



Aportes desde la red de estaciones GNSS SIRGAS-CON a la Meteorología

Morichetti, Paola⁽¹⁾; Camisay, M. F⁽²⁾; Mackern, M.V.⁽³⁾ y Mateo, M. L⁽⁴⁾

(1) Universidad Juan Agustín Maza, Ing. Agrimensora, morichettip@yahoo.com.ar.

(2) Universidad Juan Agustín Maza, Universidad Nacional de Cuyo, Ing. Agrimensora, fernandacamisay@gmail.com

(3) Universidad Juan Agustín Maza, Universidad Nacional de Cuyo, CONICET, Dra. en Agrimensura, vmackern@mendoza-conicet.gov.ar

(4) Universidad Nacional de Cuyo, Universidad Juan Agustín Maza, Dra. En Ingeniería, lmateo@ingenieria.uncuyo.edu.ar

RESUMEN

Desde hace más de una década las inversiones geodésicas realizadas por los países con el objeto de materializar y densificar los marcos de referencia internacionales se han concentrado en instalar, poner en funcionamiento y mantener estaciones GNSS de operación continua. Algunos ejemplos de esto podemos encontrar en las redes [RAMSAC](#), [RBMC](#), [MAGNA-SIRGAS](#), [REGNA-ROU](#), de Argentina, Brasil, Colombia y Uruguay, respectivamente. Las estaciones continuas GNSS que conforman estas redes se basan en un receptor GNSS que opera continuamente, ubicada en un punto materializado y administrado por una institución. La información es gestionada desde una base de datos a la que tienen acceso desde internet los usuarios locales y la comunidad científica.

En el procesamiento de las observaciones surge como error, el retardo troposférico sobre la señal GNSS (ZTD), el cual debe ser modelado por su influencia. Desde la red GNSS latinoamericana SIRGAS-CON se procesan diariamente las observaciones y se obtiene el ZTD sobre aproximadamente 400 estaciones. Conforme a Calori et al. 2016, se estima el vapor de agua sobre dichas estaciones, cada 6 horas.

En este trabajo se presentan algunos productos que este grupo de investigación, en el contexto de SIRGAS, presenta como aportes a la Meteorología local y al conocimiento del clima.

PALABRAS CLAVE: Vapor de agua, IWV, SIRGAS; ZTD, GNSS.

INTRODUCCIÓN

El Vapor de agua atmosférico es reconocido como uno de los gases más importantes que regula el efecto invernadero del planeta [Mitchell 1989].

Esta variable presenta significativos cambios tanto espacial como temporalmente, por lo cual a la fecha no ha podido ser modelada con precisión suficiente y requiere de su necesaria observación, tanto directa como indirecta. El método clásico de observación ha sido por décadas a través de radiosondeos, pero dado su alto costo e insuficiente cobertura, se han comenzado a desarrollar técnicas indirectas desde las misiones satelitales. A la fecha se



utilizan la radiometría satelital [Christensen et al. 1994] con eficacia sobre océanos, las observaciones de los sistemas globales de navegación satelital GNSS [Bevis et al. 1992] y la Radio Occultation [Kursinski et al. 1997].

Nuestro equipo conjuntamente con profesionales y científicos de países de Latinoamérica nos hemos abocado a investigar sobre la aplicación del método indirecto de estimación del WV mediante el cálculo del retardo troposférico que este ocasiona sobre las señales GNSS de las estaciones que conforman la red SIRGAS-CON (Figura 1), sobre América Latina y el Caribe. Se ha definido y validado una metodología de cálculo [Calori et al, 2015]. Se ha trabajado en la determinación de esta variable con una latencia en el cálculo de aproximadamente 30 días, propias de aplicar la técnica de pos procesamiento sobre las observaciones de la red, aplicando los modelos y convenciones estipuladas internacionalmente por la Asociación Internacional de Geodesia, IAG y el Servicio Internacional de GNSS, IGS.

En los resultados logrados a la fecha se ha demostrado que la red SIRGAS-CON puede ser utilizada para monitoreo atmosférico complementando significativamente a la radiometría sobre océano y a la red de radiosondas internacional [Calori et al, 2015 y 2016][Bianchi C. et al 2016).

Si analizamos la evolución que han tenido las redes de estaciones permanentes no sólo en Argentina sino en todo América Latina (Figura 2), se observa una constante densificación. Esto tienen su explicación en que las instituciones responsables de definir y materializar el sistema de referencia geodésico de los países han volcado todas las inversiones a este tipo de red geodésica activa. Considerando la infraestructura geodésica ya existente y con el objeto de identificar más y mejores servicios que la misma puede ofrecer, nos motivamos a desarrollar esta investigación.

