



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.

Quality Check GPS Observations On Continuously Operating Free Access Stations In México

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

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

Abstract

A statistical comparative evaluation of 65 continuously operating, free access stations in Mexico was made. The observations were performed from January 2010 to January 2020. The quality check of the GPS observations was carried out by using TEQC software, developed by UNAVCO. Four quality indexes were considered within the quality check, with six variables: multipath effect on L1 and L2 band, percentage of registered/expected observations, signal-to-noise ratio on L1 and L2, and cycle slip per 1000 observations. The results obtained from each station were compared with the quality standard established by IGS in order to belong to its network, this with the goal of determining their quality and the level of meeting the standard. The results show, on average, a meeting 3.3 of the 6 variables, where: 6 stations meet 5 of 6 variables; 16 stations with 4; 35 stations with 3; 6 stations with 2 and 2 station with one variable, being INEG station the best in the quality check except for the cycle slips per 1000 observations. Likewise, it was shown that the multipath effect is greater in those stations that had not antenna/receiver changing or firmware update,

mainly degrading the received signal on the L2 band.

Keywords: Quality check, GPS, multipath effect, signal-to-noise ratio, cycle slip, México

Introducción

Los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS) están basados en un conjunto de satélites, los cuales proveen de coordenadas geocéntricas a un punto de medición (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Dichos sistemas han sido ampliamente utilizados en la navegación, el posicionamiento y la determinación precisa de la medida del tiempo. Algunas aplicaciones son: estudio de los fenómenos atmosféricos y pronósticos climatológicos (Liu et al., 2020), localización y navegación (Leick et al., 2015), deformación de la corteza (Marquez-Azua y DeMets, 2009; Yanlong et al., 2012; Murray et al., 2019), trabajos de modelación geológica (Sonnette et al., 2010), recursos hídricos (Foster, 2015) y monitoreo de estructuras (Cao et al., 2019; Zhang et al., 2020).

México es un país que cuenta con redes geodésicas de operación continua y que, además, colabora con organismos internacionales como el International GNSS Service (IGS), National Geodetic Survey (NGS), University NAVstar Consortium (UNAVCO) y Estaciones de Referencia de Operación Continua (CORS). Por esta razón, es posible el desarrollo de trabajos científico-técnicos de alta precisión que se apoyan de la infraestructura geodésica, teniendo en consideración el análisis de calidad de las estaciones de operación continua en las experimentaciones.

En este sentido, la calidad de los datos crudos y la verificación del correcto funcionamiento de las estaciones (Brown et al., 2002; García-Armenteros, 2020) está relacionada con el posicionamiento preciso, de modo que a mejor calidad en las observaciones se esperaría un mejor posicionamiento (Yeh et al., 2008). En México existen pocos trabajos realizados de esta naturaleza. Un ejemplo de ellos es Vázquez et al. (2013) en el que sólo se ha analizado el efecto multitrayectoria. No obstante, otros parámetros son necesarios para determinar la calidad de las estaciones, así como tener en cuenta el periodo mínimo de observación continua de 2.5 años para poder incluir las estaciones en estudios geodinámicos (Blewitt y Lavallée, 2002).

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo es realizar el análisis de calidad de 65 estaciones de libre acceso en territorio mexicano, considerando un periodo de 10.07 años, de acuerdo al estándar de calidad establecido por IGS (2019) para determinar aquellas estaciones que podrían formar parte de su red; así como evaluar el rendimiento de las estaciones considerando los valores establecidos por dicho organismo.

Marco teórico

Análisis de calidad de las observaciones GPS

El análisis de calidad de las estaciones GNSS es un componente clave en la verificación del correcto funcionamiento de toda una infraestructura geodésica, respecto a los datos crudos y el monitoreo de estabilidad de los datos (Brown et al., 2002; Herrada et al., 2010). De este modo, el análisis de calidad en este estudio se centra en cuatro indicadores: efecto multitrayectoria, relación señal-ruido, saltos de ciclo y porcentaje de observaciones registradas respecto de las esperadas, los cuales pueden ser extraídos mediante el software TEQC (Traslate/Edit/Quality Check) (Estey y Meertens, 1999):

Efecto Multitrayectoria: tiene lugar cuando la misma señal llega al receptor por diferentes direcciones o trayectorias, 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, degradando la precisión en el posicionamiento (Seeber, 2008). El cálculo del efecto multitrayectoria se basa en una combinación lineal de pseudorange y fase portadora de L_1 y L_2 para la estimación del error medio cuadrático en metros (Estey y Meertens, 1999).

Relación Señal-Ruido: expresada como SNR, S/N o C/N₀ describe el estado operativo del sistema (receptor, antena, señal), rendimiento del seguimiento y captura de la señal (Xiao et al., 2020), siendo la potencia de la señal satelital, la ganancia de la antena, estado del receptor y el efecto multitrayectoria, los principales causantes de variación de la SNR (Zhang et al., 2017). Generalmente, el rango en el exterior es de 35 a 55 dBHz, clasificadas en señales débiles <36 dBHz y fuertes ≥ 36 dBHz (Gurtner y Estey, 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); asimismo, de acuerdo con Kamatham (2018), la SNR es inversamente proporcional al efecto multitrayectoria.

Salto de Ciclo: son pérdidas en el seguimiento del satélite, siendo una discontinuidad en el número entero de ciclos de la fase, efecto similar en la ambigüedad, producidos por una mala recepción de la fase portadora, saltos bruscos en la señal recibida, malas condiciones ionosféricas, alto efecto multitrayectoria, así como una baja elevación del satélite (Yeh et al., 2007). La relación de los saltos de ciclo por cada mil observaciones se expresa como $CSR = 1000/(o/slps)$ (Zuo et al., 2019; Xiao et al., 2020) donde “o” es el número de observaciones registradas y “slps” la cantidad de saltos de ciclo.

Porcentaje de observaciones registradas respecto de las esperadas: hace referencia a la cantidad de datos obtenidos respecto de los posibles, como medida de confianza (Álvarez, 2008; Hofmann-Wellenhof et al., 2008) siendo

un concepto fundamental en la navegación y característica en el análisis de calidad (Souto, 2014). La relación de los datos observados es $R = (N_1/N_0) \times 100$ donde N_1 es el número de observaciones recibidas y N_0 representa el número de observaciones posibles (Xiao et al., 2020).

Materiales y métodos

El análisis de calidad se llevó a cabo a través de las etapas que se muestran en la Figura 1.

