

Spatio-temporal variation of the change in total water storage and precipitation using GRACE and TRMM data: Lima - Callao in Peru

Juan Mendoza, Physical Sciences Master¹, Joel Rojas, Physical Sciences Doctor², Cesar Jimenez, Physical Sciences Master², Antenor Leva, Research and University Teaching Master¹, and Yesmi Ortega, System Engineer Master¹

¹Universidad Nacional del Callao. Callao - Perú, jnmendozan@unac.edu.pe, alevaa@unac.edu.pe, ykortegar@unac.edu.pe

²Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú, rojasa@unmsm.edu.pe, cjimenezt@unmsm.edu.pe

Abstract— Spatio-temporal variation of the anomalies of the gravity field associated with the change in total water storage and precipitation in Lima - Callao was analyzed. GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) and TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) data monthly were introduced in this study. Autocorrelation, cross-correlation and decomposition analysis of the time series was performed, finding that both series present annual cycles but with different intra-annual variations. The gravitational anomalies increased and decreased in an annual cycle, positive gravitational anomalies varied from December to May and negatives gravitational anomalies vary from June to November. Precipitation mainly presents an annual cycle, although other frequencies of lower spectral power of 6, 4 and 3 months were found, precipitation increases from August to March, decreases rapidly until May followed by a dry period from May to August. Cross correlation was applied between both time series obtaining a maximum correlation coefficient of 0.8677 for a lag of two months, this lag seems to be related to the recharge mechanisms of the total water storage, which reveals that the Lima - Callao region receives indirect recharge.

Keywords—Total water storage, precipitation, TRMM, GRACE
Tel

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.275>

ISBN: 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

Variación espacio - temporal del cambio de agua total almacenada y la precipitación usando datos GRACE y TRMM de Lima-Callao en Perú

Juan Mendoza, Maestro en Ciencias Físicas¹, Joel Rojas, Doctor en Ciencias Físicas², Cesar Jimenez, Maestro en Ciencias Físicas², Antenor Leva, Maestro en Investigación y docencia universitaria¹, and Yesmi Ortega, Maestra en Ingeniería de Sistema¹

¹Universidad Nacional del Callao. Callao - Perú, jnmendozan@unac.edu.pe, alevaa@unac.edu.pe, ykortegar@unac.edu.pe

²Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú, brojasa@unmsm.edu.pe, cjimenezt@unmsm.edu.pe

Resumen- Las anomalías gravitacionales aumentaron y disminuyeron en un ciclo anual, las anomalías gravitacionales positivas variaron de diciembre a mayo y las anomalías gravitacionales negativas de junio a noviembre. La precipitación presenta principalmente un ciclo anual, aunque se encontraron otras frecuencias de menor poder espectral de 6, 4 y 3 meses, la precipitación aumenta de agosto a marzo, disminuye rápidamente hasta mayo seguido de un período seco de mayo a agosto. Se aplicó correlación cruzada entre ambas series de tiempo obteniendo un coeficiente de correlación máximo de 0.8677 para un desfase de dos meses, este desfase parece estar relacionado con los mecanismos de recarga del almacenamiento total de agua, lo que revela que la región Lima - Callao recibe recarga indirecta.

Palabras clave- Almacenamiento total de agua, precipitación, TRMM, GRACE Tel

I. INTRODUCCIÓN

Las variaciones mensuales de las anomalías gravitatorias usando los datos de la misión GRACE relacionados con las variaciones del agua total almacenada en diversas cuencas y lagos, en sinergia con datos satelitales de precipitación, humedad del suelo, modelos hidrológicos, y datos in situ han sido ampliamente estudiadas como se indican en [1], [2], [3] y [4]. Uno de los principales estudios fue el ciclo de carga y recarga del agua almacenada en la cuenca del Amazonas y su relación con los eventos del fenómeno El Niño Oscilación Sur (ENSO) en el Pacífico tropical. [5], [6]. Los datos GRACE en sinergia con diferentes datos y modelos hidrológicos han sido utilizados para comprender las variaciones anuales y estacionales del agua subterránea y su relación con eventos de sequías e inundaciones [7], [8], [9], [10]. En Argentina se analizaron la relación entre la humedad del suelo con las anomalías del agua total almacenada GRACE enfocándose en eventos hidrológicos extremos [11]. En el Perú aunque no se han usado los datos GRACE para el análisis de las variaciones del agua total almacenada si se han hechos estudio hidrológicos usando datos TRMM [12], [13], [14].

