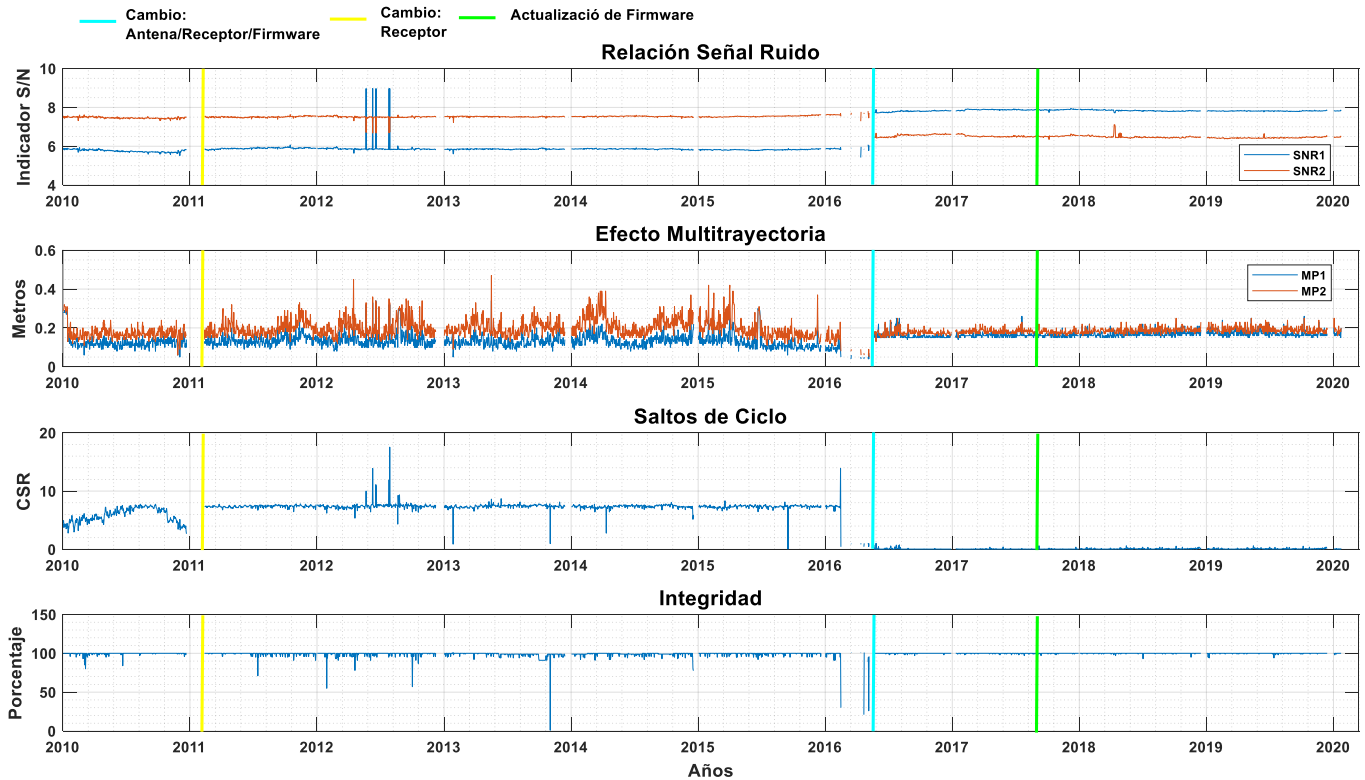


Figura 43. Series temporales de los índices de calidad para la estación PJZX.

### 4.5.3 IGS

La estación INEG, la única hasta el momento perteneciente a la red IGS, presenta el menor grado de efecto multitrayectoria de las 65 estaciones, basado en el análisis de calidad, presentando valores promedio de MP1 de 0.14 m y de MP2 de 0.19 m, con una integridad del 99.25 % y señales fuertes en ambas bandas, SNR1 de 6.60 y SNR2 de 7.13. La actualización de receptor a finales de enero de 2011 al mismo tipo de receptor TRIMBLE 5700 y firmware 1.24 no presenta cambios significativos en la relación señal-ruido, sin embargo, se refleja mayor inestabilidad en el efecto multitrayectoria y saltos de ciclo mayores a uno por cada mil observaciones (Figura 44). La siguiente actualización en mayo de 2016 de receptor TRIMBLE 5700 a receptor LEICA GR10, antena TRM29659.00 NONE a LEIAR10 NONE y firmware 1.24 a la versión 3.22/6.521 muestra una mejora en los cuatro parámetros de calidad, se incrementa la relación señal-ruido, los valores de multitrayectoria se estabilizan, a tal grado de ser muy parecidos y menores a 0.25 m, los saltos de ciclo disminuyen en gran manera siendo menores de 1 por cada 1000 observaciones, no obstante,

en promedio presenta 4.42 CSR y respecto a la integridad oscila entre 98 y 100 %. La última actualización a la versión de firmware 4.11/6.523 no muestra mejoras significativas ni afectaciones en el sistema.



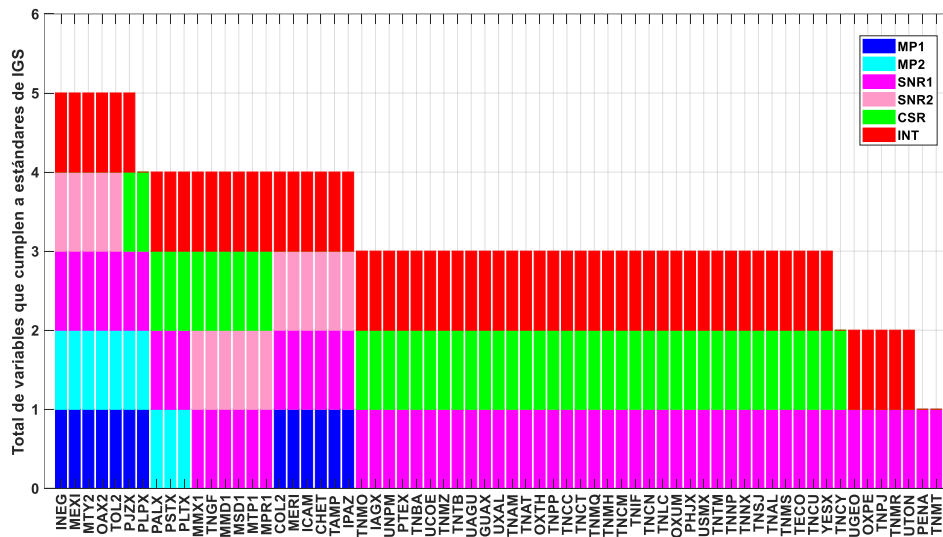
**Figura 44.** Series temporales de los índices de calidad para la estación INEG.

El adecuado comportamiento descrito por la estación desde el año 2010 y mejorado en mayo del 2016, no sólo está en función del sistema (antena-receptor-firmware) también de la localización y entorno que evidencia un bajo ambiente multitrayectoria (Figura 45).



**Figura 45.** Monumento y vista general de la estación INEG, (21/07/2011).

Finalmente, de las 65 estaciones evaluadas, 6 estaciones cumplen con el estándar del IGS en 5 de sus 6 variables; 16 estaciones lo cumplen en 4; 35 con 3; 6 con 2 y 2 con una variable como se muestra en la Figura 46, donde a los 4 indicadores de calidad se les ha asignado valor de 1 cuando la variable se ajuste al estándar propuesto por el IGS, es decir, el valor máximo será de 6 con una barra superpuesta de 6 colores correspondientes a cada variable (MP1, MP2, SNR1, SNR2, CSR, INT). Sin embargo, cuando la variable no se ajuste no se le asignará valor, de este modo sólo se muestran aquellas que cumplen con los estándares del IGS.



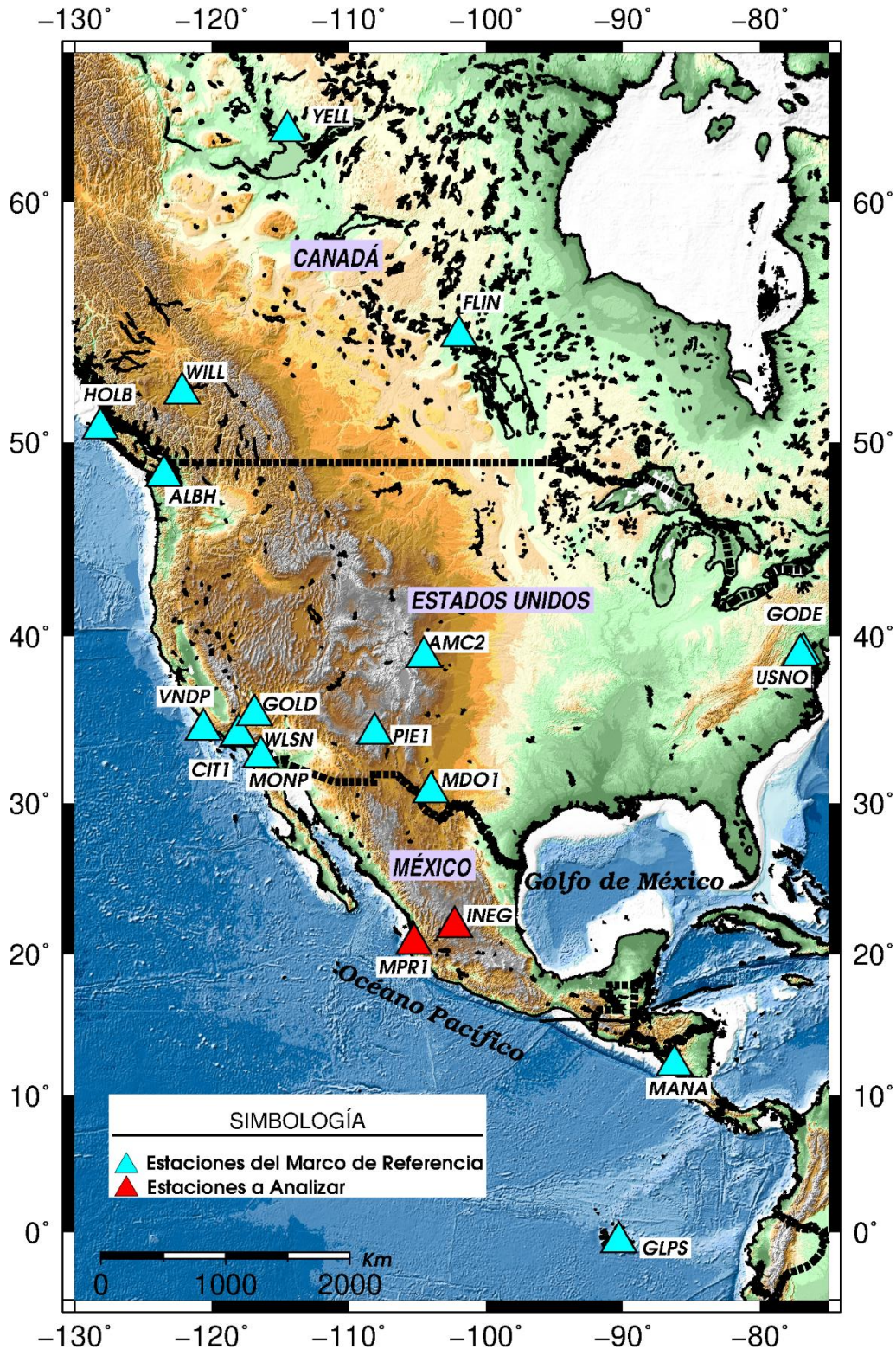
**Figura 46.** Variables que cumplen los estándares establecidos por el IGS. Se asignan los valores de: MP1 = 1; MP2 = 1, SNR1 = 1; SNR2 = 1; CSR = 1; INT = 1, si las variables se cumplen.

#### 4.6 Análisis del impacto en el posicionamiento preciso

Derivado del análisis de calidad, se ha procesado con software científico GAMIT/GLOBK 10.71 la estación INEG y MPR1 correspondientes a la estación de menor y mayor efecto multitrayectoria, respectivamente, ya que, según Franco-Patiño *et al.* (2013); Yeh *et al.* (2007, 2008); Hilla *et al.* (2004); Vázquez *et al.* (2012); Vázquez *et al.* (2013) mencionan a la multitrayectoria como el principal degradador en el posicionamiento preciso. Así mismo, Herrada *et al.* (2010) y Souto, (2014) mencionan a la multitrayectoria como causante de los saltos de ciclo debido a una baja relación señal-ruido. En este sentido, se han considerado 17 estaciones de la red IGS para la definición del marco de referencia, las cuales cumplen con tiempos de operación mayor a 2.5 años de acuerdo con lo recomendado por Blewitt y Lavallée (2002). En la Tabla 17 se muestran los tiempos utilizados para la evaluación al impacto al posicionamiento preciso de las estaciones a analizar, así como el de las estaciones del marco de referencia. En la Figura 47 se muestra la localización de dichas estaciones.

**Tabla 17.** Estaciones analizadas

| Estación                           | Año inicial | Año final  | Días en la solución | Tiempo Estimado (años) | Red  |
|------------------------------------|-------------|------------|---------------------|------------------------|------|
| INEG                               | 2010.0      | 2020.074   | 3610                | 9.890                  | IGS  |
| MPR1                               | 2010.0      | 2020.074   | 3541                | 9.701                  | CORS |
| Estaciones del marco de referencia |             |            |                     |                        |      |
| YELL                               | 2010.0      | 2020.074   | 3649                | 9.997                  | IGS  |
| VNDP                               | 2010.0      | 2020.074   | 3648                | 9.995                  | IGS  |
| CIT1                               | 2010.0      | 2020.074   | 3647                | 9.992                  | IGS  |
| ALBH                               | 2010.0      | 2020.074   | 3646                | 9.989                  | IGS  |
| MONP                               | 2010.0      | 2020.074   | 3639                | 9.970                  | IGS  |
| FLIN                               | 2010.0      | 2020.074   | 3624                | 9.929                  | IGS  |
| MANA                               | 2010.0      | 2020.074   | 3617                | 9.910                  | IGS  |
| HOLB                               | 2010.0      | 2020.074   | 3584                | 9.819                  | IGS  |
| PIE1                               | 2010.0      | 2020.074   | 3581                | 9.811                  | IGS  |
| WILL                               | 2010.0      | 2020.074   | 3576                | 9.797                  | IGS  |
| WLSN                               | 2010.0      | 2020.074   | 3553                | 9.734                  | IGS  |
| GODE                               | 2010.0      | 2020.074   | 3552                | 9.732                  | IGS  |
| GOLD                               | 2010.0      | 2020.074   | 3369                | 9.230                  | IGS  |
| AMC2                               | 2010.0      | 2018.255   | 2973                | 8.145                  | IGS  |
| GLPS                               | 2010.0      | 2020.074   | 2791                | 7.647                  | IGS  |
| MDO1                               | 2010.0      | 2019.69315 | 2327                | 6.375                  | IGS  |
| USNO                               | 2010.0      | 2015.211   | 1858                | 5.090                  | IGS  |



**Figura 47.** Localización de estaciones geodésicas para estimación de velocidades y posicionamiento. Modelo de Relieve Global ETOPO1 (NOAA, 2008). Mapa generado mediante Generic Mapping Tools (Wessel *et al.*, 2019).

