

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“ANOMALÍAS DEL CAMPO GRAVITACIONAL EN LA  
REGIÓN LIMA Y CALLAO”**

AUTOR: Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe

(PERIODO DE EJECUCIÓN: Del 01 marzo 2020 al 28 de febrero de 2021)

(Resolución de aprobación N° 566 2020)

Callao, 2021



## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo a mi familia por el impulso y la paciencia durante la investigación. A mis padres que siempre muestran interes en las investigaciones que realizo.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'A. R. D. G.', written in a cursive style.

## **AGRADECIMIENTO**

Se agradece 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 la herramientas para el procesamiento de los datos, a la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) por los datos del índice de El Niño 3.4. A la Universidad Nacional del Callao por el financiamiento del trabajo.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'P. Rojas', located in the center of the page.

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	2
AGRADECIMIENTO.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
RESUMEN.....	8
ABSTRACT .....	9
INTRODUCCIÓN .....	10
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	11
1.2. Formulación del problema .....	11
1.3. Objetivos .....	12
1.4. Limitantes de la investigación.....	12
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO .....	13
2.1. Antecedentes .....	13
2.2. Marco .....	18
2.2.1. Teórico .....	18
2.2.2. Conceptual.....	21
2.3. Definición de términos básicos .....	22
CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	23
3.1. Hipótesis.....	23
3.2. Definición conceptual de las variables.....	23
3.3. Operacionalización de las variables .....	24
CAPÍTULO IV: DISEÑO METODOLÓGICO.....	25
4.1. Tipo y diseño de investigación.....	25
4.2. Método de Investigación .....	25
4.3. Población y muestra .....	25
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado.....	26
4.4.1. Área de estudio.....	26
4.4.2. Acuíferos de la Región Lima – Callao .....	26
4.5. Técnica e instrumentos para la recolección de información .....	28

4.6. Análisis y procesamiento de datos .....	28
4.6.1. Análisis visual de los datos GRACE y TRMM .....	28
4.6.2. Análisis de autocorrelación de los datos GRACE y TRMM .....	36
4.6.3. Descomposición de las series de datos GRACE y TRMM.....	41
4.6.4. Análisis de correlación cruzada entre los datos GRACE y TRMM....	43
4.6.5. Análisis de los datos de anomalía del Índice Niño 3.4 .....	44
CAPITULO V: RESULTADOS .....	45
5.1. Resultados descriptivos .....	45
5.2. Resultados inferenciales.....	45
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	46
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados .....	46
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios .....	46
CONCLUSIONES .....	47
RECOMENDACIONES .....	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
ANEXO .....	52
Matriz de Consistencia.....	52
Base de datos GRACE Tellus de la Región Lima -Callao.....	53
Base de datos TRMM 3B34V7 de la región Lima - Callao.....	56



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Principales Desastres en la Región Lima - Callao.....	21
Figura 4.1 (a) Ubicación de la región Lima - Callao y (b) Modelo de elevación digital 30 m de la Región Lima - Callao.....	26
Figura 4.2. Administraciones locales del agua.....	27
Figura 4.3. Acuíferos de la Región Lima - Callao .....	27
Figura 4.4 Anomalías gravitacionales mensuales de la Región Lima - Callao.....	28
Figura 4.5. Variación de las anomalías gravitacionales por año.....	29
Figura 4.6. Variación de las anomalías gravitacionales por mes .....	29
Figura 4.7. Mapas de la anomalía gravitacional por año .....	30
Figura 4.8. Mapas de la anomalía gravitacional por mes.....	31
Figura 4.9. Precipitación mensual sobre la Región Lima - Callao.....	32
Figura 4.10. Variación de la precipitación por año .....	33
Figura 4.11. Variación de la precipitación por mes .....	33
Figura 4.12. Mapas de la precipitación anual .....	34
Figura 4.13. Mapas de la precipitación mensual.....	35
Figura 4.14. Gráficas de los datos con retrasos 3, 6, 9 y 12 meses con respecto a los datos originales de las anomalías gravitacionales .....	36
Figura 4.15. Gráfica de los datos con retraso $L = 12$ meses con los datos originales de las anomalías gravitacionales .....	37
Figura 4.16. Función de autocorrelación de las anomalías gravitacionales.....	37
Figura 4.17. Espectro de potencia de las anomalías gravitacionales .....	38
Figura 4.18. Espectrograma de potencia de las anomalías gravitacionales con una ventana de 100 meses.....	38
Figura 4.19. Gráficas de los datos con retrasos 3, 6, 9 y 12 meses con respecto a los datos originales de la precipitación .....	39
Figura 4.20 Superposición de los datos con retraso $L = 12$ meses con respecto a los datos originales de precipitación .....	39
Figura 4.21. Función de autocorrelación de los datos de precipitación.....	40
Figura 4.22. Espectro de potencia de la precipitación .....	40

Figura 4.23. Espectrograma de potencia de la precipitación con una ventana de 100 meses .....	41
Figura 4.24. Descomposición de la serie de tiempo de las anomalías gravitacionales usando un modelo aditivo .....	42
Figura 4.25. Descomposición de la serie de tiempo de la precipitación usando un modelo aditivo.....	43
Figura 4.26. Componente estacional de los datos GRACE y TRMM .....	43
Figura 4.27. Datos estandarizados GRACE y TRMM desfasados $L = 1$ mes y $L = 2$ meses .....	44
Figura 4.28. Serie de tiempo de los datos del índice de el Niño 3.4 .....	44