La región Lima - Callao concentra aproximadamente el 30% de la población del Perú y es particularmente sensible al déficit o exceso de agua, causados por los impactos antropogénicos y la variabilidad climática, el objetivo principal de este estudio es analizar la variabilidad espacio - temporal de la anomalía gravitacional y de la precipitación, así como su correlación temporal, con fines de determinar el periodo de carga y recarga del agua total almacenada, su magnitud y los eventos extremos como inundaciones y deslizamientos, información que es útil principalmente para el sector agrícola, industrial y residencial en la región Lima - Callao.

A. El área de estudio

El área de estudio es la región Lima - Callao, ubicada en el Perú, entre la vertiente occidental de los Andes y la costa, entre los límites geográficos Latitud: [-10.2 °; -13.3 °] y Longitud: [-75,5 °; -77.9 °], con una superficie aproximada de 34 800 km². La costa de 0 a 500 msnm es generalmente árida con algunos valles fértiles y en la parte andina se distinguen los relieves montañosos de 500 a 5200 msnm, y algunos nevados entre los 5200 a 6342 msnm, Fig.1. La región Lima-Callao se encuentran importantes recursos hídricos como los ríos: Fortaleza, Pativilca, Supe, Huaura, Chancay-Huaral, Chillón, Rímac, Lurín, Chilca, Mala, Cañete y la quebrada de Topará, y 21 lagunas, [15].

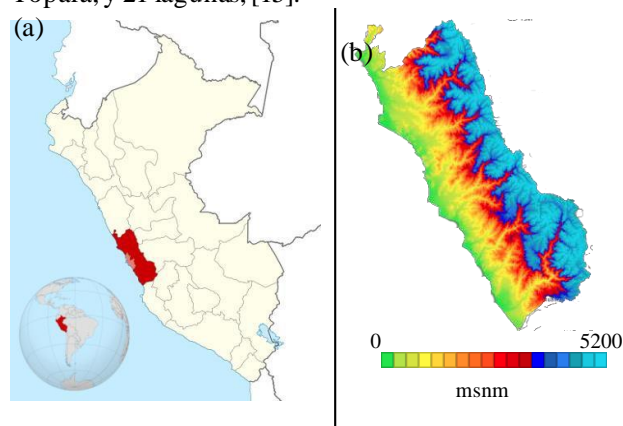


Fig. 1. (a) Ubicación de la región Lima - Callao y (b) Modelo de elevación digital SRTM 30 m de la Región Lima - Callao.

B. Datos utilizados

Se utilizaron los datos GRACE Tellus para las anomalías gravitatorias y los datos TRMM 3B34V7 para la precipitación ambas de resolución mensual, para el periodo 2002 al 2016. Los datos de las anomalías gravitatorias GRACE Tellus Land de los centros CSR (U. Texas/Center for Space Research), GFZ (GeoForschungsZentrum Potsdam) y JPL (NASA Jet Propulsion Laboratory) fueron descargados de la página <http://grace.jpl.nasa.gov> y se calculó el promedio de los datos de los tres centros sobre el área de estudio, completando algunos datos con interpolación lineal. Los datos de anomalía gravitatoria están relacionados con el cambio del agua total almacenada, expresado en centímetros de espesor de agua equivalente y tienen una resolución espacial de 1° (~110 km), [16], [17].

Los datos de precipitación TRMM 3B34V7 fueron descargados de la NASA EARTHDATA de la página web <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets>. Estos datos proporcionan una de las mejores estimaciones de la precipitación a partir de la sinergia con otras fuentes de datos globales, como datos de microondas de alta calidad, infrarrojos y de pluviómetros, con una resolución espacial de 0.25° (~ 27.5 km), [18].

