

Aprovechamiento de la infraestructura observacional SIRGAS-CON en Venezuela para el seguimiento del vapor de agua troposférico

Cioce V., Hoyer M., Wildermann E., Royero G., Espinosa R., Méndez T.

Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de la Universidad del Zulia
Escuela de Ingeniería Geodésica de la Facultad de Ingeniería
Maracaibo, Venezuela
vciocce@fing.luz.edu.ve

RESUMEN

El uso de las técnicas satelitales de observación geodésica para la adquisición de datos y generación de información que permita el seguimiento e interpretación del Cambio Global, ha mostrado interesantes tendencias que apuntan a consolidarlas como herramientas de primera línea para dicho fin, de manera que ya no solamente permiten resolver problemas propios de las geociencias, lo que va de la mano con la redefinición de la Geodesia como ciencia de servicios. En este sentido, desde hace varios años el GPS ha venido siendo aplicado para la cuantificación del vapor de agua en la troposfera, principal gas de efecto invernadero y uno de los responsables por la refracción que sufre la señal satelital durante su recorrido; los resultados en comparación con los métodos estándar, son altamente satisfactorios tal y como lo reportan numerosos autores a nivel mundial. Recientemente en Venezuela, el *Centro de Procesamiento GNSS SIRGAS de la Universidad del Zulia* (CPAGS-LUZ), comenzó la estimación del agua en su fase gaseosa presente en la atmósfera neutra sobre la estación SIRGAS-REGVEN-REMOS Maracaibo (MARA), partiendo de las observaciones GPS y meteorológicas sobre ella realizadas de manera continua, y de una metodología de cálculo diferencial sustentada por el *Bernese GPS Software v 5.0* como plataforma de procesamiento en su modalidad BPE. Tanto el vapor de agua integrado como el retardo zenital húmedo, como principales productos derivados, están siendo monitorizados con la intención de favorecer el desarrollo de investigaciones en el ámbito geodésico y atmosférico. El trabajo describe entonces, las primeras experiencias venezolanas en ésta materia.

Palabras clave: SIRGAS, vapor de agua, CPAGS-LUZ, GPS, Cambio Climático

INTRODUCCIÓN

El funcionamiento en la región de una extensa red de estaciones de observación continua GNSS no solo permite la generación de productos de interés para las Geociencias, otras áreas propias de las Ciencias de la Atmósfera, se han visto beneficiadas al contar con una plataforma observacional con la que es posible un estudio continuo en tiempo y espacio, de los fenómenos que ocurren en la ionosfera y troposfera, lo que ha permitido ofrecer respuestas ante los efectos negativos que ambas capas atmosféricas ejercen sobre el posicionamiento satelital, pero por otra parte, también es posible su aprovechamiento para la investigación y seguimiento del Cambio Global, enmarcada en la redefinición de la Geodesia como ciencia de servicios.

Particularmente en Venezuela, un estudio de la atmósfera basándose en observaciones satelitales GNSS, puede ser desarrollado de manera efectiva una vez que se disponga de una infraestructura geodésica completamente consolidada, materializada actualmente por la **Red de Estaciones de Monitoreo Satelital GPS (REMOS)**, que constituye la densificación de la red SIRGAS-CON en el país. La intención es investigar sobre el comportamiento de la atmósfera en el territorio nacional desde la perspectiva de la Geodesia, aportando información útil para las Geociencias y otras disciplinas.

En este sentido se ha venido avanzando, los primeros pasos en ésta materia vienen dados por una investigación con la cual fue posible definir las bases que permitan inicialmente, demostrar la viabilidad de una estimación periódica de soluciones sobre el retardo zenital troposférico y el vapor de agua integrado mediante observaciones GPS de alta precisión, tomando la estación SIRGAS-REGVEN-REMOS Maracaibo (MARA) como piloto. La descripción de las pruebas y resultados, será tratada en el siguiente trabajo.