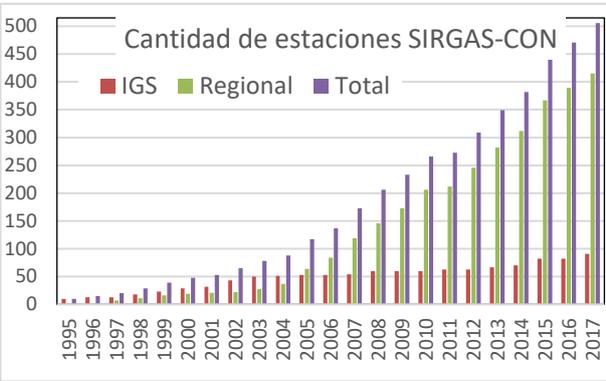


Figura 2.- Evolución de la red SIRGAS-CON

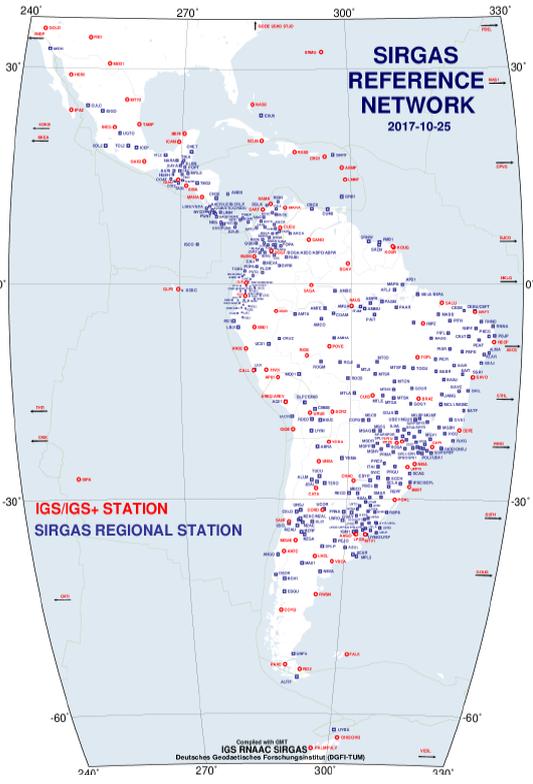


Figura 1.- Red SIRGAS-CON



Desde las instituciones que conforman SIRGAS, se viene trabajando hace más de 10 años en identificar diferentes servicios que la red de estaciones GNSS continuas, SIRGAS-CON pudiese ofrecer. En lo que respecta a los aportes a la meteorología desde el Centro de procesamiento de Ingeniería en Mendoza Argentina, CIMA, se ha estimado el Vapor de agua integrado, IWV, sobre los aproximadamente 400 sitios donde opera una estación GNSS de la red SIRGAS-CON. Con estos valores se han generado series de tiempo que brindan un conocimiento de esta variable sin igual en la región, tanto por su destacada distribución espacial como por su registro temporal. Si además se considera que dichos productos son obtenidos sin necesidad de inversión específica en infraestructura, se suma un valor agregado muy significativo a dichos productos.

En este trabajo se describe la metodología empleada, se muestran algunos resultados de la investigación que ofrecen un aporte al conocimiento de esta variable en el contexto del Clima (escala prolongada en el tiempo) y de la Meteorología de la región.

Objetivos

Objetivo General: Implementar una estrategia de procesamiento que permita utilizar a la red de observaciones GNSS SIRGAS-CON en el monitoreo troposférico sobre Latinoamérica.

Objetivos específicos:

- Automatizar el proceso de cálculo del vapor de agua troposférico desde el procesamiento diario de la red
- Lograr la capacitación de personal especializado en el centro de procesamiento CIMA
- Asegurar la coordinación necesaria entre los procesamientos de las subredes que cada centro de procesamiento SIRGAS calcula, como así también en la generación de los productos factibles de obtener.
- Desarrollar una experiencia piloto que permita validar el proceso y aplicar las correcciones necesarias.
- Lograr una serie temporal anual tanto del ZTD (Retardo cenital total), ZWD (Retardo cenital húmedo) e IWV (vapor de agua integrado) para todas las estaciones participantes de la experiencia de cálculo.
- Analizar la variabilidad espacio temporal de las tres variables mencionadas, sobre la región.

Método

Desde el año 2008 y hasta marzo del 2014 inclusive, el Centro de procesamiento de Mendoza Argentina, CIMA, calculó las observaciones GPS de la sub red SIRGAS-CON-D-Sur (100 estaciones GPS continuas), con el software Bernese versión 5.0 [Dach R. et. al 2017], según los estándares del International GNSS Service (IGS) adoptados por SIRGAS. Desde el 2014 a la fecha dichos estándares fueron actualizados y junto a ello el software Bernese, pasando a incorporar nuevos modelos convencionales en su versión Bernese 5.2 [Dach R and Walser P, 2015]. Cabe mencionar que la nueva versión 5.2, ha optimizado notablemente el proceso de estimación del retardo cenital troposférico (ZTD) (Tabla 1), de sumo interés para esta investigación. Por lo tanto, CIMA como los demás centros de procesamiento SIRGAS actualizaron su versión en enero del 2014 y la utilizan hasta la fecha.