II. ANÁLISIS

A. Variación anual y estacional de los datos GRACE

El promedio de las anomalías gravitatorias anuales es 0.7765 cm con una desviación estándar de 1.5575 cm. El año de mayor anomalía gravitatoria fue el 2015 con 6.190 cm, y los años de menor anomalía gravitatoria fueron el 2005 y 2010 con -1.520 cm y -1.311 cm respectivamente. Se observa un crecimiento significativo de la anomalía gravitatoria entre del 2012 al 2015, aun ritmo anual de 1.6 cm/año (~0.56 Gt/año de agua total almacenada), Fig. 2.

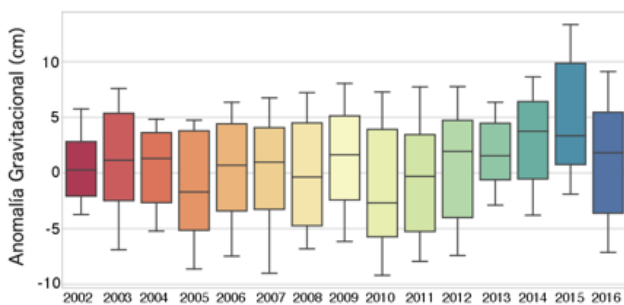


Fig. 2. Variación de la anomalía gravitatoria por año, el agua total almacenada se incremento significativamente a una tasa anual del 1.6 cm/año (~0.56 Gt/año).

La anomalía gravitatoria por mes muestra una estacionalidad anual, con valores medios positivos de diciembre a junio, y valores medios negativos de julio a noviembre, Fig. 3.

Se calculó la función de autocorrelación, los valores de los coeficientes de correlación más grandes son -0.7372 y 0.8644, para retrasos de 6 y 12 meses respectivamente, Fig. 4. La densidad espectral de potencia muestra que la serie de tiempo de las anomalías gravitatorias tiene una frecuencia dominante $f = 0.0847 \text{ mes}^{-1}$ (12 meses), confirmando que las anomalías gravitatorias tienen un ciclo anual, Fig. 5.

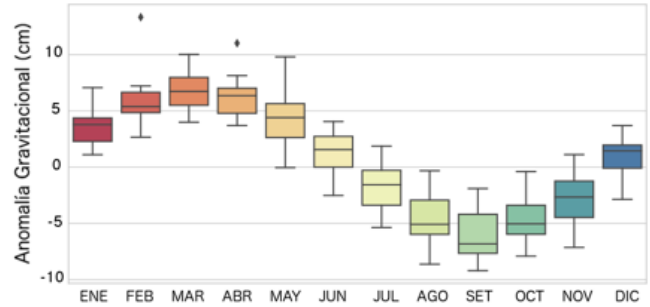


Fig. 3. La anomalía gravitatoria por mes muestra una estacionalidad anual, con valores medios positivos de diciembre a junio, y valores medios negativos de julio a noviembre.

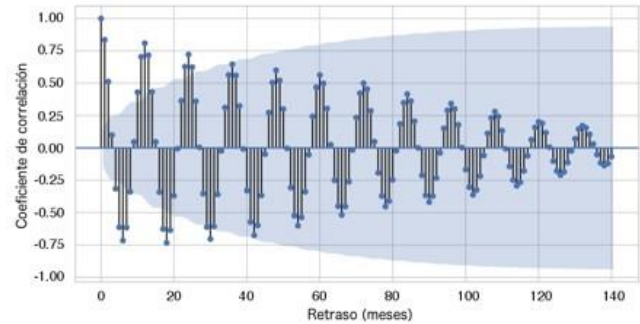


Fig. 4. Función de autocorrelación de los datos GRACE, para un retraso de 12 meses el coeficiente de correlación es de 0.8644.

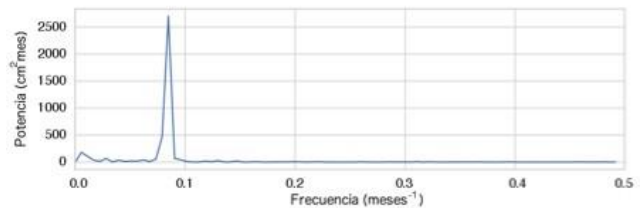


Fig. 5. Densidad espectral de potencia de los datos GRACE evidencia un solo pico para la frecuencia $f = 0.0847 \text{ mes}^{-1}$ (12 meses) en toda la serie de tiempo.