GENERALIDADES SOBRE EL ESTUDIO ATMOSFÉRICO VIA GNSS

Desde hace aproximadamente dos décadas, el estudio de la atmósfera mediante observaciones geodésicas satelitales ha venido desarrollándose, lo que ha dado paso a numerosas investigaciones orientadas a la compresión y representación de la ionosfera y troposfera como principales capas atmosféricas, siendo Bevis *et al.* (1992) sus precursores, aplicando el GPS. Diversos autores han dado a conocer sus experiencias en este sentido, partiendo de modelos matemáticos fundamentales que bien pueden ser consultados en la bibliografía especializada, todas parten del conocimiento o la estimación de la refractividad.

Puede afirmarse entonces que el estudio de la troposfera a través de mediciones satelitales GNSS se basa en la estimación de la refractividad como magnitud primaria a lo largo de la trayectoria de la señal (Cioce, 2009a).

La señal satelital refractada contiene información útil, acumulada durante su paso por la atmósfera, de manera que los retardos ionosféricos y troposféricos son considerados como datos observables o medibles, vinculados naturalmente con parámetros atmosféricos diversos y es a partir de ésta idea que se hace posible recuperar tal información mediante un adecuado tratamiento y análisis de las mediciones GNSS.

Para fines de posicionamiento preciso y navegación, la refracción troposférica es considerada hoy en día como la principal fuente de error sobre las observaciones GNSS (ruido), requiriéndose un tratamiento y modelado especiales para su mitigación, pero en lo que respecta a las Ciencias de la Atmósfera, el retardo troposférico se asume como una señal con la cual es posible estudiar la refractividad de la atmósfera y particularmente la distribución del vapor de agua en la troposfera.

El vapor de agua presente en la atmósfera neutra o troposfera, desempeña un rol fundamental en los procesos meteorológicos, siendo una variable de gran interés dentro de los mismos. Desde un punto de vista climático, el agua en su fase gaseosa representa un componente regulador de la temperatura planetaria siendo considerado como el principal

gas de efecto invernadero, justificándose así la necesidad de estimaciones constantes que permitan una monitorización eficaz, dadas las implicaciones en la química atmosférica.

En relación al posicionamiento a través de las técnicas geodésicas satelitales, como el GNSS, la troposfera ejerce ciertas influencias sobre las radioseñales emitidas por los satélites, desmejorando la calidad de las determinaciones, hablándose así de la ocurrencia de un *retardo zenital hidrostático* (ZHD), un *retardo zenital no hidrostático* o húmedo (ZWD) y de un *retardo zenital total* (ZTD) que corresponde a la sumatoria de los dos primeros. Este retardo es debido a la refracción de la señal cuando ésta atraviesa la troposfera, lo que se ilustra en la figura 1, las moléculas neutras y el vapor de agua son los responsables del retardo, un efecto similar ocurre en la ionosfera con las partículas polarizadas.

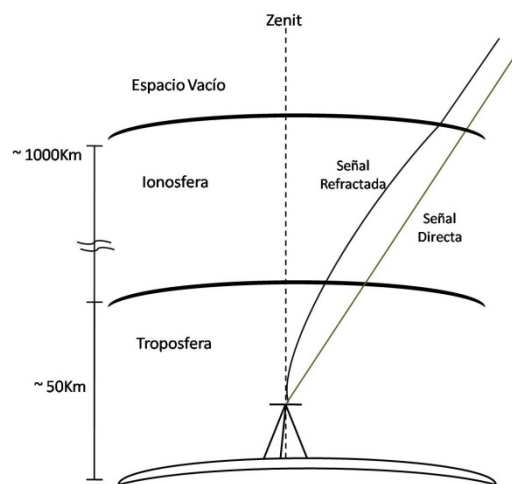


Figura 1: Refracción atmosférica de la señal GNSS

Se sabe que la componente hidrostática del retardo troposférico contribuye en un 90% con la refracción total, el 10% restante corresponde a la componente no hidrostática, pero su variabilidad es mucho mayor lo que dificulta su determinación. En la práctica, diferentes modelos son aplicados para el cálculo de la refractividad (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008), pero generalmente, el perfil de refractividad para una locación específica es desconocido, motivo por el cual se ha recurrido al uso de aproximaciones matemáticas. Un modelo empírico fue presentado por Bevis *et al.* (1992).