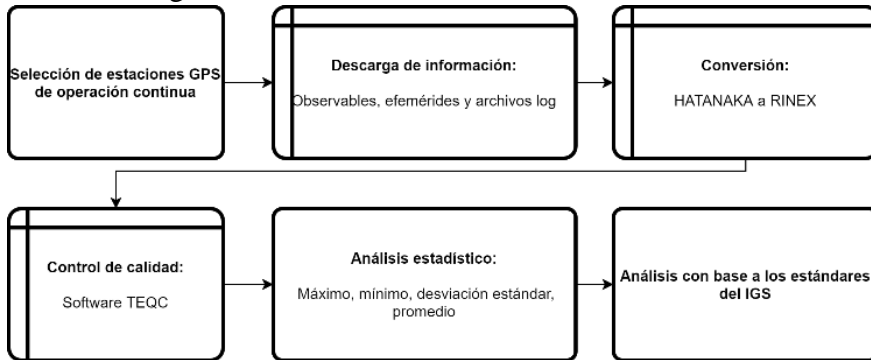


Figura 1. Metodología para el control y análisis de calidad.

La primera etapa fue la selección de estaciones GPS de operación continua de libre acceso dentro de territorio mexicano sin limitación al acceso de los datos que genera cada estación, descartando parcialmente la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA, <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/rgna/>) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), por limitar el acceso a 90 días de archivos RINEX 2.11 (Receiver Independent Exchange Format) (Gurtner y Estey, 2013). De este modo, se utilizaron los servidores del University NAVstar Consortium (UNAVCO) (<ftp://data-out.unavco.org>), International GNSS Service (IGS) (<ftp://garner.ucsd.edu/pub>) y Continuously Operating Reference Station (CORS) (<ftp://geodesy.noaa.gov/cors>), para la localización de las estaciones de libre acceso, contabilizando en total 65 estaciones geodésicas, de las cuales: 49 estaciones son gestionadas por UNAVCO; 15 estaciones de la red CORS gestionada por el National Geodetic Survey (NGS), de las cuales 10 forman parte también de la RGNA; y una última estación perteneciente al IGS y también a la RGNA, como se muestra en la Figura 2.

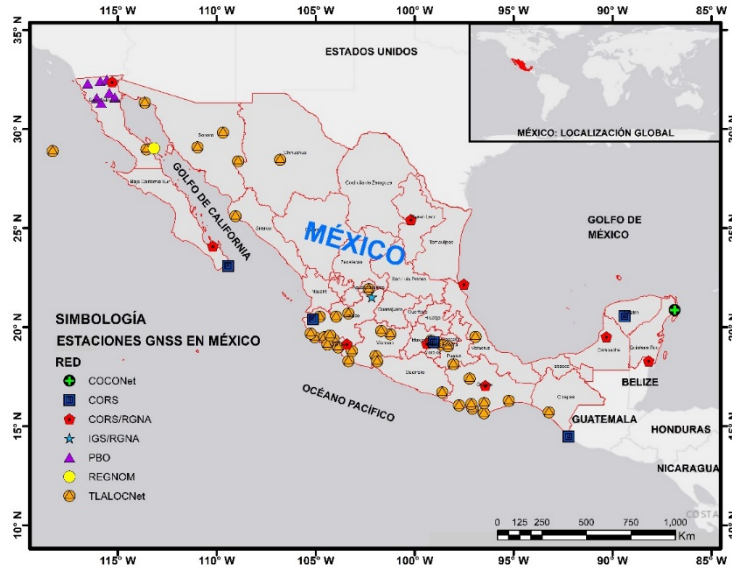


Figura 2. Estaciones de operación continua de libre acceso en México seleccionadas para el análisis de calidad.

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 ficheros de observación, mediante el protocolo FTP (Protocolo de Transferencia de Archivos) de cada gestor. Los datos fueron descargados del 01 de enero de 2010 al 28 de enero de 2020 (Tabla 1) con un total de 10.07 años. Adicionalmente para revisar actualizaciones e inconsistencias documentadas, se descargaron los ficheros en los cuales se registran los cambios y actualizaciones realizadas en la estación (ficheros "log"). Asimismo, fueron descargadas las efemérides transmitidas (ficheros "n") de SOPAC (Scripps Orbits and Permanent Array Center).

En la tercera etapa, se realizó la conversión de formato HATANAKA a RINEX 2.11 mediante el software RNXCMP y su herramienta CRX2RNX (Hatanaka, 2008).

La cuarta etapa referente al control de calidad se realizó a través del software TEQC mediante la opción "+qc" en el modo "qc-full", se consideró sólo la constelación GPS al ser la constelación que se encuentra presente en todas las estaciones seleccionadas. Asimismo, se cambió la tasa de muestreo a 30 segundos, siendo este el tiempo en común, ya que en las estaciones varía entre 1, 15 y 30 s. Una vez preparados los ficheros RINEX, se realizó el control de calidad, extrayendo los valores de multitraectoria en ambas bandas, relación señal-ruido, saltos de ciclo y el porcentaje de observaciones registradas respecto de las esperadas.

A través de un análisis de estadística descriptiva de las estaciones, se obtuvieron los valores máximos, mínimos, promedios y desviaciones estándar de los indicadores de las 6 variables: MP1, MP2, SNR1, SNR2, CSR y R, permitiendo evaluar cada estación de forma individual en función de sus resultados.

Finalmente, para el control de calidad se compararon los cuatro indicadores con los umbrales establecidos por IGS (2019): 95% de porcentaje de observaciones registradas respecto de las esperadas, 1 salto de ciclo por cada 1000 observaciones, 30 cm para el efecto multitrayectoria y 36 dBHz para las señales recibidas, con la finalidad de determinar aquellas estaciones que podrían formar parte de la red IGS.

Tabla 1. Disponibilidad de información por año.