B. Variación espacial del agua total almacenada

La variación espacial de la anomalía gravitatoria presenta un gradiente negativo de enero a junio, y un gradiente positivo de julio a diciembre, en la dirección este-oeste y de norte a sur, es decir, en los meses de enero a junio el agua total almacenada en la zona andina es mayor que en la costa, y en

los meses de julio a diciembre el agua almacenada es mayor en la costa que en los andes, Fig. 6.

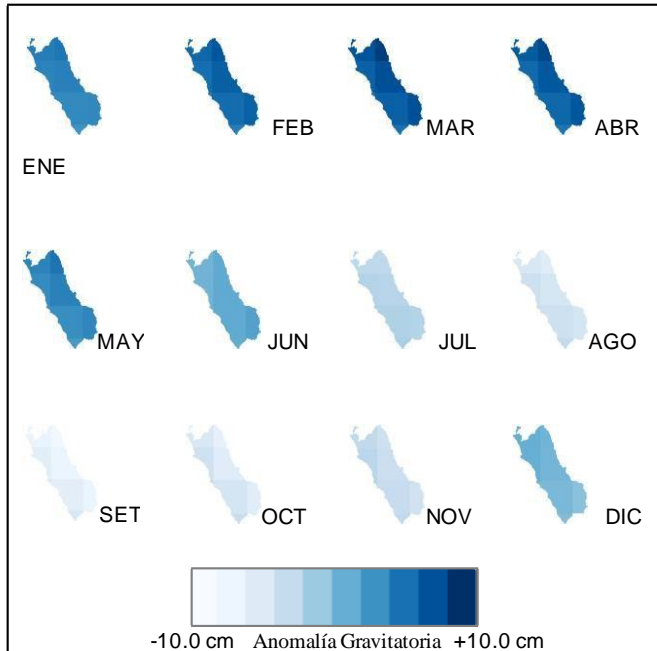


Fig. 6. Variación espacial de la anomalía gravitatoria por mes.

C. Variación anual y estacional de los datos TRMM3B34V7

Se calculó el promedio de la precipitación mensual sobre el área de estudio para el periodo 2002 - 2016. La precipitación media anual es de 0.0350 mm/hr con una desviación estándar de 0.006 mm/hr. En los años 2002, 2003, 2006, 2007, 2012, 2013 y 2016 las precipitaciones lograron sobrepasar los 0.10 mm/hr, en el año 2012 hubo dos meses con precipitaciones intensas atípicas, Fig. 7.

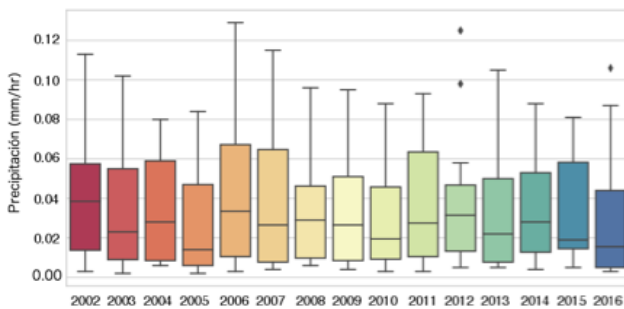


Fig. 7. Variación de la precipitación mensual por año, en el año 2002, 2003, 2006, 2007, 2012, 2013 y 2016 se registraron precipitaciones superiores a 0.10 mm/hr.

El ciclo intranual de los datos de precipitación evidencia una variación estacional, la precipitación es mínima entre mayo - agosto mostrando una estación seca en estos meses, a partir de agosto la precipitación aumenta alcanzando su valor máximo en el mes marzo. Entre marzo y mayo la precipitación

disminuye rápidamente. Se encontraron valores atípicos en los meses de setiembre y noviembre, Fig. 8.

La densidad espectral de potencia de la precipitación muestra que la serie de tiempo tiene una frecuencia dominante de $f_1 = 0.0833 \text{ mes}^{-1}$ (12 meses), lo que sugiere un ciclo anual muy marcado, también se encontraron otras frecuencias secundarias de menor potencia que influyen sobre el ciclo de la precipitación $f_2 = 0.1667 \text{ mes}^{-1}$ (6 meses), $f_3 = 0.2500 \text{ mes}^{-1}$ (4 meses), $f_4 = 0.3333 \text{ mes}^{-1}$ (3 meses) y $f_5 = 0.4167 \text{ mes}^{-1}$, Fig. 9.