El retardo hidrostático es asociado con el momento dipolar inducido de la atmósfera y puede ser estimado de manera muy precisa (a nivel del milímetro) si se dispone de datos meteorológicos de superficie cuya calidad sea adecuada para tal fin. Por su parte, el retardo húmedo se debe principalmente al momento dipolar permanente del vapor de agua presente en la troposfera, esto hace que su estimación y modelado sea realmente difícil a lo largo de la trayectoria de la señal ya que este gas no se encuentra bien mezclado y su distribución espacial y temporal no es homogénea.

El procedimiento común para su estimación forma parte de las estrategias de procesamiento GNSS; al ser el ZWD muy sensible a la información *a priori* que se considere para el cálculo, debe prestarse especial interés a la bondad de las mediciones meteorológicas, modelos troposféricos y funciones de mapeo (Cioce, 2009a).

ESTIMACIÓN DEL VAPOR DE AGUA TROPOSFÉRICO EN LA ESTACIÓN MARA

La metodología aplicada para la estimación del vapor de agua troposférico parte del cálculo del retardo zenital de la señal GPS durante su paso por la troposfera a partir de las mediciones satelitales registradas por la estación SIRGAS-REGVEN-REMOS Maracaibo (MARA), parámetro este que resulta de fundamental importancia para tal fin. La recuperación del vapor de agua troposférico puede ser vista de dos formas: (a) Como *Vapor de Agua Integrado* (IWV), que se entiende como la masa de agua gaseosa presente por unidad de área, expresado en Kg/m^2 , (b) Como *Vapor de Agua Precipitable* (PW) definido como la altura de la columna de agua equivalente, expresado en mm.

En ambos casos, se parte del hecho de que el ZWD es cercanamente proporcional al contenido de vapor de agua existente sobre la estación de observación para un instante específico. Tanto el IWV como el PW quedan referidos a la vertical del lugar, pero en condiciones meteorológicas estables, el contenido de vapor de agua presenta una alta correlación regional sobre distancias horizontales de hasta 50Km aproximadamente (Seeber, 2003).

Una vez estimado el retardo zenital húmedo sobre la estación de observación, se aplica un factor de conversión que depende básicamente de constantes termodinámicas y físicas, y de la temperatura media de la troposfera (T_m), ésta última es quien tiene mayor influencia en la recuperación del vapor de agua de las observaciones GPS.

El proceso de cálculo propio de la conversión, fue optimizado y automatizado ante la gran cantidad de datos involucrados, y para ello se diseñó e implementó una sencilla rutina denominada *TROPOSWASSER v2.0* (Cioce, 2009b). Mediante la posterior confección de series de tiempo, fue posible la evaluación de las variaciones interdiarias de este gas de efecto invernadero así como las propias para todo un periodo en específico.

Ahora bien, para el cálculo del ZWD en MARA se utilizó el *Bernese GPS Software v5.0* (Beutler *et al.*, 2004) en modo BPE, realizando un procesamiento diferencial a partir de las estaciones Saint Croix (CRO1), Cúcuta (CUCU) y Santiago de Cuba (SCUB), la configuración geométrica de la red es mostrada en la figura 2. El procesamiento está orientado únicamente a la resolución de parámetros troposféricos, implicando esto el uso de las coordenadas actualizadas a la época de la observación para todas ellas, derivadas naturalmente de la solución SIRGAS-CON. Otras consideraciones propias de un procesamiento con rango científico, fueron tomadas en cuenta, i.e. orbitas precisas, centros de fase de las antenas, carga oceánica, entre otras.

