

Estimando el retardo troposférico sobre estaciones GNSS de operación continua en Venezuela mediante observaciones satelitales GLONASS

REVISTA **MAPPING**
Vol. 26, 183, 36-46
mayo-junio 2017
ISSN: 1131-9100

Estimating tropospheric delay on Venezuelan GNSS continuously operating stations using GLONASS satellite observations

Víctor Cioce Pérez, Darwins Valecillos, Joel Alvarado,
Eugen Wildermann, Giovanni Royero Orozco

Resumen

Los datos GNSS registrados por estaciones de operación continua utilizadas para el posicionamiento geodésico también pueden destinarse al campo de la meteorología y climatología permitiendo la obtención del retardo zenital troposférico, relacionado con el vapor de agua en la atmosfera neutra. Dada la existencia en Venezuela de este tipo de arreglo geodésico fue posible determinar la componente no-hidroestática del retardo (ZWD) para un total de 16 estaciones dentro de un lapso comprendido por 64 semanas no consecutivas durante los años 2013 a 2015; principalmente fueron consideradas las observaciones GLONASS a fin de evaluar su representatividad respecto a patrones establecidos mediante datos GPS. Se aplicó la misma estrategia seguida por los Centros de Análisis SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas), apreciándose la consistencia entre resultados en el orden de ± 5 mm, conllevando a una caracterización del ZWD a corto y largo plazo. La principal limitante fue la carencia de datos continuos para todas las estaciones del país, sin embargo, los resultados permiten demostrar la viabilidad del uso independiente o bien combinado de los sistemas de posicionamiento satelital para este tipo de estudios a nivel nacional.

Abstract

GNSS data recorded by continuous operation stations used for geodetic positioning can be implemented in meteorology and climatology field through tropospheric delay estimation, it is related with water vapor in neutral atmosphere. Due to presence of this kind of geodetic network in Venezuela determination of non-hydrostatic component of delay (ZWD) was possible considering 16 stations and 64 weeks non-consecutive between 2013 and 2015; GLONASS observation were principal target in this research to evaluate its consistency respect to pattern given by GPS data. It was applied same processing strategy of SIRGAS (Geocentric Reference System for the Americas) Analysis Centers obtaining representative results for ZWD with agreement of ± 5 mm, it allowed its long- and short-term characterization. Lack of data for all national stations was a primary weakness, although results shows viability in using one or both satellite positioning system for this studies in country.

Palabras clave: **retardo troposférico, GLONASS, GPS, SIRGAS, Venezuela.**

Keywords: **tropospheric delay, GLONASS, GPS, SIRGAS, Venezuela.**

Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de la Universidad del Zulia (CPAGS-LUZ), Departamento de Geodesia Superior, Escuela de Ingeniería Geodésica, Facultad de Ingeniería, Maracaibo, Venezuela
vcioce@fing.luz.edu.ve

Recepción 07/06/2017
Aprobación 29/06/2017

1. INTRODUCCIÓN

El posicionamiento geodésico basado en GPS (Global Positioning System) ha representado durante las últimas décadas una de las mejores alternativas para adquirir datos e información georreferenciada destinada a una amplia diversidad de aplicaciones tecno-científicas abarcando otros campos más allá de las geociencias, considerándose indispensable en determinados casos. Hoy en día, ante la consolidación de GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) y el continuo despliegue de otros sistemas de navegación similares como Galileo o BeiDou, el término GNSS (Global Navigation Satellite Systems) resulta común, ya no como un concepto sino en la práctica. Se trata así de la principal herramienta para determinar coordenadas geodésicas precisas actualmente en uso.

Además de las aplicaciones conocidas en geodesia y afines, el GNSS puede emplearse para la observación atmosférica según demostraran Tralli y Lichten (1990), Bevis et al. (1992), abriendo el campo de la denominada Meteorología GNSS. Diversos estudios a nivel mundial demuestran la bondad de la técnica geodésica en esta área del conocimiento, aportando datos de gran interés para la predicción numérica del clima (NWP por sus siglas en inglés) y comprensión de la atmósfera terrestre, e.g. Guevora et al. (2016), Li et al. (2016), Bock y Melgar (2016), Notarpietro et al. (2012).

Al respecto, resulta fundamental estimar el retardo experimentado por la señal GNSS durante su paso por la atmósfera baja, ocasionado por la presencia de gases neutros y vapor de agua; para efectos de posicionamiento preciso, luego de la refracción ionosférica este retardo se considera una fuente de error potencial que debe ser reducida adecuadamente evitando así sesgos sobre las coordenadas geodésicas, en especial sobre la componente vertical (Sanz et al., 2013; Hofmann-Wellenhof et al., 2008). En el caso de los estudios atmosféricos, representa la principal variable a ser determinada.

Dada la disponibilidad plena de un sistema completamente independiente al GPS como GLONASS, la caracterización del retardo troposférico de su señal es objeto de investigación para el desarrollo de soluciones destinadas a mejorar la calidad del posicionamiento y el estudio atmosférico, resaltando los trabajos que en este sentido se han desarrollado en Latinoamérica y El Caribe, en donde SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) es quien define la infraestructura geodésica que brinda soporte a todo tipo de adquisición geoespacial en la región (Martínez et al., 2017).

Desde SIRGAS varias contribuciones han sido ofrecidas en cuanto a estudios troposféricos sustentados en el tratamiento de observaciones GNSS, aportes recientes fueron presentados por Cioce et al. (2016a), Mateo et al. (2016) y otras, sustentando la creación de un Centro de Análisis de

la Atmósfera Neutra (Cioce et al., 2016b). En Venezuela, las primeras experiencias relacionadas con la aplicación del GPS para derivar información sobre el retardo y vapor de agua troposférico se atribuyen a Cioce (2009), ampliadas por Montero (2013), Barroso y Estrada (2015), Leal (2016) y Espinoza (2017). No obstante, al existir en el país una red de operación continua capaz de hacer un rastreo GPS+GLONASS fue posible efectuar comparaciones a corto y largo plazo del retardo obtenido haciendo estimaciones solo-GLONASS respecto a las GPS y combinadas bajo las condiciones climáticas y meteorológicas propias del país, investigación inicial presentada por Valecillos y Alvarado (2016). Este trabajo describe entonces los principios, estrategia y alcance de la contrastación efectuada entre las diferentes estimaciones de la misma variable en cuestión.

2. EL RETARDO TROPOSFÉRICO Y SU ESTIMACIÓN CON GNSS

La región comprendida desde la superficie terrestre hasta los 40 km de altura, al carecer de partículas ionizadas o eléctricamente cargadas, se conoce como atmósfera neutra (Böhm y Schuh, 2013; Torge y Müller, 2012) concentrando la mayor parte de la masa atmosférica; es un medio no-dispersivo para señales de radio como las utilizadas por el GNSS ejerciendo la curvatura del rayo directo satélite-receptor y un incremento en el tiempo de propagación. El fenómeno ilustrado en la Figura 1, es conocido como retardo troposférico.

