

## Variación espacio-temporal del vapor de agua precipitable (PWV) en la costa norte del Perú para el periodo 2001-2017

Jhon Brayan Guerrero Salinas, Rolando Renee Badaracco Meza y Joel Rojas Acuña

Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Ap. Postal 14-0149, Lima, Perú

*Recibido 11 de octubre del 2018, Revisado el 7 de diciembre de 2018.*

*Aceptado el 12 de diciembre de 2018*

DOI: <https://doi.org/10.33017/RevECIPeru2018.0016/>

### Resumen

El objetivo de este estudio fue realizar el análisis de la variabilidad espacial y temporal de la columna de vapor de agua precipitable (PWV, por sus siglas en inglés) en la costa norte del Perú (3°S-7°S). Se analizaron un total de 17 años de datos PWV obtenidas del sensor MODIS/Terra, de las cuales se generaron mapas de climatología provisional y de desviación estándar, para así obtener los patrones de distribución espacial promedio y variabilidad temporal. El mapa climatológico provisional de PWV muestra en general que las zonas de mayor variabilidad de PWV se encuentran en el océano y tierras bajas, mientras que las zonas de menor variabilidad se encuentran en la región de los Andes. Los diagramas de Hovmöller y la serie de tiempo identificaron un ciclo anual y el aumento de los valores extremos en los meses de verano a partir del año 2010. El análisis espectral de potencia de la serie de tiempo aparte de identificar el periodo anual también identifica un periodo semianual que se debe al cambio estacional verano-invierno.

**Descriptor:** Vapor de agua precipitable, Costa norte, MODIS/TERRA, Hovmöller.

### Abstract

The objective of this study was to perform the analysis of the spatial and temporal variability of the precipitable water vapor column (PWV) on the northern coast of Peru (3°S-7°S). A total of 17 years of PWV data obtained from the MODIS/Terra sensor were analyzed, from which maps of provisional climatology and standard deviation were generated, in order to obtain the patterns of average spatial distribution and temporal variability. The provisional climatological map of PWV shows in general that the areas with the greatest variability of PWV are found in the ocean and lowlands, while the areas of least variability are found in the Andes region. The Hovmöller diagrams and the time series identified an annual cycle and the increase of the extreme values in the summer months from the year 2010. The power spectral analysis of the time series apart from identifying the annual period also identifies a period semiannual that is due to the seasonal change summer-winter.

**Keywords:** Precipitable water vapor, Northern coast, MODIS/TERRA, Hovmöller.

### 1. Introducción

#### 1.1 El vapor de agua en el clima

El término de humedad atmosférica se refiere a cualquiera de un conjunto de formas de especificar

la cantidad de vapor de agua en el aire. De los diferentes términos usados para expresar esta cantidad, los más comunes en meteorología son el vapor de agua precipitable (PWV: siglas en inglés) y la humedad relativa (HR) [1]. El vapor de agua precipitable (PWV) se define como el vapor de agua

atmosférico total contenido en una columna vertical de área, transversal unitaria, que se extiende entre dos niveles específicos; se expresa comúnmente en términos de la altura a la cual esa agua podría permanecer, si se condensara y almacenara en un recipiente de la misma sección unitaria transversal [2]. El vapor de agua está en constante ciclo y juega un rol importante, influyendo en el comportamiento del sistema climático. Se genera por evaporación del agua que se encuentra en la superficie continental y oceánica, condensándose para formar nubes y posteriormente retornando a la superficie en forma de precipitación.

## 1.2 El vapor de agua y los fenómenos atmosféricos

La abundancia de vapor de agua es necesaria para las fuertes/intensas lluvias. Las anomalías de la precipitación son una característica natural recurrente del clima. En la actualidad se toman en cuenta los datos de PWV de alta resolución temporal en la vigilancia y observación de condiciones meteorológicas extremas, tales como: inundaciones y/o periodos húmedos y sequias, debido a que existe una relación física entre el PWV y la ocurrencia de estos fenómenos, por ejemplo, en EE. UU. se demostró que un evento de inundación se caracteriza por un aumento anómalo del PWV acompañado por una disminución de la presión en la superficie [3].