En la Tabla 18 y 19 se muestran las posiciones y velocidades estimadas con GLOBK de las dos estaciones analizadas, donde se han considerado modelos implementados para el procesado, como: retardo ionosférico, modelos troposféricos, rotación del polo, carga oceánica, así como, archivos de corrección del centro de fase de la antena, coordenadas a priori y las estaciones de referencia para las dobles diferencias de fase, con los cuales se puede llegar a las coordenadas mínimamente constreñidas, siendo así de alta precisión para la determinación de deformación de la corteza terrestre.

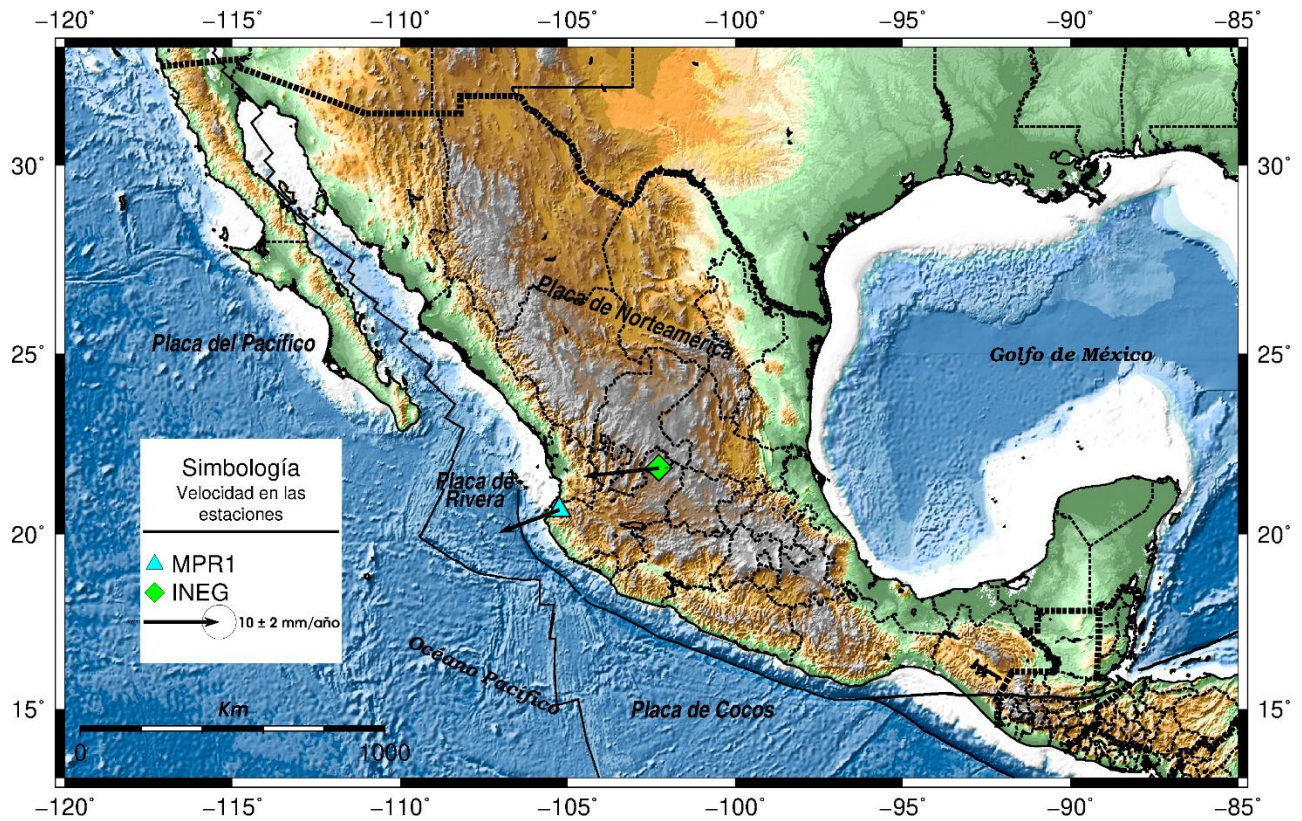
**Tabla 18.** Resumen de la posición estimada con GLOBK 10.71

| Long.<br>(deg) | Lat.<br>(deg) | dE adj.<br>(mm) | dN adj.<br>(mm) | dE +-<br>(mm) | dN +-<br>(mm) | RHO    | dH adj.<br>(mm) | dH +-<br>(mm) | SITIO |
|----------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|--------|-----------------|---------------|-------|
| 257.71580      | 21.85615      | -0.57           | 1.27            | 2.10          | 2.76          | -0.464 | 10.93           | 6.86          | INEG  |
| 254.75080      | 20.67900      | 1.73            | 12.10           | 2.47          | 3.10          | -0.307 | 6.19            | 8.71          | MPR1  |

**Tabla 19.** Resumen de la velocidad estimada con GLOBK 10.71

| Long.<br>(deg) | Lat.<br>(deg) | E & N<br>velocidad<br>(mm/año) |       | E & N Adj.<br>(mm/año) |      | E & N +-<br>(mm/año) |      | RHO    | H<br>velocidad | H.adj.<br>(mm/año) | +-   | SITIO |
|----------------|---------------|--------------------------------|-------|------------------------|------|----------------------|------|--------|----------------|--------------------|------|-------|
| 257.71580      | 21.85615      | -9.95                          | -1.10 | -1.00                  | 1.64 | 0.02                 | 0.02 | -0.019 | -36.62         | -10.24             | 0.08 | INEG  |
| 254.75080      | 20.67900      | -8.04                          | -3.03 | -0.14                  | 1.04 | 0.02                 | 0.02 | -0.031 | -2.460         | -0.680             | 0.06 | MPR1  |

En la Figura 48, se muestran los vectores de desplazamiento de acuerdo a la velocidad estimada en cada estación. Con base en DeMets *et al.* (2010) la placa de Rivera subduce hacia el noreste por debajo de México, con velocidades de hasta 35 mm/año, de igual manera la Placa de Cocos subduce por debajo de la Placa Norteamericana (Bernal-López *et al.*, 2017), lo cual queda evidente con la magnitud y dirección de las estaciones sobre la Placa Norteamericana.

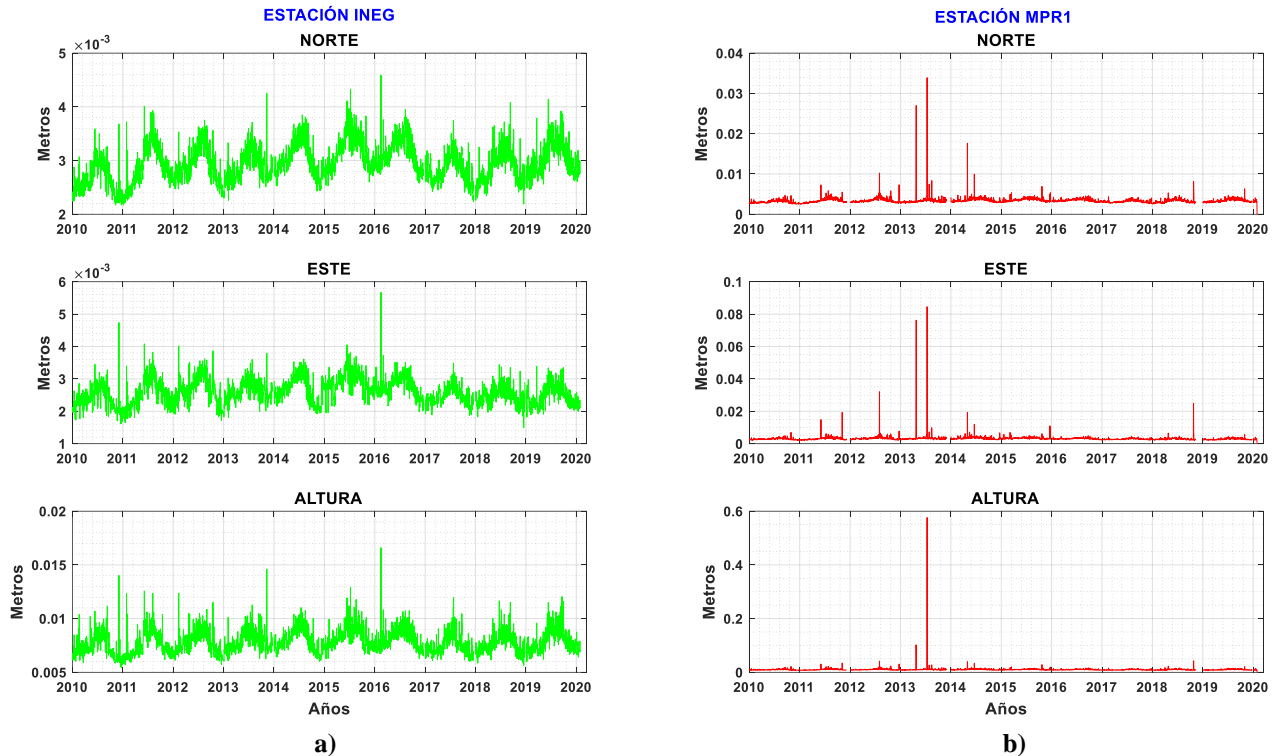


**Figura 48.** Velocidad de las estaciones INEG y MPR1. Modelo de Relieve Global ETOPO1 (NOAA, 2008).

Mapa generado mediante Generic Mapping Tools (Wessel *et al.*, 2019).

#### 4.6.1 Evaluación de CEP y EPV

La Figura 49 a) y 49 b) muestra las desviaciones estándar de las soluciones diarias de la estación INEG y MPR1, respectivamente, en las componentes Norte, Este y Altura (N, E, U) las cuales fueron utilizadas para el cálculo del Circulo de Error Probable (CEP) y Exactitud de Posición Vertical (EPV) en un intervalo de confianza del 95 %.



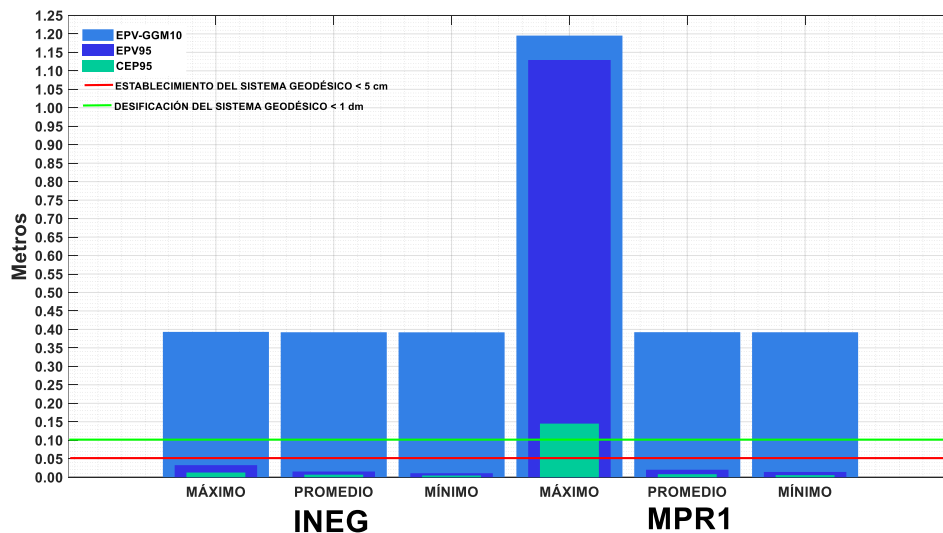
**Figura 49.** Desviaciones estándar de las soluciones diarias en las componentes Norte, Este y Altura  
a) estación INEG, b) estación MPR1.

La Tabla 20 muestra los valores de CEP, EPV y EPV considerando el modelo geoidal GGM10, del día con mayor afectación (máximo), el promedio global de todas las soluciones diarias y el día de menor afectación (mínimo) para ambas estaciones, considerando que las condiciones han sido las mismas, evitando así, inconsistencias en el postproceso a través de software científico, en el uso de modelos, efemérides precisas, tiempos de observación y estaciones de referencia. De este modo se busca la mejor exactitud en las soluciones diarias.

**Tabla 20.** Cálculo de Circulo de Error Probable y Exactitud Posicional Vertical

| INEG     |            |            |            |        |        |           |
|----------|------------|------------|------------|--------|--------|-----------|
|          | $\sigma_N$ | $\sigma_E$ | $\sigma_U$ | CEP95  | EPV95  | EPV-GGM10 |
| MÁXIMO   | 0.0046     | 0.0057     | 0.0166     | 0.0126 | 0.0325 | 0.3933    |
| PROMEDIO | 0.0029     | 0.0026     | 0.0078     | 0.0068 | 0.0153 | 0.3923    |
| MÍNIMO   | 0.0022     | 0.0015     | 0.0055     | 0.0045 | 0.0107 | 0.3921    |
| MPR1     |            |            |            |        |        |           |
|          | $\sigma_N$ | $\sigma_E$ | $\sigma_U$ | CEP95  | EPV95  | EPV-GGM10 |
| MÁXIMO   | 0.0339     | 0.0846     | 0.5762     | 0.1450 | 1.1293 | 1.1954    |
| PROMEDIO | 0.0034     | 0.0032     | 0.0103     | 0.0080 | 0.0201 | 0.3925    |
| MÍNIMO   | 0.0025     | 0.0020     | 0.0072     | 0.0055 | 0.0141 | 0.3923    |

La Figura 50 muestra la comparativa de la Tabla 20, evidenciando que los valores de EPV, considerando el modelo geoidal GGMM10, superan los 39 cm dada la desviación estándar del modelo de 0.20 m. Los valores que presenta INEG de CEP95 y EPV95 son aptos para el establecimiento del sistema geodésico nacional al ser menores a 5 cm de acuerdo con INEGI, (2010), sin embargo, la estación MPR1 en los valores máximos, supera lo recomendado por INEGI para la densificación del sistema geodésico nacional, siendo el valor de EPV95 hasta 7 veces mayor al valor de CEP95. En cuanto al valor promedio y mínimo, ambos son aptos para el establecimiento del sistema geodésico, presentando valores similares a INEG con diferencias de: 0.0005, 0.0006 y 0.0025 m en las componentes N, E y U, en promedio respectivamente.