A diferencia de la refracción ionosférica, que puede ser tratada mediante combinaciones lineales de las frecuencias

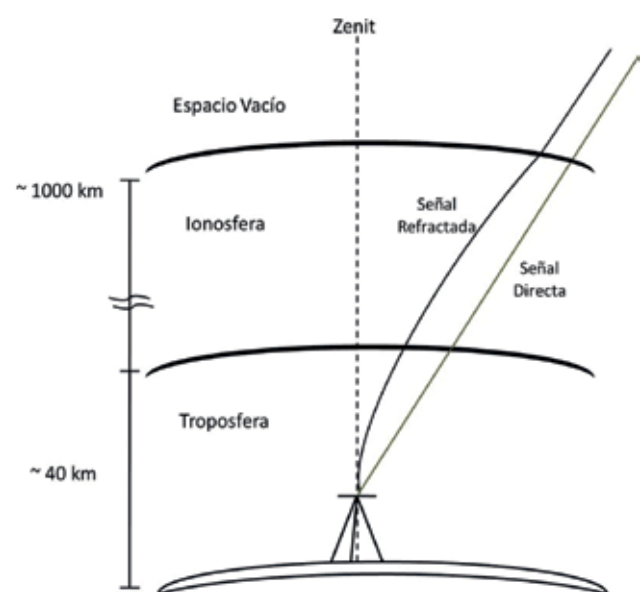


Figura 1. Refracción de la señal GNSS en la región troposférica de la atmósfera.

portadoras GNSS (Xu y Xu, 2016; Dach et al., 2015), el retardo troposférico merece una consideración especial siendo la principal fuente de error luego del efecto causado por la parte ionizada de la atmosfera, pues guarda correlación con otros sesgos como el introducido por las orbitas, deriva de los relojes y variación de centros de fase de las antenas, y de ahí su impacto directo sobre la componente vertical del posicionamiento.

En líneas generales, para cuantificar y reducir de las observaciones el retardo troposférico, es necesario determinar el índice de refracción n a lo largo de la trayectoria de la señal entre el satélite y el receptor, pero al ser su valor muy cercano a la unidad se recurre a la refractividad N como magnitud auxiliar (Böhm y Schuh, 2013). La compleja dinámica en la atmósfera neutra y su composición física, inducen una contribución hidrostática y otra no-hidroestática sobre la refractividad, asociada respectivamente a la presencia de gases neutros como el oxígeno, nitrógeno y argón, y al vapor de agua. El modelado matemático implícito establece así una relación dependiente entre el retardo y la refractividad haciendo su evaluación en la dirección del zenit como referencia.

De esta manera, una contribución de 90% sobre el denominado retardo zenital total (ZTD) se atribuye a su componente hidrostático (ZHD, zenith hydrostatic delay) cuantificado a nivel del mar en aproximadamente 7.7ns que equivalen a 2.3m (Leandro et al., 2008; Torge y Müller, 2012), este puede estimarse con alta precisión a partir de datos meteorológicos (presión atmosférica) registrados en la estación de observación o bien provenientes de modelos existentes según indican Petit y Luzum (2010). El 10% restante lo aporta la componente no-hidroestática (ZWD, zenith wet delay) directamente asociada con la distribución espacio-temporal del vapor de agua en la troposfera, no modelable con la calidad requerida por las técnicas geodésicas satelitales, por ende, el ZWD es una variable sujeta a estimación al igual que las coordenadas de la estación y parámetros de reloj del receptor (Steingenberg et al., 2009).

Se presenta en la Figura 2 y a manera de ejemplo respecto a lo planteado en el párrafo previo, la serie temporal del ZWD estimado entre 2009 y 2013 para la estación GPS Maracaibo (MARA) ubicada en la región occidental de Venezuela y perteneciente a la red SIRGAS de operación continua, la media del retardo no-hidroestático se ubicó en 0.32m, detectándose los cambios estacionales vinculados directamente con las épocas de sequía y de lluvia propias de la zona (Cioce et al., 2013).

Otro rasgo del retardo es que se hace mayor en la medida que se reduce el ángulo de elevación del satélite, llegando a ser de hasta 20 m para ángulos de 5° . En escenarios normales de observación GNSS la señal es recibida no solo desde el zenit sino también desde cualquier otro ángulo de elevación como consecuencia del movimiento orbital, situación

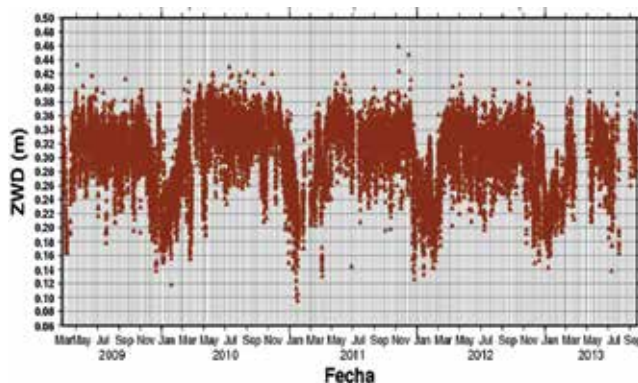


Figura 2. Retardo zenital no-hidroestático en la estación Maracaibo (MARA) entre 2009 y 2013.

que se ilustra en la Figura 3; esto supone la introducción de errores significativos sobre las determinaciones pues como se indicara previamente, el modelado del ZHD y la estimación del ZWD refieren al zenit. Con la introducción de una función de mapeo es posible proyectar o representar ambas componentes del retardo zenital hacia cualquier ángulo de elevación (Urquhart et al., 2013; Hofmann-Wellenhof et al., 2008), lo que conlleva a una caracterización efectiva del retardo total inclinado (STD, slant total delay).

Dichas estructuras matemáticas se distinguen por un conjunto de coeficientes que se definen clásicamente a partir de perfiles de refractividad basados en datos recolectados por radiosondas o bien considerando hipótesis sobre una atmosfera estándar; una amplia variedad de funciones de mapeo fueron diseñadas y algunas de ellas llegaron a ser adoptadas en los procesos de estimación geodésica satelital como por ejemplo las de Saastamoinen, Chao, Black, Davis, Ifadis, Herring, Niell y otras, una revisión detallada sobre las mismas es ofrecida por Schüler (2001), pudiendo catalogarlas como funciones de mapeo clásicas.

Actualmente, aquellas de tipo modernas se basan en modelos numéricos para la predicción del clima (NWM) describiendo el estado atmosférico en función de perfiles de temperatura, presión y humedad. Al respecto, destacan

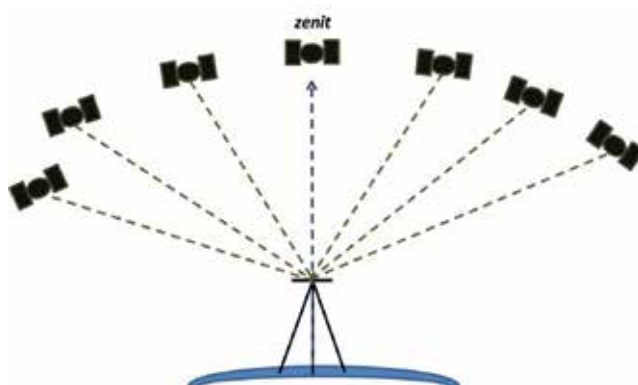


Figura 3. Variación en la dirección de recepción de la señal GNSS desde un mismo satélite.

los trabajos de Niell (2000), Böhm y Schuh (2004), Ghodousi-Fard (2009), Urquhart et al. (2013) entre otros. Petit y Luzum (2010) indican que la función de mapeo adoptada como estándar para el tratamiento y reducción de efectos troposféricos sobre observaciones geodésicas satelitales es la VMF1 (Vienna Mapping Function 1), desarrollada por Böhm y Schuh (2004) y mejorada según Böhm et al. (2006).