En el proceso de cálculo aplicado por SIRGAS, se estima el ZTD, ocasionado por el contenido de Vapor de agua en la Tropósfera al momento de la observación, sobre la señal GPS y GLONASS. Utilizando este valor estimado del ZTD, CIMA ha dirigido una investigación en los últimos diez años para recuperar los valores de Contenido de Vapor de Agua Integrado troposférico, IWV, cada 1 hora, sobre cada uno de los sitios donde se encuentra cada estación GNSS de la red.

La metodología de recuperación del IWV ha sido validada y reúne las condiciones de precisión que requiere el monitoreo de esta variable atmosférica [Calori et. al, 2015].

En una primera experiencia piloto dicho proceso fue aplicado por CIMA, en las estaciones de la subred SIRGAS-CON-D-Sur (aproximadamente 100 estaciones GPS continuas), para el período de mayo del 2008 a junio del 2010 [Calori et. al, 2015].

A partir del año 2015 se resolvió extender el cálculo al total de estaciones SIRGAS-CON operativas (\approx 400 estaciones). El proceso de estimación de coordenadas y retardo troposférico se realizó desde entonces con Bernese 5.2. La Tabla 1 sintetiza los modelos y convenciones utilizadas tanto en la serie del 2008 al 2013, como en la nueva serie del 2014 a la fecha.

Modelos de cálculo utilizados en el procesamiento de la red SIRGAS-CON		
Modelo	Hasta Diciembre 2013 (w:1772)	Desde Enero 2014 (w: 1773)
Nutación	IAU2000	IAU2000R06
Movimiento subdiario del polo	IERS2000	IERS2010XY
Efemérides planetarias	DE200.EPH	DE406.EPH
Modelo Global de Gravedad	JGM3	EGM2008_SMALL
Reducción a los efectos de mareas oceánicas en los coeficientes del Modelo Global de Gravedad	OT_CSRC.TID	OT_FES2004.TID
Reducción a los efectos de mareas terrestres en los coeficientes del Modelo Global de Gravedad	No se aplicaba	TIDE2000.TPO
Reducción de carga atmosférica generada por mareas S1 y S2	No se aplicaba	Ray and Ponte (2003) (Archivo AMSUR.ATL)
Modelo de reducción del efecto troposférico a-priori y función de mapeo	Saastamoinen (en PPP con Código)	GMF (en PPP con Código)
	Dry_Niell (preprocesamiento)	Dry_GMF (preprocesamiento)
	Dry_Niell (procesamiento)	Dry_VMF (procesamiento)
Estimación de parámetros Troposféricos y Función de Mapeo	Wet_Niell (preprocesamiento y resolución de ambigüedades)	Wet_GMF (preprocesamiento y resolución de ambigüedades)
	Wet_Niell (procesamiento)	Wet_VMF (procesamiento) Se incluye la lectura de mallas globales (*.GRD) calculadas para el día.
Estimación de gradientes horizontales Troposféricos	No se aplicaba	Modelo de CHENHER Corrección en N y E
Intervalo de Estimación de parámetros Troposféricos	2hs	2hs

Tabla 1._ Comparación de los principales modelos utilizados en el software Bernese versión 5.0 y 5.2.



La incorporación de las más de 400 estaciones operativas de la red SIRGAS-CON en el cálculo del vapor de agua en la región, permitió multiplicar la cantidad de estaciones de monitoreo, ofreciendo una mejor cobertura en el modelado de dicha variable. Además, se convino estimar el retardo cenital troposférico simultáneamente con las coordenadas de la red a un intervalo de una hora, es decir, veinticuatro valores de corrección troposférica por cada día y por cada estación. A la fecha para el cálculo de esta reducción se utiliza el modelo Vienna Mapping Function (VMF) el cual incluye un modelo para la componente a priori (parte seca de la atmósfera) y una función de interpolación para la estimación de los parámetros troposféricos adicionales (parte húmeda de la atmósfera). El VMF se apoya en modelos numéricos climáticos (especialmente del ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), que además de latitud, tienen en cuenta la longitud de las estaciones e intervalos de tiempo cortos. Se accede a los valores en mallas equiespaciadas de 15° a intervalos de 6 hora en <http://ggsatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/>. Se incluye también la estimación de gradientes horizontales.

El cálculo del vapor de agua se realiza mediante tres procesos encadenados- El primero "Estimación de ZTD", es el que se realiza a partir de los valores de ZTD que se estiman en cada centro de procesamiento SIRGAS (CA) del cálculo de la sub red GNSS que le corresponde. Dado que cada estación es procesada por al menos 3 CA, se cuenta con una superabundancia de productos troposféricos ZTD, por lo cual se realiza un procedimiento de ajuste mediante mínimos cuadrados, del cual se dispone tanto de un parámetro troposférico por estación, por hora y de sus estimadores de precisión. En el segundo proceso, "cálculo de la componente húmeda del retardo (ZWD)", se extrae del ZTD la parte hidrostática (ZHD), para lo cual es necesario conocer los correspondientes valores de presión atmosférica y temperatura para cada sitio y hora de cálculo. En el tercer proceso, "recuperación de los valores de IWV" desde el ZWD utilizando Askne and H. Nordius, 1987.