La estrategia de procesamiento es ilustrada en la figura 3 y está compuesta por tres etapas contadas luego de la fase de pre-procesamiento (Cioce, 2009a). En la primera de ellas se calcularon los residuales haciendo un tratamiento de los mismos luego del análisis estadístico correspondiente, además, en ella se removió el retardo troposférico hidrostático para lo que fueron necesarios los datos meteorológicos (temperatura, presión y humedad) captados *in situ* y representados en la figura 4. La estación meteorológica empleada, funciona a escasos metros de MARA, tal y como se aprecia en la figura 5.

Para la representación a priori de la troposfera, se utilizó el modelo de *Saastamoinen* con su respectiva función de mapeo, tratando solamente la componente hidrostática del retardo zenital troposférico (ZHD), lo que permitió su determinación y remoción del retardo total (ZTD) considerando los datos meteorológicos medidos a nivel de superficie.



Figura 2: Configuración geométrica de la red geodésica conformada para el cálculo del ZWD en la estación SIRGAS-REGVEN-REMOS Maracaibo (MARA)

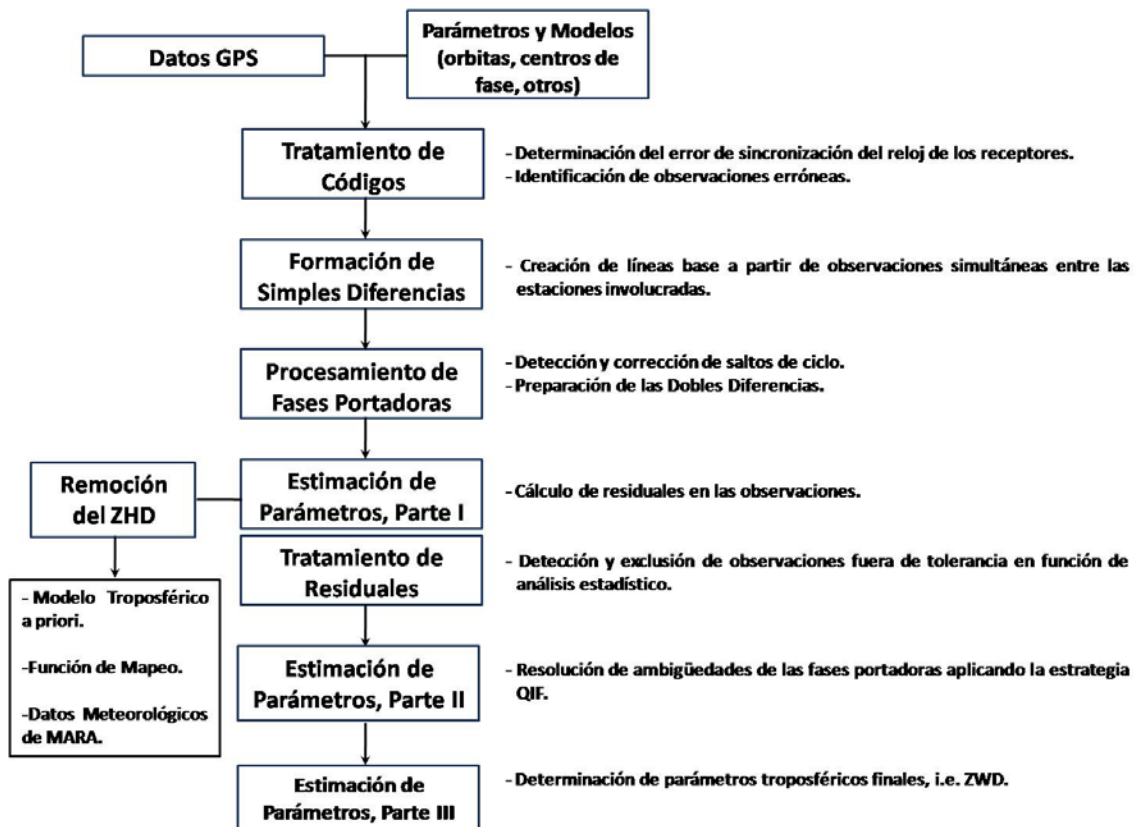


Figura 3: Ilustración de la estrategia de procesamiento GPS aplicada para la obtención del ZWD