Cabe destacar que además de componentes del retardo troposférico en dirección al zenit, también intervienen gradientes horizontales cuya determinación es necesaria para una reducción confiable de su efecto sobre las observables. De esta manera, una expresión general que permite el apropiado tratamiento y reseñada por Dach et al. (2015) es:

$$STD = ZHD \times mf_H + ZWD \times mf_{NH} + (G_N \cos Az + G_E \sin Az) \times mf_G$$

donde mf_H y mf_{NH} corresponden a las funciones de mapeo para las componentes hidrostática y no-hidrostática del retardo respectivamente, G_N y G_E son sus gradientes horizontales en las direcciones Norte y Este con mf_G siendo su correspondiente función de mapeo; el argumento Az corresponde al azimut desde el cual se recibe la señal, sin embargo, cuando se asume una atmósfera simétrica el término es despreciado.

Como ha sido mencionado previamente, el retardo de la señal GNSS durante su paso por la atmósfera neutra es un factor crítico cuando se trata de determinar posición precisa lo que también aplica cuando la técnica geodésica se dirige a estudios meteorológicos y climáticos, de ahí que su cuantificación y reducción debe hacerse de forma rigurosa disponiendo de observaciones altamente precisas como las recolectadas por las redes de operación continua cuya extensión puede ser local, regional, continental o global. Las estrategias de procesamiento también resultan de interés por cuanto estas deben garantizar un tratamiento efectivo tanto de las observaciones como de los sesgos que las afectan y que eventualmente pudieran desmejorar el cálculo del retardo.

3. CALCULANDO EL RETARDO TROPOSFÉRICO CON DATOS GLONASS

Al ser las señales GPS y GLONASS similares entre sí, pues ambas son radiofrecuencias situadas en la misma región del espectro electromagnético, el efecto causado por la atmósfera neutra se manifiesta, determina y se reduce bajo las mismas consideraciones que se adopten en una estrategia de procesamiento particular que considere observaciones solo-GPS, es decir, los mismos modelos aplican.

Para efectos del presente trabajo se consideró pertinente realizar estimaciones del retardo (prestando especial interés en la componente no-hidrostática dada su alta variabilidad e interés para fines meteorológicos y climáticos) utilizando observaciones GLONASS registradas bajo distintas condiciones atmosféricas existentes en Venezuela, en tal sentido, aprovechando la existencia de la Red de Estaciones de Monitoreo Satelital GNSS (REMOS), concebida y operada por el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB) para proveer control geodésico continuo en base a registros multiconstelación dentro del territorio nacional, se seleccionaron 16 de 32 estaciones cuyos datos se encontraron disponibles solo para periodos particulares de los años 2013, 2014 y 2015. La ubicación relativa de las estaciones se muestra en la Figura 4.

Estas observaciones GNSS fueron procesadas rigurosamente de forma individual para cada sistema de navegación (i.e. solo-GPS, solo-GLONASS) y combinada (i.e. GPS+GLONASS) siguiendo los estándares y convenciones del IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) e IGS (International GNSS Service) adoptados por SIRGAS para su estrategia de cálculo y ajuste semanal de la red SIRGAS-CON (SIRGAS, 2017), esta representa la densificación del ITRF (International Terrestrial Reference Frame) en Latinoamérica y El Caribe.

Dicha estrategia se basa en el modo de estimación relativa GNSS en el que las dobles-diferencias constituyen la ecuación de observación fundamental para la consecuente determinación de coordenadas geocéntricas cartesianas y valores del retardo troposférico. Fue necesario incluir estaciones SIRGAS-CON según se muestra en la Figura 5, con capacidad de rastreo GLONASS para conformar una red geodésica extensa con vértices lejanos a la región de estudio (territorio venezolano), pues tratándose de un arreglo con

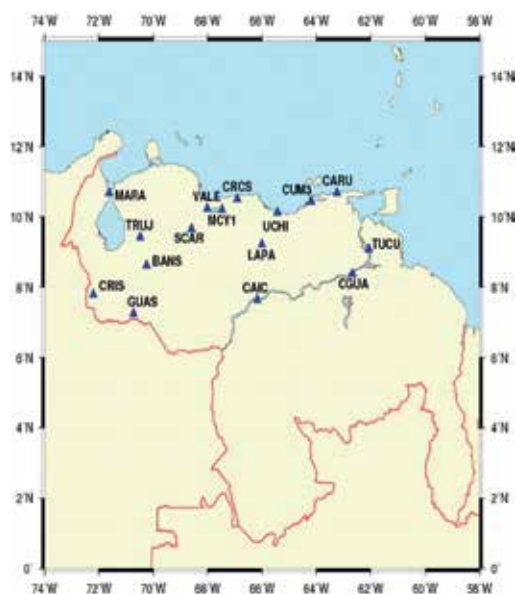


Figura 4. Ubicación relativa de las estaciones REMOS.

cobertura regional (nacional) es importante minimizar posibles deformaciones manifestadas en términos de rotaciones o traslaciones en los puntos de interés respecto al marco de referencia durante la fase de ajuste de la red sabiendo que las mayores distorsiones tienden a acumularse principalmente hacia sus extremos (Cioce, 2015; Mateo y Mackern, 2012).

De esta manera, el procesamiento y ajuste de las observaciones GNSS registradas por el total de 35 estaciones (red SIRGAS-REMOS para efectos del presente trabajo) abarcó un periodo de 64 semanas desde la 1754 hasta la 1846 (dadas en calendario GPS), del cual 10 corresponden al año 2013, 33 al 2014 y 21 al año 2015. Es necesario indicar que las semanas de observación no fueron consecutivas ante la carencia de datos continuos para las estaciones REMOS lo que representó la principal debilidad en este estudio.

El Bernese GNSS Software v5.2 (Dach et al., 2015) fue utilizado como plataforma de procesamiento, generando soluciones tanto diarias como semanales semilibres de la red asumiendo conocidas las orbitas y parámetros de reloj de los satélites así como los parámetros de orientación terrestre, productos estos ofrecidos por el IGS (Dow et al., 2009). Por su parte se introdujeron coordenadas a priori de las estaciones de la red con una incertidumbre de $\pm 5\text{cm}$ conduciendo a la resolución de líneas-base altamente precisas, lo suficiente como para definir la geometría de la red a partir del ajuste semilibre. Efectos de carga oceánica fueron reducidos aplicando el modelo FES2004 (Letellier, 2004) dado por Bos y Scherneck (2011) y aquellos asociados con la componente mareal de la carga atmosférica se corrigieron según el modelo propuesto por van Dam et al. (2010); el tratamiento de otros efectos sistemáticos y demás detalles propios del procesamiento pueden ser consultados en SIRGAS (2017).