Dada la complejidad de los procesos y el volumen de información que se maneja (400 estaciones con estimaciones cada 1 hora), se diseñaron y desarrollaron varias rutinas de cálculo en Matlab® y en Perl.

Los valores de presión atmosférica y temperatura utilizados en el 2do y 3er proceso, fueron extraídos del modelo numérico del tiempo re análisis ERA Interim [Dee, D.P. et al.; 2011].

Con los valores calculados se determinaron en cada sitio valores medios de IWV. Se obtuvieron las series temporales de IWV para las distintas estaciones SIRGAS para el periodo 2015 al 2017.

Resultados

Entre los resultados obtenidos se destaca mencionar que se ha logrado integrar todo el proceso desde el cálculo del ZTD en las estaciones de la red SIRGAS-CON hasta la obtención del IWV. Se ha alcanzado la capacitación de recursos humanos dentro del grupo de investigadores como también de profesionales que participan desde los centros de procesamiento SIRGAS (UNA, ECU, CHI, DGF, IBG, IGA, LUZ y URY). Se ha logrado en base a una coordinación óptima contar con la estimación diaria continua, cada 2 horas durante el 2014 y cada 1 hora desde el 2015 a la fecha, del ZTD sobre el total de las estaciones de la red



SIRGAS-CON.

Se ha logrado la estimación de ZTD para las estaciones de la red SIRGAS-CON a partir de la combinación de las soluciones individuales de cada subred de densificación. En esta etapa se han ajustado mayoritariamente soluciones de 3 CA o al menos 2 CA por cada estación GNSS

continua por día. Se han completado las series temporales de IWV para 2 años (enero del 2015 a diciembre del 2017) en el total de estaciones SIRGAS-CON operativas o históricas.

Se han calculado valores de ZWD e IWV para la serie temporal mencionada, con un intervalo de muestreo de 6 horas (0, 6, 12 y 18hs UT), por estación.

Con los valores estimados se calculó un valor de IWV medio anual por estación (Fig.3 y Fig 4). Se evidenció una significativa correlación entre los valores medios de IWV y la característica climática de la Zona (tropical, subtropical, desierto de montaña, etc). Por lo cual surgió el interés de evaluar el comportamiento temporal de la variable según la latitud geodésica, según la altura del sitio y según las regiones.

En primer lugar, se analizó la **variabilidad del IWV con la latitud**. Ecuatoriales y subtropicales presentan mayor ZTD y mayor Vapor de agua que mayores latitudes (Fig. 5) En segundo lugar, se evaluó la **incidencia de la altura de la estación** tanto en el ZTD como en el IWV (a mayor altura menor presión atmosférica, menor ZTD y menor vapor) (Figura 6).

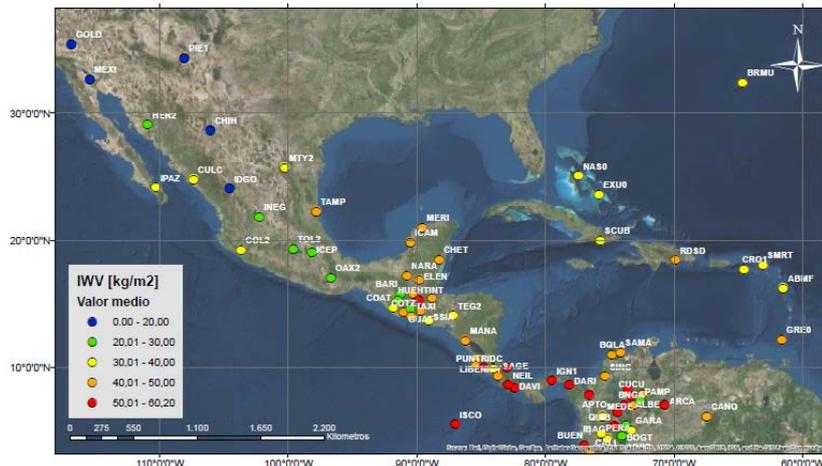


Fig.3. Valores medios de IWV [kg/m²]. Periodo 2015-2016. América Central y Caribe