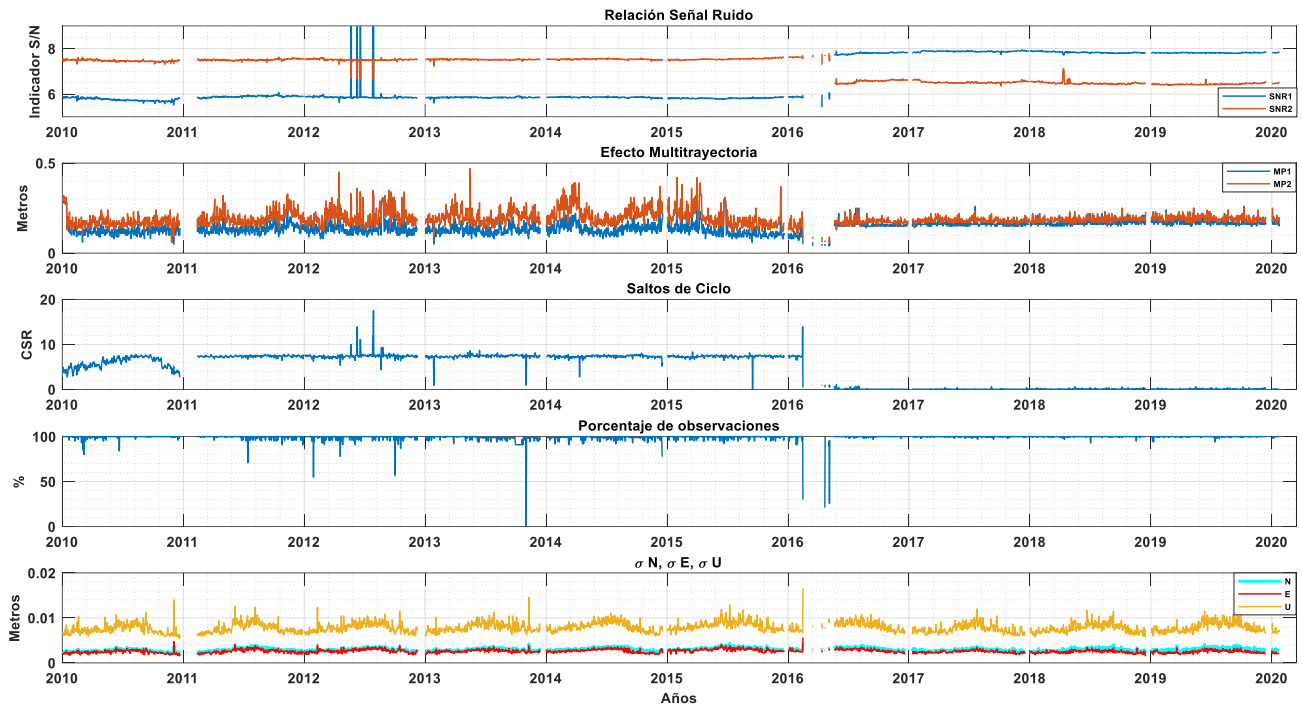


**Figura 50.** Comparativa de los Valores CEP95 y EPV95 de acuerdo a INEGI (2010).

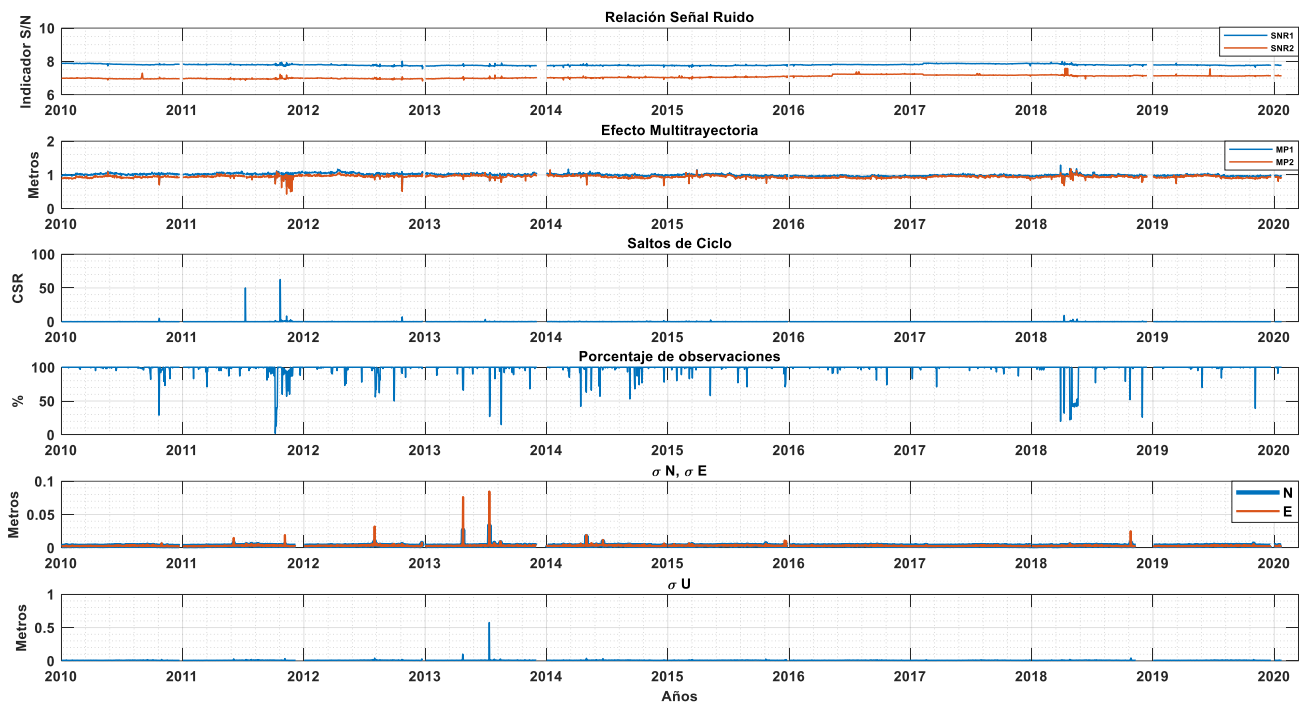
Si bien, la cantidad de efecto multitrayectoria es considerablemente menor en la estación INEG también refleja un CEP y EPV menor a MPR1, no obstante, la precisión de la estación MPR1 es comparable a la estación INEG, a excepción del valor máximo, ambas aproximadas a  $\approx 1$  cm de CEP95 y  $\approx 2$  cm en EPV95 considerando sólo la altura elipsoidal, sin introducir en el cálculo el modelo geoidal GGM10, degradándose la exactitud vertical.

De acuerdo a este comportamiento, la cantidad de efecto multitrayectoria no refleja degradación significativa en el posicionamiento de la estación MPR1 respecto de INEG, lo cual puede estar relacionado al método de posicionamiento (relativo estático) que de acuerdo con Hofmann-Wellenhof *et al.* (2008), puede alcanzar una precisión de  $5 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ ppm}$  incrementando con la longitud de la línea base, confirmando que en sesiones prolongadas la contaminación de multitrayectoria para posicionamiento relativo estático no es un problema (Souza y Negri, 2017; Hofmann-Wellenhof *et al.* 2008), aún en valores elevados de efecto multitrayectoria.

En la Figura 51 y 52 se muestran las series temporales del análisis de calidad en conjunto con las desviaciones estándar de las soluciones diarias para una inspección visual.

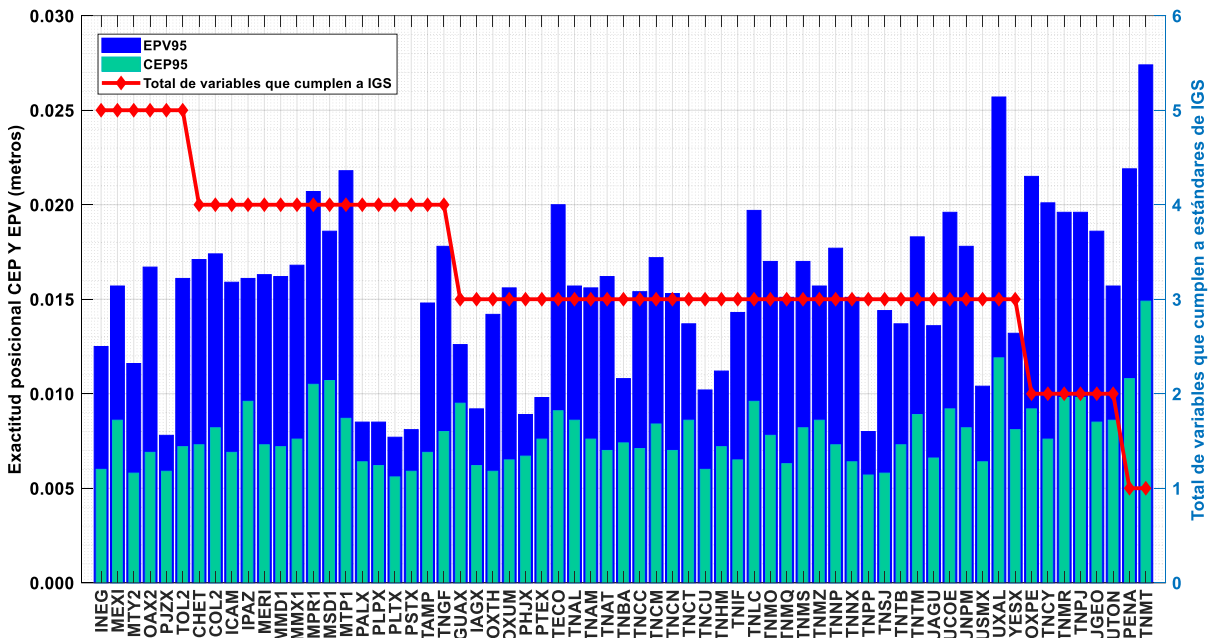


**Figura 51.** Series temporales del análisis de calidad y las desviaciones estándar de las soluciones diarias de la estación INEG.



**Figura 52.** Series temporales del análisis de calidad y las desviaciones estándar de las soluciones diarias de la estación MPRI.

De manera conjunta la Figura 53 muestra los valores de CEP y EPV (gráfica de barras) para cada una de las 65 estaciones evaluadas y procesadas con GAMIT/GLOBK, así como la cantidad de variables del análisis de calidad que se ajustan a los estándares del IGS (línea roja con rombos). En este sentido, no se muestra una relación directamente proporcional entre la cantidad de variables ajustadas a IGS y la exactitud posicional, es decir, las estaciones que cumplen dos variables al estándar de IGS presentan valores de CEP y EPV similares a las estaciones que cumplen 3 y 4 variables, a su vez las estaciones que cumplen con 4 variables tienen valores similares a los que se ajustan a 5 variables, sin embargo, en los casos extremos donde la estación INEG se ajusta a 5 variables de 6 y la estación TNMT se ajusta a 1 de 6 variables, si se muestra un mejor desempeño de exactitud posicional horizontal y vertical en la estación INEG que en TNMT, no obstante, las 65 estaciones se ajustan a la normativa vigente en México para el establecimiento de un sistema geodésico nacional.



**Figura 53.** Comparativa de los valores de exactitud posicional (CEP95 y EPV95) procesado con software científico GAMIT/GLOBK y el número de variables que cumple cada estación, derivado del análisis de calidad en función de los estándares de IGS.

#### 4.6.2 Estimación de la velocidad en las estaciones

Derivado del análisis de calidad y el procesado en GAMIT/GLOBK se obtuvieron las velocidades de las dos estaciones analizadas dando como resultado para la estación INEG en la componente Norte  $-0.07 \pm 0.03$  mm/año y  $-9.33 \pm 0.02$  mm/año en la componente Este, lo que implica un desplazamiento en dirección sur-oeste (SW). La estación MPR1 muestra una velocidad en la componente Norte de  $-3.08 \pm 0.02$  mm/año y en la componente Este de  $-7.85 \pm 0.02$  mm/año implicando el desplazamiento de la estación en dirección sur-oeste (SW).

En la Figura 54 y 55 se muestran las series temporales ajustada de la estación INEG y MPR1, respectivamente, donde los puntos azules son la solución diaria en posicionamiento respecto a la posición de referencia en las componentes N, E y U. La línea roja corresponde a la incertidumbre estimada  $\pm 1\sigma$  y la líneas verdes hacen referencia al error medio cuadrático ponderado en  $\pm 3$  veces la dispersión.