Es importante señalar que la estimación del retardo troposférico guarda estrecha relación con la estimación de coordenadas (es un subproducto del cálculo GNSS) y por tal motivo es de gran importancia efectuar un procesamiento

riguroso con el que sea posible lograr resultados de alta calidad en términos de la red como un todo, por tal razón para cada sesión procesada, tres controles de calidad fueron implementados, a saber: (1) la variación absoluta de las coordenadas estimadas respecto a las a priori, resultando no mayor a 5cm lo que permite inferir sobre posibles distorsiones en la geometría de la red; (2) el valor del factor de varianza a posteriori y de la relación χ^2/DOF (DOF: grados de libertad), ubicándose en una media de 1.6mm y 0.6 respectivamente, ambos reflejan la bondad del ajuste de las observaciones; (3) los RMS de la comparación individual entre soluciones diarias respecto a la semanal para cada componente resultando menores a 15mm para la posición horizontal y 30mm para la vertical.

Con la VMF1, ofrecida en forma de mallas globales de 2.0° en latitud por 2.5° en longitud por la Technische Universität Wien en Austria (GGOS Atmosphere, 2014), se obtuvieron las componentes hidrostáticas y no-hidrostáticas del retardo zenital troposférico a intervalos de 2 horas para cada día de observación. Al ser una función de mapeo altamente sofisticada que hace uso de un trazado de rayos a través del NWM del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), la presión atmosférica cuenta con una incertidumbre que asegura en el ZHD la confiabilidad a nivel milimétrico en su modelado, y dadas las características y controles propios del procesamiento GNSS, el ZWD fue estimado con una precisión formal media de $\pm 3\text{mm}$ para todas las estaciones.

4. EVALUACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL RETARDO TROPOSFÉRICO GLONASS

El procesamiento riguroso de las observaciones GLONASS registradas por la red de operación continua venezolana, posibilitó una caracterización a corto y largo plazo del retardo troposférico (componente no-hidrostática) para las locaciones de interés tratando de aprovechar al máximo los periodos de disponibilidad de los datos; ante la consistencia ya comprobada de las estimaciones GPS, estas se asumieron como un patrón de comparación mientras que aquellas provenientes de la combinación GPS+GLONASS sirvieron para evaluar el aporte de ambos sistemas de observación satelital sobre el cálculo del retardo.

De esta manera, la cuantificación del ZWD sobre una base semanal, mensual y anual vino dada para el lapso comprendido entre los años 2013 a 2015, observándose tanto la evolución como la tendencia de esta variable

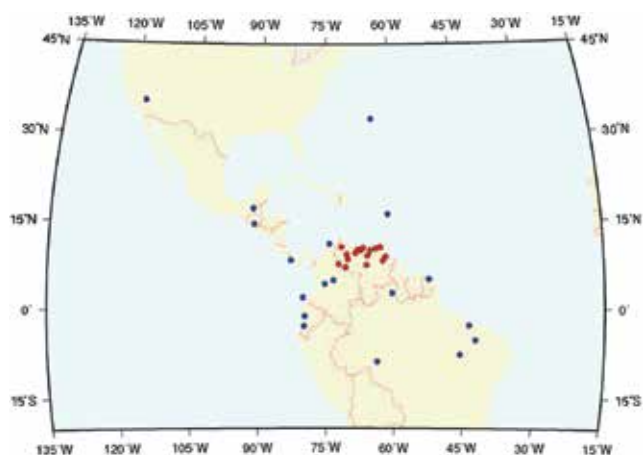


Figura 5. Red SIRGAS-REMOS: estaciones SIRGAS-CON en azul, estaciones REMOS en rojo.

implícita a la dinámica de la atmosfera neutra a través de la confección de series temporales. Para la representación a largo plazo, las series fueron generadas de manera individual para un total de 16 estaciones, en las Figuras 6 y 7 se presentan las series del ZWD para dos de ellas, Guasualito (GUAS) y San Carlos (SCAR) ubicadas en la región de Los Llanos, zona que se caracteriza por sus marcados regímenes de sequía y de inundación según la estación del año.

Obviando las evidentes discontinuidades en las series, se aprecia la consistencia en la tendencia y valor del ZWD derivado a partir de la estimación GLONASS respecto a la GPS (Tabla 1), de manera que en términos generales ambos sistemas resultan similarmente sensibles ante aquellos factores que afectan a estas observaciones satelitales y que inciden sobre la ocurrencia y determinación del retardo troposférico. En este sentido, también resalta su representatividad espacial, encontrándose ambas estaciones separadas aproximadamente 350km, lo que permite inferir sobre las similitudes en las condiciones atmosféricas y climáticas propias de una misma zona (Los Llanos venezolanos).

La caracterización a largo plazo se sustentó además en series de menor extensión temporal formadas de acuerdo a las posibilidades dadas por la intermitencia de los datos REMOS, en consecuencia, se logró la obtención del ZWD

para cuatro meses continuos en 2013, ocho meses en 2014 y cinco meses en 2015. Como demostración, se presenta en la Figura 8 la serie correspondiente a la estación Caracas (CRCS), y en la Tabla 2 se resumen los valores característicos del retardo no-hidrostatístico para las estaciones de la red venezolana GNSS notándose las discrepancias entre sus valores máximos, mínimos y medios.

Por su parte, los rasgos descritos por el ZWD luego de su estimación con GLONASS para lapsos no mayores a una semana permitieron su caracterización a corto plazo. Para efectos de comparación se han considerado soluciones solo-GPS y GPS+GLONASS por cuanto la cantidad de datos resultó suficiente para analizar su aporte con mayor detalle. Las Figuras 9 y 10 corresponden al retardo estimado sobre las estaciones CRCS y GUAS respectivamente, cada cálculo independiente refleja una variabilidad similar con discrepancias máximas de hasta $\pm 2\text{cm}$.

Durante la semana 1834, CRCS mostró valores medios del ZWD de 0.14m mientras que GUAS de 0.21m según la estimación GLONASS, los resultados para las estimaciones GPS y GPS+GLONASS se presentan en la Tabla 3. El resto de las estaciones REMOS con datos suficientes como para realizar esta comparación, también mostró diferencias en un mismo orden de magnitud.

Un control adicional de estos resultados, vino dado al evaluar las soluciones correspondientes para dos estaciones de la red SIRGAS-CON incluidas en las etapas de procesamiento y ajuste, ajenas a la zona de influencia

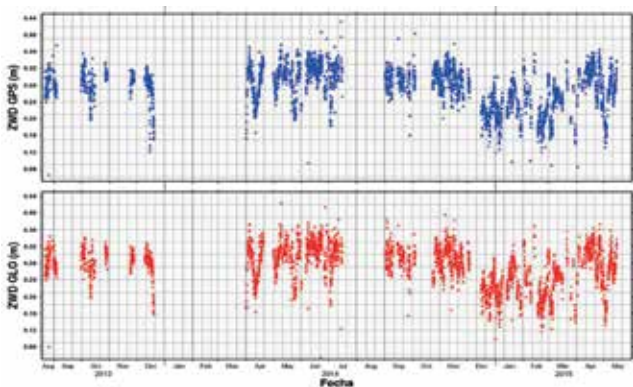


Figura 6. ZWD de la estación GUAS (Guasualito, Edo. Apure), 2013 a 2015.

