

APLICACIONES ATMOSFÉRICAS DE GNSS EN COLOMBIA

GNSS ATMOSPHERIC APPLICATIONS IN COLOMBIA

D. Hernández Deckers¹, H. Mora Páez², L. Cardona²

¹Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Sede_Bogotá

²Servicio Geológico Colombiano, Dirección de Geoamenazas, Grupo Investigaciones Geodésicas Espaciales, Bogotá

Hernández Deckers D., Mora Páez H., Cardona L., (2018): *aplicaciones atmosféricas de GNSS en Colombia*.- GEOLOGIA COLOMBIANA, Vol. 41. Bogotá, Colombia. pp. 55-60

Manuscrito recibido: 10 de diciembre de 2018; aceptado: 29 de abril de 2019

Resumen

La tecnología GNSS (Global Navigation Satellite System) proporciona una aplicación atmosférica muy específica: la estimación, con muy alta resolución temporal, de la columna de vapor de agua en la atmósfera sobre una estación receptora. Se presentan aquí de forma muy compacta los principios básicos en los cuales se fundamenta esta tecnología, que tiene grandes ventajas frente a otros métodos de medición del vapor de agua. En particular su alta resolución temporal, el hecho que funcione bajo cualquier condición atmosférica, y su bajo costo. En Colombia existe ya una red bastante densa de estaciones GNSS, pero aún no se utiliza para aplicaciones atmosféricas operacionalmente. A través de un caso de lluvia extrema ocurrido en la Sabana de Bogotá, se ilustra en este artículo el gran potencial que tiene esta tecnología con fines de investigación en convección atmosférica tropical.

Palabras claves: Meteorología Tecnología, GNSS, vapor de agua atmosférico, convección atmosférica.

Abstract

GNSS (Global Navigation Satellite System) technology provides a very specific atmospheric application: the estimation with very high temporal resolution of the column of water vapor in the atmosphere over a receiving station. The basic principles on which this technology is based are presented here in a very compact way, which has great advantages over other methods of measuring water vapor. In particular, its high temporal resolution, the fact that it works under any atmospheric condition, and its low cost. In Colombia there is already a fairly dense network of GNSS stations, but it is not yet used for atmospheric applications operationally. Through a case of extreme rain that occurred in the Sabana de Bogotá, the great potential of this technology for research in tropical atmospheric convection is illustrated in this article.

Keywords: GNSS technology, meteorology, atmospheric water vapor, atmospheric convection.

1. INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones atmosféricas de la tecnología GNSS (Global Navigation Satellite System) son un claro ejemplo de un caso en el cual los avances en un campo -en este caso la geodesia espacial- proporcionan un claro beneficio a otro campo -en este caso las Ciencias Atmosféricas-. La tecnología GNSS fue desarrollada para fines de posicionamiento a partir

del envío y recepción de ondas electromagnéticas entre varios satélites y receptores dispuestos en tierra. Actualmente los dispositivos de posicionamiento global se han convertido en un dispositivo al cual casi toda la población tiene acceso. En geodesia se utilizan antenas y receptores de alta precisión que se fijan a la corteza terrestre con el fin de monitorear su dinámica. Teniendo en cuenta que el orden de magnitud de los movimientos de la corteza terrestre es de milímetros o centímetros

por año, la precisión que deben tener estos instrumentos es mucho mayor que la precisión en la posición que ofrece un teléfono celular, por ejemplo.

El fundamento sobre el cual está construida la tecnología GNSS, se basa en el tiempo que tarda una señal en llegar de un satélite a un receptor en tierra. A partir de una correcta sincronización de los relojes del satélite y el receptor, de la triangulación de señales de distintos satélites, y del conocimiento de la posición de los satélites, es posible determinar la posición del receptor. Sin embargo, como el medio a través del cual viaja la señal es la atmósfera terrestre, cuya composición no es totalmente homogénea ni en el tiempo ni en el espacio, el tiempo que demora la señal en llegar al receptor sufre un retraso que depende de diversas variables.