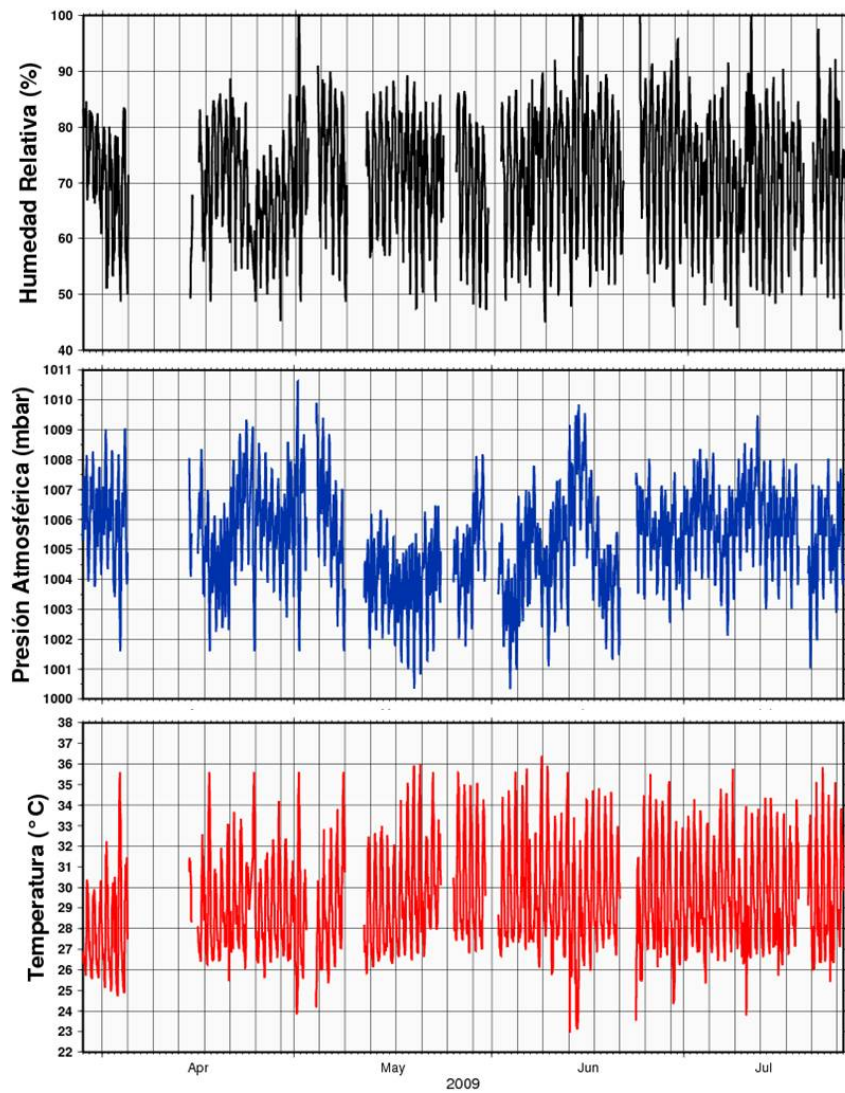


Figura 4: Datos meteorológico registrados en la estación MARA, semanas GPS 1525 a 1541



Figura 5: Ubicación relativa de la estación meteorológica con respecto MARA

La segunda etapa estuvo dirigida hacia la resolución de ambigüedades aplicando en este caso el algoritmo QIF (Dach *et al.*, 2007), siendo el apropiado de acuerdo a la configuración de la red. Finalmente, se procede a la estimación final de parámetros, que en este caso solo corresponden a los gradientes del retardo troposférico no hidrostático. La componente húmeda fue estimada a partir de las observaciones GPS refinadas, aplicando como función de mapeo el modelo *Wet-Niell*, con ella se logró el cálculo de los parámetros troposféricos específicos del lugar de observación considerando una resolución temporal de 30 minutos.