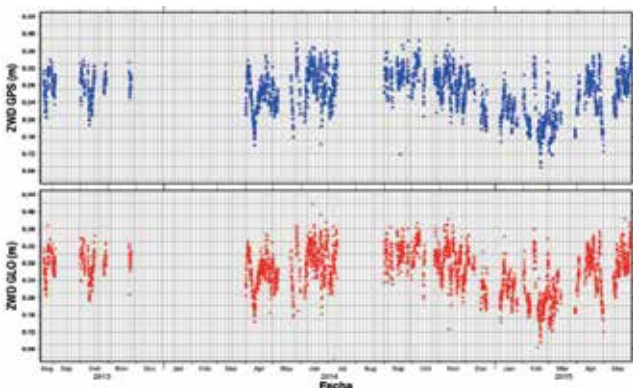


Figura 7. ZWD de la estación SCAR (San Carlos, Edo. Cojedes), 2013 a 2015.

Estación	Estimación	ZWD		
		Máx. (m)	Mín. (m)	Media (m)
GUAS	GPS	0.43	0.07	0.25
	GLONASS	0.42	0.05	0.24
SCAR	GPS	0.39	0.09	0.24
	GLONASS	0.42	0.07	0.25

Tabla 1. Valores del ZWD para las estaciones GUAS y SCAR entre 2013 y 2015.

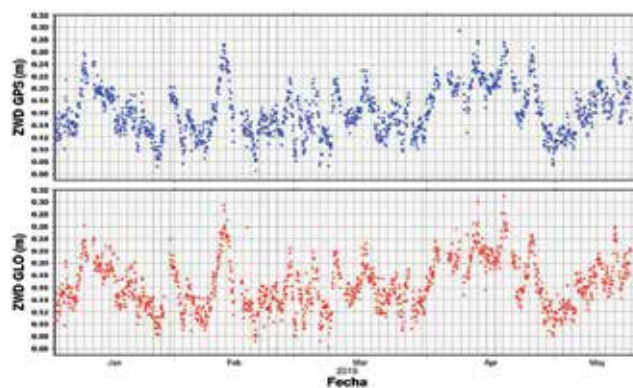


Figura 8. ZWD de la estación Caracas (CRCS), semanas 1826 a 1846 (04.01.2015 al 30.05.2015).

Estimación	ZWD GPS			ZWD GLONASS		
	Máx. (m)	Mín. (m)	Media (m)	Máx. (m)	Mín. (m)	Media (m)
2015						
CRCS (Caracas)	0.30	0.06	0.16	0.31	0.06	0.19
TUCU (Tucupita)	0.40	0.12	0.26	0.40	0.15	0.26
UCHI (Boca de Uchire)	0.38	0.11	0.25	0.39	0.10	0.25
CRIS (San Cristóbal)	0.28	0.11	0.19	0.27	0.10	0.19
2014						
VALE (Valencia)	0.36	0.12	0.24	0.33	0.12	0.24
MARA (Maracaibo)	0.40	0.16	0.28	0.40	0.12	0.27
TRUJ (Trujillo)	0.35	0.13	0.26	0.35	0.12	0.22
CUM3 (Cumaná)	0.42	0.11	0.30	0.43	0.11	0.30
LAPA (Valle La Pascua)	0.37	0.17	0.29	0.40	0.14	0.29
CARU (Carúpano)	0.40	0.13	0.29	0.39	0.13	0.29
MCY1 (Turmero)	0.35	0.15	0.27	0.36	0.15	0.26
CAIC (Caicara del Orinoco)	0.42	0.19	0.29	0.40	0.13	0.29
2013						
BANS (Barinas)	0.36	0.12	0.24	0.12	0.36	0.24
CGUA (Ciudad Guayana)	0.38	0.16	0.27	0.41	0.14	0.28

Tabla 2. Valores característicos del ZWD para las estaciones REMOS.

de las estaciones GNSS venezolanas; estas fueron SAMA (Santa Marta, Colombia) localizada en la región de menor deformación geométrica de la red, i.e. cercana a la REMOS, y GOLD (Goldstone, EE.UU.) que es la más alejada y donde han de concentrarse las mayores deformaciones en caso de que las hubiere. Debe recordarse que en la estimación por dobles-diferencias, los efectos sistemáticos tienden a propagarse, de manera que esta evaluación se orientó a la detección de posibles sesgos sobre el ZWD asociados al cálculo de la red. La discrepancia máxima entre soluciones del retardo no-hidroestático (ver Figuras 11 y 12) fue ± 2 cm para SAMA y ± 3 cm para GOLD estando en el mismo orden que las correspondientes a las estaciones REMOS.

La tendencia descrita por el ZWD durante un mismo periodo, pero en años sucesivos, también fue valorada considerando las respectivas estimaciones para las estaciones REMOS CRCS y SCAR. Las series son presentadas en las Figuras 13 y 14, los valores referenciales en la Tabla 4.

Para ambas estaciones puede notarse que el retardo no-hidroestático mantiene, en líneas generales, la misma tendencia para los periodos descritos (i.e. las oscilaciones propias del ZWD se mantienen similares). La variación media en el retardo GLONASS para SCAR en los dos periodos fue de 0.02m y para CRCS de 0.17m. Destaca la variación en el nivel de las series, que descartando la presencia de efectos sistemáticos, pudieran ser atribui-

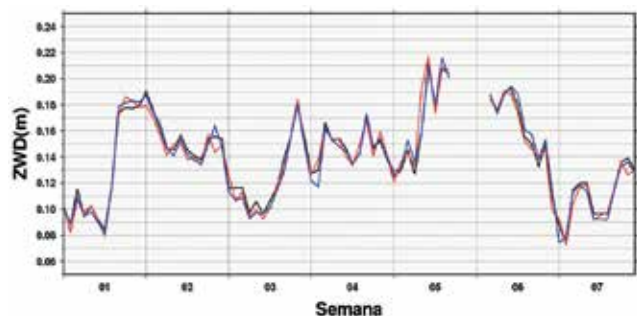


Figura 9. ZWD GPS (azul), GLONASS (rojo), GPS+GLONASS (negro) en la estación CRCS para la semana 1834 (01.03.2015 a 07.03.2015).

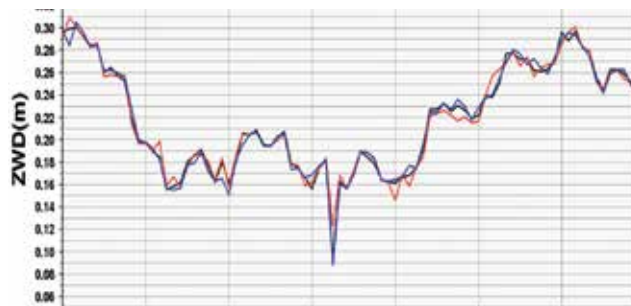


Figura 10. Solución del ZWD GPS (azul), GLONASS (rojo), GPS+GLONASS (negro) de la estación GUAS para la semana 1834 (01.03.15 a 07.03.15).