Para lograr la precisión necesaria en aplicaciones geodésicas, es necesario conocer estos retrasos y corregirlos. Es allí donde surgen las aplicaciones atmosféricas de GNSS, ya que una de las fuentes de retrasos está relacionada con el contenido de vapor de agua en la atmósfera. Por lo general los retrasos se expresan en unidades de distancia, ya que al final lo que interesa no es el tiempo que tarda la señal en llegar, sino la distancia que recorre. Un retraso de Δt segundos, corresponde a un “error” en la distancia que recorre la señal de $c\Delta t$ metros, donde c es la velocidad de la luz.

Existen dos tipos de retrasos en la atmósfera terrestre: Uno ocurre en la ionosfera debido a su contenido de iones que interactúan con las ondas electromagnéticas (del orden de 2–50 m); y otro debido a la atmósfera neutra, es decir a una mezcla de gases secos y vapor de agua (del orden de 2–20 m). La ionosfera es un medio dispersivo, es decir, el retraso que sufre una onda electromagnética al pasar por ella depende de la longitud de onda. Comparando los retrasos correspondientes a distintas longitudes de onda es posible deducir los retrasos individuales y así estudiar el contenido de iones. Sin embargo, para las ciencias atmosféricas relacionadas con el tiempo y el clima, el retraso de mayor interés es el que se debe a la atmósfera neutra, ya que éste ocurre principalmente en la troposfera, donde ocurren la mayoría de los fenómenos atmosféricos de interés. Las técnicas para entender y calcular estos retrasos han sido desarrolladas desde finales de la década de los 80 del siglo pasado. Bevis et al. (1992) y Bevis et al. (1994) presentan un resumen detallado de esta teoría, a partir de la cual se hace la descripción a continuación.

El retraso troposférico se divide en dos componentes: una *hidrostática* (ZHD , por sus siglas en inglés), debida a la componente no-dipolar de la atmósfera, y una *húmeda* (ZWD , por sus siglas en inglés), que se debe a la contribución del momento dipolar del vapor de agua

presente en la atmósfera. El retraso total troposférico (ZTD , por sus siglas en inglés) está dado entonces por la suma de estos dos, y es posible calcularlo a partir de los retrasos de señales provenientes de distintos satélites que se encuentran en distintas posiciones y por lo tanto a distintas distancias y ángulos de inclinación respecto al receptor. Por otro lado, el retraso hidrostático (ZHD) se puede estimar a partir de la presión atmosférica en superficie p_s , y una función $f(\theta, h)$ que describe la variación de la aceleración gravitacional en función de la latitud θ y la altitud h :

$$ZHD = (2.2768 \pm 0.0024) p_s f(\theta, h) \quad (1)$$

El retraso húmedo se obtiene entonces de la diferencia entre el retraso total y el retraso hidrostático:

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (2)$$

Una vez se tiene este retraso (que se expresa como una distancia), se puede calcular la columna de vapor de agua o vapor de agua precipitable (PWV por sus siglas en inglés), como se conoce comúnmente en meteorología) a partir de otra relación empírica:

$$PWV = \frac{10^6}{(k_3 T_m + k'_2) R_v} ZWD \quad (3)$$

donde:

k_3 y k'_2 son constantes empíricas,

R_v es la constante específica de los gases para el vapor de agua, y

T_m es la temperatura media de la capa atmosférica.

Esta temperatura media se puede aproximar a partir de una relación lineal que ha sido construida a partir de datos de muchas estaciones alrededor del planeta:

$$T_m = 70.2 + 0.72 T_s, \quad (4)$$

donde

T_s es la temperatura del aire en superficie. Por lo tanto, si se conoce la presión atmosférica y la temperatura en superficie, es posible obtener un estimativo de la columna de vapor de agua.