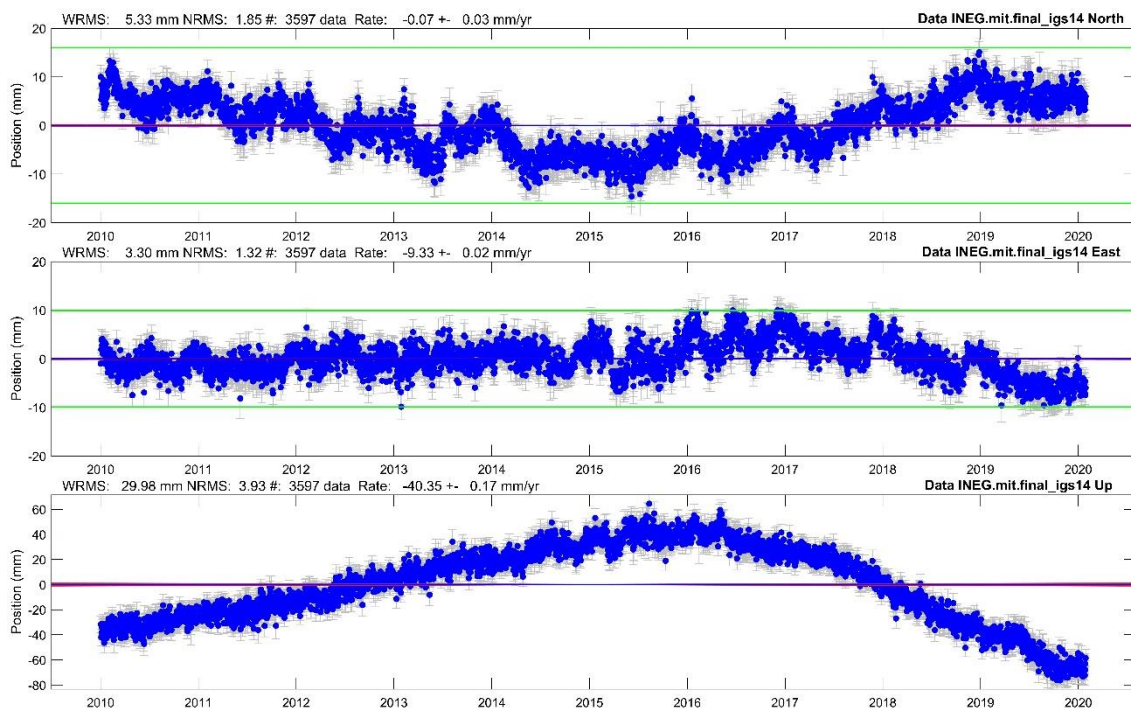
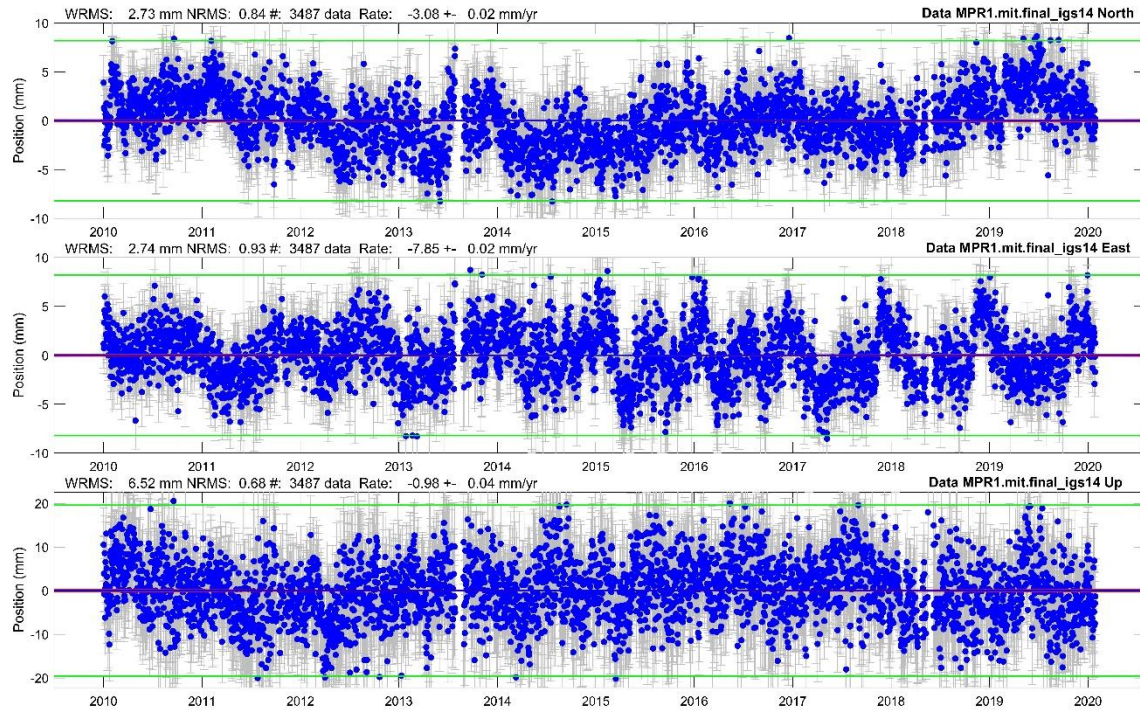


Figura 54. Series temporales de posición N, E, U ajustadas de la estación INEG

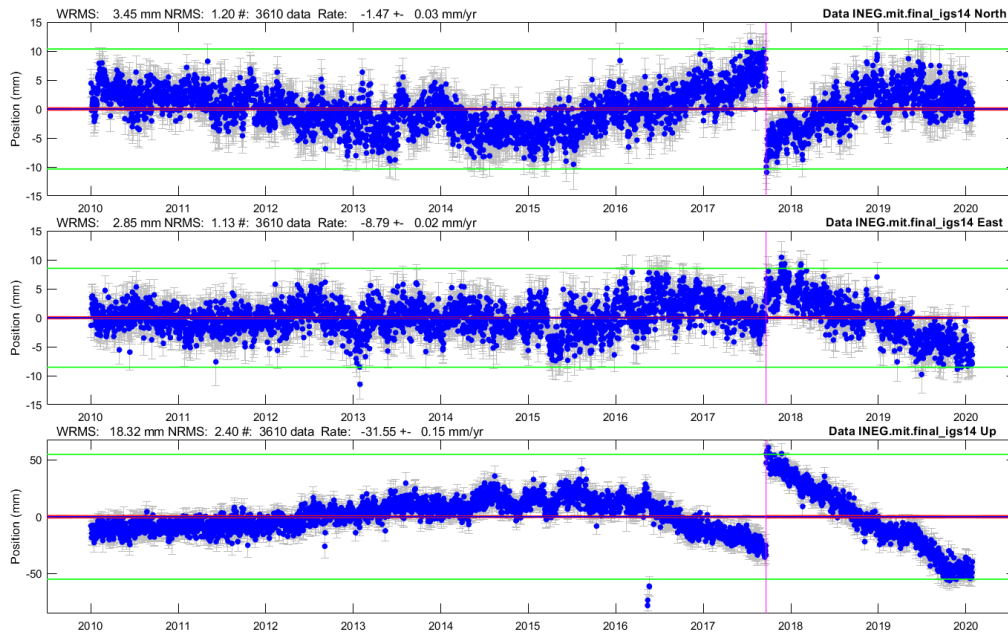


**Figura 55.** Series temporales de posición N, E, U ajustadas de la estación MPR1

Las series temporales de la estación **INEG** en las componentes Este y Norte no muestran gran dispersión en las soluciones diarias, siendo de  $\pm 15$  mm, sin embargo, en la componente Vertical se muestra un comportamiento parabólico ascendente del año 2010 a 2016 de -40 mm hasta un máximo de 60 mm. A partir del segundo cuatrimestre del año 2016 se presenta descendente hasta valores de -80 mm, dando como resultado de los 10.07 años evaluados una velocidad de  $-40.35 \pm 0.17$  mm/año. Tal comportamiento puede estar relacionado a fallas geológicas y grietas cercanas a su localización, así como al graven de Aguascalientes presentando fenómenos de subsidencia (SEPLADE, 2006) en este sentido Métivier *et al.* (2020) describe que dada la señal anómala en la componente vertical, la estación no fue considerada en su estudio para la determinación de los coeficientes de armónicos esféricos de grado uno y dos de los cambios de la figura de Tierra sólida. La estación **MPR1**, muestra una velocidad en la componente vertical de  $0.98 \pm 0.04$  mm/año.

Como resultado de la implementación de software científico y modelos, es posible la estimación con alta precisión de las velocidades de las estaciones, así como el desplazamiento co-sísmico que concuerda en las tres componentes (E, N, U) detectado por

la estación INEG, correspondiente al sismo del 19 de septiembre de 2017, de magnitud 7.1  $M_w$  localizado a 8 Km al noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla (México, 2020; USGS, 2020), donde en la componente norte se muestra un desplazamiento de  $13.34 \pm 0.20$  mm, en la componente Este de  $-5.02 \pm 0.17$  mm y en la componente vertical de  $-83.18 \pm 1.07$  mm como se muestra en la Figura 56.



**Figura 56.** Serie temporal de la estación INEG, donde se muestra los desplazamientos co-sísmicos de cada componente (N, E, U). La línea magenta vertical, hace referencia al sismo del 19 de septiembre de 2017 (7.1  $M_w$ ) localizado a 8 Km al noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla, México.

## CAPÍTULO V

### DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Retomando el estudio realizado por Vázquez *et al.* (2013), desde el año 2010 a enero de 2020, agregando 3 índices de calidad a la evaluación (SNR, CSR e INTEGRIDAD), así como 12 estaciones adicionales de libre acceso, las estaciones PLPX y PJZX muestran estabilidad respecto a la cantidad de efecto multitrayectoria, así mismo, las estaciones INEG y MEXI han sido estables en cuanto a la correcta generación de información desde el año 1998 y 1994 respectivamente, siendo la estación INEG la que muestra una mejora significativa en MP1 pasando de 0.80 m en 1999 a 0.14 m en promedio, para los últimos 10.07 años analizados, cumpliendo así los estándares internacionales recomendados por el IGS, a excepción de la cantidad de saltos de ciclo por cada 1000 observaciones.

La relación inversamente proporcional entre SNR y MP (Kamatham, 2018), con base en los valores promedios obtenidos, sólo se presenta en 5 estaciones INEG, MEXI, MTY2, OAX2 y TOL2, lo cual muestra un dominio de las relaciones directamente proporcionales de SNR y MP en las 60 estaciones restantes, es decir, un grado elevado de efecto multitrayectoria y una relación señal-ruido con señales fuertes, al menos en la banda L<sub>1</sub>. Esto mismo, resulta complejo, ya que según Zuo *et al.* (2019); Kamatham (2018); Xiao *et al.* (2020), entre mejor recepción de la señal (SNR), se espera que el efecto multitrayectoria sea mínimo. Sin embargo, el comportamiento encontrado puede estar directamente relacionado con las actualizaciones del sistema, antena, receptor y firmware (Ray y Senior, 2003; Herrada *et al.*, 2010; Vázquez *et al.*, 2013) ya sea individual o en conjunto.

Por otro lado, el caso de las estaciones MPR1, MSD1 y MTP1, presentan la mayor cantidad de efecto multitrayectoria de hasta 1 m, sin presentar actualizaciones desde su instalación. No obstante, los parámetros de SNR, Integridad y CSR se apegan a los estándares internacionales.

Particularmente, las estaciones que presentan actualizaciones, muestran un mejor desempeño en la recepción de la señal, sin embargo, aún están sujetas a un grado de efecto multitrayectoria a pesar de la cuidadosa selección de localización y uso de antenas tipo

Chock Ring y Trimble Zephyr Geodetic, diseñadas para mitigar el efecto multitrayectoria (Krantz *et al.*, 2001; Smyrniaios *et al.*, 2013; Vázquez *et al.*, 2012, 2013).

Con base en los estándares internacionales propuestos por el IGS y los valores promedios obtenidos por cada una de las estaciones, en el periodo analizado, ninguna de las 65 estaciones cumple con los cuatro indicadores de calidad (MP, SNR, CSR, Integridad), sin embargo, sólo 6 estaciones concretan 5 de las 6 variables posibles. En este sentido y considerando el promedio global de variables cumplidas, las estaciones han demostrado estabilidad y continuidad en los datos obtenidos respecto de los parámetros de calidad estudiados, cumpliendo además con 3.3 de las 6 variables evaluadas acorde con el estándar del IGS para formar parte de su red. Así mismo, considerando el efecto multitrayectoria como el principal degradador de la señal y del posicionamiento preciso, la estación INEG es la que mejor rendimiento ha presentado, mostrando bajos niveles de efecto multitrayectoria y cumpliendo todos los estándares de calidad excepto la cantidad de saltos de ciclo por cada 1000 observaciones. En este sentido las estaciones MEXI, MTY2, OAX2 Y TOL2 cumplen los mismos indicadores de calidad que la estación INEG en los 10.07 años evaluados y todas ellas podrían ser consideradas para formar parte de la red IGS. No obstante, su inclusión queda sujeta a las normas y políticas de dicho organismo.

Por otra parte, se muestra que el efecto multitrayectoria se presenta en mayor cantidad en aquellas estaciones en las que no se han realizado cambios en su sistema (antena-receptor-firmware), degradando generalmente la recepción de la señal en la banda L<sub>2</sub>, es decir, una relación señal-ruido (SNR<sub>2</sub>) con señales débiles. Caso contrario de las estaciones en las que si se realizaron cambios y actualizaciones, las cuales reflejan un mejor desempeño. Sin embargo, se requiere de un análisis más profundo para determinar si todas las actualizaciones implican mejoras significativas para los índices de calidad, dado que en casos como MEXI se muestra una inversión en la relación señal-ruido.

Respecto a las series temporales de las soluciones diarias de posicionamiento como las velocidades de las estaciones evaluadas, muestran gran consistencia en comparación con las que el Laboratorio Geodésico de Nevada<sup>4</sup> proporciona (Blewitt *et al.*, 2018), posterior a

---

<sup>4</sup> [http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap\\_MAG.html](http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap_MAG.html)

la introducción de modelos, obteniendo errores de  $\pm 0.17$  mm/año en la estimación de las respectivas velocidades y errores medios cuadráticos menores a 5.33 mm en las componentes horizontales.