Estación	Estimación	ZWD		
		Máx. (m)	Mín. (m)	Media (m)
CRCS	GLONASS	0.22	0.07	0.14
	GPS	0.22	0.07	0.14
	GPS+GLONASS	0.21	0.07	0.14
GUAS	GLONASS	0.31	0.12	0.21
	GPS	0.30	0.09	0.20
	GPS+GLONASS	0.30	0.10	0.20

Tabla 3. ZWD para CRCS y GUAS estimado con GLONASS, GPS y GPS+GLONASS, semana 1834.

das a variaciones en la concentración del vapor de agua troposférico de una época a otra, no obstante, un análisis más concluyente es imperante lo que amerita series de tiempo mucho más largas.

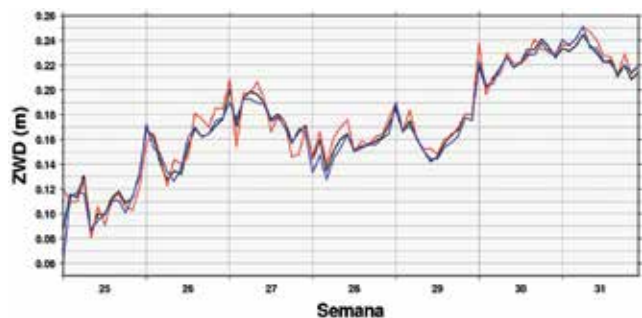


Figura 11. Solución del ZWD GPS (azul) GLONASS (rojo) GPS+GLONASS (negro) de la semana 1755 para la estación GOLD (SIRGAS).

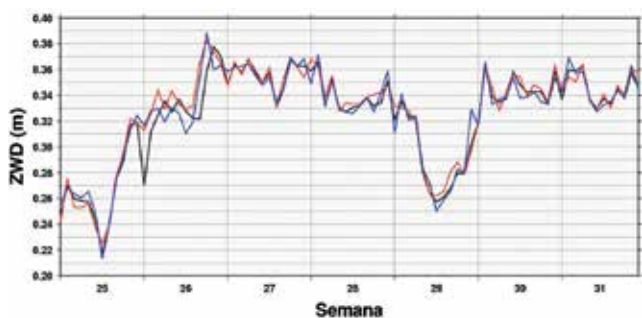


Figura 12. Solución del ZWD (azul) GLONASS (rojo) GPS+GLONASS (negro) de la semana 1755 para la estación SAMA (SIRGAS).

5. APORTES DE LA CARACTERIZACIÓN DEL RETARDO TROPOSFÉRICO EN VENEZUELA

Es un hecho que la técnica satelital GNSS es reconocida e implementada como una potente y efectiva herramienta con fines meteorológicos y climáticos, esto gracias a la gran cantidad de experiencias documentadas a nivel mundial; en buena medida, es la existencia de densas redes de observación continua, establecidas inicialmente con fines geodésicos, lo que ha permitido aportar datos con alta resolución espacial y temporal.

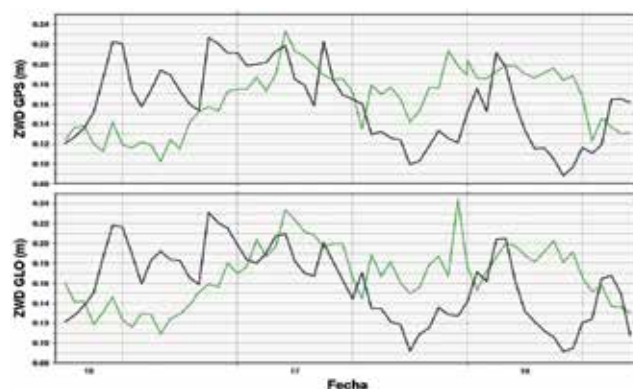


Figura 13. Comparación del ZWD para la semana 1771 (15 al 21 de diciembre de 2013) en verde y 1823 (14 al 20 de diciembre de 2014) en negro para CRCS.

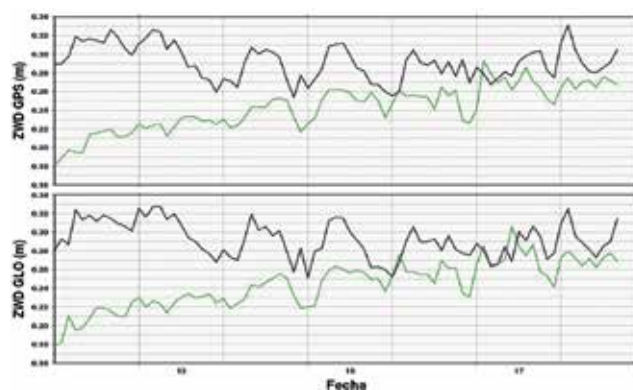


Figura 14. Comparación del ZWD para la semana 1788 (13 al 19 de abril de 2014) en verde y 1840 (12 al 18 de abril de 2015) en negro para la estación SCAR

Estación	Año	ZWD GPS			ZWD GLONASS		
		Máx. (m)	Mín. (m)	Media (m)	Máx. (m)	Mín. (m)	Media (m)
CRCS	2013	0.23	0.10	0.16	0.25	0.11	0.18
	2014	0.23	0.09	0.16	0.23	0.11	0.17
SCAR	2014	0.28	0.18	0.23	0.31	0.21	0.26
	2015	0.33	0.25	0.29	0.30	0.26	0.28

Tabla 4. Comparación inter-anual del ZWD para las estaciones CRCS y SCAR.

En el caso venezolano, aplicando la metodología soportada por observaciones independientes GPS y GLONASS aquí descrita, se logró por primera vez y en la medida de las posibilidades, obtener información de interés acerca del retardo troposférico en territorio nacional, y en consecuencia, del vapor de agua presente en esta región de la atmosfera, lo que sirve como base para el desarrollo de la meteorología GNSS en el país cuya condición tropical implica un interés para estudios asociados con la compresión del clima y fenómenos meteorológicos en la región. Se trata además, de un valioso aporte de la infraestructura geodésica nacional, si se cuenta con estaciones de funcionamiento continuo plenamente operativas.

Uno de los posibles aportes luego de haber caracterizado el retardo troposférico en Venezuela, una vez convertido a vapor de agua precipitable, es la generación de información que permita evaluar la ocurrencia del conocido fenómeno de El Niño, responsable de las fuertes sequías que ha sufrido el país en los últimos años. Esto se conecta indudablemente con estudios sobre efectos del cambio climático y su impacto a nivel nacional pues se trata de un gas de efecto invernadero con un rol fundamental en procesos termodinámicos de la atmosfera.