## 1.3 Importancia del vapor de agua precipitable (PWV)

La importancia del PWV es triple [4]. En primer lugar, es útil para prever los patrones de precipitación, e.g., [5,6]. En segundo lugar, la aplicación del PWV como una fuente adicional de información sobre la cantidad de vapor de agua en el aire, tiene un impacto significativo en los estudios de predicción y clima, e.g. [7,8]. En tercer lugar, la recuperación del PWV de diferentes satélites se puede combinar con el PWV de radiosondeos, de estaciones de GPS (Sistema de Posicionamiento Global) y otros datos de observación, para obtener la distribución de PWV en todas las condiciones climáticas. Además, los productos de PWV también contienen información valiosa sobre el transporte de humedad en la atmósfera y el ciclo hidrológico (e.g. [9,10]).

## 1.4 Climatología del vapor de agua precipitable

Series de estimaciones de la distribución climatológica del vapor de agua están disponibles a escala global. La serie proviene de los análisis del

“National Center for Environmental Prediction” (NCEP) y el “European Centre for Medium-Range Weather Forecasts” (ECMWF) a partir de estudios y el procesamiento de datos satelitales, tales como el TOVS Pathfinder (The TIROS (Television Infrared Observation Satellite) Operational Vertical Sounder (TOVS) Pathfinder Path), el Proyecto GEWEX GVAP (The GEWEX water vapor assessment (G-VAP)) y de satélites geoestacionarios. El inconveniente es que todo este conjunto de datos sufre de una o más deficiencias que los hacen inadecuados para estudios detallados de variabilidad interanual y de tendencias a largo plazo [11]. Sin embargo, desde el año 2000 se cuenta con datos satelitales sobre el vapor de agua en la atmósfera de alta resolución espacial y temporal en los sistemas de adquisición de datos MODIS/Terra y MODIS/Aqua (MODIS (or Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) is a key instrument aboard the Terra (EOS AM) and Aqua (EOS PM) satellites), lo que permite realizar estudios climatológicos. Los datos MODIS proporcionan mediciones de alta resolución temporal y espacial del PWV. Estas medidas han sido ampliamente validadas con las observaciones sobre la mayor parte de las zonas terrestres [12]. Con este conjunto de datos, se realiza el análisis climatológico del PWV en la costa norte del Perú.

El propósito de esta investigación es contribuir en el conocimiento sobre el PWV en la costa norte peruana, zona costera caracterizada por su alta concentración de humedad y sujeta a altas tasas de precipitación en los meses de verano debido al Fenómeno de El Niño y a los fenómenos extremos estacionales. A continuación, se analiza la climatología del PWV, la estacionalidad (variación periódica durante el año), variabilidad interanual (variación temporal a lo largo de los años) y anomalías (diferencia entre el valor medio observado con respecto al valor climatológico).

## 1.5 Área de estudio y datos

El área de estudio está conformada por la costa norte peruana por debajo de 1000 msnm aproximadamente (figura 1). Encima de esta elevación, cesa la influencia de la neblina debido al fenómeno de inversión térmica. El clima a lo largo de gran parte de la costa peruana está caracterizado por tener bajas precipitaciones, alta concentración de humedad y cielo cubierto por nubes bajas a lo largo de casi todo el año [13].

### 1.5.1 Datos utilizados

Se utiliza datos diarios del producto MODIS de vapor agua precipitable (MOD05) de Nivel 2 que consiste en la cantidad total de vapor de agua de la columna atmosférica. El nombre corto para este producto de vapor de agua precipitable es MOD05\_L2, y contiene los datos recopilados por el sensor MODIS/Terra. Los datos MOD05\_L2 utilizados están actualizados en la Colección 6 (C6) de datos MODIS. Los datos del Nivel 2 se generan a una

resolución espacial de 1 km x 1 km utilizando el algoritmo de infrarrojo cercano (NIR) durante el día. La aplicación del algoritmo infrarrojo cercano (NIR) permite estimar el PWV en áreas despejadas del planeta y sobre el tope de las nubes en áreas nubladas. El conjunto de datos utilizado abarca el periodo 2001-2017. Los datos son de acceso libre (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>).

