

Análisis de 7 años (2002-2008) de datos EOS-MODIS de contenido de vapor de agua sobre la Península Ibérica

Y.S. Bennouna¹, V.E. Cachorro¹, J. P. Ortiz de Galisteo², C. Toledano¹, A. Berjón¹, D. Fuertes¹, R. Gonzalez¹, B. Torres¹, J.L. Marcos³, L. Martín¹ y A. M. de Frutos¹

¹ Grupo de Óptica Atmosférica (GOA). Universidad de Valladolid. Prado de la Magdalena a/n, 47071 Valladolid (Castilla y León, España). E-mail: yasmine@goa.uva.es

² Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Delegación Territorial de Castilla y León, C/ Orión 1, 47014 Valladolid (Castilla y León, España).

³ Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. Universidad de Valladolid (Palencia). Av. De Madrid 57, 34007 Palencia (Castilla y León, España).

RESUMEN

Esta investigación complementa un estudio previo sobre el ciclo anual del vapor de agua precipitable (PWV) en la península Ibérica derivado de 7 años de datos de GPS, radiosondeos y fotómetros. En este estudio el ciclo anual de PWV se ha derivado de dos tipos de datos diferentes sensor satelital MODIS obtenidos de la aplicación de dos algoritmos diferentes en las regiones de lejano (IR) y cercano infrarrojo (NIR) respectivamente. Se usa tanto la plataforma Terra como Aqua para el mismo periodo de 7 años (2002-2008) y sobre 15 estaciones EUREF de la península Ibérica. En todos ellos el ciclo anual presenta la forma típica de valores bajos en invierno y valores altos en verano, pero se muestra obviamente el gradiente norte-sur y las variaciones de este a oeste de esta variable atmosférica. También se han evaluado las diferencias entre las dos técnicas (IR, NIR) que utiliza MODIS para derivar el PWV. A su vez, los valores anuales se compararon con los obtenidos mediante los datos de red GPS.

Palabras clave: vapor de agua, teledetección, ciclo anual, satélite, MODIS.

ABSTRACT

This study comes to complement a previous study on the annual cycle of precipitable water vapor (PWV) over the Iberian Peninsula derived from 7 years of GPS, Radio Sounding and sun photometer data. Here, the annual cycle of PWV is derived from two types of MODIS satellite data obtained by two different algorithms applied to the infrared (IR) and near Infrared (NIR) spectral range, using both MODIS Terra and Aqua for the same 7 year period (2002-2008), at 15 EUREF sites in the Iberian Peninsula. At all sites the annual cycle presents the typical shape with low values in the winter and high values in the summer. These satellite results clearly depict the north-south gradient. The differences between the two techniques (IN, NIR) used to derive the PWV from MODIS observations are estimated. Besides, these annual cycles are evaluated by means of comparison with those obtained with the GPS network.

Keywords: water vapor, remote sensing, annual cycle, satellite, MODIS.

INTRODUCCIÓN

El vapor de agua es el mayor gas de efecto invernadero en el sistema tierra-atmósfera pero su alta variabilidad espacial y temporal limita nuestro conocimiento sobre el balance de energía global y el del propio vapor de agua en este sistema. El parámetro a tener en cuenta para estos balances es lo que denominamos vapor de agua en columna o vapor de agua precipitable (PWV tomando las siglas en inglés) que es la integración del perfil del vapor de agua sobre toda la vertical de la atmósfera. Históricamente el perfil

del vapor de agua se ha medido mediante radiosondeos. Hoy en día los datos proporcionados por los sistemas GPS (Ground Position Systems) de alta precisión pueden ser utilizados para determinar el PWV y por tanto estudiar esta variable. Como ejemplo podemos mencionar el trabajo de Ortiz de Galisteo *et al.* (2011) donde se analiza el ciclo de PWV para establecer su climatología sobre la Península Ibérica basado en 7 años (2002-2008) de datos. En dicho trabajo, estos resultados se han comparado con los datos de las observaciones de sondeos de las estaciones de la

AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) y con los datos de tipo fotométrico dados por la red RIMA ((Red Ibérica de Medida fotométrica de Aerosoles), federada en AERONET (Aerosol Robotic Network). El número de estaciones sobre tierra sigue siendo hoy en día escasa y los periodos cubiertos por esta base de datos son de momento bastante limitados (por ser una técnica relativamente nueva) para caracterizar la variabilidad climática de una determinada zona, que detalle los cambios anuales y estacionales del PWV a escala regional. Por tanto complementar los datos de esta variable con técnicas de teledetección satelital, pueden servir también de ayuda. Estas técnicas radiométricas sobre satélite proporcionan una base diaria y con una resolución espacial del orden de 1 a 5 km sobre periodos de tiempo relativamente largos. Con la nueva generación de satélites para la observación de la Tierra de la última década se ha mejorado considerablemente la cobertura espacial así como la calidad en la obtención de datos relativos a los parámetros de humedad de la atmósfera. El sensor MODIS (“Moderate Resolution Imaging Spectrometer”) sobre las plataformas satelitales EOS (Earth Observing System (EOS) Terra y Aqua están mostrándose muy adecuadas para la determinación de diferentes propiedades de la atmósfera. Este trabajo complementa el estudio realizado por Ortiz de Galisteo *et al.* (2011). Aquí se toman los datos PWV de MODIS para el periodo 2002-2008 con el fin de construir el ciclo anual del contenido de vapor de agua sobre 15 estaciones de la Península Ibérica que corresponden a estaciones de tipo GPS, Radiosondeo o fotométrico. El trabajo evalúa también las diferencias de los dos algoritmos usados por el sensor MODIS para la determinación de la variable PWV, así como la comparación con los valores dados por la técnica GPS para el conjunto de estaciones en estudio.

METODOLOGÍA

El primer sensor instrumental MODIS fue lanzado a finales de 1999 sobre la plataforma orbital Terra, con una cobertura global diaria desde Febrero del 2000. El segundo sensor MODIS fue lanzado después sobre la plataforma Aqua dentro de la constelación de satélites que componen el A-Train en Junio de 2002. Ambas plataformas, Terra y Aqua suponen 4 pasadas por día sobre nuestra zona de estudio. Terra lo realiza entre 10:00-13:00 (UTC) por la mañana y 21:00-23:20 (UTC) por la noche, y Aqua entre 12:00-15:00 (UTC) y 01:00-03:00 (UTC) por la noche. MODIS mide la radiancia en 36 canales cu-

briendo el rango espectral de 0.44 a 15 μm , con una resolución espacial que varía desde 250 m (bandas 1 y 2), hasta 500 m (bandas 3-7) y 1 km (bandas 8-36). Los productos atmosféricos usados para el PWV son los productos estándar de nivel 2 de MODIS, lo que se denomina “collection 005” de NASA-GSFC: MOD05 para Terra y MYD05 para Aqua (<http://modis.gsfc.nasa.gov>). Estos productos de PWV se obtienen mediante dos métodos diferentes, uno basado en las bandas de absorción del vapor de agua en el infrarrojo lejano (IR) y otro en las bandas del infrarrojo cercano (NIR).