En todo caso, series de tiempo multianuales son indispensables, así por ejemplo si se contara con registros del ZWD desde 2006 (año en el que comenzó a instalarse la red continua nacional) hasta el presente, un análisis respecto a la situación asociada con los periodos de lluvia y sequía pudiera efectuarse con la rigurosidad necesaria.

Al respecto, una demostración es presentada tomando el caso de la estación CRCS; su serie de tiempo del ZWD comprendida entre 2009 a 2013 (ver Figura 15) fue obtenida por el CPAGS-LUZ empleando observaciones GPS (Cioce et al., 2013) y claramente puede apreciarse la variabilidad estacional de tal variable. La interrupción de la serie es debida a las razones expuestas por Cioce et al. (2015) y fue posible darle continuidad a partir de octubre de 2014 aprovechando las estimaciones realizadas para este trabajo.

Dicha continuidad, empleando el ZWD GLONASS, es representativa pues directamente se observa cómo el retardo entre octubre de 2014 a abril de 2015 sigue la misma tendencia que en el caso del retardo GPS para años anteriores. Además, nótese la transición entre los periodos de lluvia y sequía característicos del país y los correspondientes valores del retardo: en el período lluvioso que va de mayo a octubre el ZWD se mantuvo en valores más altos en relación al período de sequía que se extiende de noviembre a abril mostrando retardos menores. Con esto puede demostrarse la ventaja que implica contar con una red GNSS plenamente operativa quedando abierta la posibilidad de desarrollar diversas investigaciones vinculadas al área de la meteorología y climatología.

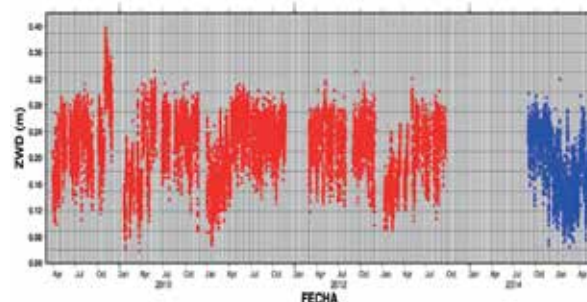


Figura 15. Serie de tiempo continuada de 2009 a 2015 para Caracas, solución CPAGS-LUZ (rojo) y solución SIRGAS-REMOS (azul)

6. COMENTARIOS FINALES

La aplicación de la técnica geodésica satelital GPS ha venido siendo desarrollada en áreas específicas de Venezuela y por primera vez se extiende el estudio al resto del país gracias al despliegue de la red nacional de operación continua, cuyas estaciones son capaces del rastreo combinado GPS y GLONASS. En este sentido, se evaluó la potencialidad de las observaciones GLONASS en cuanto a la estimación del retardo troposférico no-hidroestático sobre un total de 16 estaciones.

El ZWD GLONASS fue determinado con una calidad interna de $\pm 3\text{mm}$ aplicando una rigurosa estrategia de procesamiento en la que se incorporaron observaciones realizadas por la red SIRGAS de operación continua. En líneas generales, las estimaciones fueron consistentes con aquellas propiamente GPS y GPS+GLONASS con discrepancias máximas entre sí de $\pm 2\text{cm}$, lo que demuestra en cierta forma la efectividad de este tipo de observaciones no solo en la estimación de posición sino además de parámetros atmosféricos.

Con estos resultados se llevó a cabo la caracterización del ZWD a largo y corto plazo considerando aquellas estaciones de la red venezolana que contaron con datos lo suficientemente prolongados, de ahí que las series de tiempo confeccionadas refieran a lapsos específicos. No solo se evaluó la consistencia entre soluciones GLONASS y GPS, siempre en el orden de $\pm 5\text{mm}$, sino también la representatividad temporal y la dependiente del sitio, ofreciéndose así valores medios del ZWD para las estaciones REMOS.

Partiendo de estos resultados, surge la posibilidad inmediata de desarrollar investigaciones pertinentes que por un lado contribuyan a un refinamiento de los mismos, y con aquellas aplicaciones en las áreas de meteorología y climatología, especialmente si se considera la relación existente entre el retardo troposférico y el vapor de agua precipitable. En definitiva, se ha contribuido a fortalecer sinergias entre la geodesia como disciplina integral básica para las geociencias y la meteorología al ofrecer resultados provenientes de la técnica GLONASS.

REFERENCIAS

- Barroso, A. y Estrada K. (2015). Implementación del modelo climático ERA-Interim para la estimación de parámetros troposféricos a partir de observaciones GPS. Trabajo Especial de Grado, LUZ, Maracaibo, Venezuela.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T., Rocken, C., Anthes, R., Ware, R. (1992). GPS Meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, 97, D14, 15787-15801.
- Bock, Y. y Melgar, D. (2016). Physical applications of GPS geodesy: a review. *Reports on Progress in Physics*, 79. doi: 10.1088/0034-4885/79/10/106801
- Böhm, J. y Schuh, H. (2004). Vienna Mapping Functions in VLBI analyses. *Geophysical Research Letters*, 31(1). doi: 10.1029/2003GL018984
- Böhm, J. y Schuh, H., Eds. (2013). *Atmospheric effects in Space Geodesy*. Berlin, Alemania: Springer.
- Böhm, J., Werl, B., Schuh, H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of Geophysical Research*, 111. doi: 10.1029/2005JB003629
- Bos, M. y Scherneck, H. (2011). *Ocean Tide Loading Provider*. Recuperado de <http://holt.oso.chalmers.se/loading>
- Cioce, V. (2009). *Aplicación de observaciones GPS para la cuantificación de vapor de agua troposférico en la ciudad de Maracaibo*. Trabajo de Grado, LUZ, Maracaibo, Venezuela.
- Cioce, V. (2015). *Vinculación de redes GNSS de operación continua al marco de referencia SIRGAS*. Trabajo de Ascenso. LUZ, Maracaibo, Venezuela.
- Cioce, V., Alves, S., Gende, M. (2016b). *Estado actual de la red SIRGAS-CON: Reporte del Grupo de Trabajo I*. Recuperado de <http://www.sirgas.org>
- Cioce, V., Espinoza, D., Rincón, M.F., Wildermann, E., Royero, G., Sánchez, L. (2016a). Estimación y seguimiento del retardo troposférico GPS empleando posicionamiento de punto preciso. Recuperado de <http://www.sirgas.org>
- Cioce, V., Espinoza, D., Wildermann, E., Royero, G., Ceballos, R. (2013). *Actividades del Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de la Universidad del Zulia (CPAGS-LUZ), período 2012-2013*. Recuperado de <http://www.sirgas.org>
- Cioce, V., Wildermann, E., Royero, G., Rincón, M.F., Morales, R., Reinoza, C., Audemard, F., Sánchez, L. (2015). *Una alternativa para el mantenimiento del marco de referencia SIRGAS en Venezuela*. Recuperado de <http://www.sirgas.org>
- Dach, R., Lutz, S., Fridez, P., Walser, P., Eds. (2015). *User manual of the Bernese GPS Software version 5.2*. Berna, Suiza: Bern Open Publishing. doi: 10.7892/boris.72297
- Dow, J., Neilan, R., Rizos, C. (2009). The International GNSS Service (IGS) in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *Journal of Geodesy*, 83, 191-198. doi: 10.1007/s00190-008-0300-3
- Espinoza, D. (2017). *Cálculo del retardo troposférico mediante la implementación rigurosa del posicionamiento de punto preciso*. Trabajo Especial de Grado, LUZ, Maracaibo, Venezuela.
- Ghoddousi-Fard, R. (2009). *Modelling tropospheric gradients and parameters from NWP models: effects on GPS estimates*. UNB Technical Report No. 264, Fredericton, Canadá.
- Guerova, G., Jones, J., Douša, J., Dick, G., de Haan, S., Pottiaux, E., Bock, O., Pacione, R., Elgered, G., Vedel, H., Bender, M. (2016). Review of the state of the art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9, 5385-5406.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E. (2008). *GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and more*. Viena, Suiza: Springer.
- Leal, S. (2016). *Determinación de los valores de vapor de agua atmosférico mediante el tratamiento de productos de la plataforma de percepción remota MODIS*. Trabajo Especial de Grado, LUZ, Maracaibo, Venezuela.
- Leandro, R., Langley, R., Santos, M. (2008). UNB3m_pack: a neutral atmosphere delay package for radiometric space techniques. *GPS Solutions*, 12, 65-70.
- Letellier, T. (2004). *Etude des ondes de marée sur les plateaux continentaux*. Tesis Doctoral. Ecole Doctorale des Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace. Toulouse, Francia.
- Li, X., Dick, G., Lu, C., Ge, M., Nilsson, T., Ning, T., Wickert, J., Schuh, H. (2016). Multi-GNSS Meteorology: real-time retrieving of atmospheric water vapor from BeiDou, Galileo, GLONASS, and GPS observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. doi: 10.1109/TGRS.2015.2438395
- Martínez, W., Mackern, M.V., Cioce, V., Correia de Freitas, S.R., Pérez Rodino, R. (2017). Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas Reporte 2016. Boletín Informativo No. 21. Recuperado de <http://www.sirgas.org>
- Mateo, M.L. y Mackern, M.V. (2012). Adjustment methodology in a regional densification of a terrestrial reference frame. En: F. Boukour y A. Rivenq (Eds.), *New approach of indoor and outdoor localization systems* (27-44). Rijeka, Croacia: InTech.
- Mateo, M.L., Mackern, M.V., Calori, A., Camisay, M.F., Robin, A. (2016). Combinación y análisis de los parámetros