## RESUMEN

Se analizó la variación espacio - temporal de las anomalías del campo gravitacional asociadas al cambio del agua total almacenada y de la precipitación en la región Lima - Callao. Se utilizaron los datos GRACE Tellus para las anomalías gravitacionales y los datos TRMM 3B34V7 para la precipitación, en una resolución mensual. Se realizó un análisis de autocorrelación, de espectro de potencia, descomposición y correlación cruzada de los datos GRACE y TRMM, se encontró que las anomalías gravitacionales y la precipitación presenta un ciclo anual, las anomalías gravitacionales positivas varían de diciembre a mayo y las negativas de junio a noviembre. La precipitación aumenta desde agosto hasta marzo, luego disminuye rápidamente hasta mayo iniciando un periodo seco de mayo a agosto. Existe una fuerte correlación positiva entre los datos de anomalías gravitacionales y la precipitación, con un coeficiente de correlación máximo de 0.8677 para un retraso de dos meses, este retraso sugiere que la región Lima - Callao recibe recarga de agua de modo indirecto. El Niño moderado 2009 - 2010 y El Niño fuerte 2015-2016, están estrechamente relacionado con un incremento de las anomalías gravitacionales. Las anomalías gravitacionales presentan un gradiente negativo, en los meses enero a junio, y un gradiente positivo de julio a diciembre en la dirección Este - Oeste.

**Palabras claves:** Anomalía gravitacional, Precipitación, El Niño, Agua almacenada.



## **ABSTRACT**

Spatio-temporal variation of the anomalies of the gravity field associated with the change in total water storage and precipitation in the Lima - Callao region was analyzed. GRACE Tellus and TRMM 3B34V7 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. The events of El Niño 2009 - 2010 (moderate) and 2015 - 2016 (strong) were identified on gravitational anomalies time series. Gravitational anomalies present a negative gradient, in the months January to June, and a positive gradient from July to December in the east-west direction.

**Keywords:** Gravity Anomaly, Precipitation, El Niño, Total Water Stored.





## **INTRODUCCIÓN**

Las variaciones mensuales de las anomalías gravitacionales 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 ha sido ampliamente estudiadas. 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. (Tapley et al, 2004, Chen, et al., 2009, Chen, et al., 2010). En el Perú aun no existen estudios usando datos de las anomalías gravitacionales, aunque se ha analizado la precipitación usando datos TRMM mostrando buena concordancia con los datos in situ (Schell et al., 2011, Mantas et al., 2015, Chávez et al., 2016). Investigaciones que permitan comprender mejor las variaciones del agua total almacenada y sobre todo del agua subterránea y su relación con eventos hidrológicos extremos, así como el impacto del uso intensivo en el sector agrícola y otros usos antropogénicos, están recién desarrollándose en países de América del Sur.

## **CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Descripción de la realidad problemática**

El almacenamiento total de agua en el Perú y específicamente en la Región Lima - Callao no han sido estudiados, aunque se disponen de datos hidrológicos in situ, como la variación del nivel estático de pozos inventariados por la Autoridad Nacional del Agua estos no han sido recopilados de forma sistemática y rigurosa, por lo que su calidad es cuestionable y se requieren de procesos de control de calidad. Comprender las características espacio-temporales de los cambios en el almacenamiento de agua es importante para el Perú, pues este enfrenta una variedad de desafíos en la gestión del agua causados por los impactos antropogénicos y la variabilidad climática.

La variabilidad del almacenamiento de agua terrestre tiene importantes implicaciones políticas y económicas, ya que son fundamentales para comprender el impacto del cambio climático, el clima, la productividad agrícola, las inundaciones y otros peligros naturales. La región Lima - Callao es una de las regiones más pobladas del Perú y es particularmente sensibles al déficit o exceso de agua.



### **1.2. Formulación del problema**

Los satélites GRACE proporcionan datos de las anomalías gravitacionales que están relacionadas con la variación espacio - temporal del agua total almacenada, con una resolución de 1° (~110 km) las que a su vez deben estar relacionadas con la precipitación y los eventos El Niño, por lo que se plantea las siguientes preguntas ¿Cómo están relacionadas las variaciones de las anomalías gravitacionales con la precipitación y los eventos de EL Niño en la Región Lima-Callao en el periodo 2002 - 2016? ¿Cómo son las variaciones interanuales y estacionales de la anomalía gravitacional y la precipitación en la Región Lima -Callao en el periodo 2002 - 2016? ¿Existe influencia de los eventos de El Niño en las anomalías gravitacionales en La región Lima -Callao en el periodo 2002 - 2016?

### **1.3. Objetivos**

De acuerdo con las preguntas de investigación se han propuesto los siguientes objetivos:

#### **Objetivo general:**

- Explicar la relación entre las anomalías gravitacionales, la precipitación y los eventos de El Niño en la Región Lima-Callao, en el periodo 2002 - 2016.

#### **Objetivos específicos:**

- Explicar las variaciones interanuales y bestacionales de las anomalías gravitacionales y la precipitación en la Región Lima - Callao, en el periodo 2002 - 2016.
- Identificar la influencia de los eventos El Niño en las anomalías gravitacionales en la Región Lima - Callao en el periodo 2002 - 2016.

### **1.4. Limitantes de la investigación**

La presente investigación tiene un alcance sobre la Región Lima - Callao, se deja de investigar a nivel nacional por la cantidad de datos disponibles. Los datos hidrológicos in situ, como la variación del nivel estático de pozos inventariados por la Autoridad Nacional del Agua no han sido recopilados de forma sistemática y rigurosa, por lo que no pudo ser usados para contraste de los resultados.