Con ésta forma de realizar el procesamiento de las observaciones GPS, se busca simplificar la relación

$$ZTD = ZHD + ZWD$$

una vez que la componente hidrostática ha sido cuantificada y extraída del retardo total; naturalmente, ésta estrategia puede estar sujeta a variantes que permitan una estimación refinada, motivo por el cual no se descartan sugerencias o recomendaciones al respecto.

La consistencia interna de las estimaciones del ZWD fue evaluada en función de los RMS de los parámetros troposféricos arrojados por el *software*, ubicándose en el orden de 2mm para todo el periodo considerado. No obstante, un control externo fue implementado, al comparar la componente no hidrostática obtenida para la solución semanal de la red SIRGAS-CON calculada por el CPAGS-LUZ, con respecto a la correspondiente surgida luego de aplicar la estrategia de cálculo, en este caso las diferencias medias se ubican en 10mm.

El retardo troposférico total (ZTD) calculado al sumar el ZWD con el ZHD, este último obtenido aplicando el modelo

$$ZHD = \frac{(2,2779 \pm 0,0024) \cdot P_s}{f(\varphi, h)}$$

en donde P_s es la presión atmosférica a nivel de la estación y $f(\varphi, h)$ corresponde a la variación de la aceleración gravitacional con respecto a la latitud y altura elipsoidal, también fue contrastado con el ZTD proveniente de la solución semanal CPAGS-LUZ, las diferencias se encuentran en el orden de 10mm.

La magnitud de ambas diferencias se considera mínima y aceptable tomando en cuenta que en la estrategia para el cálculo del ZWD aplicada, intervienen datos meteorológicos reales y que además, la estimación de parámetros se hace en base a una red completamente diferente a la SIRGAS-CON a cargo del CPAGS-LUZ.

Es así como se presentan en la figura 6, series de tiempo que revelan el retardo zenital troposférico total (ZTD) para la estación SIRGAS-REGVEN-REMOS Maracaibo (MARA), para el período comprendido entre las semanas GPS 1525 a 1541 (abril a julio de 2010 aproximadamente), junto a sus componentes hidrostáticas (ZHD) y no hidrostática (ZWD). El retardo promedio de la señal GPS resultó de:

- 2,617m → para el ZTD
- 2,296m → para el ZHD
- 0,321m → para el ZWD

En dicha figura, se logra apreciar el comportamiento regular del ZHD, cuyas variaciones se encuentran dentro del rango de los 2cm, siendo su estimación altamente confiable desde el punto de vista observacional, caso contrario al ZWD, parámetro altamente variable en función del tiempo y naturalmente del contenido de vapor de agua en la atmósfera neutra, el rango de la variación pasa los 20cm.