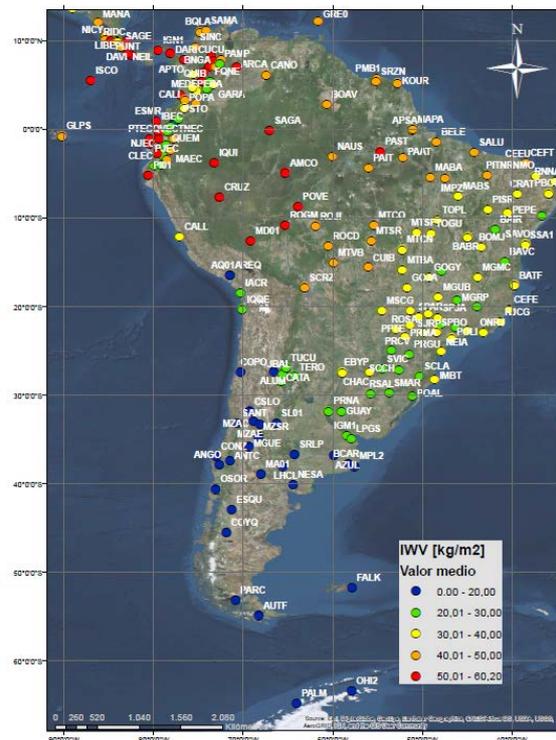


Fig.4. Valores medios de IWV [kg/m²]. Periodo 2015-2016. América del Sur

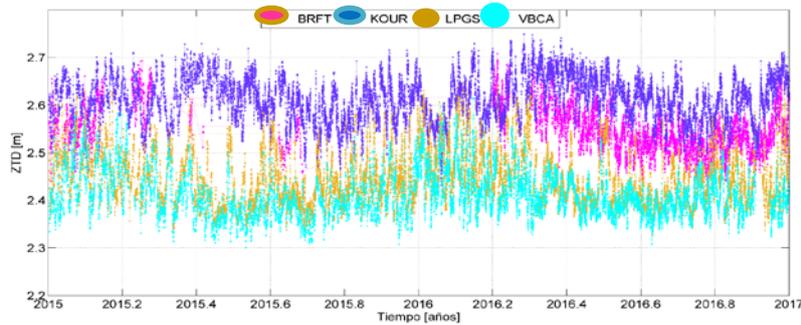


Figura 5: Serie temporal de ZTD (arriba) estimado por CIMA, en pos-proceso de observaciones SIRGAS-CON, variabilidad con la latitud de la estación GNSS. Ubicación de las estaciones (derecha)

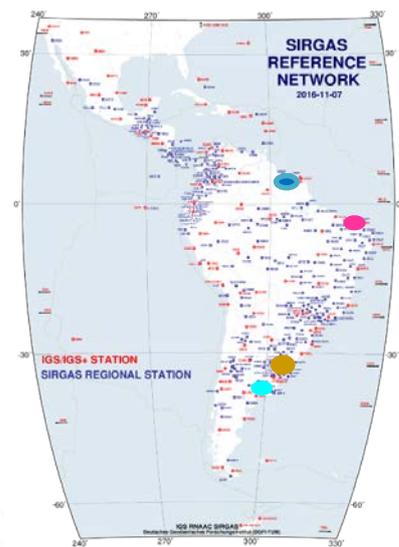


Figura 6: Serie temporal de IWV estimado en pos-proceso de observaciones SIRGAS-CON, variabilidad con la altura de la estación GNSS.

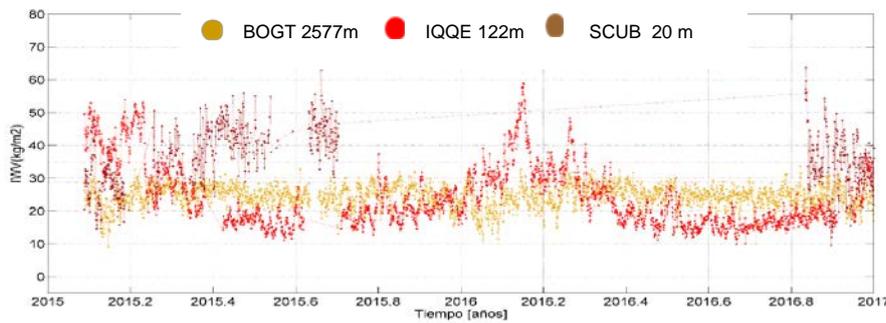


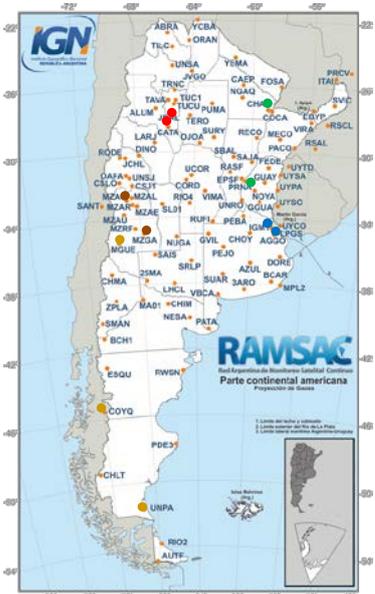
Figura 7: Estaciones argentinas analizadas

Por último, se analizó la **variabilidad según región climática**. Se evaluaron las series temporales de estaciones ubicadas en cinco distintas regiones de Argentina (Fig.7): Noroeste (color rojo), Mesopotamia (verde), Pampa húmeda (azul), Región cuyana (marrón oscuro) y Patagonia (marrón claro). La selección de estaciones se realizó considerando aquellas que presentaban las series completas para los dos años estudiados.