## CAPITULO II: MARCO TEÓRICO



### 2.1. Antecedentes

(Tapley, B. D., Bettadpur, S., Ries, J. C., Thompson, P. F., & Watkins, M. M., 2004) estudiaron las variaciones mensuales del geoide en América del Sur usando los datos del GRACE, estas variaciones se atribuyen en gran medida a los cambios en las masas de aguas superficiales y subterráneas notándose una clara separación entre la gran cuenca del Amazonas y las cuencas más pequeñas del norte. Determino la variabilidad mensual del geoide en América del Sur durante el año 2003, observó que, para la cuenca del Amazonas, tenía un máximo en abril de 2003 y un mínimo en octubre.

(Rodell, M., Velicogna, I., & Famiglietti, J. S., 2009) cuantificaron el agotamiento del agua subterránea a una tasa promedio de  $4.0 \pm 1.0$  cm/año en espesor equivalente de agua ( $17,7 \pm 4,5$  km<sup>3</sup>/año) sobre los estados de Rajasthan, Punjab y Haryana (incluida Delhi), para eso usaron los datos del GRACE y modelos hidrológicos, para un periodo de agosto de 2002 a octubre de 2008, encontraron que el agotamiento de las aguas subterráneas fue equivalente a una pérdida neta de 109 km<sup>3</sup> de agua. Observaron que la precipitación anual estuvo cerca de lo normal durante todo el período y que los otros componentes del almacenamiento de agua terrestre: humedad del suelo, aguas superficiales, nieve, glaciares y biomasa no contribuyeron significativamente a la disminución en los niveles totales de agua. Sugieren que la causa del agotamiento son el consumo intensivo de agua subterránea para riego y otros usos antropogénicos.

(Chen, J. L., Wilson, C. R., & Tapley, B. D., 2010) encontraron que las variaciones del almacenamiento total de agua obtenidas de las anomalías gravitacionales de la misión GRACE muestran aumentos significativos en la cuenca baja del Amazonas en el primer semestre de 2009 asociados con la temporada excepcional de inundaciones en esa región. Las anomalías gravitacionales mensuales revelan la evolución temporal y espacial del cambio de almacenamiento total de agua


estacional e interanual en la cuenca del Amazonas para el período 04/2002 - 08/2009. Los datos de anomalía gravitacional del GRACE revelan una estación muy seca en 2002-2003 y una temporada extremadamente húmeda en 2009. En marzo de 2009 el excedente total de almacenamiento total de agua en toda la cuenca del Amazonas fue de aproximadamente  $624 \pm 32$  Gt. Las mediciones de GRACE son consistentes con los datos de precipitación. Los cambios interanuales de almacenamiento total de agua en la cuenca del Amazonas están estrechamente relacionados con los eventos del fenómeno El Niño Oscilación Sur (ENSO) en el Pacífico tropical. La estación seca de 2002-2003 está claramente ligada a El Niño de 2002-2003 y la inundación de 2009 al evento de La Niña.

(Famiglietti, J. S., Lo, M., Ho, S. L., Bethune, J., Anderson, K. J., Syed, T. H., Swenson, S.C., Caroline R., & Rodell, M., 2011) calcularon las tasas de agotamiento del agua subterránea en el Valle Central de California. Analizaron 78 meses 10/2003 a 03/2010 de datos de la misión GRACE para estimar los cambios de almacenamiento de agua en las cuencas de los ríos Sacramento y San Joaquín de California. Encontró que las cuencas están perdiendo agua a una tasa de  $31.0 \pm 2.7$  mm/año igual a un volumen de  $30.9 \text{ km}^3$  para el período de estudio. También usaron observaciones adicionales e información del modelo hidrológico para determinar que la mayoría de estas pérdidas se deben al agotamiento del agua subterránea en el Valle Central. Los resultados mostraron que el Valle Central perdió  $20,4 \pm 3,9$  mm/año de agua subterránea durante el período de 78 meses, o  $20,3 \text{ km}^3$  en volumen.

(Chen, J., Li, J., Zhang, Z., & Ni, S., 2014) realizaron una reevaluación de la variación de almacenamiento de agua subterránea a largo plazo en la región del noroeste de la India utilizando los datos de anomalía gravitacional de la misión GRACE y un método de modelado directo global sin restricciones. Las nuevas evaluaciones basadas en las soluciones de gravedad GRACE release-5 (RL05) mostraron que durante un período de 10 años de 01/2003 a 12/2012, la tasa de agotamiento de las aguas subterráneas fueron de  $\sim 20,4 \pm 7,1$  Gt/año y  $29,4 \pm 8,4$



Gt/año durante los primeros 5 años. Los cambios anuales de almacenamiento de agua subterránea en la región están fuertemente correlacionados con anomalías de precipitación anual. En el año 2009, la temporada más seca de la década, el agotamiento de las aguas subterráneas alcanza casi 80 Gt, mientras que en las dos temporadas relativamente húmedas, 2008 y 2011, los depósitos de aguas subterráneas incluso registran aumentos netos de alrededor de 24 y 35 Gt, respectivamente. Las tasas de agotamiento más altas pueden reflejar los beneficios de la calidad de datos mejorada de las soluciones de gravedad GRACE RL05 y el método de procesamiento de datos mejorado, que puede reducir de manera más efectiva el error de fuga en las estimaciones de GRACE. Este trabajo ha contribuido a nuevas estimaciones regionales de agotamiento de las aguas subterráneas.