El vapor de agua es el componente atmosférico con mayor variabilidad. Su concentración varía entre 0% y 5%, a diferencia de los demás componentes de la atmósfera, cuya concentración es mucho menos variable. Esto se debe a que el vapor de agua está estrechamente ligado a los procesos meteorológicos y por lo tanto comprender su distribución espacio-temporal y su dinámica es muy importante para la meteorología. Además, el vapor de agua es un gas de

efecto invernadero supremamente potente, lo cual lo hace también muy importante para estudios climáticos (Wallace & Hobbs, 2006). Por ejemplo, la “retro alimentación del vapor de agua” es el proceso por el cual un aumento inicial en la concentración de CO₂ de la atmósfera ocasiona un calentamiento que, debido a la relación de Clausius-Clapeyron¹, permite que haya mayor concentración de vapor de agua en la atmósfera, lo cual amplifica significativamente el calentamiento (e.g., Dessler & Sherwood, 2009). Por otro lado, el vapor de agua es uno de los componentes del ciclo hidrológico más importantes. Si se condensara todo el vapor de agua atmosférico en el planeta, se tendría una capa de 25 mm de agua cubriendo toda la superficie del planeta. Pero, por otro lado, la precipitación anual global es cerca de 1000 mm/año, lo cual quiere decir que el vapor de agua atmosférico se renueva alrededor de 40 veces al año. Es decir, una vez cada 8–15 días en promedio (Wallace & Hobbs, 2006). Esto ilustra la dinámica tan activa del campo de vapor de agua en la atmósfera, y por lo tanto la importancia de su monitoreo en todas las escalas.

No es fácil monitorear el campo de vapor de agua en la atmósfera, ya que éste varía espacial y temporalmente en distintas escalas espacio-temporales siguiendo los procesos y patrones meteorológicos. Los radio-sondeos son uno de los métodos con los cuales se puede estimar la cantidad de vapor de agua en la columna atmosférica sobre un punto. Sin embargo, éstos generalmente sólo se llevan a cabo en los aeropuertos más importantes en el mundo, y únicamente una o dos veces al día. Su resolución temporal es por lo tanto muy pobre, y su resolución espacial horizontal también.

Otra tecnología que permite medir el vapor de agua atmosférico es a través de radiómetros de microondas. Sin embargo, el costo de esta tecnología es muy alto, lo cual hace que en muy pocos lugares sea posible utilizarla. Además, esta tecnología no permite obtener datos de vapor de agua en condiciones nubladas, lo cual hace perder gran parte de la utilidad de la misma. Es allí donde la tecnología GNSS resulta de gran utilidad, ya que permite una resolución temporal muy alta (del orden de unos pocos minutos), y gracias a los avances en geodesia ya existen muchas redes de estaciones GNSS en el mundo entero. Además, permite tomar datos en condiciones nubladas, a diferencia de la radiometría de microondas.

Las desventajas de la tecnología GNSS para medir la columna de vapor de agua son esencialmente dos: primero, el dato que se obtiene es la integral de todo

el vapor de agua en una columna de aire, por lo tanto, la resolución vertical es baja y segundo, la resolución horizontal dependerá de la red de estaciones existentes. La primera limitación se puede compensar si existe una red de estaciones muy densa, ya que a través de la tomografía GNSS, es posible procesar la información para generar mapas en tres dimensiones del campo de vapor de agua (e.g., Rohm, 2013).

2. APLICACIONES ATMOSFÉRICAS DE GNSS

Es claro que el vapor de agua está estrechamente ligado a la formación de nubes y así mismo a la ocurrencia de lluvias torrenciales, tormentas eléctricas, y en general eventos extremos de tipo meteorológico. Por tanto, el monitoreo constante y efectivo del vapor de agua permite comprender mejor estos fenómenos, e incluso pronosticarlos mejor. Por ejemplo, el campo de vapor de agua obtenido con GNSS puede ser asimilado por modelos de pronóstico del tiempo, lo cual mejora significativamente los resultados (e.g., Guerova et al. 2006). Claro está, hacer esto no es tarea fácil, y requiere de una red de estaciones densa y lo suficientemente extensa como para que el proceso de asimilación sea posible. De hecho, para estudios climáticos, también es importante el monitoreo del vapor de agua atmosférico. Este es el valor agregado de la tecnología GNSS, porque proporciona una medida más del vapor de agua adicional a las que se obtienen con radiosondas, imágenes de satélite, etc., lo que es crucial a la hora de evaluar tendencias a largo plazo a nivel global del vapor de agua.