Con base en el análisis del impacto en el posicionamiento preciso de la estación de menor y mayor efecto multitrayectoria (INEG y MPR1) evaluado con las soluciones diarias superiores a los 9 años respecto de sus desviaciones estandar, muestran en las componentes E y N valores menores a 3.5 mm y para la componente Vertical (altura) menores a 1.03 cm. En este sentido, ambas estaciones cumplen con la normatividad vigente en México para el establecimiento de un sistema geodésico teniendo valor de CEP 95 menores a 5 cm (aproximado a 1 cm en ambas estaciones), respecto al EPV el valor se aproxima a 2 cm considerando sólo la altura elipsoidal, dado que la introducción del modelo geoidal GGM10 degrada la exactitud posicional, superior a los 39 cm. De este modo, la cantidad de efecto multitrayectoria no refleja degradación significativa en sesiones prolongadas con efecto multitrayectoria de hasta 1 m, sin embargo, los valores de CEP y EPV para la estación INEG, muestran un mejor desempeño respecto a MPR1, por lo que la exactitud posicional sigue siendo mejor en la estación con menor efecto multitrayectoria, sin embargo las diferencias no son significativas siendo de 2.5 mm para la componente vertical y menores a 0.6 mm en las componentes horizontales. En relación con las 65 estaciones, la cantidad de variables ajustadas no muestran una relación directamente proporcional entre exactitud posicional y estándares de calidad ajustados a IGS, sin embargo, la estación TNMT al cumplir sólo con una variable, sí muestra una menor exactitud posicional, no obstante, las 65 estaciones son aptas para el establecimiento de un sistema geodésico nacional de acuerdo con normatividad vigente en México.

Finalmente, todas las estaciones analizadas, a excepción de IAGX, TNTM, TNCT y TNMT, cumplen con un tiempo de operación mayor al recomendado de 2.5 años, con las cuales sería factible un análisis geodinámico del territorio mexicano, evitando así, sesgos en la estimación de las velocidades.

## Trabajo futuro

Derivado de los resultados obtenidos se plantean las siguientes experimentaciones como trabajo futuro:

- Incorporar al análisis de calidad estaciones gubernamentales.
- Realizar el análisis de calidad de estaciones GNSS con software ANUBIS el cual permite analizar más de una constelación y versiones de RINEX.
- Anexar a la experimentación estaciones de reciente establecimiento de libre acceso.
- Desarrollar una interfaz gráfica para generar el análisis de calidad con base a normativa de IGS e INEGI considerando soluciones diarias.
- Análisis del impacto en el posicionamiento preciso considerando otra técnica de posicionamiento mediante Posicionamiento Puntual Preciso (PPP).
- Análisis geodinámico con las estaciones que superan el valor de 2.5 años operacionales para México.

## Productos generados

European Scientific Journal, ESJ  
November 2020 edition Vol.16, No.33

ISSN: 1857-7881 (Print) e - ISSN 1857-7431



ESJ Natural/Life/Medical Sciences

**Daniel Hernández-Andrade,**  
Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería  
Topográfica y Geodésica, Benemérita Universidad  
Autónoma de Puebla.

**Rosendo Romero-Andrade,**

**Juan L. Cabanillas-Zavala,**  
Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio,  
Posgrado en Ciencias de la Información,  
Universidad Autónoma de Sinaloa

**Máximo Ávila-Cruz,**  
Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería  
Topográfica y Geodésica, Benemérita Universidad  
Autónoma de Puebla.

**Manuel E. Trejo-Soto,**

**Alejandro Vega-Ayala,**  
Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio,  
Posgrado en Ciencias de la Información,  
Universidad Autónoma de Sinaloa

Submitted: 08 October 2020

Accepted: 02 November 2020

Published: 30 November 2020

Corresponding author:

*Daniel Hernández-Andrade*

DOI: [10.19044/esj.2020.v16n33p332](https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p332)

© Copyright 2020 Andrade et al.  
Distributed under Creative Commons  
BY-NC-ND 4.0 OPEN ACCESS

Cite as:

Hernández-Andrade D, Andrade R, Zavala J, Ávila-Cruz M, Trejo-Soto M, 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), 332. <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p332>

## Análisis de calidad de las observaciones GPS en estaciones de operación continua de libre acceso en México

### Resumen:

Se realizó la evaluación estadística-comparativa de 65 estaciones de operación continua de libre acceso en México, de enero de 2010 a enero de 2020. El análisis de calidad de las observaciones GPS se llevó a cabo mediante el software TEQC, desarrollado por UNAVCO, considerando cuatro indicadores de calidad en 6 variables: efecto multitrayectoria en la banda L1 y L2, relación señal-ruido en L1 y L2, saltos de ciclo por cada mil observaciones y porcentaje de observaciones registradas/esperadas. El resultado de cada estación se comparó con el estándar de calidad establecido por el IGS para pertenecer a su red, con la finalidad de determinar la calidad de las mismas y el grado de cumplimiento de dicho estándar. Los resultados muestran, en promedio, un grado de cumplimiento de 3.3 de las 6 variables, donde: 6 estaciones cumplen con 5 de las 6 variables; 16 estaciones con 4; 35 con 3; 6 con 2 y 2 con una variable, siendo la estación INEG la de mejor calidad excepto en los saltos de ciclo por cada mil observaciones. Así mismo, se muestra que el efecto multitrayectoria se presenta en mayor cantidad en aquellas estaciones en las que no se realizó cambio de antena, receptor o actualización de firmware, degradando principalmente la recepción de la señal en la banda L2.

**Subject:** Earth Sciences, Geography, Physics, Technology

**Palabras clave:** Control de calidad, GPS, efecto multitrayectoria, relación señal-ruido, saltos de ciclo, México.

## **Análisis Comparativo Del Posicionamiento GNSS Utilizando Receptor De Bajo Costo U-Blox De Doble Frecuencia Para Aplicaciones Topógrafo-Geodésicas**

***Rosendo Romero-Andrade,***

***Juan L. Cabanillas-Zavala,***

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Posgrado en Ciencias de la  
Información, Universidad Autónoma de Sinaloa

***Daniel Hernández-Andrade,***

Facultad de Ingeniería, Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica,  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

***Manuel E. Trejo-Soto,***

***Sergio A. Monjardin-Armenta,***

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Posgrado en Ciencias de la  
Información, Universidad Autónoma de Sinaloa

Doi:10.19044/esj.2020.v16n27p289 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n27p289](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n27p289)

---

### **Resumen**

Se evaluó y comparó estadísticamente el posicionamiento obtenido a través del receptor de bajo costo U-blox ZED-F9P de nueva generación con un receptor geodésico, realizando observaciones GNSS sobre un vértice geodésico mediante del método de Posicionamiento Puntual Preciso y relativo estático, con una distancia de 33 km a la estación de referencia. Esto, con la finalidad de probar la factibilidad de utilizar receptores de bajo costo de gama similares en trabajos topográficos-geodésicos. Para ello, se consideran cuatro escenarios; en el primer escenario, se aplicó la técnica relativo estático con el equipo de bajo costo, en el segundo escenario se procesó con un receptor geodésico en modo relativo estático; ambos mediante un software comercial. Para el tercer y cuarto escenario, se procesó modo Posicionamiento Puntual Preciso con el software RTKLIB. Los resultados muestran que para la técnica Posicionamiento Puntal Preciso la precisión lograda de 1 cm por el equipo de bajo costo es apta para realizar trabajos geodésicos. En el método relativo estático, la precisión lograda de 7 mm indica que es posible utilizar el equipo de bajo costo para trabajos topógrafos-geodésicos de alta precisión considerando una línea base  $\leq 33$  km, esto, según la normatividad del Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

## ANEXOS

Tabla A1. Estadística del análisis de calidad de las 65 estaciones GPS de operación continua seleccionadas en México.

| Estación | Días | MP1 (m) |      |          |          | MP2 (m) |      |          |          | SNR1 (Indicador) |      |          |          | SNR2 (Indicador) |      |          |          | CSR   |      |          |          | INTEGRIDAD (%) |     |          |          |
|----------|------|---------|------|----------|----------|---------|------|----------|----------|------------------|------|----------|----------|------------------|------|----------|----------|-------|------|----------|----------|----------------|-----|----------|----------|
|          |      | Max     | Min  | Promedio | $\sigma$ | Max     | Min  | Promedio | $\sigma$ | Max              | Min  | Promedio | $\sigma$ | Max              | Min  | Promedio | $\sigma$ | Max   | Min  | Promedio | $\sigma$ | Max            | Min | Promedio | $\sigma$ |
| MPR1     | 3600 | 1.29    | 0.63 | 1.00     | 0.04     | 1.18    | 0.43 | 0.94     | 0.04     | 8.01             | 7.55 | 7.79     | 0.82     | 7.59             | 6.82 | 7.06     | 0.91     | 62.5  | 0.04 | 0.13     | 1.37     | 100            | 2   | 98.46    | 7.94     |
| MTP1     | 3218 | 1.2     | 0.39 | 0.98     | 0.05     | 1.23    | 0.23 | 0.86     | 0.05     | 8.22             | 7.68 | 7.89     | 0.15     | 7.54             | 6.86 | 7.05     | 0.16     | 8.85  | 0.04 | 0.14     | 0.39     | 100            | 1   | 98.28    | 8.35     |
| MSD1     | 3488 | 1.29    | 0.43 | 0.94     | 0.05     | 1.42    | 0.38 | 0.87     | 0.08     | 8.1              | 6.96 | 7.81     | 0.31     | 7.57             | 6.78 | 7.06     | 0.14     | 62.5  | 0.04 | 0.14     | 1.46     | 100            | 3   | 98.43    | 7.73     |
| TNMT     | 825  | 1.11    | 0.80 | 0.92     | 0.04     | 0.63    | 0.47 | 0.55     | 0.03     | 7.17             | 6.95 | 7.01     | 0.04     | 6.04             | 4.67 | 4.86     | 0.38     | 4.35  | 0.22 | 1.70     | 0.51     | 86             | 73  | 77.45    | 1.07     |
| MMD1     | 3632 | 0.93    | 0.44 | 0.79     | 0.03     | 1.01    | 0.37 | 0.71     | 0.03     | 8.12             | 7.63 | 7.90     | 0.14     | 7.48             | 6.78 | 7.02     | 0.14     | 50    | 0.04 | 0.08     | 0.87     | 100            | 2   | 98.44    | 8.01     |
| YESX     | 2200 | 0.95    | 0.35 | 0.72     | 0.15     | 0.66    | 0.34 | 0.52     | 0.07     | 7.27             | 7.03 | 7.16     | 0.06     | 6.14             | 4.76 | 5.01     | 0.23     | 4.26  | 0.04 | 0.23     | 0.18     | 100            | 96  | 99.39    | 0.62     |
| UTON     | 2490 | 1.68    | 0.33 | 0.68     | 0.2      | 1.23    | 0.30 | 0.51     | 0.12     | 7.09             | 5.28 | 6.90     | 0.18     | 6.11             | 4.31 | 4.66     | 0.14     | 11.24 | 0.19 | 1.95     | 1.61     | 99             | 64  | 96.43    | 1.42     |
| TNMR     | 1281 | 1.08    | 0.52 | 0.66     | 0.07     | 0.81    | 0.41 | 0.49     | 0.05     | 7.91             | 7.03 | 7.38     | 0.29     | 6.55             | 4.66 | 5.52     | 0.77     | 12.82 | 0.04 | 2.38     | 2.23     | 100            | 42  | 95.50    | 2.59     |
| TNCU     | 2014 | 0.91    | 0.54 | 0.65     | 0.05     | 0.58    | 0.32 | 0.42     | 0.05     | 7.3              | 7.09 | 7.21     | 0.05     | 6.29             | 4.93 | 5.13     | 0.19     | 5.99  | 0.04 | 0.08     | 0.17     | 100            | 93  | 99.86    | 0.54     |
| TNGF     | 1377 | 1.03    | 0.56 | 0.64     | 0.08     | 0.83    | 0.43 | 0.49     | 0.05     | 7.41             | 6.84 | 7.01     | 0.17     | 6.74             | 5.62 | 6.20     | 0.27     | 3.25  | 0.04 | 0.41     | 0.21     | 100            | 58  | 98.85    | 1.22     |
| PENA     | 3330 | 3.42    | 0.27 | 0.64     | 0.48     | 3.77    | 0.48 | 0.75     | 0.42     | 7.12             | 6.82 | 6.94     | 0.06     | 5.84             | 2.00 | 4.55     | 0.69     | 83.33 | 0.09 | 5.28     | 16.96    | 100            | 6   | 91.82    | 23.38    |
| TNPJ     | 1139 | 1.21    | 0.52 | 0.61     | 0.06     | 1.16    | 0.38 | 0.45     | 0.05     | 7.71             | 6.95 | 7.18     | 0.24     | 6.06             | 4.74 | 4.96     | 0.09     | 9.01  | 0.38 | 1.24     | 0.94     | 99             | 72  | 95.61    | 1.52     |
| MMX1     | 3627 | 0.77    | 0.41 | 0.59     | 0.02     | 0.94    | 0.34 | 0.60     | 0.03     | 8.15             | 7.65 | 7.89     | 0.14     | 7.53             | 6.09 | 7.06     | 0.15     | 62.5  | 0.04 | 0.11     | 1.38     | 100            | 3   | 98.60    | 7.26     |
| TECO     | 2499 | 0.89    | 0.30 | 0.58     | 0.18     | 0.57    | 0.39 | 0.45     | 0.02     | 7.05             | 6.82 | 6.95     | 0.06     | 5.55             | 4.29 | 4.63     | 0.1      | 5.75  | 0.12 | 0.63     | 0.37     | 99             | 94  | 98.08    | 0.75     |
| TNMS     | 1947 | 0.84    | 0.49 | 0.58     | 0.03     | 0.81    | 0.30 | 0.42     | 0.04     | 7.23             | 6.97 | 7.07     | 0.05     | 6.13             | 4.77 | 4.93     | 0.25     | 5.65  | 0.27 | 0.76     | 0.32     | 100            | 91  | 98.56    | 0.69     |
| TNAL     | 1242 | 0.83    | 0.42 | 0.57     | 0.07     | 0.74    | 0.40 | 0.52     | 0.04     | 7.26             | 6.82 | 7.03     | 0.08     | 5.14             | 4.28 | 4.74     | 0.21     | 6.45  | 0.04 | 0.52     | 0.44     | 100            | 31  | 98.46    | 2.89     |
| TNCY     | 1355 | 0.93    | 0.43 | 0.55     | 0.05     | 0.78    | 0.24 | 0.41     | 0.04     | 7.21             | 6.64 | 6.98     | 0.05     | 6.03             | 4.28 | 4.79     | 0.24     | 71.43 | 0.04 | 0.68     | 2.98     | 97             | 1   | 92.50    | 14.3     |
| TNSJ     | 1410 | 0.76    | 0.42 | 0.53     | 0.02     | 0.7     | 0.25 | 0.37     | 0.06     | 7.23             | 7.03 | 7.14     | 0.04     | 6.2              | 4.88 | 5.06     | 0.28     | 3.46  | 0.04 | 0.29     | 0.23     | 99             | 86  | 97.61    | 1.00     |
| TNNX     | 1882 | 1.17    | 0.45 | 0.53     | 0.04     | 0.71    | 0.20 | 0.32     | 0.06     | 7.24             | 7.01 | 7.13     | 0.06     | 6.2              | 4.83 | 5.03     | 0.25     | 9.09  | 0.04 | 0.16     | 0.51     | 100            | 95  | 99.86    | 0.48     |
| OXPE     | 3081 | 0.88    | 0.3  | 0.52     | 0.09     | 0.72    | 0.35 | 0.48     | 0.04     | 7.13             | 6.62 | 6.84     | 0.08     | 5.5              | 4.05 | 4.53     | 0.07     | 29.41 | 0.08 | 2.01     | 1.90     | 100            | 48  | 97.12    | 2.67     |
| TNNP     | 1513 | 1.37    | 0.45 | 0.52     | 0.04     | 0.98    | 0.27 | 0.38     | 0.04     | 7.1              | 6.91 | 7.01     | 0.04     | 6.07             | 4.59 | 4.86     | 0.29     | 9.35  | 0.04 | 0.18     | 0.31     | 99             | 94  | 98.60    | 0.67     |
| TNTM     | 752  | 0.65    | 0.46 | 0.51     | 0.03     | 0.52    | 0.30 | 0.40     | 0.05     | 6.99             | 6.8  | 6.87     | 0.04     | 5.83             | 4.33 | 4.56     | 0.44     | 0.76  | 0.04 | 0.08     | 0.07     | 100            | 96  | 99.34    | 0.61     |