En las estaciones del Noroeste (CATA, en Catamarca; JBAL, en Tucumán) se observó una marcada variabilidad estacional valores máximos de IWV 50 Kg/m², en verano y mínimo 8 Kg/m², en invierno (Figura 8)

En las estaciones de la Mesopotamia (CHAC, en Chaco y PRNA, en Paraná) se observó una marcada variabilidad diaria, la cual no se aprecia en las estaciones del noroeste. Hay variabilidad estacional valores máximos de IWV 60 Kg/m², en verano y mínimo 10 Kg/m², en invierno (Figura 9).

En las estaciones de la Pampa Húmeda el comportamiento es similar al de las mesopotámicas, aunque los valores máximos y





mínimos son menores 50 Kg/m², en verano y mínimo 5 Kg/m², en invierno (Figura 10).

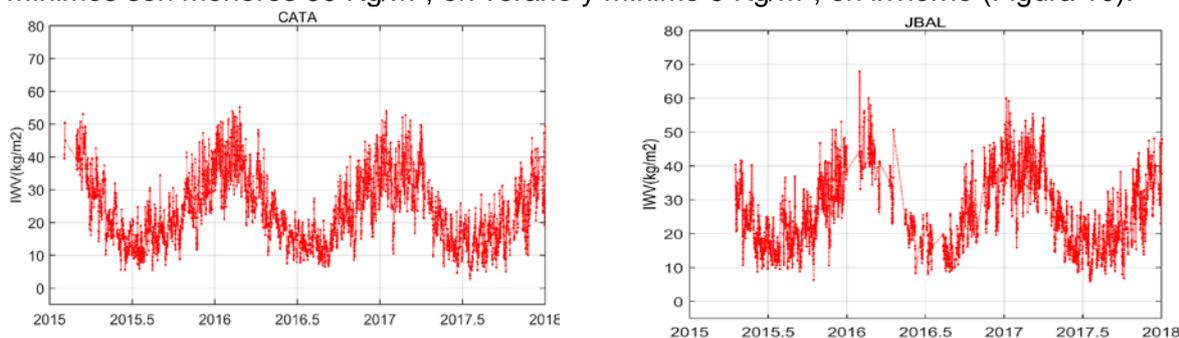


Figura 8: Serie temporal de IWV, región Noroeste (CATA izquierda, JBAL derecha).

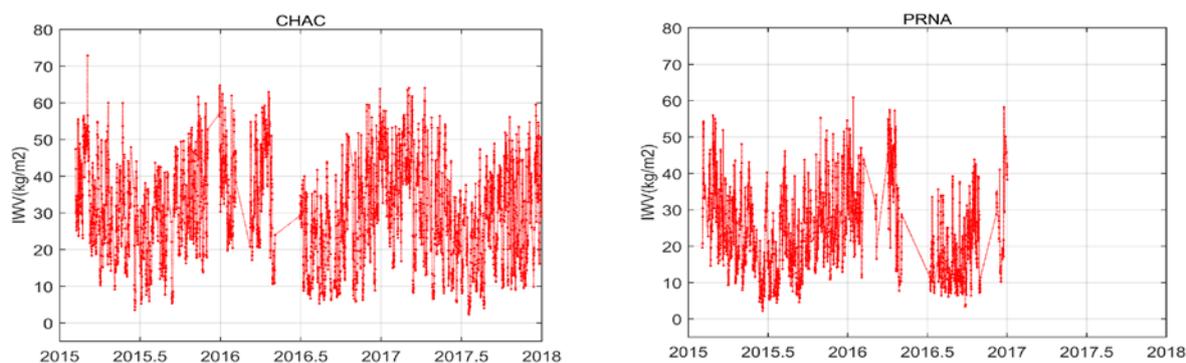


Figura 9: Serie temporal de IWV, región Mesopotamia (CHAC izquierda, PRNA derecha).

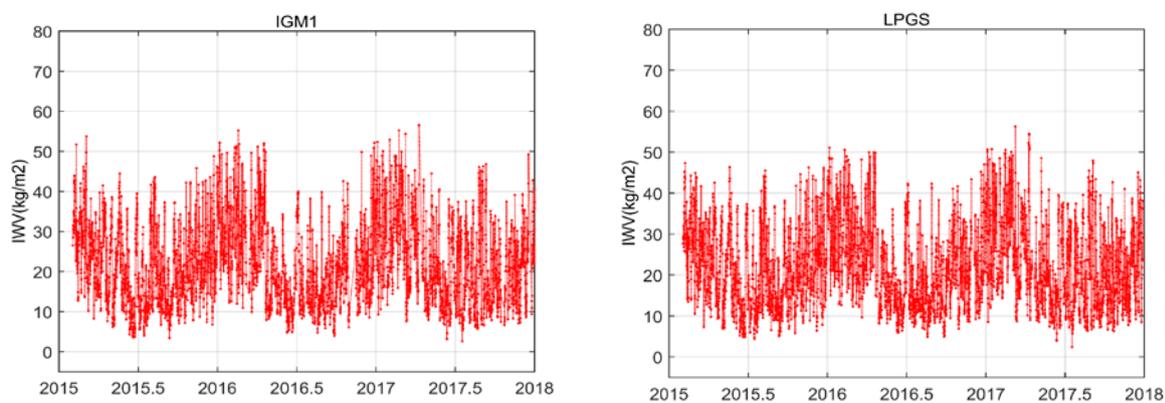


Figura 10: Serie temporal de IWV, región Pampa Húmeda (IGM1 izquierda, LPGS derecha).