Otra aplicación que está tomando fuerza en los últimos años es en la investigación de la convección tropical. La convección atmosférica es uno de los procesos más importantes a nivel global, toda vez que es responsable en gran parte del transporte vertical de humedad y energía a través de la atmósfera, siendo uno de los procesos claves del ciclo hidrológico. Es además un proceso atmosférico que ocurre en escalas espaciales y temporales relativamente pequeñas, y por lo tanto necesita ser parametrizado en los modelos de simulación globales y regionales.

El estudio de la convección atmosférica es en la actualidad, uno de los campos más activos de la investigación en ciencias atmosféricas, y cuyas incertidumbres son muy relevantes para el estudio del sistema climático terrestre. Uno de los posibles caminos para estudiar ciertos aspectos fundamentales de la convección atmosférica es a través de la información que proporciona la tecnología GNSS. Adams, et al. (2013). obtuvo información acerca de las escalas de tiempo características de la convección profunda en la región de Manaus, Brasil. A partir de datos de una sola estación GNSS encontró que el desarrollo de la

¹ La cantidad de vapor de agua que puede contener un determinado volumen de aire seco aumenta aproximadamente de forma exponencial con la temperatura.

convección profunda en esta región se caracteriza por una convergencia débil de alrededor de 8 horas, seguida por una convergencia intensa de alrededor de 4 horas.

Toda esta información es supremamente útil para los modelos climáticos, que deben ser capaces de reproducir estos resultados. Sin embargo, la convección atmosférica es influenciada por muchísimos factores que varían significativamente de un lugar a otro, y por lo tanto es importante llevar a cabo este tipo de estudios en distintos lugares del planeta.

3. EL CASO DE COLOMBIA

El Grupo de Investigaciones Geodésicas Espaciales-GIGE del Servicio Geológico Colombiano ha logrado mediante el proyecto GeoRED (GeoRED 2018), establecer una excelente red de estaciones GNSS en Colombia para aplicaciones geodésicas. Sin embargo, hasta el momento no se han utilizado los datos de esta red para aplicaciones atmosféricas más allá de algunos ejercicios aislados. En particular, Sverko (2012), hizo un primer análisis de datos de PWV de una estación GNSS y los comparó con los valores obtenidos por medio de radiosondas, encontrando una buena concordancia. Sin embargo, más allá de este trabajo exploratorio, en el país no se ha desarrollado este campo. En esta sección se presenta un ejemplo que ilustra la utilidad y

relevancia de esta información en el país. Para esto es importante tener en cuenta que Colombia se encuentra en una latitud muy cercana al ecuador, lo cual hace que los procesos meteorológicos responsables de la precipitación sean muy distintos a los que se presentan en latitudes medias y altas.

Cerca al ecuador la fuerza de Coriolis es muy pequeña, razón por la cual no se presentan sistemas de alta y baja presión, frentes atmosféricos, etc, que son justamente los sistemas meteorológicos de escala sinóptica que facilitan los pronósticos del tiempo en latitudes medias y altas. El régimen de precipitación en Colombia, obedece principalmente a la migración de la zona de convergencia intertropical, que en términos generales no es más que una zona muy activa de convección donde convergen los vientos alisios. A esto se le suman ingredientes muy complejos de topografía, variabilidades intraestacional e interanual, además de tendencias a largo plazo como el cambio climático. Para ilustrar la relevancia de la comprensión de la evolución del campo de vapor de agua en Colombia, no es necesario ir tan lejos. Basta con observar el comportamiento de las diferentes variables meteorológicas en una estación. La Figura 1, muestra los valores promedio a lo largo del día para cada mes del año de la presión atmosférica, temperatura del aire, humedad relativa, y la columna de vapor de agua. Ésta última se obtuvo de la estación GPS permanente de operación