**Tabla A1.** Continuación, estadística del análisis de calidad de las 65 estaciones GPS de operación continua seleccionadas en México.

| Estación | Días | MP1 (m) |      |          |          | MP2 (m) |      |          |          | SNR1 (Indicador) |      |          |          | SNR2 (Indicador) |      |          |          | CSR   |      |          |          | INTEGRIDAD (%) |     |          |          |
|----------|------|---------|------|----------|----------|---------|------|----------|----------|------------------|------|----------|----------|------------------|------|----------|----------|-------|------|----------|----------|----------------|-----|----------|----------|
|          |      | Max     | Min  | Promedio | $\sigma$ | Max     | Min  | Promedio | $\sigma$ | Max              | Min  | Promedio | $\sigma$ | Max              | Min  | Promedio | $\sigma$ | Max   | Min  | Promedio | $\sigma$ | Max            | Min | Promedio | $\sigma$ |
| PHJX     | 3006 | 0.55    | 0.44 | 0.50     | 0.01     | 0.48    | 0.38 | 0.42     | 0.01     | 7.21             | 6.97 | 7.11     | 0.05     | 5.8              | 4.56 | 4.82     | 0.11     | 1.38  | 0.04 | 0.06     | 0.06     | 100            | 95  | 99.00    | 0.38     |
| USMX     | 2117 | 0.65    | 0.45 | 0.50     | 0.02     | 0.61    | 0.24 | 0.35     | 0.07     | 7.92             | 7.1  | 7.24     | 0.15     | 6.88             | 4.96 | 5.24     | 0.43     | 5.71  | 0.04 | 0.13     | 0.4      | 98             | 92  | 97.71    | 0.73     |
| OXUM     | 2067 | 0.69    | 0.31 | 0.49     | 0.07     | 0.56    | 0.31 | 0.41     | 0.04     | 7.29             | 6.83 | 7.00     | 0.03     | 5.63             | 4.33 | 4.67     | 0.09     | 11.49 | 0.04 | 0.38     | 0.96     | 100            | 63  | 98.73    | 5.49     |
| TNCN     | 1385 | 0.77    | 0.41 | 0.49     | 0.04     | 0.59    | 0.24 | 0.38     | 0.05     | 7.11             | 6.88 | 7.01     | 0.04     | 5.68             | 4.51 | 4.73     | 0.07     | 4.9   | 0.04 | 0.43     | 0.31     | 100            | 91  | 99.73    | 0.65     |
| TNLC     | 1550 | 0.6     | 0.44 | 0.49     | 0.02     | 0.5     | 0.26 | 0.37     | 0.04     | 7.09             | 6.81 | 7.00     | 0.05     | 6.08             | 4.56 | 4.82     | 0.29     | 5.03  | 0.04 | 0.21     | 0.27     | 100            | 96  | 99.44    | 0.64     |
| TNIF     | 1469 | 0.63    | 0.37 | 0.47     | 0.02     | 0.55    | 0.26 | 0.38     | 0.05     | 7.19             | 6.93 | 7.03     | 0.05     | 6.06             | 4.65 | 4.85     | 0.29     | 4.31  | 0.04 | 0.18     | 0.26     | 100            | 2   | 98.74    | 8.43     |
| TNCM     | 1867 | 1.15    | 0.42 | 0.47     | 0.03     | 1.03    | 0.25 | 0.37     | 0.03     | 7.24             | 6.95 | 7.06     | 0.05     | 6.18             | 4.78 | 4.95     | 0.17     | 8     | 0.04 | 0.20     | 0.41     | 100            | 73  | 99.86    | 0.86     |
| TNMH     | 2016 | 0.75    | 0.44 | 0.46     | 0.01     | 0.73    | 0.23 | 0.33     | 0.05     | 7.17             | 6.96 | 7.08     | 0.05     | 6.24             | 4.77 | 4.99     | 0.25     | 3.75  | 0.04 | 0.07     | 0.11     | 100            | 96  | 99.88    | 0.44     |
| TNCT     | 801  | 0.58    | 0.40 | 0.45     | 0.02     | 0.6     | 0.26 | 0.36     | 0.04     | 7.03             | 6.80 | 6.94     | 0.06     | 5.44             | 4.32 | 4.52     | 0.09     | 2.54  | 0.04 | 0.07     | 0.12     | 100            | 43  | 99.74    | 2.89     |
| TNMQ     | 1333 | 0.96    | 0.38 | 0.45     | 0.04     | 1.01    | 0.16 | 0.34     | 0.05     | 7.4              | 6.70 | 7.09     | 0.06     | 6.15             | 4.33 | 4.96     | 0.24     | 25.64 | 0.04 | 0.13     | 0.81     | 100            | 0   | 96.43    | 15.88    |
| OXTH     | 3043 | 0.58    | 0.22 | 0.44     | 0.05     | 0.46    | 0.15 | 0.36     | 0.03     | 7.22             | 6.74 | 6.95     | 0.06     | 5.98             | 4.36 | 4.97     | 0.55     | 38.46 | 0.04 | 0.39     | 1.52     | 100            | 66  | 99.67    | 1.6      |
| TNAT     | 1807 | 0.94    | 0.4  | 0.44     | 0.02     | 0.99    | 0.23 | 0.34     | 0.05     | 7.18             | 6.95 | 7.08     | 0.06     | 5.89             | 4.73 | 4.93     | 0.1      | 8.77  | 0.04 | 0.19     | 0.48     | 100            | 96  | 99.79    | 0.61     |
| TNCC     | 1236 | 0.59    | 0.38 | 0.44     | 0.03     | 0.46    | 0.22 | 0.33     | 0.05     | 7.15             | 6.96 | 7.05     | 0.05     | 6.18             | 4.80 | 5.00     | 0.31     | 4.83  | 0.04 | 0.19     | 0.34     | 100            | 93  | 97.78    | 0.58     |
| TNAM     | 1847 | 1.01    | 0.40 | 0.44     | 0.03     | 0.95    | 0.23 | 0.32     | 0.05     | 7.14             | 6.94 | 7.05     | 0.05     | 6.17             | 4.73 | 4.93     | 0.26     | 7.46  | 0.04 | 0.13     | 0.45     | 100            | 79  | 99.84    | 0.69     |
| TNPP     | 1806 | 0.6     | 0.40 | 0.44     | 0.02     | 0.49    | 0.20 | 0.32     | 0.06     | 7.2              | 7.00 | 7.12     | 0.05     | 5.9              | 4.80 | 4.96     | 0.08     | 0.77  | 0.04 | 0.06     | 0.05     | 99             | 96  | 98.94    | 0.28     |
| UXAL     | 2956 | 0.64    | 0.24 | 0.43     | 0.07     | 0.63    | 0.37 | 0.46     | 0.05     | 7.22             | 6.74 | 7.02     | 0.05     | 5.71             | 4.49 | 4.73     | 0.06     | 9.09  | 0.12 | 0.69     | 0.63     | 100            | 0   | 99.41    | 3.63     |
| GUAX     | 1314 | 0.54    | 0.39 | 0.43     | 0.02     | 0.48    | 0.21 | 0.37     | 0.04     | 7.18             | 6.97 | 7.07     | 0.06     | 6.14             | 4.76 | 5.07     | 0.44     | 1.75  | 0.04 | 0.11     | 0.11     | 100            | 97  | 99.91    | 0.35     |
| UAGU     | 2575 | 0.48    | 0.29 | 0.42     | 0.07     | 0.48    | 0.35 | 0.39     | 0.03     | 7.17             | 6.92 | 7.06     | 0.05     | 5.72             | 4.57 | 4.79     | 0.07     | 4.33  | 0.04 | 0.17     | 0.2      | 100            | 54  | 98.76    | 5.86     |
| TNTB     | 1169 | 0.48    | 0.35 | 0.42     | 0.01     | 0.43    | 0.25 | 0.36     | 0.03     | 7.15             | 6.94 | 7.05     | 0.05     | 5.78             | 4.75 | 4.87     | 0.08     | 0.65  | 0.04 | 0.06     | 0.05     | 100            | 97  | 99.89    | 0.4      |
| UCOE     | 3460 | 0.67    | 0.25 | 0.41     | 0.09     | 0.73    | 0.26 | 0.35     | 0.04     | 7.24             | 6.77 | 6.97     | 0.09     | 5.58             | 4.45 | 4.64     | 0.09     | 8.06  | 0.04 | 0.12     | 0.34     | 100            | 27  | 99.84    | 1.75     |
| TNBA     | 1881 | 0.62    | 0.39 | 0.41     | 0.01     | 0.45    | 0.23 | 0.33     | 0.04     | 7.17             | 6.94 | 7.07     | 0.05     | 6.19             | 4.72 | 4.95     | 0.26     | 2.4   | 0.04 | 0.07     | 0.1      | 100            | 96  | 99.9     | 0.39     |
| TNMZ     | 997  | 0.45    | 0.13 | 0.41     | 0.02     | 0.36    | 0.09 | 0.32     | 0.01     | 7.23             | 6.85 | 7.00     | 0.02     | 5.09             | 4.16 | 4.65     | 0.04     | 50    | 0.08 | 0.48     | 2.27     | 100            | 0   | 99.57    | 5.37     |

**Tabla A1.** Continuación, estadística del análisis de calidad de las 65 estaciones GPS de operación continua seleccionadas en México.