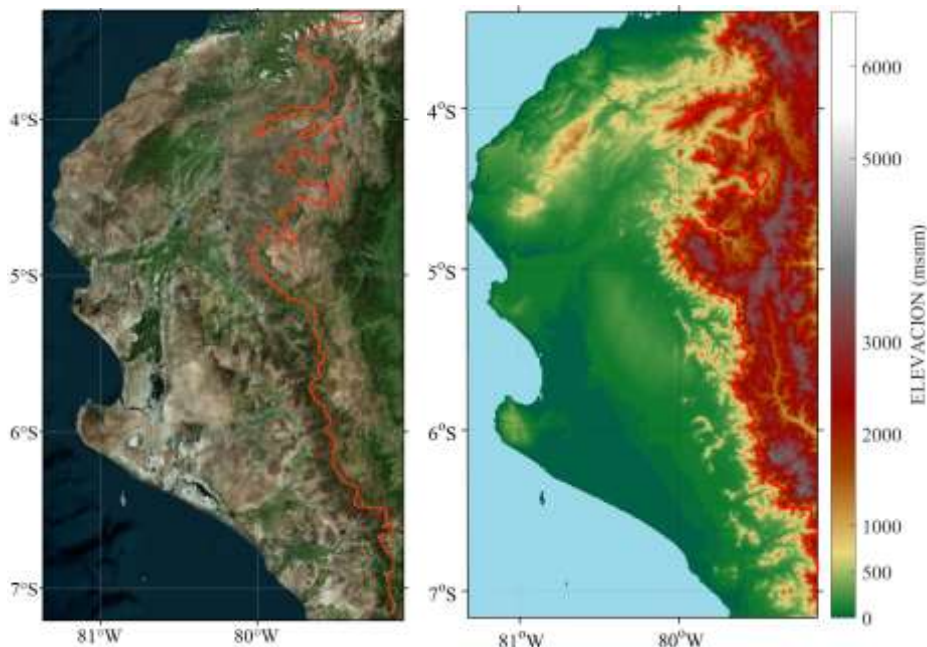


Figura 1: Ubicación del área de estudio (izquierda). Modelo de elevación digital GTOPO (derecha). La línea en rojo corresponde al límite de 1000 msnm.

## 2. Metodología

### 2.1 Tratamiento de los datos PWV MODIS/Terra

Se implementó el módulo “MODIS Conversion Toolkit” (MCTK) para pre-procesar y georreferenciar los datos imágenes diarios de Nivel 2 de vapor de agua precipitable MODIS. En los datos de imágenes diarios de PWV es necesario eliminar el ruido, modificando aquellos píxeles cuyo nivel de intensidad es muy diferente al de sus vecinos y mejorar la calidad visual de las imágenes. El origen del ruido puede estar tanto en el proceso de adquisición de la imagen o dentro de los errores en el algoritmo de estimación del PWV. Las operaciones de filtrado tienen por objeto reducir el ruido. Se aplica a las imágenes diarias de PWV el filtro de la mediana usando una ventana móvil de 3 x 3, que logra mejorar notablemente el contraste espacial, sin alterar el valor de los datos en comparación con otras técnicas de filtrado.

Para el estudio de la distribución espacial y temporal de PWV se utiliza la técnica de máximo valor compuesto (MVC). Esto se realiza seleccionando, para cada píxel, el máximo valor de PWV del mes, teniendo en cuenta la presencia de nubes y la calidad de los datos. El MVC mensual es una imagen, en la que cada píxel toma el valor máximo de PWV alcanzado durante el mes, es decir, se selecciona el momento de máxima humedad de ese periodo. Esto disminuye la distorsión o contaminación por nubes u otros factores atmosféricos que reducen los valores de PWV. Por lo tanto, el máximo valor de PWV representa las condiciones de menor contaminación de los datos.