(Awange, J. L., Gebremichael, M., Forootan, E., Wakbulcho, G., Anyah, R., Ferreira, V. G., & Alemayehu, T. , 2014), analizaron la variabilidad interanual y estacional de los cambios en el almacenamiento total de agua, las precipitaciones y las anomalías de la humedad del suelo en las regiones áridas de Etiopía, identificaron la relación entre las características de los acuíferos y los cambios de almacenamiento total de agua. Utilizaron los datos GRACE, TRMM y GLDAS, desde 2003 a 2011. Sus resultados mostraron que la parte occidental y las tierras bajas del noreste de Etiopía experimentaron una disminución en el almacenamiento total de agua entre 2003 y 2011. El impacto de la estacionalidad de las lluvias también se observó en los cambios de almacenamiento total de agua. Aplicaron el método estadístico de Análisis de Componentes Principales a los cambios de almacenamiento total de agua, la humedad del suelo y las variaciones de lluvia, identificaron la variabilidad anual dominante y la variabilidad estacional dominante en diversas regiones del área de estudio. Un análisis de correlación entre el almacenamiento total de agua y la precipitación mostro un retraso de tiempo mínimo de cero a un máximo de seis meses, mientras que no se nota ningún retraso entre las anomalías de la humedad del suelo y los cambios de almacenamiento total de agua. La respuesta de retraso y el coeficiente de correlación entre la precipitación y el almacenamiento total de agua parecen estar relacionados con los mecanismos



de recarga, lo que revela que la mayoría de las regiones de Etiopía reciben recarga indirecta. Sus resultados revelaron que la magnitud de los cambios de almacenamiento total de agua es mayor en la región occidental y menor en la región noreste, y que la elevación influye tanto en la humedad del suelo como en el almacenamiento total de agua.



(Mantas, V. M., Liu, Z., Caro, C., & Pereira, A. J. S. C. , 2015) Compararon los productos TMPA, 3B42V7 y 3B42RT del TRMM con datos in situ, para diferentes longitudes de observación considerando las limitaciones geográficas, topográficas y climáticas, en los Andes peruanos. Los productos TMPA mostraron una buena concordancia con los valores in situ, especialmente para períodos de más de 8 días. Los resultados mostraron una fuerte dependencia regional como consecuencia de las diferencias en el clima y la topografía, lo que sugiere se requieren estudios de validación localizados. En general encontraron que los datos TMPA funciona de manera adecuada y proporciona información de calidad. Existen otros trabajos que validan y hacen usos de los datos TRMM en los Andes peruanos y en la Amazonía, que respaldan su utilidad, (Chavez, S. P., & Takahashi, K., 2017; Ballari, D., Castro, E., & Campozano, L., 2016; Scheel, M. L. M., Rohrer, M., Huggel, C., Santos Villar, D., Silvestre, E., & Huffman, G. J., 2011).

(Abelen, S., Seitz, F., Abarca del Rio, R., & Güntner, A., 2015) analizaron la relación entre la humedad del suelo con las variaciones del almacenamiento total de agua de la misión gravitacional GRACE, enfocándose en eventos hidrológicos extremos de la base de datos internacional de desastres EM-DAT. El área de estudio fue la Cuenca del Plata en América del Sur. Los datos fueron analizados usando técnicas de correlación cruzada y componentes principales. Los resultados mostraron que la mayoría de las anomalías de la humedad del suelo están relacionadas con períodos de El Niño y La Niña. Para la sequía de La Plata de 2008/2009 y la inundación de El Niño de 2009/2010, sugirieron que la humedad del suelo puede servir como indicador del déficit o superávit posterior en el almacenamiento total de agua.

(Chen, J. L., Wilson, C. R., Tapley, B. D., Scanlon, B., & Güntner, A., 2016) determinaron que el almacenamiento de agua subterránea en Victoria - Australia había disminuido de manera constante, hasta que se produjo una inversión de tendencia a principios de 2010, atribuida a dos estaciones más húmedas en 2010 y 2011. El análisis se desarrollo usando los datos de anomalía gravitacional del GRACE y modelos de superficie terrestre, así como mediciones in situ del nivel del agua subterránea de una red de 1395 pozos de agua subterránea. Encontraron que las tasas de agotamiento de las aguas subterráneas de 2005 a 2009 son relativamente elevadas, como indican las estimaciones de de anomalía gravitacional del GRACE ( $8,0 \pm 1,7 \text{ km}^3 / \text{año}$ ) y las mediciones in situ ( $8,3 \pm 3,4 \text{ km}^3 / \text{año}$ ). Determinaron que los cambios anuales en el almacenamiento de agua subterránea están fuertemente correlacionados con anomalías de precipitación, pero solo alrededor de una quinta parte de la precipitación anómala contribuye a la recarga de agua subterránea. La notable concordancia entre las estimaciones de GRACE y las mediciones in situ sugieren un gran potencial de las observaciones satelitales de la gravedad en combinación con las estimaciones del modelo de la superficie terrestre para cuantificar los cambios en los recursos hídricos subterráneos regionales, especialmente cuando las mediciones in situ son limitadas o no están disponibles.



(Abdelmalik, K. W., & Abdelmohsen, K. , 2019), analizaron el impacto de los datos de almacenamiento total de agua terrestre de la misión GRACE para determinar el cambio de masa de agua a una gran escala regional. Este estudio se centro en la cuenca del Nilo y utilizó la integración de almacenamiento total de agua extraído de las soluciones de datos GRACE y los conjuntos de datos de la Misión de medición de lluvia tropical (TRMM) para interpretar la variación promedio anual / estacional de la masa total de agua terrestre. En general, tanto los conjuntos de datos de GRACE y TRMM analizados y procesados mostraron una tendencia estadísticamente creciente en la masa de agua estacional en toda la cuenca del Nilo como promedio en el período 2003 - 2016.