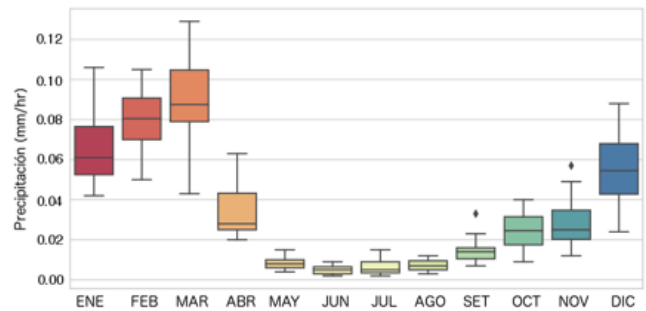


Fig. 8. Variación de la precipitación por mes, la precipitación se incrementa desde agosto hasta marzo luego disminuye rápidamente hasta mayo, existe un periodo seco de mayo a agosto.

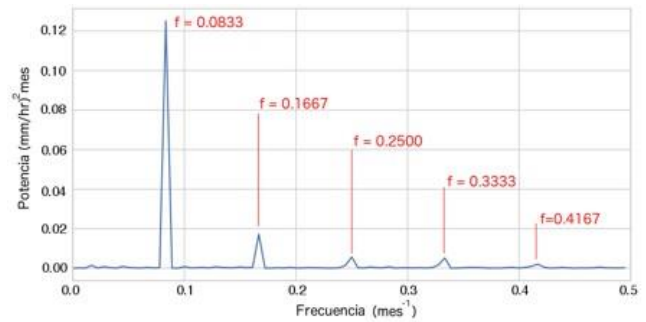


Fig. 9. Densidad espectral de potencia de la precipitación evidencia una frecuencia dominante $f = 0.0847 \text{ mes}^{-1}$ (12 meses).

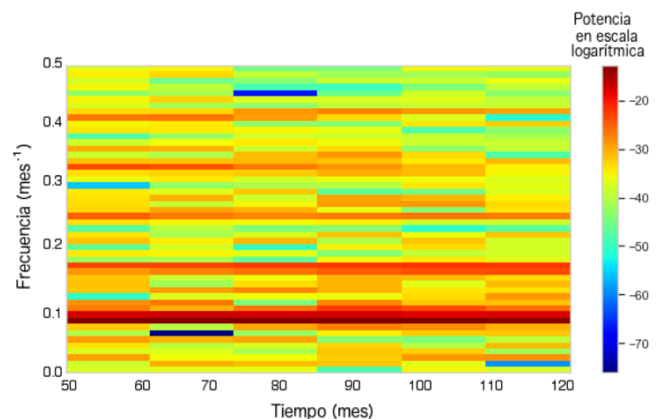


Fig. 10. Espectro de potencia de la precipitación, para una ventana de 100 meses con 97 meses de solapamiento, el eje x expresa el mes central de la ventana.

También se calculó el espectrograma de la serie de tiempo con una ventana de 100 meses con solapamientos de 97 meses, se puede apreciar que en toda la serie temporal están presentes las cinco frecuencias, $f_1 = 0.0833 \text{ mes}^{-1}$ (12 meses), $f_2 = 0.1667 \text{ mes}^{-1}$ (6 meses), $f_3 = 0.2500 \text{ mes}^{-1}$ (4 meses), $f_4 = 0.3333 \text{ mes}^{-1}$ (3 meses) y $f_5 = 0.4167 \text{ mes}^{-1}$ (2.4 meses), sin embargo se puede notar que la frecuencia $f_4 = 0.3333$ (3 meses) tiene una mayor potencia en los primeros 84 meses (7 años) luego esta disminuye, Fig. 10.

D. Variación espacial de la precipitación

La distribución espacial de la precipitación evidencia que los valores máximos de la precipitación ocurre en la parte Este de la Región Lima - Callao (Región andina) y los valores mínimos ocurren en la parte Oeste (Región costa), la costa es evidentemente seca durante casi todo el año, Fig. 11.