Utilizando los promedios mensuales se construyó el mapa climatológico provisional con su respectiva desviación estándar del PWV en la costa norte del Perú, se utilizaron diagramas latitud vs tiempo (diagramas Hovmöller) para representar la variabilidad temporal y espacial del PWV en una área geográfica que abarcó desde la línea de costa

y los 1000 msnm. También se incorporaron diagramas Hovmöller de anomalía del PWV.

## 2.2 Espectro de potencia de la serie temporal

El análisis de series de tiempo tiene como objetivo investigar el comportamiento temporal del PWV. El análisis se enfoca en detectar patrones temporales. El concepto de regularidad de una serie de tiempo se puede expresar mejor en términos de las variaciones periódicas del fenómeno que produjo la serie [14]. En vista de ello el enfoque es en el dominio de frecuencia.

El espectro de potencia permite detectar los cambios en la ciclicidad a lo largo del tiempo. Usamos método el antiguo del *periodograma*, que ha mostrado buenos resultados. Este método fue inventado por *Arthur Schuster* en 1898 para estudiar el clima y calcula el espectro de potencia

mediante la realización de la transformada de Fourier [15]. Para la serie de tiempo de PWV se identificaron las frecuencias que explican la mayor parte de la variabilidad de las series, mediante la transformada de Fourier.

## 3. Resultados y discusión

En la figura 2 se presenta el promedio mensual del PWV y su desviación estándar para el periodo 2001-2017. Los resultados indican que existe una diferencia de aproximadamente 10 mm de valores de PWV entre las zonas del océano costero y del continente, debido a diferencias de temperatura de ambas superficies que influyen en las tasas de evaporación [16]. Las áreas de alto valor promedio de PWV se pueden observar en elevaciones bajas, éstas se caracterizan por tener temperaturas promedio altas y estar muy cerca de grandes fuentes de humedad.

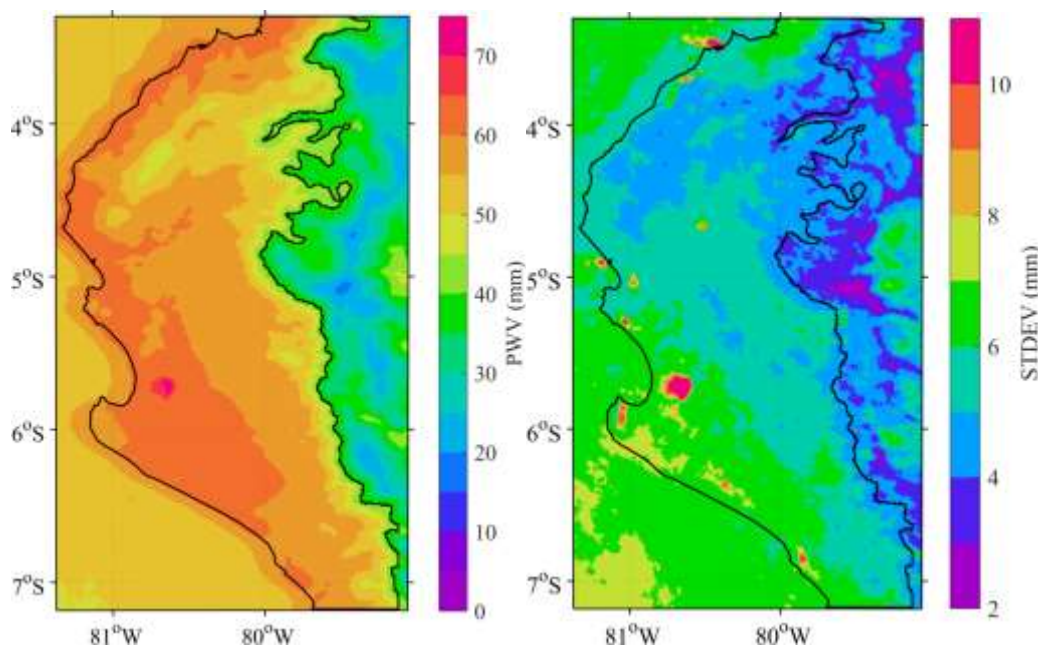


Figura 2: Climatología promedio mensual del PWV para el periodo 2001-2017 (Izquierda). Desviación estándar del PWV (Derecha).