ESTAC IÓN	GES TOR	LOCALIZA CIÓN	AÑO										TOT AL (DÍA S)	TOT AL (AÑ OS)					
			2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019			2020				
IAGX	UNA VCO	Isla ángel de la guarda, Baja California	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29	35	28	685	1.88			
TNTM	UNA VCO	Tamarindo, Jalisco	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36	35	28	752	2.06			
TNCT	UNA VCO	Chalacatepec, Jalisco	-	-	-	-	-	-	-	35	24	20	0	5	6	-	801	2.19	
TNMT	UNA VCO	Manantlán, Jalisco	-	-	-	-	-	-	-	73	36	35	5	9	28	825	2.26		
TNMZ	UNA VCO	Manzanillo, Colima	-	-	-	-	-	19	35	34	10	1	7	4	5	-	997	2.73	
TNPJ	UNA VCO	Pijijiapan, Chiapas	-	-	-	-	44	36	23	31	18	5	1	3	6	-	1139	3.12	
TNTB	UNA VCO	Topolobampo, Sinaloa	-	-	-	-	-	-	36	36	36	5	5	5	74	-	1169	3.20	
TNCC	UNA VCO	Coalcomán, Michoacán	-	-	-	-	-	-	17	35	36	2	2	5	9	28	1236	3.39	
TNAL	UNA VCO	Altzomoni, Puebla	-	-	-	-	13	36	33	36	44	9	3	2	4	-	1242	3.40	
TNMR	UNA VCO	Maruata, Michoacán	-	-	-	-	11	34	34	29	18	3	2	9	1	6	-	1281	3.51
GUAX	UNA VCO	Isla Guadalupe, Baja California	-	-	-	-	-	-	19	36	36	8	5	5	8	28	1314	3.60	
TNMQ	UNA VCO	Marquelia, Guerrero	-	-	-	-	-	37	34	36	36	1	3	4	0	28	1333	3.65	
TNCY	UNA VCO	Coyuche, Oaxaca	-	-	-	-	-	33	36	35	36	5	7	5	7	28	1355	3.71	
TNGF	UNA VCO	CDMX	-	-	-	-	-	-	26	36	36	0	5	5	9	28	1377	3.77	

TNCN	UNA VCO	Las Cañas, Michoacán	-	-	-	-	-	-	31 4	31 9	36 5	35 9	28	1385	3.79
TNSJ	UNA VCO	San José del Pacífico, Oaxaca	-	-	-	-	-	-	29 4	36 5	36 4	35 9	28	1410	3.86
TNIF	UNA VCO	La Concepción, Jalisco	-	-	-	-	-	75	27 7	36 5	36 5	35 9	28	1469	4.02
TNNP	UNA VCO	Nopala, Oaxaca	-	-	-	-	-	31	36 5	36 5	36 5	35 9	28	1513	4.15
TNLC	UNA VCO	Morelia, Michoacán	-	-	-	-	-	68	36 5	36 5	36 5	35 9	28	1550	4.25
TNPP	UNA VCO	Puerto Peñasco, Sonora	-	-	-	-	-	32 4	36 5	36 5	36 5	35 9	28	1806	4.95
TNAT	UNA VCO	Acatlán, Puebla	-	-	-	-	48	36 5	29 7	35 6	35 4	35 9	28	1807	4.95
TNAM	UNA VCO	Ameca, Jalisco	-	-	-	-	-	36 5	36 5	36 5	36 5	35 9	28	1847	5.06
TNCM	UNA VCO	Chamela, Jalisco	-	-	-	-	11 5	30 7	34 1	35 2	36 5	35 9	28	1867	5.12
TNBA	UNA VCO	Bahía de los Ángeles, Baja California Sur	-	-	-	-	34	36 5	36 5	36 5	36 5	35 9	28	1881	5.15
TNNX	UNA VCO	Nochixtlan, Oaxaca	-	-	-	-	47	36 5	36 5	35 3	36 5	35 9	28	1882	5.16
TNMS	UNA VCO	Mascota, Jalisco	-	-	-	-	11 7	36 5	36 5	34 8	36 5	35 9	28	1947	5.33
UGEO	UNA VCO	Guadalajara, Jalisco	238	11 2	-	-	-	31 8	36 5	33 5	20 3	35 9	28	1958	5.36
TNCU	UNA VCO	Cuauhtémoc, Chihuahua	-	-	-	-	16 7	36 5	36 5	36 5	36 5	35 9	28	2014	5.52
TNHM	UNA VCO	Presa Infiernillo, Jalisco	-	-	-	-	16 9	36 5	36 5	36 5	36 5	35 9	28	2016	5.52
OXUM	UNA VCO	Puerto Ángel, Oaxaca	-	-	-	99	33 2	23 6	29 6	36 5	36 5	34 6	28	2067	5.66
USMX	UNA VCO	Moctezuma, Sonora	-	-	-	-	27 0	36 5	36 5	36 5	36 5	35 9	28	2117	5.80
YESX	UNA VCO	Yecora, Sonora	143	18 5	-	-	25	36 5	36 5	36 5	36 5	35 9	28	2200	6.03
UTON	UNA VCO	Tonanzintla, Puebla	32	-	27	34 8	28 4	36 5	36 5	36 5	36 4	32 1	19	2490	6.82
TECO	UNA VCO	Tecomán, Colima	357	36 5	13 6	-	-	35 0	36 5	36 4	36 5	16 9	28	2499	6.85
UAGU	UNA VCO	Aguascaliente s, Aguascaliente s	264	-	35 0	25 8	97	30 6	33 4	25 2	35 6	33 0	28	2575	7.05

TAMP	NGS	Tampico, Tamaulipas	-	-	55	36	36	36	34	35	35	35	28	2581	7.07
ICAM	NGS	Campeche, Campeche	-	-	56	36	36	36	34	35	36	34	28	2590	7.10

Tabla 1. Continuación, disponibilidad de información por año.

ESTAC IÓN	GES TOR	LOCALIZA CIÓN	AÑO											TOT AL (DÍAS)	TOT AL (AÑOS)
			201 0	20 11	20 12	20 13	20 14	20 15	20 16	20 17	20 18	20 19	20 20		
IPAZ	NGS	La Paz, Baja California Sur	-	-	56	36	36	36	34	34	36	35	28	2593	7.10
UXAL	UNA VCO	Jalapa, Veracruz	109	36	35	21	15	31	36	36	36	32	28	2956	8.10
PHJX	UNA VCO	Mexicali, Baja California	-	64	36	36	36	36	36	36	36	35	28	3006	8.24
OXTH	UNA VCO	Tehuantepec, Oaxaca	357	11	20	23	34	36	34	32	36	35	28	3043	8.34
PJZX	UNA VCO	La Rumorosa, Baja California	-	32	36	36	36	36	20	31	36	35	28	3057	8.38
PSTX	UNA VCO	San Isidro, California	124	36	36	36	36	36	14	22	36	35	28	3067	8.40
OXPE	UNA VCO	Puerto Escondido, Oaxaca	307	36	23	32	36	19	26	28	34	35	28	3081	8.44
PTEX	UNA VCO	Tecate, Baja California	-	24	36	36	36	36	36	36	36	35	28	3191	8.74
MTP1	NGS	Tapachula, Chiapas	190	22	36	36	36	31	36	31	34	35	27	3218	8.82
PENA	UNA VCO	Pena Colorada, Colima	357	36	36	36	36	36	36	35	28	11	28	3330	9.12
PLTX	UNA VCO	Mexicali, Baja California	63	36	36	36	36	36	36	36	36	35	28	3370	9.23
PLPX	UNA VCO	San Felipe, Baja California	66	36	36	36	36	36	36	36	36	35	28	3373	9.24
PALX	UNA VCO	El Álamo, Baja California	121	36	36	36	36	36	36	36	36	35	28	3428	9.39
INEG	IGS	Aguascaliente, Aguascaliente	355	32	34	34	35	35	28	35	34	34	22	3430	9.40
UCOE	UNA VCO	Coeno, Michoacán	356	33	21	36	34	36	36	36	36	35	28	3460	9.48
MSD1	NGS	San José del Cabo, Baja California	356	36	36	36	35	35	24	36	34	35	27	3488	9.56