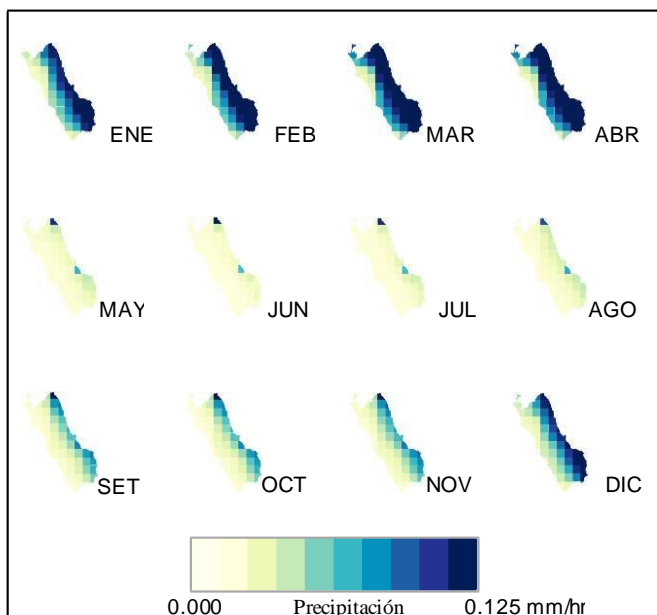


Fig. 11. Variación espacial de la precipitación por mes, la precipitación es menor en la costa con respecto a la parte andina, durante todo el año.

E. Correlación cruzada entre los datos TRMM y GRACE

Se utilizó el test de Dickey-Fuller aumentado para probar la estacionariedad de la serie temporal de la precipitación y de la anomalía gravitacional. El valor p resultado de cada serie respectivamente resultó 0.071 y 0.2454, lo que permite inferir con un nivel de significancia del 5%, que ambas series de tiempo no son estacionarias.

Dada que ambas series no son estacionarias se descompuso ambas series usando un modelo aditivo: Tendencia + Estacionalidad + Residuo, Fig. 12 y Fig. 13. El componente

“Tendencia” de la anomalía gravitatoria muestra un incremento desde el año 2012 al 2015, se hizo una regresión lineal de la media móvil anual de los datos originales para el periodo 07/2012 a 11/2015 y se obtuvo una tasa de 1.44 cm/año ($\sim 0.50 \text{ km}^3/\text{año}$).

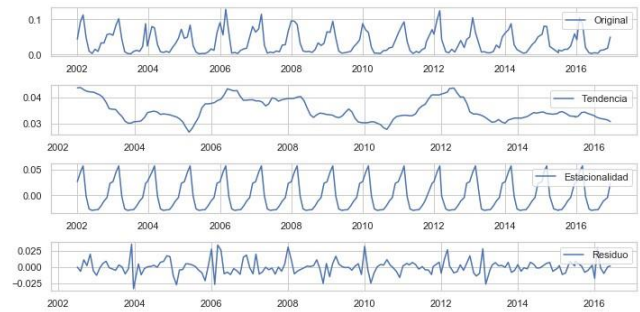


Fig. 12. Descomposición de la serie de tiempo de la precipitación, usando un modelo aditivo.

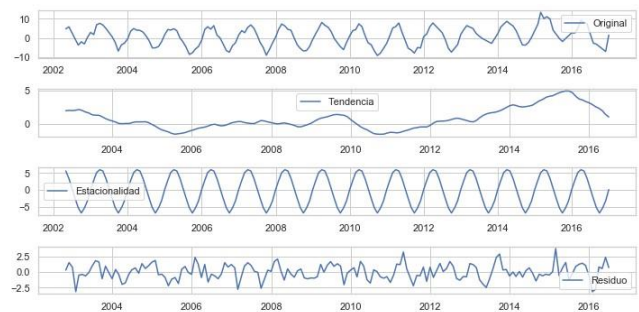


Fig. 13. Descomposición de la serie de tiempo de las anomalías gravitacionales usando un modelo aditivo.

Se utilizó el componente Estacional de cada serie de tiempo para establecer su correlación cruzada, el coeficiente de correlación entre ambas series es de 0.6198, Sin embargo para retrasos de 1 y 2 meses se encontraron coeficiente de correlación de 0.8591 y 0.8677, respectivamente, Fig. 14.