En las estaciones de la región Cuyana (MZAC, en Mendoza; MZGA, en Gral. Alvear, Mendoza y MGUE al sur de Mendoza) se observó una marcada variabilidad estacional similar al Noroeste, aunque se observan menores valores dado el comportamiento de clima seco de montaña. Valores máximos de IWV 45 Kg/m^2 , en verano y mínimo 5 Kg/m^2 , en invierno (Figura 11 y 12)

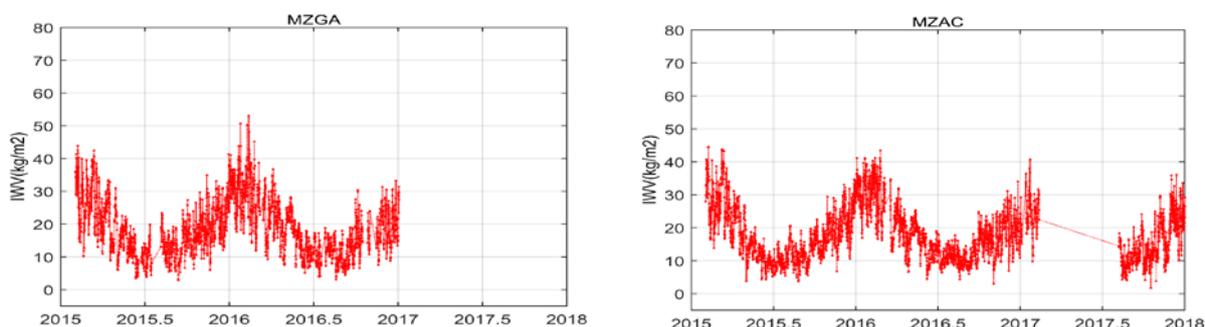


Figura 11: Serie temporal de IWV, región Cuyana (MZGA izquierda, MZAC derecha).

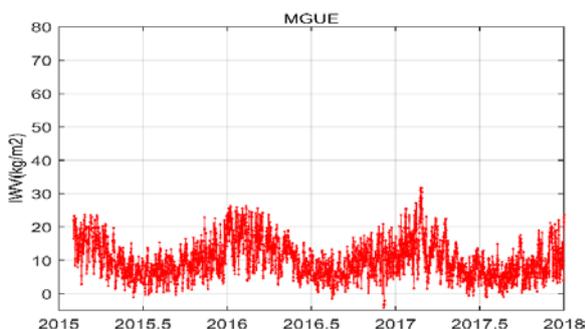


Figura 12: Serie temporal de IWV, región Cuyana (MGUE, Malargüe Mendoza).

La estación del sur mendocino, MGUE presenta en la serie de IWV, un patrón similar al de las estaciones patagónicas, dado que si bien presenta variabilidad estacional la amplitud entre máximos y mínimos es del orden de 20 Kg/m^2 logrando valores máximos de 22 Kg/m^2 y mínimos de 0 Kg/m^2 , de allí que sería oportuno considerar más al norte el límite de la región Patagonia, en lo que respecta al comportamiento de esta variable climática. (Figuras 12 y 13)

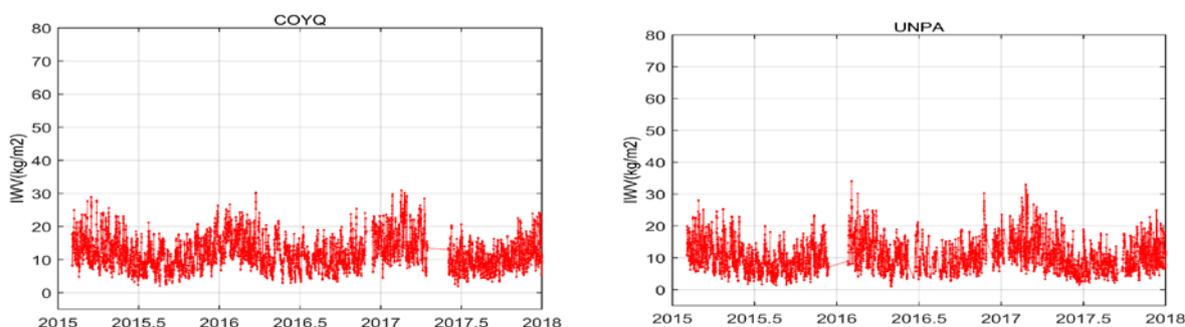


Figura 13: Serie temporal de IWV, región Patagonia (COYQ izquierda, UNPA derecha).