TNMO	UNA VCO	Morelia, Michoacán	301	36 4	36 2	34 8	36 5	27 3	36 5	36 5	36 5	35 9	28	3495	9.58
TOL2	NGS	Toluca, Edo. Mexico	354	36 4	36 2	36 3	36 4	36 5	35 1	35 9	34 6	33 6	-	3564	9.76
MTY2	NGS	Monterrey, Nuevo León	357	36 5	36 0	36 5	36 5	36 5	35 9	34 9	31 8	35 8	28	3589	9.83
MEXI	NGS	Mexicali, Baja California	349	36 5	36 3	36 4	35 8	36 5	33 8	34 0	36 5	35 8	26	3591	9.84
MPR1	NGS	Puerto Vallarta, Jalisco	356	36 4	35 8	33 6	36 5	36 2	36 5	36 5	34 7	35 5	27	3600	9.86
MERI	NGS	Mérida, Yucatán	357	36 5	36 5	35 8	34 7	35 9	35 4	35 0	36 5	35 8	28	3606	9.88
CHET	NGS	Chetumal, Quintana Roo	355	36 1	36 4	36 4	36 4	36 5	35 2	35 3	35 9	35 9	28	3624	9.93
MMX1	NGS	CDMX	356	36 4	35 6	36 5	36 5	36 1	36 5	36 5	34 8	35 5	27	3627	9.94
OAX2	NGS	Oaxaca, Oaxaca	357	36 5	36 5	36 5	36 5	35 5	35 3	35 5	36 5	35 8	27	3630	9.95
MMD1	NGS	Mérida, Yucatán	356	36 3	36 1	36 5	36 5	36 2	36 5	36 5	34 7	35 6	27	3632	9.95
COL2	NGS	Colima, Colima	357	36 4	36 5	36 5	36 5	36 1	35 7	35 1	36 5	35 9	28	3637	9.96
UNPM	UNA VCO	Puerto Morelos, Quintana Roo	357	36 5	36 5	36 5	36 2	36 5	36 5	36 5	36 5	35 9	28	3661	10.0 3

Resultados

La Tabla 2 muestra los resultados de la estadística descriptiva de los cuatro indicadores de calidad en las 6 variables analizadas: MP1 y MP2 (multitrayectoria), SNR1 y SNR2 (relación señal-ruido), CSR (saltos de ciclo por cada 1000 observaciones) y R (porcentaje de las observaciones registradas/esperadas), ordenando las estaciones de mayor a menor en función del promedio de efecto multitrayectoria en L1 ya que es el principal causante de la degradación de la señal.

Tabla 2. Estadística del análisis de calidad de las 65 estaciones GPS de operación continua seleccionadas en México, ordenadas en función del promedio MP1

Estación	Días	MP1 (m)				MP2 (m)				SNR1 (dBHz)				SNR2 (dBHz)				CSR (1000/(o/slps))				R (%)			
		Max	Min	Promedio	σ	Max	Min	Promedio	σ	Max	Min	Promedio	σ	Max	Min	Promedio	σ	Max	Min	Promedio	σ	Max	Min	Promedio	σ
MPR1	3600	1.29	0.63	1.00	0.04	1.18	0.43	0.94	0.04	48.06	45.30	46.74	0.82	45.54	40.92	42.36	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	49.32	46.08	47.34	0.15	45.24	41.16	42.30	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	48.60	41.76	46.86	0.31	45.42	40.68	42.36	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	43.02	41.70	42.06	0.04	36.24	28.02	29.16	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	48.72	45.78	47.40	0.14	44.88	40.68	42.12	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	43.62	42.18	42.96	0.06	36.84	28.56	30.06	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	42.54	31.68	41.40	0.18	36.66	25.86	27.96	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	47.46	42.18	44.28	0.29	39.30	27.96	33.12	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	43.80	42.54	43.26	0.05	37.74	29.58	30.78	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	44.46	41.04	42.06	0.17	40.44	33.72	37.20	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	42.72	40.92	41.64	0.06	35.04	12.00	27.30	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	46.26	41.70	43.08	0.24	36.36	28.44	29.76	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	48.90	45.90	47.34	0.14	45.18	36.54	42.36	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	43.38	41.82	42.42	0.05	36.78	28.62	29.58	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	42.30	40.92	41.70	0.06	33.30	25.74	27.78	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	43.56	40.92	42.18	0.08	30.84	25.68	28.44	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	43.26	39.84	41.88	0.05	36.18	25.68	28.74	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	43.38	42.18	42.84	0.04	37.20	29.28	30.36	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	43.44	42.06	42.78	0.06	37.20	28.98	30.18	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	42.60	41.46	42.06	0.04	36.42	27.54	29.16	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	42.78	39.72	41.04	0.08	33.00	24.30	27.18	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	41.94	40.80	41.22	0.04	34.98	25.98	27.36	0.44	0.76	0.04	0.08	0.07	100	96	99.34	0.61

Tabla 2. Continuación, estadística del análisis de calidad de las 65 estaciones GPS de operación continua seleccionadas en México, ordenadas en función del promedio MP1