Al correlacionar espacialmente la topografía del área de estudio (figura 1) y el mapa climatológico de PWV se observa que en la zona continental la concentración de vapor de agua y la elevación tienen una relación inversa [16]. La mayor cantidad de PWV se encuentra concentrado en las zonas bajas desérticas (menores a 1000 msnm). El desierto de Sechura concentra la mayor humedad atmosférica (> 50 mm). En esta zona destaca la bahía de Paita con valores de PWV muy elevados por encima de 70 mm. Cerca de la bahía se forma la laguna de La Niña en los años cuando se da el

Fenómeno de El Niño. Cuando aparece la laguna, esta constituye una de las zonas de alta humedad debido a la evaporación. Los altos valores de desviación estándar (> 10 mm) indican una alta variabilidad del PWV mostrando que este fenómeno es excepcional.

El efecto de la topografía sobre el PWV es evidente no solo en los Andes sino también en la costa peruana. Las elevaciones del Parque Nacional Cerros de Amotape ubicado en el norte de Piura (~4S°) se reflejan en el mapa

climatológico de PWV. En regiones más elevadas (> 1000 msnm) la distribución de vapor de agua es mucho menor (en el rango de 20 y 40 mm). La figura 2 se muestra la desviación estándar del PWV. Las zonas entre azul y verde son aquellas que muestran un menor valor de la desviación estándar lo que indica menor variabilidad, tal como sucede en las regiones altas. En cambio, las áreas entre amarillo y rojo corresponden a zonas de alta variabilidad debido a la influencia de la humedad del océano [16].

La figura 3 muestra el diagrama Hovmöller, latitud vs tiempo de la variación climatológica del PWV a lo largo de todo el año en el periodo 2001-2017. Los diagramas de Hovmöller se usan para graficar la evolución temporal de los perfiles verticales de cantidades escalares tales como la temperatura, la densidad o las concentraciones de constituyentes de la atmósfera o el océano.

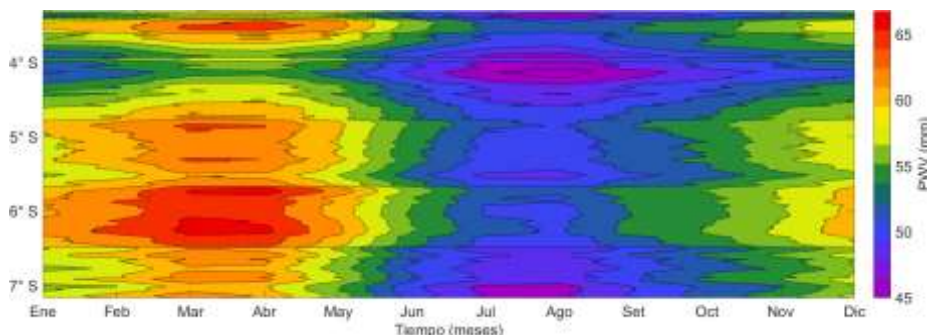


Figura 3: Diagrama de Hovmöller de la variación anual del PWV para el periodo 2001-2017. El diagrama muestra isolíneas de variación espacial y temporal del PWV durante un periodo de 17 años.

El diagrama de Hovmöller de la figura 3 muestra dos patrones verticales debido a la variabilidad estacional. El ciclo anual de PWV en la costa norte del Perú, se caracteriza por tener valores máximos durante las estaciones verano-otoño (de enero a mayo) y mínimos durante el invierno (de junio a septiembre). Sin embargo, este ciclo muestra

diferencias en el patrón latitudinal en el verano; fue bastante débil en las áreas alrededor de ~4°S debido al efecto de la topografía. Esta zona se caracteriza por tener bajas concentraciones de PWV durante todo el año. Asimismo, se encontraron los valores más altos de PWV (> 60 mm) en áreas alrededor de ~6°S.