CONCLUSIONES

Conforme a los resultados presentados, este trabajo ha permitido mostrar que la red SIRGAS-CON puede considerarse una red de monitoreo de la variable Vapor de Agua troposférico, sobre la región de América Latina. Los resultados que se muestran son una significativa contribución a las investigaciones del clima y a la comprensión de los procesos atmosféricos de la región.

La incorporación de las series de ZTD del total de las estaciones de la red SIRGAS-CON, triplica a los valores presentados por Calori et al 2015 y Bianchi et al 2016.

El método de cálculo aplicado ofrece una mejora desde el punto de vista estadístico ya que la superabundancia en la estimación de parámetros (2 o 3 estimaciones por estación) permitió realizar el correspondiente ajuste por mínimos cuadrados y su correspondiente estimación de precisión.

Fue notable la variabilidad encontrada del IWV tanto en función de las alturas de las estaciones (a mayor altura menor presión atmosférica, menor ZTD y menor vapor) , como de la latitud de las mismas (ecuatoriales y subtropicales mayor ZTD, mayor Vapor de agua).

La extensa serie temporal resulta un significativo aporte para monitorear la variabilidad diaria, estacional, anual y semi-anual del IWV y caracterizarla regionalmente.

Agradecimiento. Este trabajo ha sido posible gracias a las observaciones de las estaciones SIRGAS-CON en primer lugar y al trabajo invaluable de los Centros de Análisis SIRGAS que semanalmente entregan sus productos al Centro de procesamiento CIMA quien realiza la estimación final de productos troposféricos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Askne, J., Nordius, H. (1987). "Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data". *Radio Sci.* Vol. 22, pp. 379–386.

Bevis, M., Businger, S., Herring, T.A., Rocken, C., Anthes, R.A., Ware, R.H. (1992). "GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system". *J. Geophys. Res.* Vol. 97 (D14), pp. 15787–15801

Bianchi C.E., Mendoza, L.P. , Fernandez, L.E. , Natali, M.P., Meza, A.M., and Moirano, J.F. (2016) "Multi-year GNSS monitoring of atmospheric IWV over Central and South America for climate studies". *Ann. Geophys.*, Vol. 34, pp. 623–639.

Calori, A., Colosimo, G., Crespi, M., Azpilicueta, F., Gende, M., Brunini, C., Mackern, M.V., (2014). "Zenith wet delay retrieval using two different techniques for the South American region and their comparison". In: Rizos, Chris, Willis, Pascal (Eds.), *International Association of Geodesy Symposia*, Berlin vol. 139, pp. 59–64.



Calori, A., Colosimo, G., Crespi, M., Mackern, M.V., (2015). "Comparison of different techniques for retrieving the ZWD over South America and surrounding oceans". In: Sneeuw, N., Novák, P., Crespi, M., Sansò, F. (Eds.), *International Association of Geodesy Symposia* vol. 142, pp. 1–7.

Calori A., J.R. Santos, M. Blanco, H. Pessano, P. Llamedo, P. Alexander, A. de la Torre (2016). "Ground-based GNSS network and integrated water vapor mapping during the development of severe storms at the Cuyo region (Argentina)". *Atmospheric Research* 176–177 pp. 267–275

Christensen EJ, Haines BJ, Keihm SJ et al (1994) Calibration of TOPEX/POSEIDON at platform harvest. *J Geophys Res Vol* 99, pp. 24465–24485

Dach R, Hugentobler H, Fridez P, Meindl M (2007) Bernese GPS Software Version 5.0, User manual, Astronomical Institute, University of Bern

Dach, R., S. Lutz, P. Walser, P. Fridez (Eds) (2015), "Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual", Astronomical Institute, University of Bern, *Bern Open Publishing*. DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9.

Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., et al., (2011). "The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system". *Q. J. R. Meteorol. Soc.* Vol. 137, pp. 553–597. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.828>.

Kursinski E, Hajj G, Schofield J et al (1997). "Observing the Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the global positioning system". *J. Geophys Res* Vol.102 pp. 23429–23465

Mitchell J.F.B. (1989), "The greenhouse effect and climate change". *Rev. Geophys* Vol. 27, pp.115–139

Mackern, M.V., J.A. Rivera; M.L. Mateo, M.F. Camisay, Calori, A. y A.M. Robin. (2017a) "Contribución del vapor de agua troposférico al desarrollo de tormentas severas en Mendoza". *II Jornadas Internacionales de Investigación, Ciencia y Universidad. UMaza*, Mendoza, octubre, 2017.

Mackern, M.V., M.L. Mateo, M.F. Camisay, P.V. Morichetti; J.A. Rivera y A.M. Robin. (2017b) "Series anuales de IWV en las estaciones SIRGAS-CON, aportes del centro de procesamiento CIMA". *Simposio SIRGAS 2017, Mendoza, Argentina*, noviembre 2017.