Estación	Días	MP1 (m)				MP2 (m)				SNR1 (dBHz)				SNR2 (dBHz)				CSR (1000/(o/slps))				R (%)			
		Max	Min	Promedio	σ	Max	Min	Promedio	σ	Max	Min	Promedio	σ	Max	Min	Promedio	σ	Max	Min	Promedio	σ	Max	Min	Promedio	σ
PHJX	3006	0.55	0.44	0.50	0.01	0.48	0.38	0.42	0.01	43.26	41.82	42.66	0.05	34.80	27.36	28.92	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	47.52	42.60	43.44	0.15	41.28	29.76	31.44	0.43	5.71	0.04	0.13	0.40	98	92	97.71	0.73
OXUM	2067	0.69	0.31	0.49	0.07	0.56	0.31	0.41	0.04	42.66	41.28	42.06	0.04	34.08	27.06	28.38	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	42.54	40.86	42.00	0.05	36.48	27.36	28.92	0.07	4.90	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	43.74	40.98	42.00	0.03	33.78	25.98	28.02	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	43.44	41.70	42.36	0.05	37.08	28.68	29.70	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	43.14	41.58	42.18	0.05	36.36	27.90	29.10	0.17	8.00	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	43.02	41.76	42.48	0.05	37.44	28.62	29.94	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	44.40	40.20	42.54	0.06	36.90	25.98	29.76	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	42.18	40.80	41.64	0.06	32.64	25.92	27.12	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	43.20	42.00	42.72	0.05	35.40	28.80	29.76	0.55	38.46	0.04	0.39	1.52	100	66	99.67	1.60
TNAT	1807	0.94	0.4	0.44	0.02	0.99	0.23	0.34	0.05	43.08	41.70	42.48	0.06	35.34	28.38	29.58	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	42.84	41.64	42.30	0.05	37.02	28.38	29.58	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	42.90	41.76	42.30	0.05	37.08	28.80	30.00	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	43.32	40.44	41.70	0.06	35.88	26.16	29.82	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	43.08	41.82	42.42	0.06	36.84	28.56	30.42	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	43.32	40.44	42.12	0.05	34.26	26.94	28.38	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	43.02	41.52	42.36	0.05	34.32	27.42	28.74	0.07	4.33	0.04	0.17	0.20	100	54	98.76	5.86
TNTB	1169	0.48	0.35	0.42	0.01	0.43	0.25	0.36	0.03	42.90	41.64	42.30	0.05	34.68	28.50	29.22	0.08	0.65	0.04	0.06	0.05	100	97	99.89	0.40
UCOE	3460	0.67	0.25	0.41	0.09	0.73	0.26	0.35	0.04	43.02	41.64	42.42	0.05	37.14	28.32	29.70	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	43.38	41.10	42.00	0.02	30.54	24.96	27.90	0.26	2.40	0.04	0.07	0.10	100	96	99.90	0.39
TNMZ	997	0.45	0.13	0.41	0.02	0.36	0.09	0.32	0.01	47.52	42.60	43.44	0.15	41.28	29.76	31.44	0.04	50.00	0.08	0.48	2.27	100	0	99.57	5.37

Tabla 2. Continuación, estadística del análisis de calidad de las 65 estaciones GPS de operación continua seleccionadas en México, ordenadas en función del promedio MP1

Estación	Días	MP1 (m)				MP2 (m)				SNR1 (dBHz)				SNR2 (dBHz)				CSR (1000/(σ /slps))				R (%)			
		Max	Min	Promedio	σ	Max	Min	Promedio	σ	Max	Min	Promedio	σ	Max	Min	Promedio	σ	Max	Min	Promedio	σ	Max	Min	Promedio	σ
UGEO	1958	0.45	0.22	0.40	0.02	0.51	0.24	0.43	0.02	43.74	40.98	42.30	0.08	33.30	27.36	28.98	0.18	8.62	0.04	1.04	0.54	98	71	95.93	1.34
UNPM	3661	0.63	0.26	0.39	0.10	0.67	0.29	0.38	0.04	44.10	42.84	43.62	0.04	38.22	31.32	32.28	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	42.96	41.34	42.12	0.03	32.64	26.04	27.72	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	42.90	41.64	42.00	0.05	35.40	29.10	29.70	0.07	1.77	0.04	0.10	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	44.16	42.54	43.44	0.05	38.22	31.32	32.40	0.08	3.19	0.04	0.07	0.10	99	96	98.82	0.42
TNMO	3495	0.4	0.32	0.34	0.01	0.44	0.31	0.36	0.03	43.98	42.48	43.38	0.05	37.86	30.24	32.04	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	43.02	41.52	42.24	0.05	33.66	27.24	28.26	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	44.58	42.48	43.38	0.04	38.40	31.44	32.28	0.07	2.89	0.04	0.14	0.12	99	88	97.68	0.66
PIZX	3057	0.33	0.09	0.30	0.01	0.32	0.09	0.26	0.01	46.62	42.48	43.44	0.05	39.72	31.02	32.10	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	47.52	34.20	40.86	1.03	43.62	35.10	40.44	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	47.58	33.90	40.86	0.99	43.98	36.54	40.02	0.46	25.64	0.04	3.59	3.63	101	0	98.93	6.49
CHET	3624	0.50	0.10	0.24	0.1	0.59	0.22	0.34	0.06	44.10	41.88	42.96	1.11	37.38	18.00	31.20	0.47	20.00	0.04	4.93	3.63	101	65	98.85	4.40
ICAM	2590	0.44	0.08	0.24	0.09	0.50	0.18	0.32	0.04	48.24	34.32	40.98	1.00	45.00	35.34	40.20	0.43	11.49	0.04	3.80	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	48.30	17.04	38.88	0.07	44.34	36.06	40.74	0.13	250.00	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	47.58	33.84	39.36	0.96	46.80	34.80	41.04	0.49	9.01	0.04	4.85	3.40	100	50	98.42	2.53
TOL2	3566	0.35	0.07	0.20	0.06	0.58	0.17	0.29	0.05	48.54	29.22	39.36	0.97	43.62	36.78	40.26	0.33	14.29	0.04	1.10	1.26	100	67	98.56	3.55
MTY2	3586	6.11	0.07	0.19	0.25	6.32	0.14	0.27	0.26	47.94	33.24	39.24	0.83	44.10	37.44	40.92	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	47.58	30.84	39.06	1.02	44.16	13.44	41.10	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	47.46	33.96	39.60	0.99	44.16	34.26	40.44	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	47.46	32.88	38.76	0.89	43.32	36.30	40.38	0.53	23.81	0.04	2.04	2.10	100	0	99.55	2.98
INEG	3430	0.34	0.04	0.14	0.03	0.47	0.05	0.19	0.04	53.82	32.52	39.60	0.97	46.86	38.10	42.78	0.5	17.54	0.04	4.42	3.49	100	1	99.25	4.02

Análisis estadístico del efecto multirayectoria

Los valores promedios respecto al efecto multirayectoria en la banda L1 se presentan entre 0.14 y 1.00 m, teniendo valores máximos entre 0.33 y 6.11 m y mínimos entre 0.04 y 0.80 m. Para MP2, los valores promedios están entre 0.19 y 0.94 m, los valores máximos entre 0.30 y 6.32 m y mínimos entre 0.05 y 0.48 m.