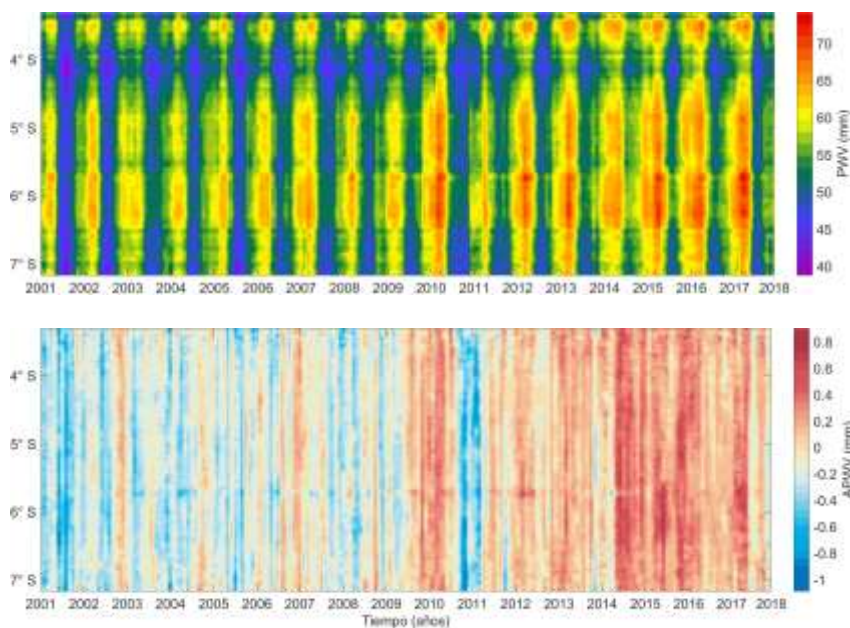


Figura 4: Diagrama de Hovmöller de la variación interanual del PWV (arriba). Diagrama Hovmöller de las anomalías de PWV (debajo). Se destaca el aumento de los valores de humedad en los meses de verano desde el 2010 hacia adelante.

La figura 4 muestra la variación interanual del PWV. En el diagrama se refleja la estacionalidad anual del PWV, con valores máximos en verano y mínimos en invierno. Entre los años 2010 y 2017 los máximos de PWV en el verano (entre 5 S° y 7 S°) muestran un notable aumento en comparación con el periodo de 2001 y 2009. Esto está relacionado al aumento de la tasa evaporación debido al calentamiento global, [17]. En ~4 S° el PWV tiene menores valores (< 60 mm) por efecto de la elevación de los Cerros de Amotape. El diagrama de Hovmöller de las anomalías de PWV (APWV) corrobora el aumento de la concentración de humedad de 2010 hacia adelante (con APWV > 0.4 mm). Estas anomalías positivas correlacionan bien con el aumento de la temperatura media

global [17]. El aumento de la temperatura origina una mayor tasa de evaporación de agua del océano lo que incrementa los niveles de humedad en la atmosfera. Este aumento progresivo de la humedad atmosférica también se observa en la serie de tiempo de PWV de la figura 5. Los valores máximos y mínimos anuales sufren un incremento con tendencia positiva. La tendencia se incrementa a partir del año 2010.

En la figura 5 se muestra la serie de tiempo del PWV para la costa norte del Perú. Esta serie muestra un comportamiento armónico debido a la fuerte influencia de la componente de estacionalidad anual.