## 2.2. Marco

### 2.2.1. Teórico

#### El campo gravitacional

El campo de gravedad de la Tierra puede ser descrito en términos de la forma del geoide que es la superficie equipotencial que coincide con el nivel medio de la superficie del océano. El geoide,  $N(\theta, \phi)$ , se puede expandir como una suma de funciones de Legendre asociadas normalizadas, :

$$N(\theta, \phi) = a \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\cos\theta)(C_{lm} \cos m\phi + S_{lm} \sin m\phi) \quad (1)$$

Donde  $\theta$  es colatitud,  $\phi$  es la longitud,  $a$  es el radio medio de la Tierra,  $C_{lm}$  y  $S_{lm}$  son los coeficientes adimensionales de Stokes.  $\bar{P}_{lm}$  son los polinomios asociados de Legendre normalizados.

#### La misión GRACE y GRACE FO

La misión GRACE - GRACE FO, administradas por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) de los Estados Unidos y la Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt (DLR) de Alemania, además de modelar el geoide tienen como objetivo medir las variaciones temporales del campo gravitacional terrestre. Las medidas de las variaciones del campo gravitacional son registradas por los satélites GRACE y filtrando la variación de masa de la atmósfera se infieren las anomalías gravitacionales mensuales de los continentes y océanos expresados en centímetros de espesor equivalente de agua. Las anomalías gravitacionales continentales están relacionadas con los cambios del almacenamiento de total de agua las que se pueden dividir en dos componentes cambios de origen natural (N) y cambios de origen antropogénico (A) de acuerdo con la Ecuación (2).

$$\Delta S_{N+A} = \Delta(SW + SWE + SM + GW)_{N+A} \quad (2)$$

Donde  $S$  es la cantidad total de agua almacenada,  $SW$  es agua superficial,  $SWE$  es equivalente de agua de la nieve,  $SM$  es la humedad del suelo y  $GW$  es el agua subterránea.

Los datos GRACE Tellus Land mensuales proporcionan las anomalías gravitacionales mensuales expresadas en centímetros de espesor de agua equivalente o LWE (LWE, level water equivalent). Estos datos son procesados por tres centros: CSR (U. Texas/Center for Space Research), GFZ (GeoForschungsZentrum Potsdam) y JPL (NASA Jet Propulsion Laboratory, cada centro procesa los datos a partir de los coeficientes armónicos esféricos del geopotencial. Estos datos están disponibles en <http://grace.jpl.nasa.gov>, soportado por el programa NASA MEaSUREs, (Swenson, 2012; Landerer & Swenson, 2012; Swenson & Wahr, 2006).



A los datos GRACE Tellus Land para la superficie terrestre se han eliminado la masa de la atmósfera utilizando los datos ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) y se han procesado con diferentes filtros para preservar mejor las características geofísicas de la Tierra. Por lo que las variaciones temporales del campo gravitacional se atribuyen principalmente a las variaciones de la masa en los reservorios naturales y artificiales, aguas superficiales y subterráneas en el área de estudio, (D-103922, 2019; D-103133, 2020).

En este trabajo de investigación se ha utilizado el promedio de los datos mensuales proporcionados por los tres centros, CSR, GFZ y JPL, sobre todo al área de estudio, los datos pueden verse en el Anexo.

### **La misión TRMM**

La misión TRMM administrada por la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y la NASDA (National Association of State Departments of Agriculture) tienen como objetivo principal monitorear las precipitaciones tropicales y subtropicales. Los datos TRMM 3B43V7 de precipitación proveniente

del algoritmo de análisis de precipitación multisatélite TRMM (TMPA) Versión 7, en sinergia con otras fuentes de datos globales, como datos de microondas de alta calidad, infrarrojos y de pluviómetros. Estos datos proporcionan una estimación mensual de precipitación con una resolución espacial de  $0.25^\circ$  ( $\sim 27$  km), (Huffman, Adler, Bolvin & Nelkin 2010; Yong, et al. 2015).

Para este trabajo de investigación se utilizaron los datos TRMM 3B43V7 de precipitación mensual promediados para el área de estudio. Los datos fueron descargados utilizando el API Google Earth Engine sobre el área de interés, desde 04/2002 hasta 12/ 2016. La precipitación TRMM 3B43V7 mensual se expresa en mm/hr.