| Estación | Días | MP1 (m) |      |          |          | MP2 (m) |      |          |          | SNR1 (Indicador) |      |          |          | SNR2 (Indicador) |      |          |          | CSR   |      |          |          | INTEGRIDAD (%) |     |          |          |
|----------|------|---------|------|----------|----------|---------|------|----------|----------|------------------|------|----------|----------|------------------|------|----------|----------|-------|------|----------|----------|----------------|-----|----------|----------|
|          |      | Max     | Min  | Promedio | $\sigma$ | Max     | Min  | Promedio | $\sigma$ | Max              | Min  | Promedio | $\sigma$ | Max              | Min  | Promedio | $\sigma$ | Max   | Min  | Promedio | $\sigma$ | Max            | Min | Promedio | $\sigma$ |
| UGEO     | 1958 | 0.45    | 0.22 | 0.4      | 0.02     | 0.51    | 0.24 | 0.43     | 0.02     | 7.29             | 6.83 | 7.05     | 0.08     | 5.55             | 4.56 | 4.83     | 0.18     | 8.62  | 0.04 | 1.04     | 0.54     | 98             | 71  | 95.93    | 1.34     |
| UNPM     | 3661 | 0.63    | 0.26 | 0.39     | 0.1      | 0.67    | 0.29 | 0.38     | 0.04     | 7.16             | 6.89 | 7.02     | 0.04     | 5.44             | 4.34 | 4.62     | 0.16     | 3.75  | 0.04 | 0.13     | 0.18     | 100            | 71  | 99.61    | 1.06     |
| IAGX     | 685  | 0.51    | 0.35 | 0.39     | 0.03     | 0.52    | 0.3  | 0.32     | 0.02     | 7.15             | 6.94 | 7.00     | 0.03     | 5.9              | 4.85 | 4.95     | 0.08     | 0.47  | 0.04 | 0.08     | 0.07     | 100            | 98  | 99.93    | 0.29     |
| PTEX     | 3191 | 0.43    | 0.35 | 0.39     | 0.01     | 0.36    | 0.28 | 0.32     | 0.01     | 7.35             | 7.14 | 7.27     | 0.05     | 6.37             | 5.22 | 5.38     | 0.07     | 1.77  | 0.04 | 0.1      | 0.09     | 98             | 94  | 97.06    | 0.43     |
| PLTX     | 3370 | 0.41    | 0.35 | 0.38     | 0.01     | 0.35    | 0.27 | 0.29     | 0.01     | 7.36             | 7.09 | 7.24     | 0.05     | 6.37             | 5.22 | 5.4      | 0.08     | 3.19  | 0.04 | 0.07     | 0.1      | 99             | 96  | 98.82    | 0.42     |
| TNMO     | 3495 | 0.4     | 0.32 | 0.34     | 0.01     | 0.44    | 0.31 | 0.36     | 0.03     | 7.17             | 6.92 | 7.04     | 0.05     | 5.61             | 4.54 | 4.71     | 0.07     | 2.39  | 0.04 | 0.22     | 0.16     | 100            | 93  | 99.83    | 0.42     |
| PSTX     | 3067 | 0.43    | 0.30 | 0.34     | 0.01     | 0.38    | 0.23 | 0.26     | 0.01     | 7.33             | 7.08 | 7.23     | 0.05     | 6.31             | 5.04 | 5.34     | 0.07     | 4.78  | 0.04 | 0.07     | 0.13     | 100            | 37  | 99.86    | 2.04     |
| PALX     | 3428 | 0.35    | 0.29 | 0.32     | 0.01     | 0.3     | 0.24 | 0.27     | 0.01     | 7.43             | 7.08 | 7.23     | 0.04     | 6.4              | 5.24 | 5.38     | 0.07     | 2.89  | 0.04 | 0.14     | 0.12     | 99             | 88  | 97.68    | 0.66     |
| PJZX     | 3057 | 0.33    | 0.09 | 0.30     | 0.01     | 0.32    | 0.09 | 0.26     | 0.01     | 7.77             | 7.08 | 7.24     | 0.05     | 6.62             | 5.17 | 5.35     | 0.07     | 76.92 | 0.04 | 0.22     | 1.66     | 100            | 48  | 99.43    | 3.78     |
| IPAZ     | 2593 | 0.43    | 0.09 | 0.29     | 0.1      | 0.57    | 0.22 | 0.40     | 0.07     | 7.92             | 5.7  | 6.81     | 1.03     | 7.27             | 5.85 | 6.74     | 0.39     | 19.61 | 0.04 | 1.08     | 1.16     | 100            | 82  | 99.75    | 0.91     |
| TAMP     | 2581 | 0.46    | 0.09 | 0.28     | 0.1      | 0.51    | 0.17 | 0.36     | 0.05     | 7.93             | 5.65 | 6.81     | 0.99     | 7.33             | 6.09 | 6.67     | 0.46     | 25.64 | 0.04 | 3.59     | 3.63     | 101            | 0   | 98.93    | 6.49     |
| CHET     | 3624 | 0.5     | 0.10 | 0.24     | 0.1      | 0.59    | 0.22 | 0.34     | 0.06     | 8.05             | 2.84 | 6.48     | 1.11     | 7.39             | 6.01 | 6.79     | 0.47     | 20    | 0.04 | 4.93     | 3.63     | 101            | 65  | 98.85    | 4.4      |
| ICAM     | 2590 | 0.44    | 0.08 | 0.24     | 0.09     | 0.50    | 0.18 | 0.32     | 0.04     | 8.04             | 5.72 | 6.83     | 1.00     | 7.50             | 5.89 | 6.70     | 0.43     | 11.49 | 0.04 | 3.8      | 3.73     | 100            | 81  | 99.62    | 1.48     |
| PLPX     | 3373 | 0.34    | 0.16 | 0.24     | 0.01     | 0.73    | 0.17 | 0.23     | 0.05     | 7.35             | 6.98 | 7.16     | 0.07     | 6.23             | 3.00 | 5.20     | 0.13     | 250   | 0.04 | 0.39     | 5.49     | 100            | 0   | 94.26    | 20.86    |
| MERI     | 3606 | 0.43    | 0.08 | 0.22     | 0.1      | 0.48    | 0.19 | 0.32     | 0.05     | 7.93             | 5.64 | 6.56     | 0.96     | 7.80             | 5.80 | 6.84     | 0.49     | 9.01  | 0.04 | 4.85     | 3.4      | 100            | 50  | 98.42    | 2.53     |
| TOL2     | 3566 | 0.35    | 0.07 | 0.20     | 0.06     | 0.58    | 0.17 | 0.29     | 0.05     | 8.09             | 4.87 | 6.56     | 0.97     | 7.27             | 6.13 | 6.71     | 0.33     | 14.29 | 0.04 | 1.10     | 1.26     | 100            | 67  | 98.56    | 3.55     |
| MYT2     | 3586 | 6.11    | 0.07 | 0.19     | 0.25     | 6.32    | 0.14 | 0.27     | 0.26     | 7.93             | 5.14 | 6.51     | 0.83     | 7.36             | 2.24 | 6.85     | 0.49     | 500   | 0.04 | 5.81     | 23.63    | 100            | 24  | 99.63    | 3.57     |
| OAX2     | 3630 | 0.35    | 0.08 | 0.19     | 0.05     | 0.56    | 0.13 | 0.27     | 0.06     | 7.99             | 5.54 | 6.54     | 1.02     | 7.35             | 6.24 | 6.82     | 0.36     | 20.41 | 0.04 | 5.05     | 3.72     | 100            | 49  | 99.08    | 2.45     |
| COL2     | 3637 | 0.36    | 0.12 | 0.18     | 0.04     | 0.65    | 0.14 | 0.36     | 0.13     | 7.91             | 5.48 | 6.46     | 0.99     | 7.22             | 6.05 | 6.73     | 0.38     | 12.2  | 0.04 | 4.97     | 3.68     | 100            | 26  | 99.24    | 2.55     |
| MEXI     | 3591 | 0.57    | 0.08 | 0.18     | 0.03     | 0.53    | 0.12 | 0.29     | 0.07     | 7.91             | 5.66 | 6.6      | 0.89     | 7.36             | 5.71 | 6.74     | 0.53     | 23.81 | 0.04 | 2.04     | 2.1      | 100            | 0   | 99.55    | 2.98     |
| INEG     | 3430 | 0.34    | 0.04 | 0.14     | 0.03     | 0.47    | 0.05 | 0.19     | 0.04     | 8.97             | 5.42 | 6.6      | 0.97     | 7.81             | 6.35 | 7.13     | 0.5      | 17.54 | 0.04 | 4.42     | 3.49     | 101            | 1   | 99.25    | 4.02     |

## REFERENCIAS

- Álvarez, G. D. A. (2008). GNSS — Global Navigation Satellite Systems. *GNSS — Global Navigation Satellite Systems*. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1>
- Álvarez Pacheco, J. G. (2019). *Analizar los efectos de la tropósfera sobre la señal de gps y el impacto en la precisión en el posicionamiento de un receptor*. (Master's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- Anderson, G., Hodgkinson, K., Herring, T., y Agnew, D. C. (2006). *Plate Boundary Observatory Data Management System Critical Design Review Version 1.2*. March, 1–122.
- Bernal-López, L. A., Garibaldi, B. R., Soto, G. L., Valenzuela, R. W., y Escudero, C. R. (2017). Seismic Anisotropy and Mantle Flow Driven by the Cocos Slab Under Southern Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 173, 161–181. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1214-7>
- Beutler, G. (2004). *Revolution in Geodesy and Surveying*. *FIG. May*, 1–19.
- Bilich, A., y Larson, K. M. (2007). Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR). *Radio Science*, 42(6), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2007RS003652>
- Bilich, A., Larson, K. M., y Axelrad, P. (2008). Modeling GPS phase multipath with SNR: Case study from the Salar de Uyuni, Boliva. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(4), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2007JB005194>
- Blewitt, G., Hammond, W., y Kreemer, C. (2018). Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science. *Eos*, 99(September). <https://doi.org/10.1029/2018eo104623>
- Blewitt, G., y Lavallée, D. (2002). Effect of annual signals on geodetic velocity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B7), ETG 9-1-ETG 9-11. <https://doi.org/10.1029/2001jb000570>
- Braasch, M. S. (2001). Performance comparison of multipath mitigating receiver architectures. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 3, 31309–31315. <https://doi.org/10.1109/aero.2001.931361>
- Braun, J. J., Mattioli, G. S., Calais, E., Carlson, D., Dixon, T. H., Jackson, M. E., Kursinski, E. R., Mora-Paez, H., Miller, M. M., Pandya, R., Robertson, R., y Wang, G. (2012). Focused study of interweaving hazards across the Caribbean. *Eos*, 93(9), 89–90. <https://doi.org/10.1029/2012EO090001>
- Brown, N., Kealy, A., Millner, J., y Ramm, P. (2002). Quality Control and Integrity Monitoring of the Victorian GPS Reference Station Network. *Proceedings FIG XXII International Congress*, 1–5. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.202.4321%0Apapers3://publication/uuid/119959C8-FFB6-438E-B6B5-799D15204A27>
- Bruyninx, C., Legrand, J., Fabian, A., y Pottiaux, E. (2019). GNSS metadata and data

- validation in the EUREF Permanent Network. *GPS Solutions*, 23(4), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0880-9>
- Cabanillas-Zavala, Juan L., Romero-Andrade, Rosendo. Mackern Oberti, María V. Camisay María F., María L. Mateo, J. M. S.-H. . (2020). *ESTABLECIMIENTO Y ANÁLISIS DE LA NUEVA RED GEODÉSICA REGJAL PARA EL ESTUDIO GEODINÁMICO DEL BLOQUE DE JALISCO, MÉXICO*. *GEOMAIL*, 1–7. <http://geomailblog.wordpress.com/%0A>
- Cabral-Cano, E., Pérez-Campos, X., Márquez-Azúa, B., Sergeeva, M. A., Salazar-Tlaczani, L., DeMets, C., Adams, D., Galetzka, J., Hodgkinson, K., Feaux, K., Serra, Y. L., Mattioli, G. S., y Miller, M. (2018). TLALOCNet: A continuous GPS-met backbone in Mexico for seismotectonic and atmospheric research. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 373–381. <https://doi.org/10.1785/0220170190>
- Cao, Y., Guan, Y., Li, C., y Hou, H. (2019). Application of GNSS displacement monitoring system in measurement of open sea structure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 304(2). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/2/022064>
- Closas, P., Fernández-Prades, C., y Fernández-Rubio, J. A. (2009). A Bayesian approach to multipath mitigation in GNSS receivers. *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 3(4), 695–706. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2009.2023831>
- CORS. (2020). - *National Geodetic Survey*. <https://geodesy.noaa.gov/CORS/>
- DeMets, C., Gordon, R. G., y Argus, D. F. (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181(1), 1–80. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x>
- Dow, J. M., Neilan, R. E., y Rizos, C. (2009). The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *Journal of Geodesy*, 83(3–4), 191–198. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0300-3>
- EGNSS Service Centre. (2020). *Orbital and Technical Parameters | European GNSS Service Centre*. <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/orbital-and-technical-parameters>
- Estey, L. H., y Meertens, C. M. (1999). TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data. *GPS Solutions*, 3(1), 42–49. <https://doi.org/10.1007/PL00012778>
- Estey, L., y Wier, S. (2014). *TEQC Tutorial: Basics of TEQC use and TEQC Products*. June, 59. [www.unavco.org](http://www.unavco.org)
- European Commission. (2019). *EGNOS Service Definition Document Open Service*. 1–40.
- European Global Navigation Satellite Systems Agency. (2016). *Galileo Initial Service - Open Service - Service Definition Document*. 64. <https://doi.org/10.2769/50543>
- Fernández Jiménez, J. Francisco y Muños Calle, F. J. (2018). *Programación Shell-script en Linux*. [http://trajano.us.es/~fjfj/shell/shellsript.htm#\\_Toc444081191](http://trajano.us.es/~fjfj/shell/shellsript.htm#_Toc444081191)
- Foster, J. (2015). GPS and surveying. *Handbook of Sea-Level Research*, 157–170.

<https://doi.org/10.1002/9781118452547.ch10>

Franco-Patiño, D. M., Seco-Granados, G., y Doyis, F. (2013). Signal quality checks for multipath detection in GNSS. *2013 International Conference on Localization and GNSS, ICL-GNSS 2013*. <https://doi.org/10.1109/ICL-GNSS.2013.6577268>

Franco, S. S. I. (2006). *REDES GPS EN MÉXICO Y SU APLICACIÓN EN LA SISMOTECTÓNICA*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

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), 1–28. <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n24p1>

GPS.gov: *Selective Availability*. (2020). <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/sa/data/>

GPS.gov: *Space Segment*. (2020). <https://www.gps.gov/systems/gps/space/#generations>

Grewal, M. S., Andrews, A. P., y Bartone, C. G. (2020). *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration*. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=ppjDDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP25&dq=Grewal,+M.+S.,+Andrews,+A.+P.,+%26+Bartone,+C.+G.+\(2020\).+Global+navigation+satellite+systems,+inertial+navigation,+and+integration.+John+Wiley+%26+Sons.&ots=rfp1hb4yHh&sig=w0e7P3ih](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=ppjDDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP25&dq=Grewal,+M.+S.,+Andrews,+A.+P.,+%26+Bartone,+C.+G.+(2020).+Global+navigation+satellite+systems,+inertial+navigation,+and+integration.+John+Wiley+%26+Sons.&ots=rfp1hb4yHh&sig=w0e7P3ih)

Gurtner, W., y Estey, L. (2013). *Rinex (The Receiver Independent Exchange Format) Version 3.01*. Available at <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex301.pdf>. June. <http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/rinex301.pdf>

Hatanaka, Y. (2008). A Compression Format and Tools for GNSS Observation Data. *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, 55, 21–30. <http://web1.gsi.go.jp/common/000045517.pdf>

Hegarty, C. J. (2012). GNSS signals - An overview. *2012 IEEE International Frequency Control Symposium, IFCS 2012, Proceedings*, 87–93. <https://doi.org/10.1109/IFCS.2012.6243707>

Hegarty, C. J., y Chatre, E. (2008). This growing civil aviation system is expected to replace a significant number of ground based navigation systems and allow for more efficient use of the world wide airspace. *Proceedings of the IEEE*, 96(12), 1902–1917. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2006090>

Henning, W. (2011). *User Guidelines for Single Base Real Time GNSS Positioning*. April, 131. [https://geodesy.noaa.gov/PUBS\\_LIB/UserGuidelinesForSingleBaseRealTimeGNSSPositioningv.3.1APR2014-1.pdf](https://geodesy.noaa.gov/PUBS_LIB/UserGuidelinesForSingleBaseRealTimeGNSSPositioningv.3.1APR2014-1.pdf)

Herrada, A., Miranda, S., Fuentes, C., Torres Lobato, O., y Pintos, H. (2010). Monitoreo de la calidad de datos GPS continuo: la estacion UNSJ (San Juan, Argentina). *GEOACTA*, 55–62.