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. 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 la Tabla 2.

La Figura 3 representa los valores promedios del efecto multirayectoria en las bandas L1 y L2 por estación, ordenados de mayor a menor respecto del efecto en la banda L1. Generalmente MP1 es menor a MP2, sin embargo, este comportamiento sólo se encuentra en 16 estaciones, el resto presenta valores de MP1 mayores a MP2.

Como se indicó anteriormente, el valor recomendado máximo permisible en MP por el IGS es de 0.30 m (línea roja horizontal). En la gráfica queda demostrado que sólo siete estaciones (INEG, MEXI, MTY2, OAX2, TOL2, PLPX, PJZX) cumplen con este estándar internacional y que el resto de estaciones sobrepasan dicho valor e incluso llegan a triplicarlo.

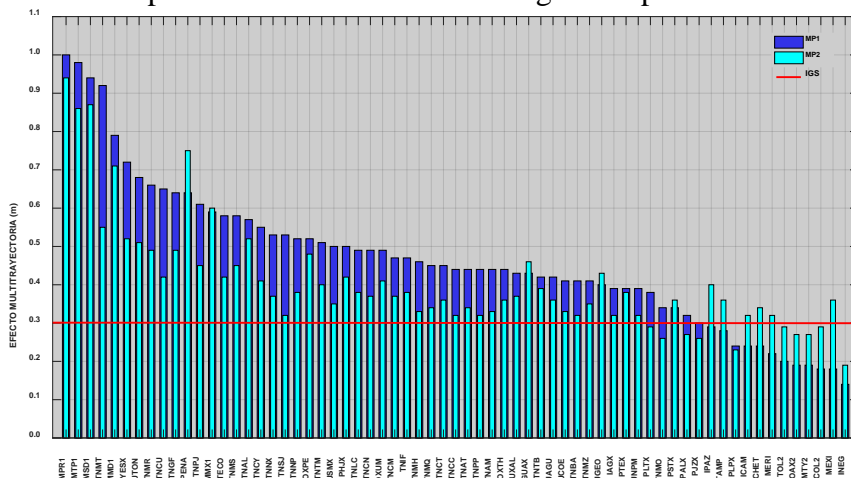


Figura 3. Promedio global de efecto multirayectoria por estación, MP1-RMS, MP2-RMS. La línea roja muestra el valor del efecto multirayectoria recomendado máximo permisible por el IGS.

Dicho comportamiento en estas estaciones puede estar relacionado con los cambios de hardware y software (Ray y Senior, 2005; Herrada et al., 2010; Vázquez et al., 2013), si bien, las estaciones que menor efecto multirayectoria

reflejan, son aquellas que han tenido actualizaciones recientes (entre los años 2016 y 2017), mejorando el comportamiento del efecto multitrayectoria, como es visto en INEG, MEXI, MTY2, OAX2 y TOL2. Por otro lado, las estaciones de mayor grado de afectación, como MPR1, MTP1, MSD1, MMD1, MMX1, no han registrado cambio ni actualización en ninguno de sus componentes desde su instalación. Sin embargo, el efecto multitrayectoria que registran ha sido constante sin mostrar saltos bruscos (Tabla 2), lo cual, puede estar relacionado también con el ambiente multitrayectoria circundante a la estación.

Análisis estadístico de la relación señal-ruido

En la Figura 4 se muestran los valores promedios de SNR1 y SNR2 para cada estación en dBHz. Con base en la clasificación de señales fuertes y débiles, las 65 estaciones presentan señales fuertes en la banda L1, entre 38.76 y 46.74 dBHz, mientras en la banda L2 se registran 48 estaciones con señales débiles con valor mínimo de 27.12 dBHz pertenecientes a UNAVCO; y 17 estaciones con señales fuertes con valor máximo de 42.78 dBHz (Tabla 2), de las cuales 15 pertenecen a NGS, 1 a IGS y 1 a UNAVCO.

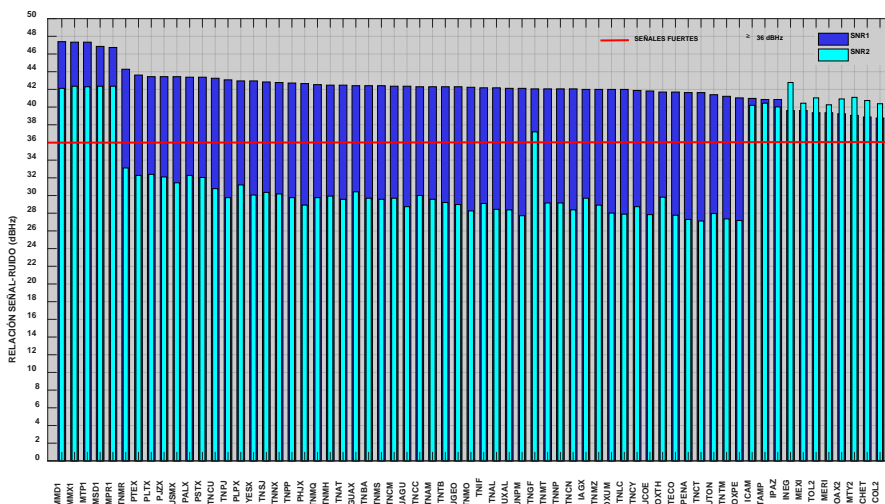


Figura 4. Promedio global de la relación señal-ruido por estación, SNR1 y SNR2. La línea roja muestra la división entre señales fuertes ≥ 36 dBHz y débiles < 36 dBHz.

El límite entre señales fuertes y débiles se denota con una línea horizontal roja en la Figura 4, solamente 17 estaciones reciben señales fuertes en ambas bandas y 48 estaciones muestran señales fuertes en L1 y débiles en L2.

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. De acuerdo con Kamatham (2018) a mayor SNR menor efecto multitrayectoria debería presentarse en la estación, es decir, una relación inversamente proporcional de SNR y MP. No obstante, dicho

comportamiento no se refleja en estas estaciones, lo cual puede estar relacionado con el entorno cercano a la antena, así como del receptor (hardware o firmware). En este sentido, los ficheros log fueron consultados encontrando el mismo tipo de instrumentación en las 5 estaciones y, hasta la fecha, no ha existido cambio de receptor NOV WAASGII, tipo de antena NOV WAASGII ni actualización de firmware 2.003.

Por otro lado, las estaciones (MTY2, OAX2, TOL2, MEXI e INEG), pertenecientes a la red CORS/RGNA, presentan un comportamiento inverso en ambos indicadores, es decir, bajo efecto multitrayectoria y señales fuertes en L1 y L2. Aunado a esto, dichas estaciones tienen en común el tipo de receptor LEICA GR10, tipo de antena LEIAR10 y versión de firmware 4.11/6.523.