### **Principales desastres 2002 -2016**

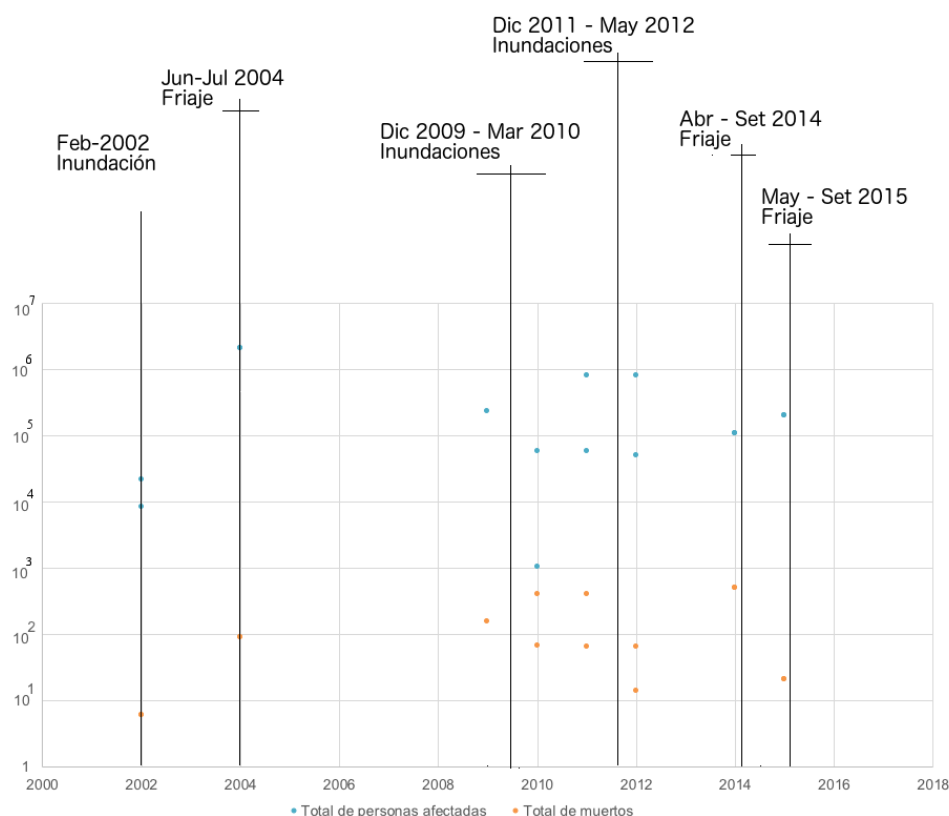
En la base de datos de los principales desastres EM-DAT (INTERNATIONAL DISASTER DATABASE), al que se puede acceder en su portal web: <https://public.emdat.be/data> se encontraron tres eventos registrados relacionados con inundaciones en 2002, 2009-2010, 2011-2012., los cuales sirvan como referencia en el análisis de la serie de tiempo de la anomalía gravitacional, Figura 2.1.

### **El índice Niño 3.4**

El índice Niño 3.4 es uno de los índices más utilizados para definir los eventos de El Niño y La Niña, este índice se basan en las temperatura superficial del oceano, (Trenberth, Kevin & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds)., 2020) Los datos utilizados en este trabajo fueron descargados de la NOAA, en su página [https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/for info](https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/for%20info).



Figura 2.1. Principales Desastres en la Región Lima - Callao



Fuente: EM-DAT (International Disaster Database)

### 2.2.2. Conceptual

#### Las anomalías gravitacionales

Las anomalías gravitacionales resaltan las variaciones del campo gravitacional sobre la superficie de la Tierra. Las anomalías gravitacionales son originadas por concentraciones inusuales de masa en una cierta región. Por ejemplo, las cadenas montañosas generalmente producen anomalías gravitacionales positiva y las fosas oceánicas pueden causar anomalías de gravedad negativa. Las anomalías gravitacionales se miden en espesor de agua equivalente, usualmente en centímetros o milímetros.

## **La precipitación**

La precipitación es el proceso donde el vapor de agua se condensa en la atmósfera y precipita como lluvia, aguanieve, nieve o granizo. Los datos de precipitación se obtienen tradicionalmente de estaciones pluviométricas y radares meteorológicos. Los pluviómetros obtienen directamente la precipitación en sitios específicos, lo que se considera el medio más confiable para observar la precipitación. Sin embargo, las redes de pluviómetros a menudo son escasas y dispersas con acceso limitado a ciertas áreas, los radares meteorológicos también tienen una cobertura espacial limitada; estas deficiencias limitan sus aplicaciones a escala regional. (Xie, P., & Arkin, P. A. , 1996; Tang, G., Clark, M. P., Papalexiou, S. M., Ma, Z., & Hong, Y., 2020).

## **2.3. Definición de términos básicos**

### **Geoide**

El geoide es una superficie hipotética donde el vector gravedad es perpendicularmente a ella y define la horizontal en cualquier lugar. Actualmente el geoide es modelado usando datos satelitales y de superficie, como es el caso del geoide 2011 de Potsdam, basado en datos de los satélites LAGEOS, GRACE y GOCE y datos de superficie (gravimetría aerotransportada y altimetría satelital).

### **Agua total almacenada**

La cantidad total de agua almacenada es la suma del agua superficial, es equivalente de agua de la nieve, la humedad del suelo y el agua subterránea.

### **Anomalía**

Es la diferencia de los datos respecto su valor promedio de una determinada época.

### **Recarga de agua**

Proceso en el cual se incrementa el agua total almacenada, esta se refleja en un cambio positivo de la anomalía gravitacional.



## **CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES**

### **3.1. Hipótesis**

De acuerdo al problema de investigación se han planteado las siguientes hipótesis:

#### **Hipótesis general:**

- Existe una relación entre la precipitación, los eventos moderados y fuertes de El Niño en las anomalías gravitacionales, en la Región Lima-Callao, en el periodo 2002 - 2016.

#### **Hipótesis específicas:**

- Las precipitación y las anomalías gravitacionales presentan ciclos anuales, con fluctuaciones entre valores máximos y mínimos intranual en la Región Lima -Callao, en el periodo 2002 - 2016.
- Los eventos El Niño moderado y fuerte tiene un influencia en el incremento de las anomalías gravitacionales en la Región Lima -Callao, en el periodo 2002 - 2016.

### **3.2. Definición conceptual de las variables**

#### **Variable Independiente (X)**

La variable independiente es la precipitación, la cual consiste en la cantidad de agua que precipita en forma de lluvia, agualuvia, nieve o granizo sobre un lugar determinado. La precipitación se mide en mm/hr, y se puede medir en frecuencias diarias, mensuales y anuales. En este trabajo se utilizarán precipitaciones mensuales proporcionados por la misión TRMM.