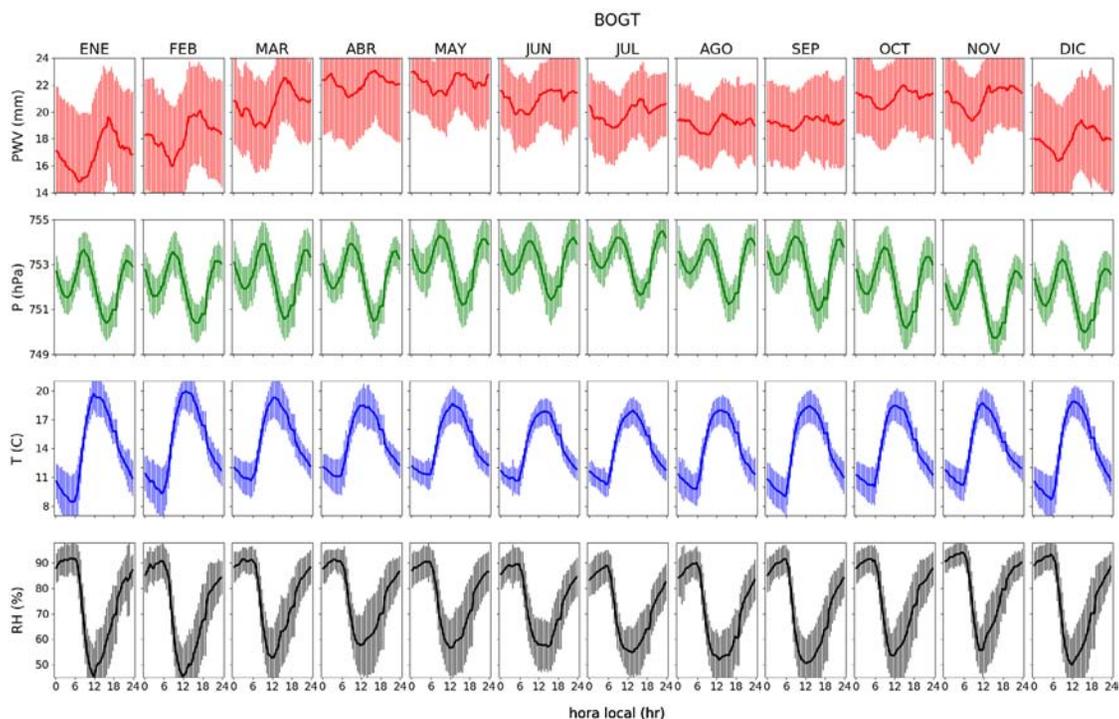


Figura 1: Series de tiempo de la evolución diurna promedio de cada mes del año para la columna de vapor de agua (PWV), presión atmosférica en superficie (P), temperatura del aire en superficie (T) y humedad relativa en superficie (RH). Los promedios se calcularon a partir de los datos disponibles en SUOMINET (2018) para la estación BOGT entre noviembre 14 de 2013 y diciembre 25 de 2017. Los datos de PWV corresponden a la estación BOGT del Servicio Geológico Colombiano, y las demás variables a los datos de la estación meteorológica del aeropuerto El Dorado de Bogotá.

continúa denominada BOGT de GeoRED, instalada conjuntamente con la agencia espacial norteamericana NASA, mientras que las demás variables son tomadas de la estación meteorológica del Aeropuerto Internacional Nuevo Dorado de Bogotá. Las barras de error indican una desviación estándar de los datos en cada sentido, lo cual da una idea de la variabilidad observada en cada una de ellas a lo largo del período utilizado (2013-2017). Lo que muestra esta figura es que las variables meteorológicas estándar no presentan mayor variabilidad ni en escala anual, ni tampoco alrededor del promedio para cada mes. En cambio, el vapor de agua presenta tanto variabilidad a lo largo del año, como también alrededor del promedio climatológico. Esto sugiere que en esta región la columna de vapor de agua contiene una gran cantidad de información sobre los procesos atmosféricos que generan el estado del tiempo, a diferencia de las demás variables.