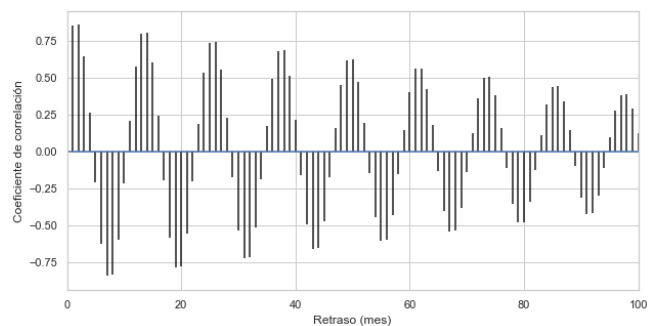


Fig. 14. Función de correlación cruzada entre los datos de precipitación y as anomalías gravitacionales.

III. RESULTADOS

La variación temporal de la anomalía gravitatoria muestra que los cambios en el agua total almacenada varían en un ciclo anual, con procesos de recarga de setiembre a marzo, desde -4.166 cm a 6.886 cm en espesor de agua equivalente y descarga de marzo a setiembre.

La variación espacial de la anomalía gravitatoria muestra que el agua total almacenada en los meses de enero a junio es mayor en la zona andina que en la costa, luego se invierte y en los meses de julio a diciembre es mayor en la costa que en los andes.

La variación temporal de la precipitación muestra un ciclo anual muy marcado, aunque se observan otras frecuencias de menor potencia espectral de 6, 4, 3 y 2.4 meses. La precipitación se incrementa desde agosto hasta marzo, luego disminuye rápidamente hasta mayo, seguido de un periodo seco de mayo a agosto.

La variación espacial de la precipitación muestra que esta es más intensa en la parte andina que en la costa durante todo el año, aún en los meses secos de mayo a agosto.

La precipitación y las anomalías gravitatorias están correlacionadas, presentando un coeficiente de correlación máximo de 0.8677 para un retraso de 2 meses.

IV. DISCUSIÓN

La variación temporal mensual de los promedios de los datos GRACE y TRMM sobre el área de estudio, mostró que ambos conjuntos de datos presentan ciclos anuales, pero con variaciones intranuales diferentes. Ambas series mensuales alcanzan su pico máximo en marzo, parece razonable que en el mes de máxima precipitación también sea el máximo del agua total almacenada. Sin embargo, en el periodo de marzo a mayo cuando la precipitación disminuye drásticamente, seguido luego por un periodo seco de mayo a agosto, la anomalía gravitacional disminuye casi de forma uniforme, es posible que este hecho este asociado principalmente con el proceso de descarga del agua subterránea, desde los andes hacia la costa desértica de Lima, coincide que en esta época seca los agricultores de los valles de Lima – Callao, las fabricas de bebidas y el servicio de agua potable hacen uso intensivo del agua subterránea. Un oportuno aprovechamiento y almacenamiento del agua subterránea en los meses de abril a junio, podría evitar las emergencias hídricas que declara la autoridad nacional del agua usualmente a finales de año ante la falta de lluvias en la parte andina.

Incrementos significativos en el agua total almacenada obtenidas a partir de los Datos GRACE Tellus en los meses de diciembre a marzo pueden ser consideradas como un indicador adicional a la de precipitación y caudales que se utilizan para

las declaraciones de emergencia ambiental y riesgos de inundaciones en todas las cuencas hidrográficas de la región Lima – Callao. Es posible que exista una relación entre el incremento de las anomalías gravitacionales y el fenómeno de El Niño. En el 2015 - 2016 se observó un incremento significativo del agua total almacenada en ese mismo periodo el fenómeno de El Niño fue considerado como uno de los más fuertes desde año 1950.

El retraso de hasta dos meses encontrado entre los componentes “Estacional” de las series de tiempo de la precipitación y las anomalías gravitacionales parecen estar relacionados con los mecanismos de recarga del agua total almacenada, lo que revela que la región Lima - Callao recibe recarga indirecta, un estudio a nivel de todo el Perú usando datos hidrológicos in situ de las principales cuencas podrá proporcionar mayor información de los procesos de carga y recarga de los acuíferos Lima y de la costa peruana en general.