X = precipitación mensual TRMM 3B43V7 en (mm/hr)





### **Variable Dependiente (Y)**

La variable dependiente es la variación del agua total almacenada de una región o área determinada. El agua total almacenada es la suma del agua superficial, del agua de la nieve, de la humedad del suelo y del agua subterránea. El agua total almacenada se mide usando los cambios en la anomalía gravitatoria, la cual se mide en centímetros equivalente de espesor de agua, y es proporcionado por la Misión GRACE.

Y = anomalía gravitacional (en cm)

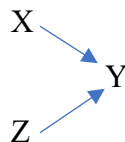
### **Variable Interviniente (Z)**

Existe muchas variables que podrían incidir sobre los cambios en el agua total almacenada además de la precipitación, como transferencias de agua subterránea o de aguas superficiales, desde otras partes. Existe un interés sobre todo la influencia de eventos climáticos extremos, en este caso se consideraron los eventos moderados y fuertes del fenómeno de El Niño. Para ello se consideró como indicador la temperatura superficial del mar en la región 3 y 4, medido por el índice de Niño 3.4.

Z = índice de Niño 3.4 (en °C)

### **3.3. Operacionalización de las variables**

Las variables X, Y y Z se miden en una frecuencia mensual desde el año 2002 al 2016. Se calculan los promedios de X e Y sobre el área de estudio, luego se busca establecer relaciones entre estas variables



## **CAPÍTULO IV: DISEÑO METODOLÓGICO**

### **4.1. Tipo y diseño de investigación**

La investigación desarrollada es descriptiva en la medida que se describe la variación anual y estacional de los datos GRACE y TRMM, es correlacional debido a que busca encontrar una correlación entre los datos de precipitación y anomalías gravitacionales, explicativa pues busca relaciones causales en las variaciones del agua total almacenada con eventos de El Niño y La Niña.

La investigación es no experimental, se analizan los datos registrados en un periodo de tiempo por instrumentos montados en plataformas satelitales. La población son todas las celdas unitarias o pixeles sobre el área de estudio, dado que son una cantidad medible el análisis estadístico se realiza sobre toda la población.

### **4.2. Método de Investigación**

Se realizó un análisis visual de la series de tiempo de las anomalías gravitacionales, la precipitación y del índice Niño 3.4. Se hizo un análisis de autocorrelación entre la series de datos de las anomalías gravitacionales y de precipitación, se calcula la densidad de potencia espectral y espectrograma. Finalmente se realizó una correlación cruzada entre los datos, a continuación se detalla cada uno de los pasos realizados. La investigación es no experimental, se analizan los datos registrados en un periodo de tiempo por instrumentos montados en plataformas satelitales.



### **4.3. Población y muestra**

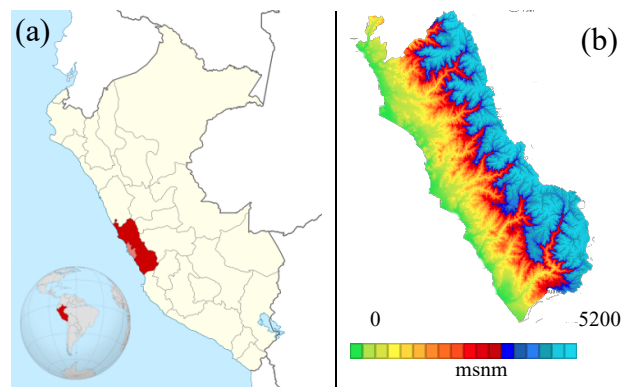
La población son todas las celdas unitarias o pixeles sobre el área de estudio, dado que son una cantidad medible el análisis estadístico se realiza sobre toda la población. Las anomalías gravitacionales tiene una resolución de 1° (~110 km) y contiene 14 celdas unitarias sobre el área de estudio, los calculos estadísticos se realizan sobre todas las celdas unitarias del área de estudio.

## 4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado

### 4.4.1. 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 km<sup>2</sup>. 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 (ANA, 2021),

Figura 4.1 (a) Ubicación de la región Lima - Callao y (b) Modelo de elevación digital 30 m de la Región Lima - Callao.



Fuente: Adaptado de <https://www.google.com/maps>

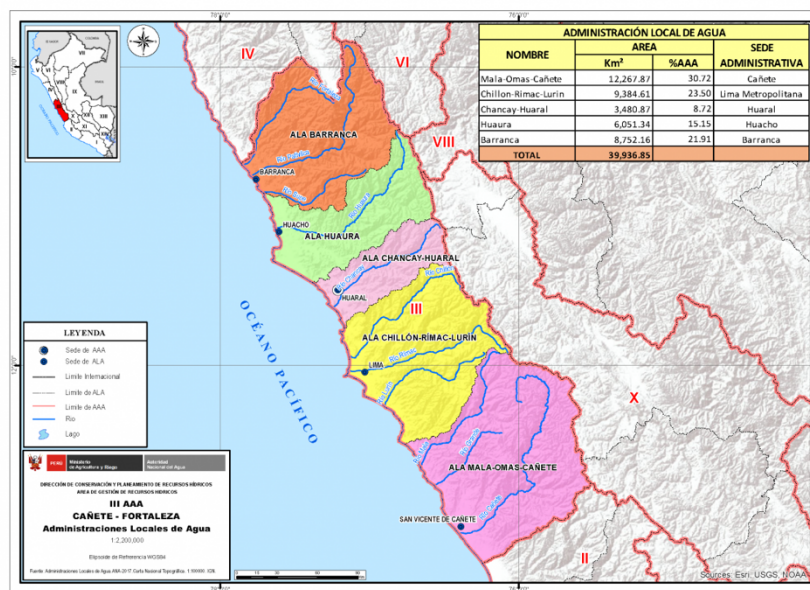
### 4.4.2. Acuíferos de la Región Lima – Callao