La Figura 2, muestra un caso particular que ocurrió el 14 de mayo de 2017. El lado izquierdo de la figura, muestra la precipitación acumulada para ese día según los datos del satélite TRMM, sobre el área de la Sabana de Bogotá. El lado derecho de la figura muestra la serie de tiempo de la columna de vapor de agua (PWV) calculado para 4 estaciones GNSS adicionales a BOGT, igualmente de GeoRED del Servicio Geológico Colombiano en esta área. El cálculo de PWV se hizo a partir del retraso total (ZTD) procesado por el GIGE bajo el marco del proyecto GeoRED, y datos de presión atmosférica y temperatura del aire en superficie de la estación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ubicada en Tibaitatá (TIB, ver ubicación en la Figura 2). Las lluvias de este día fueron tan intensas sobre la ciudad de Bogotá que causaron

muchas inundaciones, entre ellas la del conocido como el “deprimido” de la calle 94. Las series de tiempo de PWV muestran claramente una convergencia de vapor de agua que inicia alrededor del mediodía, generando un pico muy marcado alrededor de las 3 pm, justo cuando se presentó la lluvia más intensa. Un estudio más detallado acerca de eventos como este en la Sabana de Bogotá, permitiría lograr una mejor comprensión de la dinámica atmosférica responsable de las lluvias más intensas en la región. Así, la tecnología GNSS sería una de las herramientas a utilizar, y sin lugar a dudas, claramente una muy útil.

4. CONCLUSIONES

La tecnología GNSS permite estimar con muy alta resolución temporal la columna de vapor de agua sobre una estación debido al retraso que ésta ocasiona en la señal proveniente del satélite. Gracias a las correcciones de este retraso que se hacen en geodesia espacial, es posible hacer entonces mediciones muy útiles para el campo de las ciencias atmosféricas, que se pueden utilizar para mejorar los pronósticos de los modelos de simulación atmosféricos, o para lograr una mejor comprensión de procesos atmosféricos tales como la convección. Las aplicaciones atmosféricas de GNSS aún no han sido aprovechadas aún en Colombia, a pesar del potencial que tienen para monitorear y estudiar la convección tropical, que es el proceso atmosférico más relevante desde un punto de vista meteorológico en latitudes bajas. Se presenta aquí un caso de lluvia intensa en la Sabana de Bogotá que demuestra la utilidad de esta tecnología y su potencial para estudios de convección atmosférica en el país.