AGRADECIMIENTO

Al programa NASA MEaSUREs por los datos GRACE Tellus Land, a la Misión de Medición de Lluvia Tropical (TRMM) por los datos de precipitación, al API Google Earth Engine por las herramientas para el procesamiento de los datos y a la Universidad Nacional del Callao por el financiamiento del trabajo.

REFERENCES

- [1] J. Awange, M. Sharifi, G. Ogonda, J. Wickert, E. Grafarend and M. Omulo, “The falling Lake Victoria water level: GRACE, TRMM and CHAMP satellite analysis of the lake basin,” *Water Resources Management*, vol. 22, no 7, pp. 775-796, 2008.
- [2] J. Awange, M. Gebremichael, E. Forootan, G. Wakbulcho, R. Anyah, V. Ferreira and T. Alemayehu, “Characterization of Ethiopian mega hydrogeological regimes using GRACE, TRMM and GLDAS datasets,” *Advances in water resources*, no. 74, pp. 64-78, 2014.
- [3] X. Mo, J. Wu, Q. Wang, and H. Zhou, “Variations in water storage in China over recent decades from GRACE observations and GLDAS,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 16, no. 2, pp. 469-482, 2016.
- [4] K. Abdelmalik, and K. Abdelmohsen, “GRACE and TRMM mission: The role of remote sensing techniques for monitoring spatio-temporal change in total water mass, Nile basin,” *Journal of African Earth Sciences*, vol. 160, pp. 103596, 2019.
- [5] J. Chen, C. Wilson, B. Tapley, Z. Yang, and G. Niu, “Drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 114 no. B5, 2009
- [6] J. Chen, C. Wilson, and B. Tapley, “The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE,” *Water Resources Research*, vol. 46, no. 12, 2010

- [7] M. Rodell, I. Velicogna, and J. Famiglietti, "Satellite-based estimates of groundwater depletion in India," *Nature*, vol. 460 no. 7258, pp. 999-1002. 2009.
- [8] J. Famiglietti, M. Lo, S. Ho, J. Bethune, K. Anderson, T. Syed, S. Swenson, R. Caroline and M Rodell, "Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley," *Geophysical Research Letters*, vol. 38, no. 3, 2011.
- [9] J. Chen, J. Li, Z. Zhang and S. Ni, "Long-term groundwater variations in Northwest India from satellite gravity measurements," *Global and Planetary Change*, vol. 116, pp. 2130-138, 2014.
- [10] J. Chen, C. Wilson, B. Tapley, B. Scanlon, and A. Güntner, "Long-term groundwater storage change in Victoria, Australia from satellite gravity and in situ observations". *Global and Planetary change*, vol. 139, pp. 56-65, 2016.
- [11] S. Abelen, F. Seitz, R. Abarca del Rio, R., and A Güntner, "Droughts and floods in the La Plata basin in soil moisture data and GRACE," *Remote Sensing*, 7(6), pp. 7324-7349. 2015.
- [12] M. Scheel, M. Rohrer, C. Huggel, D. Santos, E. Silvestre and G. Huffman, "Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 15, no. 8, pp. 2649-2663, 2011.
- [13] V. Mantas, Z. Liu, C. Caro and A. Pereira, "Validation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products in the Peruvian Andes," *Atmospheric Research*, vol. 163, p. 132-145, 2015.
- [14] S. Chavez, and K. Takahashi, "Orographic rainfall hot spots in the Andes-Amazon transition according to the TRMM precipitation radar and in situ data," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 22, no. 11, pp. 5870-5882, 2017
- [15] Autoridad Administrativa del Agua Cañete - Fortaleza. <https://www.ana.gob.pe/organos-desconcentrados/autoridad-administrativa-del-agua-canete-fortaleza>.
- [16] Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-on, Documentes: D-103133, G.-F.L.-3. (2020), <https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/gracefo/docs>
- [17] *GRACE-FO Mission Documentation*. D-103922, G.-F. L.-2. (2019): <https://podaac.jpl.nasa.gov/gravity/gracefo-documentation>.
- [18] G. Huffman, R. Adler, D. Bolvin and E. Nelkin, "The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA), in *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*, H. Gebremichael, Springer, Dordrecht, 2010, pp. 3-22.