Herring, T. (2003). MATLAB Tools for viewing GPS velocities and time series. *GPS*

- Solutions*, 7(3), 194–199. <https://doi.org/10.1007/s10291-003-0068-0>
- Herring, T. A., King, R. W., y McClusky, S. C. (2018). *Introduction to Gamit/Globk. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.*
- Hilla, S., y Cline, M. (2004). Evaluating pseudorange multipath effects at stations in the National CORS Network. *GPS Solutions*, 7(4), 253–267. <https://doi.org/10.1007/s10291-003-0073-3>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle, E. (2008). *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer Science & Business Media.*
- Huerta, E., Mangiaterra, A., y Noguera, G. (2005). GPS. Posicionamiento Satelital. In *URN Editora* (Vol. 1, Issue 9).
- IGS. (2019a). *About the IGS Network and International Terrestrial Reference Frame – IGS.* <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202457218-About-the-IGS-Network-and-International-Terrestrial-Reference-Frame>
- IGS. (2019b). *International gnss service: terms of reference. February*, 1–10.
- IGS. (2015). *Current IGS Site Guidelines – IGS.* <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202011433-Current-IGS-Site-Guidelines>
- INEGI. (2010). *Norma técnica de Estándares de Exactitud Posicional.* 1–12.
- INEGI. (2015). *Guía Metodológica de la Red Geodésica Horizontal.*
- INEGI. (2017). *Red Geodésica Nacional Activa. Especificaciones para el establecimiento de estaciones.*
- Johnston, G., Riddell, A., y Hausler, G. (2017). The International GNSS Service. *Springer Handbooks*, 967–982. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_33)
- Kamatham, Y. (2018). Estimation, analysis and prediction of multipath error for static GNSS applications. *2018 Conference on Signal Processing And Communication Engineering Systems, SPACES 2018, 2018-Janua*, 62–65. <https://doi.org/10.1109/SPACES.2018.8316317>
- Kamatham, Y., Sarma, A., Kumar, A., & Satyanarayana, K. (2013). Spectral analysis and mitigation of GPS multipath error using digital filtering for static applications. *IETE Journal of Research*, 59(2), 156–166. <https://doi.org/10.4103/0377-2063.113036>
- King, M. A., y Watson, C. S. (2010). Long GPS coordinate time series: Multipath and geometry effects. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(4), 1–23. <https://doi.org/10.1029/2009JB006543>
- Krantz, E., Riley, S., Large, P., y Development, P. (2001). The design and performance of the zephyr geodetic antenna. *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS )*, Salt Lake City, UT, 1942-1951.

- Larson, K. M., y Small, E. E. (2016). Estimation of Snow Depth Using L1 GPS Signal-to-Noise Ratio Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(10), 4802–4808. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2508673>
- Legrand, J., Bergeot, N., Bruyninx, C., Wöppelmann, G., Santamaria-Gomez, A., Bouin, M. N., y Altamimi, Z. (2012). Comparison of regional and global GNSS positions, velocities and residual time series. In *Geodesy for Planet Earth*. 95-103. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Leick, A., Rapoport, L., y Tatarnikov, D. (2015). *GPS Satellite Surveying*. John Wiley & Sons.
- Liu, T., Zhang, B., Yuan, Y., y Zhang, X. (2020). On the application of the raw-observation-based PPP to global ionosphere VTEC modeling: an advantage demonstration in the multi-frequency and multi-GNSS context. *Journal of Geodesy*, 94(1). <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01332-z>
- Llerana C.E.S, Suarez T. E, (S/A). Sistemas de navegación para personas no videntes, mediante el uso del sistema de posicionamiento híbrido (GPS & GLONASS). ESPE. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/9975/2/T-ESPEL-ENI-0344-P.pdf>
- Löfgren, J. S., Haas, R., y Scherneck, H. G. (2014). Sea level time series and ocean tide analysis from multipath signals at five GPS sites in different parts of the world. *Journal of Geodynamics*, 80, 66–80. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2014.02.012>
- Luo, X. (2013). *GPS Stochastic Modelling*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34836-5>
- 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*. <https://patents.google.com/patent/US10545243B2/en>
- Mao, M., Wang, L., Zhang, S., Wang, X., y Hu, P. (2017). Correlation analysis among GPS-SNR, precipitation and GPS-PWV. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 437, 97–106. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-4588-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4588-2_9)
- Marquez-Azua, B., y DeMets, C. (2009). Deformation of Mexico from continuous GPS from 1993 to 2008. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(2), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2008GC002278>
- Métivier, L., Rouby, H., Rebischung, P., y Altamimi, Z. (2020). ITRF2014, Earth Figure Changes, and Geocenter Velocity: Implications for GIA and Recent Ice Melting. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2). <https://doi.org/10.1029/2019JB018333>
- México. (2020). *Servicio Sismológico Nacional - Catálogo de sismos | UNAM, México*. <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/#>
- Miller, M. M., Mattioli, G. S., Meertens, C. M., y Charlevoix, D. J. (2017). 2013 – 2018 UNAVCO Project Report Geodesy Advancing Geosciences and EarthScope: GAGE Quarterly Report Y4Q2: 01 January 2017 – 31 March 2017. *2013-2018 UNAVCO Project Report, March*. <https://doi.org/10.1029/2017EO067411>

- Montenbruck, O., Steigenberger, P., Prange, L., Deng, Z., Zhao, Q., Perosanz, F., Romero, I., Noll, C., Stürze, A., Weber, G., Schmid, R., MacLeod, K., y Schaer, S. (2017). The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges. *Advances in Space Research*, 59(7), 1671–1697. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.011>
- Morillo Barragán, J. R. (2013). *Desarrollo y análisis de la precisión de la red de antenas de referencia GNSS (Sistemas globales de navegación por satélite) de Extremadura: Trazabilidad de flotas de transporte hortofrutícola*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=39535&info=resumen&idioma=ENG>
- Murray, J. R., Bartlow, N., Bock, Y., Brooks, B. A., Foster, J., Freymueller, J., Hammond, W. C., Hodgkinson, K., Johanson, I., López-Venegas, A., Mann, D., Mattioli, G. S., Melbourne, T., Mencin, D., Montgomery-Brown, E., Murray, M. H., Smalley, R., y Thomas, V. (2019). Regional Global Navigation Satellite System Networks for Crustal Deformation Monitoring. *Seismological Research Letters*, XX(Xx), 1–21. <https://doi.org/10.1785/0220190113>
- National Geodetic Survey. (2018). Guidelines for New and Existing Continuously Operating Reference Stations ( CORS ) National Geodetic Survey. *October, May*, 1–31.
- Ning, T., y Elgered, G. (2012). Trends in the atmospheric water vapor content from ground-based GPS: The impact of the elevation cutoff angle. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(3), 744–751. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2191392>
- NOAA. (2008). *ETOPO1 Global Relief Model*. <https://doi.org/doi:10.7289/V5C8276M>
- Odolinski, R., Teunissen, P. J. G., y Zhang, B. (2020). Multi-GNSS processing, positioning and applications. *Journal of Spatial Science*, 65(1), 3–5. <https://doi.org/10.1080/14498596.2020.1687170>
- Ostini, L. (2012). *Analysis and Quality Assessment of GNSS-Derived Parameter Time Series*. Universität Bern vorgelegt.
- Peppas, I., Psimoulis, P., y Meng, X. (2018). Using the signal-to-noise ratio of GPS records to detect motion of structures. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(2), 1–17. <https://doi.org/10.1002/stc.2080>
- Ray, J., y Senior, K. (2005). Geodetic techniques for time and frequency comparisons using GPS phase and code measurements. *Metrologia*, 42(4), 215–232. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/42/4/005>
- Remondi BW. (1984): Using the Global Positioning System (GPS) phase observable for relative geodesy: modeling, processing, and results. *University of Texas at Austin, Center for Space Research*.
- Revnivkykh, S., Bolkunov, A., Serdyukov, A., y Montenbruck, O. (2017). Glonass. *Springer Handbooks*, 219–245. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_8)
- Rost, C., y Wanninger, L. (2009). Carrier phase multipath mitigation based on GNSS signal

- quality measurements Christian Rost and Lambert Wanninger. *Journal of Applied Geodesy*, 3(2), 81–87. <https://doi.org/10.1515/JAG.2009.009>
- Seeber, G. (2008). Satellite Geodesy Foundations, Methods, and Applications. In *Journal of the Geodetic Society of Japan* (Vol. 40, Issue 3). <https://doi.org/10.11366/sokuchi1954.40.295>
- SEPLADE. (2006). Atlas de peligros naturales. Aguascalientes. *Secretaría de Desarrollo Social*, 113. <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>
- Smith, M. J., Paron, P., y Griffiths, J. S. (2011). *Geomorphological Mapping: Methods and Applications - Mike J. Smith, Paolo Paron, James S. Griffiths* - Google Libros (15th ed.). Elsevier.
- Smyrniotis, M., Schn, S., y Liso, M. (2013). Multipath Propagation, Characterization and Modeling in GNSS. *IEEE Communications Magazine*, 22(2), 6–15. <https://doi.org/10.1109/MCOM.1984.1091893>
- Sonnet, L., Angelier, J., Villemin, T., y Bergerat, F. (2010). Faulting and fissuring in active oceanic rift: Surface expression, distribution and tectonic-volcanic interaction in the Thingvellir Fissure Swarm, Iceland. *Journal of Structural Geology*, 32(4), 407–422. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.01.003>
- 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>
- Souza, E. M., y Negri, T. T. (2017). First prospects in a new approach for structure monitoring from GPS multipath effect and wavelet spectrum. *Advances in Space Research*, 59(10), 2536–2547. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.02.043>
- Strode, P. R. R., y Groves, P. D. (2016). GNSS multipath detection using three-frequency signal-to-noise measurements. *GPS Solutions*, 20(3), 399–412. <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0449-1>
- Suárez, N. (2012). Red Geodésica Nacional Activa de la República Oriental del Uruguay (REGNA-ROU). Infraestructura al servicio del desarrollo de nuevas capacidades mediante el empleo de Tecnologías de la Información Geográfica (TIG). *Biblioteca Nacional, Cuaderno de Geografía*, 23–28.
- Takacs, B., y Bruyninx, C. (2001). Quality checking the raw data of the EUREF permanent network. *Proceedings EUREF Symposium*. [http://epncb.oma.be/\\_documentation/papers/eurefsymposium2001/quality\\_checking\\_rawdata\\_epn.pdf%0Apapers3://publication/uuid/754E20B5-ECA3-4188-8259-CD34553BE11C](http://epncb.oma.be/_documentation/papers/eurefsymposium2001/quality_checking_rawdata_epn.pdf%0Apapers3://publication/uuid/754E20B5-ECA3-4188-8259-CD34553BE11C)
- Tarrío Mosquera, J. A. (2018). *Geodesia Satelital*.
- Team, G. P. (2014). Global Positioning System (GPS) Standard Positioning Service (SPS) Performance Analysis Report. *GPS Product Team: Washington, DC, USA., March*, 1–61. [http://www.nstb.tc.faa.gov/reports/PAN85\\_0414.pdf](http://www.nstb.tc.faa.gov/reports/PAN85_0414.pdf)

- Teunissen, P., y Montenbruck, O. (2017). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems - Google Libros*. Springer.
- Tian, Y., Sui, L., Xiao, G., Zhao, D., y Tian, Y. (2019). Analysis of Galileo/BDS/GPS signals and RTK performance. *GPS Solutions*, 23(2), 0. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0831-5>
- Torge, W., y dan Muller, J. (2012). *Torge · Geodesy*. Walter de Gruyter.
- U.S. Coast Guard Navigation Center. (2020). <https://www.navcen.uscg.gov/>
- USGS. (2020). *Latest Earthquakes*. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- Vázquez, G. E. B., y Grejner-Brzeziska, D. A. (2012). A case of study for pseudorange multipath estimation and analysis: TAMDEF GPS network. *Geofísica Internacional*, 51(1), 63–72. <https://doi.org/10.19155/geofint.2012.051.1.146>
- 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>
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., y Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools Version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(11), 5556–5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>
- 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. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W10(November 2019), 1295–1300. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-3-w10-1295-2020>
- Xu G., Xu Y. (2016) Applications of GPS Theory and Algorithms. In: *GPS*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-50367-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-662-50367-6_10)
- Yanlong, G., Zhijiang, Z., Yueping, H., Lming, F., y Fuchao, C. (2012). APLICATION OF CORS OF GNSS IN LAND SUBSIDENCE MONITORING IN TIANJIN [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 5.
- Yeh, T. K., Liou, Y. A., Wang, C. S., y Chen, C. S. (2008). Identifying the degraded environment and bad receivers setting by using the GPS data quality indices. *Metrologia*, 45(5), 562–570. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/5/010>
- Yeh, T. K., Wang, C. S., Chao, B. F., Chen, C. S., y Lee, C. W. (2007). Automatic data-quality monitoring for continuous GPS tracking stations in Taiwan. *Metrologia*, 44(5), 393–401. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/44/5/016>
- Zabala, M., López, F., y Ortega, A. (2017). Análisis e implementación de diferencial GPS en configuración simple y doble. *Maskay*, 7(1), 41. <https://doi.org/10.24133/maskay.v7i1.343>
- Zhang, K., Zeng, F. L., Ouyang, X. F., y Zhao, Y. (2018). Analysis of GPS Interference Effect of Ground Tracking Station during the Syrian airstrike. *Proceedings of 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control*

Conference, IAEAC 2018, Iaeac, 2415–2419.  
<https://doi.org/10.1109/IAEAC.2018.8577884>

- Zhang, N., Zhang, S., He, Y., Zhang, Q., Zhang, X., y Wan, T. (2017). Characteristic of GPS SNR and it's application for snow depth monitoring analysis. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 437, 175–185. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-4588-2\\_15](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4588-2_15)
- Zhang, R., Gao, C., Pan, S., y Shang, R. (2020). Fusion of GNSS and speedometer based on VMD and its application in bridge deformation monitoring. *Sensors (Switzerland)*, 20(3). <https://doi.org/10.3390/s20030694>
- Zhou, W., Liu, L., Huang, L., Yao, Y., Chen, J., y Li, S. (2019). A New GPS SNR-based Combination Approach for Land Surface Snow Depth Monitoring. *Scientific Reports*, 9(1), 1–20. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40456-2>
- Zimmermann, F., Schmitz, B., Klingbeil, L., y Kuhlmann, H. (2019). GPS multipath analysis using fresnel zones. *Sensors (Switzerland)*, 19(1), 1–25. <https://doi.org/10.3390/s19010025>
- Zuo, X., Bu, J., Li, X., Chang, J., y Li, X. (2019). The quality analysis of GNSS satellite positioning data. *Cluster Computing*, 22, 6693–6708. <https://doi.org/10.1007/s10586-018-2524-1>