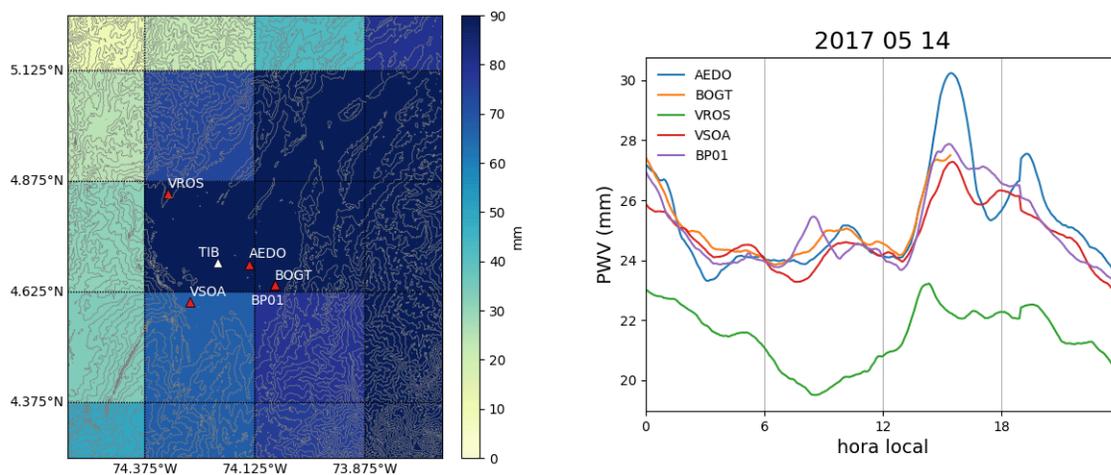


Figura 2: Izquierda: Precipitación acumulada para el día 14 de mayo de 2017 a lo largo de la Sabana de Bogotá y sus alrededores a partir de los datos del satélite TRMM (Huffman et al., 2010); en rojo se indica la localización de las estaciones GNSS, y en blanco la localización de la estación meteorológica de IDEAM (blanco) utilizada para el cálculo de PWV; las líneas de contorno indican la elevación en intervalos de 250 m. La precipitación total para el 14 de mayo de 2017 promediada en el área de coordenadas 4,375°N—5,125°N y 74,375°W—73,875°W es de 84,5 mm. Derecha: series de tiempo de PWV del 14 de mayo de 2017 para las cinco estaciones GNSS del Servicio Geológico Colombiano que se muestran en el panel izquierdo (BP01 y BOGT tienen prácticamente las mismas coordenadas).

5. REFERENCIAS

- ADAMS, D. K., S. I. GUTMAN, K. L. HOLUB AND D. S. PEREIRA** (2013): *GNSS observations of deep convective time scales in the Amazon*. Geophysical Research Letters (40) 2818–2823. DOI: 10.1002/grl.50573
- BEVIS M., S. BUSINGER, T. A. HERRING, C. ROCKEN, R. A. ANTHES Y R. H. WARE** (1992): *GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System*, Journal of Geophysical Research, (97) 15,787–15,801. DOI: 10.1029/92JD01517
- BEVIS M., S. BUSINGER AND S. CHISWELL** (1994): *GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water*, Journal of Applied Meteorology, (33) 379–386. DOI:10.1175/1520-0450(1994)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2
- DESSLER A. Y S. C. SHERWOOD** (2009): *A Matter of Humidity*, Science (323) 1020–1021. DOI: 10.1126/science.1171264
- GUEROVA G., J.-M. BETTEMS, E. BROCKMANN AND CH. MATZLER** (2006) *Assimilation of COST 716 Near Real Time GPS data in the non hydrostatic limited area model used at MeteoSwiss*. Meteorology and Atmospheric Physics, (91) 149–164. DOI: 10.1007/s00703-005-0110-6
- GEORED** (2018): <https://geored2.sgc.gov.co/>
- HUFFMAN, G.J., R.F. ADLER, D.T. BOLVIN, E.J. NELKIN**, 2010: *The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA)*. Chapter 1 in Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology, F. Hossain and M. Gebremichael, Eds. Springer Verlag, ISBN: 9789048129140, 3–22. DOI: 10.1007/978-90-481-2915-7
- MORA-PÁEZ H., J. R. PELÁEZ-GAVIRIA, H. DIEDERIX, O. BOHÓRQUEZ-OROZCO, L. CARDONA-PIEDRAHITA, Y. CORCHUELO-CUERVO, J. RAMÍREZ-CADENA, AND F. DÍAZ-MILA**, (2018), *Space Geodesy Infrastructure in Colombia for Geodynamics Research*, Seismological Research Letter 89 (2A), 446-451, doi: 10.1785/0220170185
- ROHM, W.** (2013): *The ground GNSS tomography - unconstrained approach*. Advances in Space Research, 51, 501–513. DOI: 10.1016/j.asr.2012.09.021
- SUOMINET** (2018): <http://www.suominet.ucar.edu/data.html>
- ŠVERKO, M.** (2012) *Método de estimación del vapor de agua precipitable, por detección remoto, mediante el sistema de posicionamiento global (GPS) con aplicación en el mejoramiento del pronóstico del estado del tiempo en la ciudad de Bogotá, D.C.* tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia.
- WALLACE, J. M. Y P. V. HOBBS** (2006) *Atmospheric Science (Second Edition)*, Academic Press, 504 p.