Análisis estadístico de los saltos de ciclo

La estación de mayor pérdida de la fase portadora es la estación MTY2 con un máximo de 500 saltos de ciclo por cada 1000 observaciones ($1000/(o/slps)$), un mínimo de 0.04 y un promedio de 5.81, seguida por la estación PENA con promedio de 5.28, siendo la estación TNPP la que presenta menor pérdida con 0.06 en promedio, como se muestra en la Figura 5.

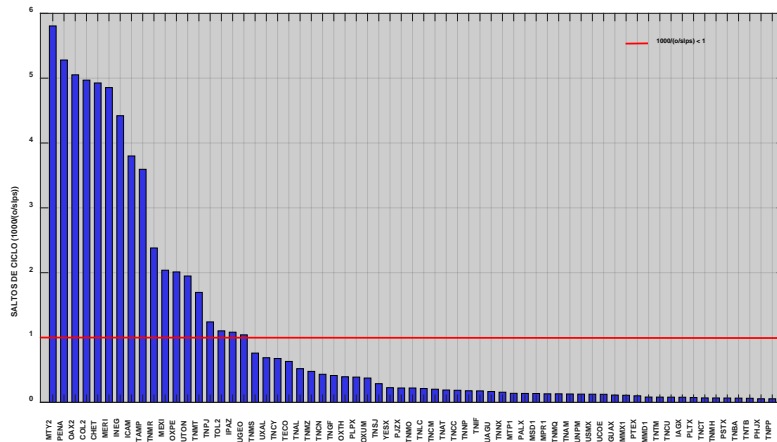


Figura 5. Promedio global de saltos de ciclo por cada 1000 observaciones (CSR) por estación. La línea roja representa el valor recomendado de CSR por el IGS.

Las estaciones pertenecientes a la red CORS/RGNA que han presentado valores bajos en multitrayectoria y señales fuertes, son las mismas estaciones que presentan la mayor cantidad de saltos de ciclo en promedio. Sin embargo, se esperaría que fuese de manera inversa, ya que, tanto el efecto multitrayectoria como la baja relación señal-ruido son los principales factores para la ocurrencia de los saltos de ciclo, no obstante, también podrían ser ocasionados por falla en el software del receptor y el entorno de la estación.

Con base en lo establecido por el Servicio GNSS Internacional, 18 estaciones GPS sobrepasan el valor máximo permisible recomendado en CSR; es decir, pérdida de un salto de ciclo por cada 1000 observaciones, siendo la línea roja (Figura 5) el límite del valor recomendado para CSR. En total, 47 estaciones se encuentran por debajo de este valor, las cuales pertenecen a la red Trans-boundary, Land and Atmosphere Long-term Observational and Collaborative Network (TLALOCNet), Plate Boundary Observatory (PBO), Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network (COCONet), Red Geodésica del Noroeste de México (REGNOM) y CORS.

Análisis estadístico del porcentaje de observaciones registradas respecto de las esperadas

Respecto al porcentaje de observaciones registradas respecto de las esperadas (R), 64 estaciones logran completar más del 90.00 % de las observaciones posibles y sólo la estación TNMT logra concretar el 77.45 % de las mismas como se muestra en la Figura 6.

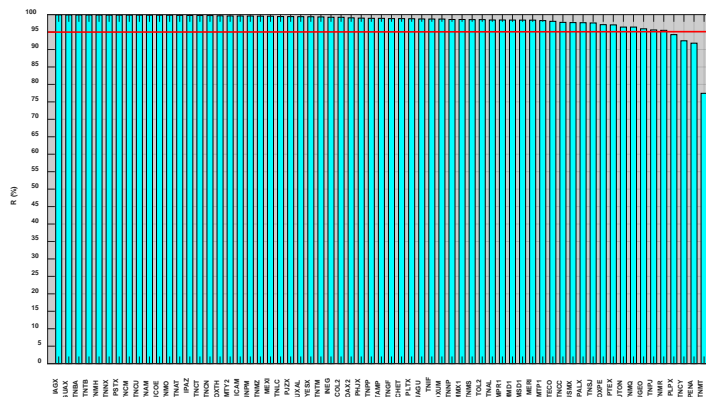


Figura 6. Promedio global del porcentaje de observaciones registradas respecto de las esperadas (R) por estación. La línea roja representa, en porcentaje (95%), el valor recomendado por el IGS.

La estación IAGX es la que mejor porcentaje de observaciones presenta con un 99.93 %, sin embargo, son 31 estaciones entre 99.00 % y 99.93 %, 19 entre 98.00 % y 98.99 %, 6 entre 97.00 % y 97.99 %, 2 entre 96.00 % y 96.99 % y finalmente 3 entre 95.00 % y 95.99 %. Sólo las estaciones PLPX, TNCY, PENA y TNMT tienen un valor por debajo del recomendado, resultando un total de 61 estaciones con un porcentaje de observaciones registradas respecto de las esperadas aceptable por el IGS.

Análisis de los indicadores de calidad para estaciones de operación continua con base a los estándares del IGS

En la Figura 7 se muestran los 4 indicadores analizados, asignando un color diferente y valor de 1 cuando se ajusta 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, R). Sin embargo, cuando la variable no se ajusta no se le asignará valor, de este modo sólo se muestran aquellas que cumplen con los estándares del IGS.

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.

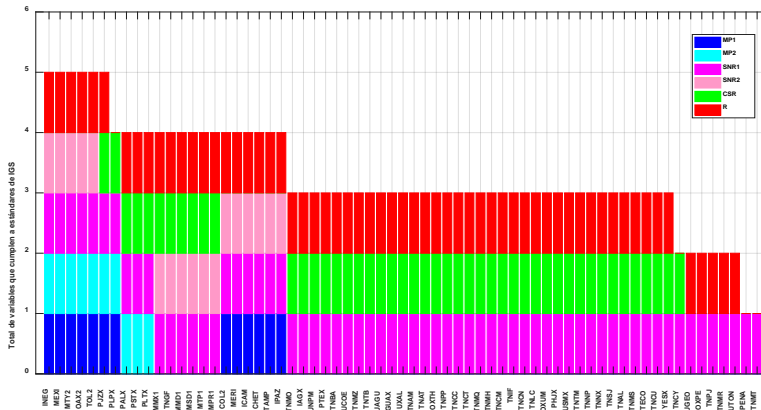


Figura 7. Variables que cumplen los estándares establecidos por el IGS. Se asignan los valores de: MP1 = 1; MP2 = 1, SNR1 = 1; SNR2 = 1; CSR = 1; R = 1, si las variables se cumplen.