Site	Lat. (deg)	Lon. (deg)	Alt.	Media PWV (cm)	Media PWV (cm)
Alicante	38.33	-0.48	10	2.1 \pm 0.9	1.6 \pm 1.0
Almería	36.85	-2.46	77	1.7 \pm 0.7	1.7 \pm 0.9
Coruña	43.36	-8.40	12	1.8 \pm 0.8	1.2 \pm 0.8
Gibraltar	36.15	-5.35	3	2.0 \pm 0.7	1.6 \pm 0.8
Huelva	37.10	-6.73	0	2.2 \pm 0.8	1.4 \pm 0.8
Lisboa	38.76	-9.13	104	1.9 \pm 0.8	1.6 \pm 0.8
Madrid	40.46	-3.58	631	1.2 \pm 0.6	1.3 \pm 0.7
Murcia	38.00	-1.16	61	1.8 \pm 0.8	1.8 \pm 1.1
Palencia	41.98	-4.51	750	1.2 \pm 0.6	1.1 \pm 0.7
San Fernando	36.46	-6.20	40	2.0 \pm 0.8	1.7 \pm 0.8
Santander	43.46	-3.80	48	1.7 \pm 0.8	1.2 \pm 0.8
Valencia	39.48	-0.33	28	1.8 \pm 0.8	1.6 \pm 1.0
Villafranca	40.45	-3.95	596	1.3 \pm 0.6	1.3 \pm 0.7
Yebes	40.51	-3.08	921	1.2 \pm 0.6	1.2 \pm 0.7
Zaragoza	41.66	-1.00	263	1.5 \pm 0.7	1.5 \pm 0.9

Tabla 1: Información de la localización de las estaciones y valor medio anual de MODIS-PWV para los datos de tipo IR y NIR.

Las primeras determinaciones del contenido de vapor de agua en la atmósfera mediante sensores radiométricos sobre satélites se realizaron en la región del IR medio o lejano, y más recientemente se ha hecho uso de la radiación solar dispersada por la superficie terrestre en la región espectral alrededor de 1 μm . El algoritmo basado en las radiancias MODIS-IR de 3-14.5 μm obtiene los perfiles de temperatura y humedad, el contenido de ozono y la temperatura de la superficie de la tierra (S.W. Seeman and J. Li, 2003). El algoritmo MODIS NIR, es descrito en Gao *et al.* (2003) y está basado en la razón de las señales de las bandas que contienen la absorción del vapor de agua, 0.905 y 0.936 μm frente a las ventanas atmosféricas representadas por los canales de 0.865 y 1.24 μm . El algoritmo PWV-NIR solo es aplicable durante el día sobre zonas de tierra de baja reflectividad y sobre nubes tanto sobre tierra como sobre océano mientras que el algoritmo en el IR obtiene el PWV tanto durante el día como por la noche. Estos últimos datos se obtienen con una resolución espacial de 5x5 km^2 y los del NIR con una resolución de 1x1 km^2 . Este estudio presenta los resultados para 15 de las estaciones usadas en Ortiz de Galisteo *et al.* (2011), cuyas coordenadas geográficas y altitud

se muestran en la Tabla 1. Para representar la variable PWV-MODIS sobre esas estaciones, se extrajeron los datos MODIS adecuados a fin de seleccionar todos los píxeles que cayeran dentro del área de 5 km alrededor de la estación, y promediados de forma que fueran coincidentes con el “overpass”. Aquí nos centramos en la evaluación del ciclo anual de PWV para las diferentes estaciones y con 7 años de datos, desde 2002 a 2008. Se calcularon previamente los valores medios diarios sobre todos los “overpass” válidos y después se calculó una única media mensual a través de todos los valores diarios de cada mes en ese periodo, lo que se denomina promedio mensual multi-anual.

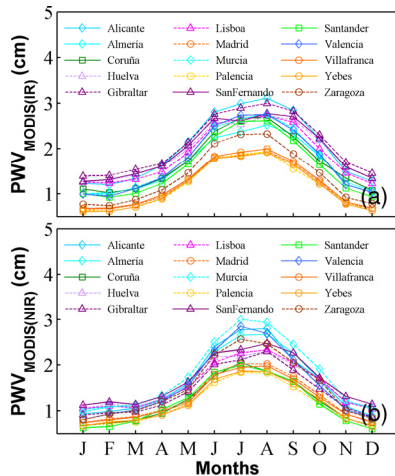


Figura 1: Ciclo anual de PWV sobre 15 estaciones de la Península Ibérica obtenidos de datos MODIS por el algoritmo: a) IR; b) NIR.