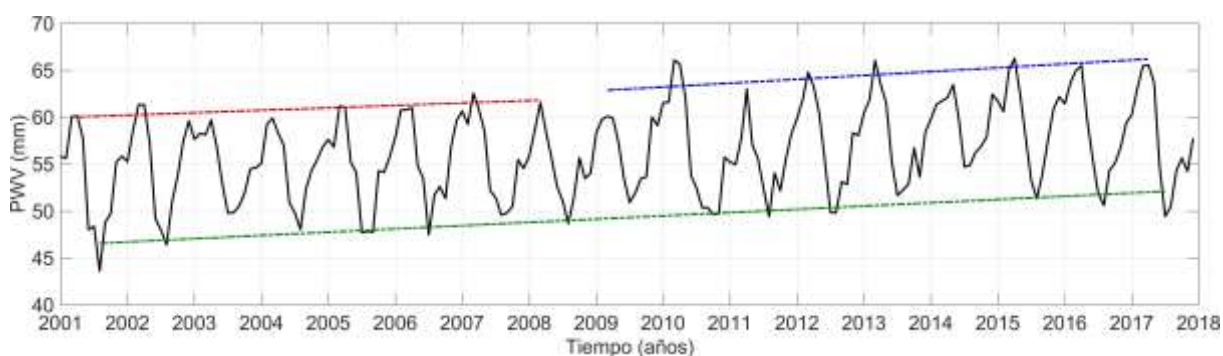


Figura 5: Serie temporal de PWV del área de estudio para el periodo 2001-2017.

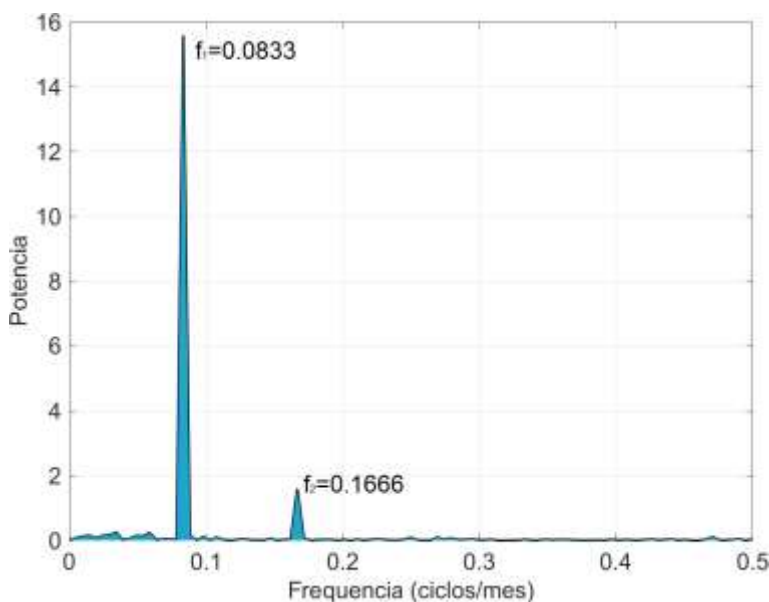


Figura 6: Espectro de potencias. Los dos picos que se observan en el espectro están asociados al ciclo anual y semianual respectivamente.

La serie de tiempo también muestra el aumento de los picos máximos del PWV a partir del año 2010, tal como se evidencia en los diagramas de Hovmöller de la figura 4. Para encontrar si existen

otras componentes periódicas distintas al anual, se recurre al espectro de potencia. La figura 6 muestra el espectro de potencia de la serie temporal del PWV, el cual grafica el contenido de

energía o potencia versus frecuencia de la serie temporal. Esta representación, por tanto, nos permite centrar la atención en las frecuencias que más nos interesen. El espectro de potencia de la figura 6 identifica dos modos de oscilación principales de frecuencias  $f_1=0.0833 \text{ mes}^{-1}$  y  $f_2=0.1666 \text{ mes}^{-1}$  representados en dos picos asociados al ciclo anual (12 meses) y semianual (6 meses) respectivamente. El periodo anual corresponde al periodo de traslación de la Tierra alrededor del Sol. El periodo semianual es la contribución del cambio interestacional entre el verano e invierno.