Ninguna de las estaciones analizadas cumple al cien por ciento con los indicadores de calidad establecidos por el IGS. Sin embargo, la estación INEG tiene un grado adecuado de cumplimiento de los parámetros de calidad, siendo también la única estación que forma parte de la red IGS. Esta estación presenta el menor grado de efecto multitrayectoria de las 65 estaciones, con valores promedio de 0.14 m en MP1 y de 0.19 m para MP2, un porcentaje de observaciones registradas respecto de las esperadas del 99.25 % y señales fuertes en ambas bandas con SNR1 de 39.6 dBHz y SNR2 de 42.78 dBHz, como se puede observar en sus series temporales en la Figura 8.

El cambio del receptor TRIMBLE 5700 a finales de enero de 2011 al mismo tipo de receptor 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. El siguiente cambio en mayo de 2016 de receptor TRIMBLE 5700 a receptor LEICA GR10, antena TRM29659.00 NONE a LEIAR10 NONE y actualización de 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 siendo menores a 0.25 m, el porcentaje de observaciones registradas respecto de las esperadas oscila entre 98 y 100 %, y los saltos de ciclo disminuyen a menos de 1 por cada 1000 observaciones. La

última actualización a la versión de firmware 4.11/6.523 no muestra mejoras significativas ni afectaciones en el sistema.

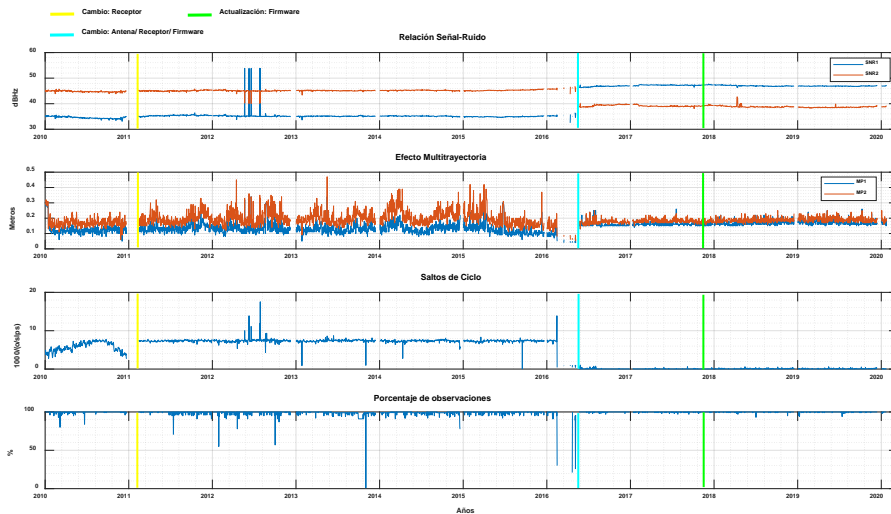


Figura 8. Series temporales de los índices de calidad para la estación INEG.

El adecuado comportamiento descrito en la estación INEG desde el año 2010, y mejorado en mayo del 2016, no sólo está en función del sistema (antena-receptor-firmware), sino también del entorno de la estación que ha presentado un bajo efecto multitrayectoria (Figura 9).



Figura 9. Monumentación y vista general de la estación INEG, (21/07/2011).

Discusión

De las 65 estaciones analizadas, 60 muestran un comportamiento directamente proporcional entre el efecto multitrayectoria y la relación señal-ruido, tal comportamiento puede estar relacionado con el cambio de hardware y actualización de firmware del sistema. Las estaciones que muestran un mejor desempeño en la recepción de la señal son aquellas en las que se han realizado cambios y actualizaciones, sin embargo, aún siguen mostrando un elevado efecto multitrayectoria a pesar de la cuidadosa selección de localización y uso de antenas tipo Choke Ring y Trimble Zephyr Geodetic.

Con base en los resultados expuestos por Vázquez et al. (2013) y los resultados de este estudio, las estaciones MEXI e INEG muestran continuidad desde el

año 1994 y 1998 respectivamente, así como, las estaciones PLPX y PJZX muestran estabilidad respecto al efecto multitrayectoria. En este sentido, se ha retomado el estudio desde el año 2010 a enero de 2020 agregando 3 índices de calidad a la evaluación (SNR, CSR y R), así como 12 estaciones adicionales de libre acceso, 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.

Conclusiones

En promedio global, 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. 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.

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 L2, es decir, una relación señal-ruido (SNR2) 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. Finalmente, sería adecuado realizar un análisis de impacto en el posicionamiento preciso para comparar la respuesta de las estaciones que presentan valores aceptables por el IGS respecto de las que no llegan a cumplirlos. Así mismo, se podría considerar un análisis geodinámico con las 61 estaciones GPS, en territorio mexicano, que superan el tiempo de operación mínimo recomendado de 2.5 años.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado bajo el apoyo institucional 03856 de la Dirección General de Desarrollo Internacional (DGDI-BUAP) y CVU: 429125 y 817394 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) en México. Un amplio agradecimiento a UNAVCO, CORS, IGS y SOPAC por poner a disposición todos los datos crudos, sin los cuales este trabajo no hubiera sido posible. A los revisores por sus comentarios y sugerencias que han mejorado de manera relevante la calidad de este manuscrito. *"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."*

References:

1. 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>
2. 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>
3. 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. https://minervaaccess.unimelb.edu.au/bitstream/handle/11343/33882/66238_00001133_01_8_o2_BrownKealyIpw_GPS.pdf?sequence=1&isAllowed=y
4. 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>
5. 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>
6. Foster, J. (2015). GPS and surveying. *Handbook of Sea-Level Research*, 157–170. <https://doi.org/10.1002/9781118452547.ch10>
7. 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>
8. 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>
9. 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>
 10. 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.
 11. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle, E. (2008). *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media.
 12. IGS. (2019). Current IGS Site Guidelines – IGS. <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202011433-Current-IGS-Site-Guidelines>
 13. 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>
 14. Leick, A., Rapoport, L., y Tatarnikov, D. (2015). *GPS Satellite Surveying*. John Wiley & Sons.
 15. 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>
 16. 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>
 17. 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>
 18. 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>
 19. 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>

20. Sonnette, L., Angelier, J., Villemin, T., & 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>
21. 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>
22. 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>
23. 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>
24. 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.
25. 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>
26. 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>
27. 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
28. 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>
29. 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>