RESULTADOS

El ciclo anual de PWV-MODIS

El ciclo anual del vapor de agua (PWV) dado por MODIS según la metodología anterior se muestra en Figura 1. Para ambos métodos, tanto el IR (Figura 1a) como el NIR (Figura 1b) el PWV presenta un claro ciclo anual en todas las estaciones con valores bajos en invierno, con un mínimo entre 0.5 y 1.4 cm, y valores altos en verano, con el máximo variando entre 1.8 y 3.2 cm. Ambos resultados muestran un gradiente norte-sur del contenido de vapor de agua. En invierno, el gradiente norte-sur es menor en los datos de tipo IR comparado con el NIR, pero en verano ocurre lo contrario. En verano los valores de PWV son en general más altos en el Mediterráneo, tal como en Alicante y Valencia, y más bajos en lugares del interior como Palencia,

Yebes y Villafranca. El mes de Julio presenta un mínimo característico de las estaciones del suroeste (Huelva y San Fernando) que es particularmente marcado en los datos de tipo IR. Curiosamente, en Gibraltar aparece un mínimo muy débil para los datos de NIR mientras que este desaparece o no existe en el caso de los IR. Este mínimo ha sido reportado en trabajos recientes como una característica de este ciclo anual (Ortiz de Galisteo *et al.*, 2011). Este mínimo parece estar correlacionado con el mínimo observado en el ciclo anual de otro parámetro atmosférico, el relativo al espesor óptico de aerosoles (Bennouna *et al.*, 2011). De la forma de este ciclo del PWV podemos clasificar la península Ibérica en 4 zonas o regiones: Atlántica, continental, Mediterránea, y zona suroeste.

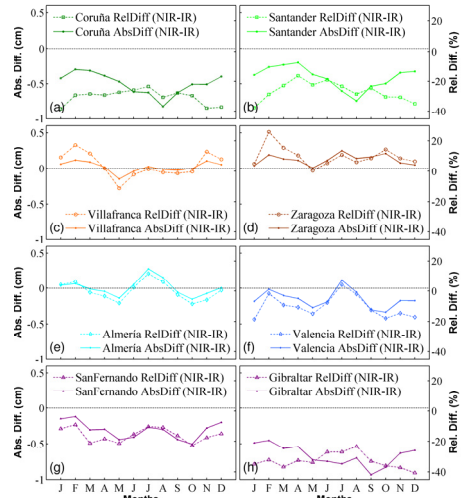


Figura 2: Diferencias absolutas y relativas entre el método NIR y IR (NIR-IR) para el ciclo anual del PWV en 8 estaciones: a) Coruña, b) Santander, c) Villafranca, d) Zamora, e) Almería, f) Valencia, g) Gibraltar y h) San Fernando.

Diferencias entre los datos MODIS IR y NIR

En la Figura 2 se muestran las diferencias (ambas, absoluta y relativa) entre el ciclo anual dado por el algoritmo IR y NIR para 8 estaciones entre las 15 incluidas en este estudio. Primeramente se muestran las diferencias de estas estaciones como representativas de cada región de la Península y en segundo lugar se dan dos ejemplos para cada una de estas 4 regiones, para mostrar mejor estos comportamientos. En general las diferencias absolutas entre estos dos métodos varían entre -1 y +0.4 cm, y las diferencias relativas presentan un amplio rango, variando

entre -40 y 30 %. Para la mayoría de los sitios analizados los valores de PWV dados por el método en el IR son mayores que los del NIR excepto para las estaciones del interior, Villafranca y Zaragoza y para la estación costera de Valencia. Las diferencias entre el IR y el NIR pueden variar entre un 15% (San Fernando) a un 30% (Zaragoza) para los valores mensuales. El acuerdo entre las dos técnicas en promedio es mejor es la estación de Villafranca, con un excelente acuerdo en los meses de verano. El peor acuerdo se ha obtenido en Gibraltar. Las variaciones del error absoluto y relativo están correlacionadas en el caso de Villafranca, Almería, Valencia y en mayor extensión en el caso de Zaragoza y San Fernando, mientras su comportamiento aparece diferente en sitios como La Coruña, Santander o Gibraltar.