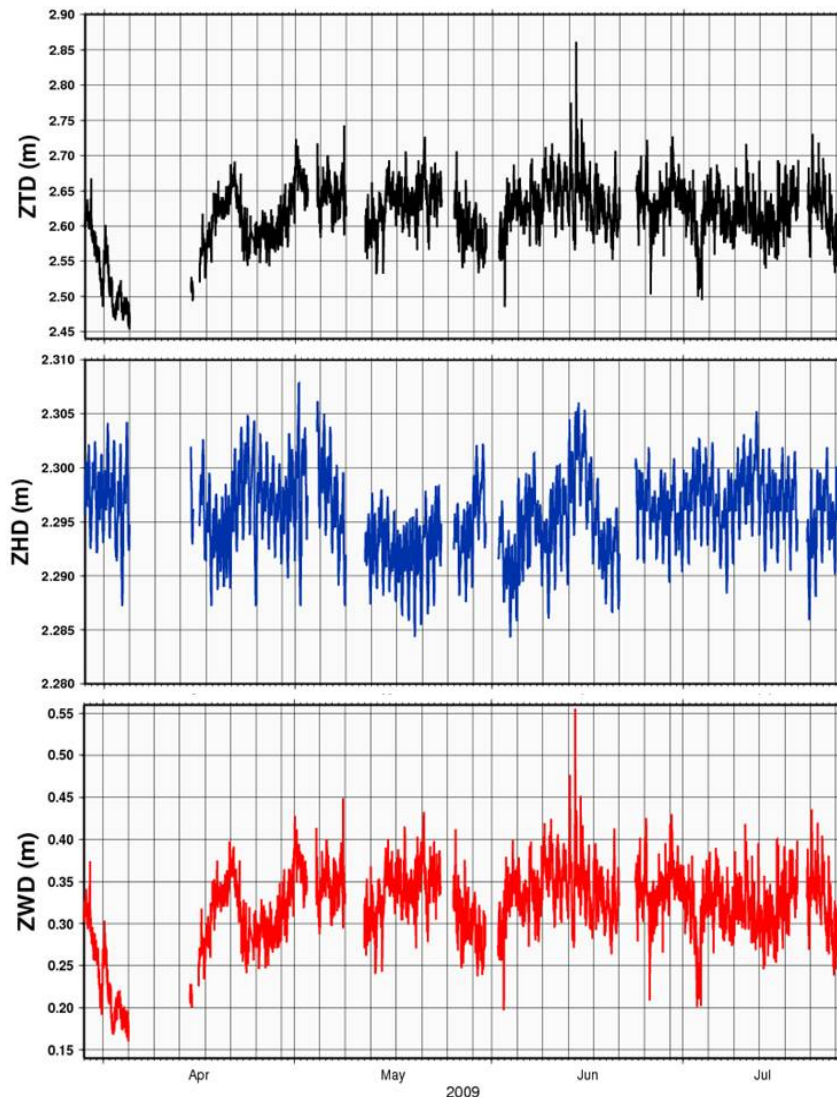


Figura 6: Retardo troposférico total (arriba), hidrostático (centro) y no hidrostático (abajo) calculado para el periodo comprendido entre las semanas GPS 1525 a 1541

Finalmente, la figura 7 muestra la serie de tiempo del Vapor de Agua Integrado (IWV) estimado luego de la conversión del ZWD mediante los modelos matemáticos respectivos, que pueden encontrarse en Bevis *et al.* (1992), Leick (2004), Schüller (2001), por citar algunos autores. La misma ofrece una visión sobre la alta variabilidad del agua en fase gaseosa presente en la atmósfera neutra de Maracaibo, encontrándose valores máximos y mínimos de $90,4\text{Kg/m}^2$ y $26,2\text{Kg/m}^2$ respectivamente, siendo la cantidad media igual a $52,6\text{Kg/m}^2$. Algunos picos en la serie de tiempo se atribuyen a alteraciones meteorológicas y ruido de la estimación.