- troposféricos de la red SIRGAS-CON. Recuperado de <http://www.sirgas.org>
- Montero, M. (2013). Factibilidad para el desarrollo de estudios troposféricos basados en la técnica satelital GPS en Venezuela. Trabajo Especial de Grado, LUZ, Maracaibo, Venezuela.
- Niell A. (2000). Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS. *Earth, Planets and Space*, 52(10), 699-702.
- Notarpietro, R., Cucca, M., Bonafoni, S. (2012). GNSS Signals: a powerful source for atmosphere and Earth's surface monitoring. En: Y. Chemin (Ed.), *Remote Sensing of Planet Earth* (171-200). Rijeka, Croacia: Intech.
- Petit, G. y Luzum, B., Eds. (2010). *IERS Conventions 2010, IERS Technical Note 36*. Frankfurt a.M., Alemania: Verlag des Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.
- Sanz, J., Zornoza, J., Hernández, M. (2013). *GNSS data processing, Vol. I: fundamentals and algorithms*. Leiden, Holanda: European Space Agency (ESA) Communications.
- Schüler, T. (2001). *On ground-based GPS tropospheric delay estimation*. Tesis Doctoral. Universität der Bundeswehr. München, Alemania.
- SIRGAS (2017). *Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, Guía para los Centros de Análisis SIRGAS*. Recuperado de <http://www.sirgas.org>
- Steingenberg, P., Böhm, J., Tesmer, V. (2009). Comparison of GMF/GPT with VMF1/ECMWF and implications for atmospheric loading. *Journal of Geodesy*, 83(10), 943-951.
- Torge, W. y Müller, J. (2012). *Geodesy*, 4th Ed. Berlin, Alemania: De Gruyter.
- Tralli, D., y Lichten, S. (1990). Stochastic estimation of tropospheric path delays in Global Positioning System geodetic measurements. *Bulletin Géodésique*, 64, 127-152. doi: 10.1007/BF02520642
- Urquhart, L., Nievinski, F., Santos, M. (2013). Assessment of troposphere mapping functions using three-dimensional ray-tracing. *GPS Solutions*. doi: 10.1007/s10291-013-0334-8
- Valecillos, D. y Alvarado, J. (2016). *Caracterización del retardo troposférico en estaciones de la red geodésica nacional de operación continua mediante observaciones GLONASS*. Trabajo Especial de Grado, LUZ, Maracaibo, Venezuela.
- van Dam, T. y Ray, R. (2010). *S1 and S2 atmospheric tide loading effects for geodetic applications*. Recuperado de <http://geophy.uni.lu/ggfc-atmosphere/tide-loading-calculator.html>
- Xu, G. y Xu, Y. (2016). *GPS: theory, algorithms and applications*, 3rd Ed. Berlin, Alemania: Springer.

Sobre los autores

Víctor Cioce Pérez

Ingeniero Geodesta con Maestría en Ingeniería Ambiental egresado de la Universidad del Zulia (LUZ), Maracaibo, Venezuela. Profesor Asociado adscrito al Departamento de Geodesia Superior de la Escuela de Ingeniería Geodésica de LUZ (EIG-LUZ), responsable de la Unidad Curricular Geodesia Satelital. Coordinador del Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de LUZ (CPAGS-LUZ) y Presidente del Grupo I (Sistema de Referencia) de SIRGAS. Investigador en áreas relacionadas con los sistemas y marcos de referencia geodésicos, fundamentos y aplicaciones del GNSS, estudios atmosféricos basados en técnicas geodésicas.

Giovanni Royero

Ingeniero Geodesta (LUZ) con Doctorado en Ciencias Gerenciales (Universidad Rafael Belloso Chacín, URBE), Maracaibo, Venezuela. Profesor Titular adscrito al Departamento de Geoinformática de la EIG-LUZ. Director de la División de Investigación de la Facultad de Ingeniería de

LUZ. Investigador en áreas relacionadas con el sensoramiento remoto y la cartográfica matemática.

Darwins Valecillos

Agrimensor e Ingeniero Geodesta egresado de la Universidad del Zulia (LUZ), Maracaibo, Venezuela. Asistente de Investigación del Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de LUZ (CPAGS-LUZ).

Joel Alvarado

Agrimensor e Ingeniero Geodesta egresado de la Universidad del Zulia (LUZ), Maracaibo, Venezuela. Asistente de Investigación del Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de LUZ (CPAGS-LUZ).

Eugen Wildermann

Ingeniero Geodesta y Doctor en Ingeniería egresado de la Universidad de Hannover, Alemania. Profesor Emérito del Departamento de Geodesia Superior de la EIG-LUZ. Investigador en áreas relacionadas con los fundamentos y aplicaciones de observaciones gravimétricas, determinación del geoide y geodinámica.