Comparación entre los datos MODIS y GPS

Los ciclo anuales de PWV derivados por GPS en Ortiz de Galisteo *et al.* (2011) se han utilizado aquí para comparar con los datos de MODIS en todas las estaciones de estudio. En la Figura 3 se muestran los valores dados por los dos métodos de MODIS y por GPS para 4 estaciones: Coruña, Yebes, Almería y San Fernando.

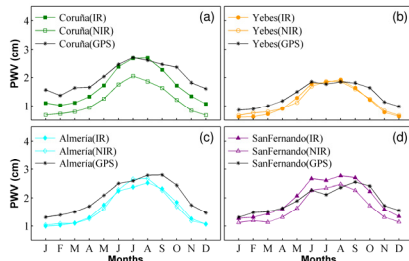


Figura 3: Comparación del ciclo anual de PWV en 4 estaciones GPS: **a)** Coruña, **b)** Yebes, **c)** Almería y **d)** San Fernando.

Como ya se mencionó las diferencias entre los métodos IR y NIR son mayores en la zona del Atlántico y suroeste de la península Ibérica, como se puede ver en las estaciones de la Coruña y San Fernando. En el caso de la Coruña, en general los valores de MODIS IR concuerdan mejor con los valores de GPS que los dados por MODIS NIR, y el mejor acuerdo aparece en los meses de verano, junio, julio Agosto. Para San Fernando es en verano cuando MODIS NIR concuerda mejor con GPS, pero en invierno lo hace con MODIS IR. Para un sitio continental como Yebes o Mediterráneo como Almería las diferencias entre los dos valores IN o NIR es depreciable. Sin embargo en este último caso aunque concuerda bien con el GPS durante el verano tiende a sobreesti-

mar los valores de GPS sobre un 20% en invierno. En la mayoría de los casos MODIS infraestima los valores de GPS y el mejor acuerdo entre aparece en la estación de Yebes. El peor acuerdo se ha obtenido para La Coruña (costa Atlántica).

CONCLUSIONES

Se ha evaluado el ciclo anual del PWV sobre 7 años de datos del sensor MODIS (datos nivel 2) tanto para datos de tipo IN como NIR para 15 estaciones de la red GPS-EUREF, representativas de la Península Ibérica. El ciclo anual presenta valores altos en verano y bajos en invierno en todas las estaciones, comportamiento bien conocido, pero aquí se determinan con rigurosidad estos valores para cada estación para este tipo de dato satelital. También se muestra el conocido gradiente norte-sur. Se han evaluado las diferencias con GPS en todas estas estaciones y en general MODIS tiende a sobrestimar los valores de GPS, particularmente en invierno, mientras en verano son más parecidos. En general el mejor acuerdo se da para las estaciones del interior de la península o zonas continentales.

BIBLIOGRAFÍA

- ORTIZ DE GALISTEO, J. P. *et al.*, 2011. *Analysis of the annual cycle of precipitable water vapor above the Iberian Peninsula*. International Journal of Climatology, Submitted in December 2010, under revision.
- GAO, BC. and KAUFMAN, Y. J., 2003. *Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels*. Journal of Geophysical Research, 108(D13), 4389.
- BENNOUNA, Y.S. *et al.*, 2011, *Comparison of atmospheric aerosol climatologies over southwestern Spain derived from AERONET and MODIS*, Remote Sensing of Environment, 115, 1272–1284.
- SEEMANN, SW and Li, J., 2003, *Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS infrared radiances*. Journal of Applied Meteorology, 42, 1072-1091.
- AGRADECIMIENTOS
- Agradecemos al equipo de NASA MODIS por los datos de este sensor y al MICIIN por la financiación de los proyectos CGL2008-05939-CO3-01/CLI y CGL2009-09740, y la Acción Complementaria CGL2010-09480-E. También al ITACyL la financiación del Proyecto EVACyL.