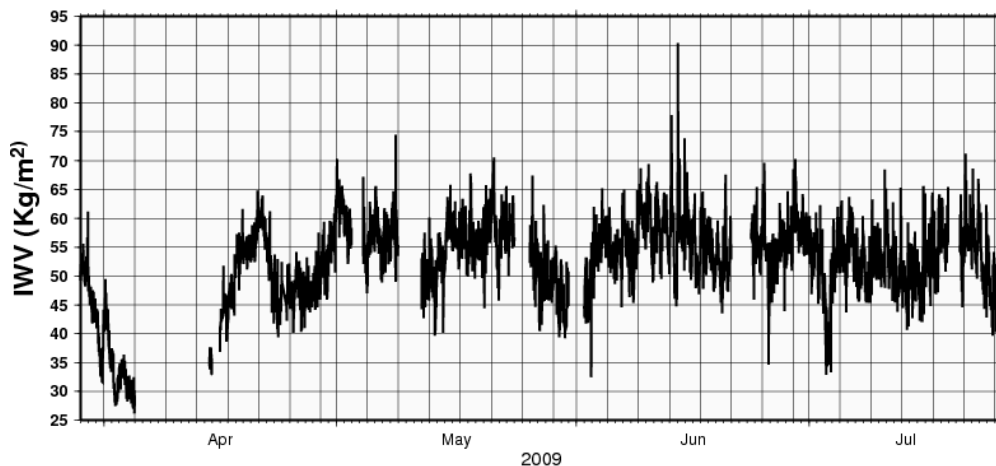


Figura 7: Vapor de Agua Integrado (IWV) estimado para el periodo comprendido entre las semanas GPS 1525 a 1541

Vale destacar que en la estrategia utilizada para la estimación del IWV se tomaron las previsiones necesarias para reducir el impacto de las fuentes de error inherentes a la observación GPS en sí, de manera que de existir efectos negativos sobre el cálculo realizado, estos se deben a las condiciones y representaciones termodinámicas y meteorológicas asumidas, éstas últimas son quienes determinan en buena medida, la calidad final de la transformación del ZWD a vapor de agua.

COMETARIOS FINALES

El desarrollo de este tipo de investigaciones donde es utilizada la técnica satelital GPS para la cuantificación del vapor de agua en la troposfera, no tiene precedente alguno en Venezuela y aunque a nivel mundial la experiencia es ampliamente conocida, nuestra estrategia y sus resultados deben ser refinados, para así tener una mayor certeza sobre las estimaciones; es así como el CPAGS-LUZ ha asumido ésta tarea aprovechando la plataforma observacional SIRGAS-CON existente en el país para la ejecución de los primeros ensayos en la materia.

Se espera a la brevedad posible, que la red activa venezolana pueda ofrecer a la comunidad SIRGAS un mayor rendimiento, lo que permitirá extender nuestros trabajos a otras locaciones. Uno de los aspectos instrumentales necesarios para ello, es el funcionamiento de estaciones meteorológicas cercanas a cada vértice de la red. Es nuestra intención procurar el trabajo conjunto con otras instituciones que de una u otra forma garanticen la continuidad de la investigación.

Por otra parte, con la confección de series de tiempo que abarquen períodos diarios, semanales, mensuales y anuales, implementando además modelos estocásticos robustos, será posible la identificación de una tendencia clara sobre el aumento en la cantidad del vapor de agua troposférico, lo que conllevará a un análisis sobre la ocurrencia del cambio climático, en concordancia con los objetivos científicos del Proyecto SIRGAS, y desde el punto de vista del posicionamiento basado en satélites, se podrá lograr una caracterización efectiva del retardo troposférico para el mejoramiento de las determinaciones. La utilidad principal de ésta investigación se centra en ambos productos principales.

REFERENCIAS

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.

Cioce V. (2009a): **“Aplicación de observaciones GPS para la cuantificación del vapor de agua troposférico en la ciudad de Maracaibo”**. Trabajo de Grado. División de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.

Cioce V. (2009b). **“TROPOSWASSER v 2.0: Aplicación automatizada para el cálculo del vapor de agua en la troposfera a partir de observaciones satelitales GPS”**. Centro de Procesamiento y Análisis GNSS SIRGAS de la Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.

Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M. (2007). **“Bernese GPS Software Version 5.0: User Manual”**. Astronomical Institute. University of Bern. Berna, Suiza.

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. (2008): **“GNSS: GPS, GLONASS, Galileo & more”**. Springer-Verlag. Viena, Suiza.

Leick A. (2004). **“GPS Satellite Surveying”**, 3rd Ed. John Wiley & Sons. New Jersey-NJ, EEUU.

Schüler T. (2001). **“On ground-based GPS tropospheric delay estimation”**. Tesis Doctoral. Universität der Bundeswehr München. München, Alemania.

Seeber G. (2003). **“Satellite Geodesy”**, 2nd Ed. Walter de Gruyter. Berlín, Alemania.