#### 4. Conclusiones

El análisis de la distribución espacial del PWV en la costa norte del Perú indica una relación inversa con la elevación del terreno. La variación temporal del PWV describe un ciclo anual con valores máximos y mínimos en verano e invierno. A partir del año 2010 los valores máximos del PWV en los meses de verano se han incrementado (APWV > 0.4 mm) en comparación de años anteriores. Esto debido al aumento de la temperatura global a efecto del cambio climático.

#### Agradecimientos

El autor agradece al Laboratorio de Teledetección (LABTEL)–Facultad de Ciencias Físicas-UNMSM, por brindar la formación y el equipamiento para este trabajo. Un agradecimiento especial al Dr. Leonidas C. Ocola Aquisé por sus valiosas contribuciones a la elaboración de este trabajo.

#### Referencias

- [1] C.D. Ahrens, *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate and The Environment*, 9th ed., (Cengage Learning-Brooks/Cole, 2009), pp. 88-95.
- [2] AMS (American Meteorological Society) (2000), *Glossary of Meteorology*, 2<sup>nd</sup> ed., Boston, Mass., Version electrónica: [http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main\\_Page](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page).
- [3] I. Bordi, T. Raziéi and L. S. Pereira, Ground-Based GPS Measurements of Precipitable Water Vapor and Their Usefulness for Hydrological Applications, *Water Resources Management* **29** (2015) 471–486.
- [4] J. Zheng, S. Chun-Xiang, L. Qi-Feng and X. Zheng-Hui, Evaluation of Total Precipitable Water over East Asia from FY-3A/VIRR Infrared Radiances, *Atmospheric and Oceanic Science Letters* **3** (2010) 93-99.

- [5] P. J. Robinson and J.T. Lutz, Precipitation efficiency of cyclonic storms, *Annals of the Association of American Geographers* **68** (1978) 81–88.
- [6] O. Ojo, The distribution of mean monthly precipitable water vapor and annual precipitation efficiency in Nigeria, *Theoretical and Applied Climatology* **18** (1970) 221–238.
- [7] M. A. Filiberti, L. Eymard and U. Urban, Assimilation of satellite precipitable water in a meteorological forecast model, *Monthly Weather Review* **122** (1994) 486–506.
- [8] V. Rakesh, R. Singh, P. K. Pal and P.C. Joshi, Impact of satellite-observed winds and total precipitable water on WRF short-range forecasts over the Indian region during the 2006 summer monsoon, *Weather and Forecasting* **24** (2009) 1706–1731.
- [9] I. L. Wittmeyer and T. H. Vonder Haar, Analysis of the global ISCCP TOVS water vapor climatology, *Journal of Climate* **6** (1994) 1282–130.
- [10] B. C. Gao, P. K. Chan and R. R. Li, A global water vapor data set obtained by merging the SSMI and MODIS data, *Geophysical Research Letters* **31** (2004) L18103.
- [11] NASA (National Aeronautics and Space Administration), EOS Science Plan: The State of Science in the EOS Program, *Create Space Independent Publishing Platform*, (2013).
- [12] L. Ning, J. Qin, K. Yang, Y. Gao, X. Xu and T. Koike, On the use of GPS measurements for Moderate Resolution Imaging Spectrometer precipitable water vapor evaluation over southern Tibet, *Journal of Geophysical Research* **116** (2011).
- [13] T. Veblen, K. R. Young and A. R. Orme (Eds.), *The physical Geographic of South America*, (Oxford University Press, 2007).
- [14] R.H. Shumway and D. S. Stoffer, *Time Series Analysis and Its applications: Whith R Examples*, 4 th ed., (Springer, 2017), pp. 173-174.
- [15] A. Schuster, The periodogram and its optical analogy, *Royal Society* **77** (1906) 136-140.
- [16] J. Guerrero, M. Sc. thesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2015.
- [17] IPCC, Quinto informe de evaluación, 2014.

E-mail: [jhongs1988@gmail.com](mailto:jhongs1988@gmail.com)