Los acuíferos de la región Lima son administrados por Autoridad Administrativa del Agua (ANA) Cañete – Fortaleza, este órgano descentralizado atiende las necesidades hídricas de la región Lima-Callao y esta dividida en diecisiete cuencas hidrográficas, en las que 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, así como 21 lagunas. La administración a su vez esta conformada por cinco administraciones locales: Barranca, Huara, Huaral-Chancay, Chillon-Rimac-Lurin y Mala-Omas-Cañete,

Figura 4.2. Los principales acuíferos en la Región Lima Callao son: Asia, Cañete, Huaral -Chancay, Chillón, Chilca, fortaleza, Huaura, Lurin, Mala, Pativilca, Supe, Figura 4.3.

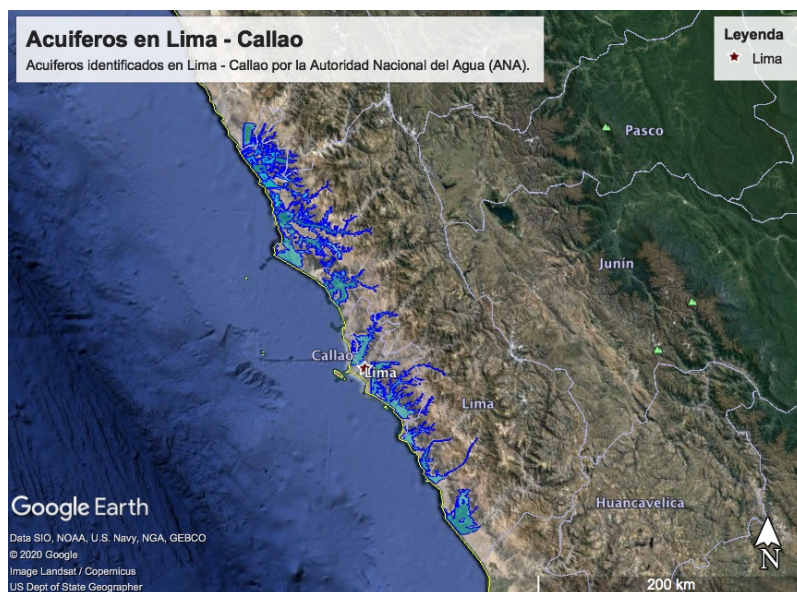
El periodo de estudio desarrollado corresponde desde el año 2002 al año 2016.

Figura 4.2. Administraciones locales del agua



Fuente: Autoridad Nacional del Agua

Figura 4.3. Acuíferos de la Región Lima - Callao



*[Handwritten signature]*

## 4.5. Técnica e instrumentos para la recolección de información

La técnica de recolección de datos es observacional a través de sensores montados sobre plataformas satelitales, de acuerdo a las misiones de observación terrestres para las que fueron diseñados. Los datos son enviados a centrales terrestres, donde se aplican algoritmos para su procesamiento y obtención de los datos que están disponibles para la comunidad científica.

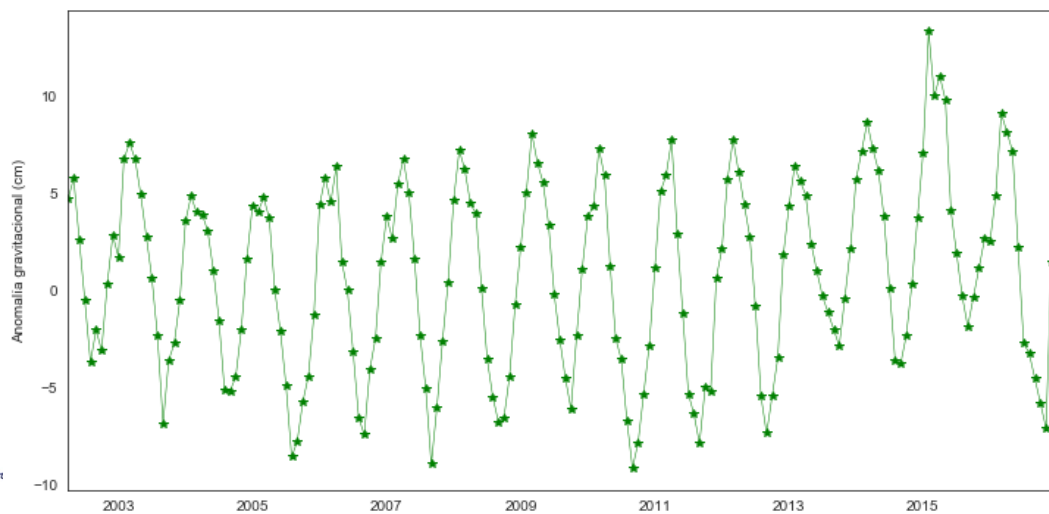
## 4.6. Análisis y procesamiento de datos

### 4.6.1. Análisis visual de los datos GRACE y TRMM

#### Análisis visual de los datos de anomalía gravitacional GRACE

Se calculó el promedio de los datos de anomalía gravitacional sobre el área de estudio para el periodo 04/2002 al 12/2016, se realizó una interpolación para completar algunos meses sin datos. La serie muestra variaciones positivas y negativas de las anomalías gravitacionales, Figura 4.9.

Figura 4.4 Anomalías gravitacionales mensuales de la Región Lima - Callao



La variación anual de las anomalías gravitacionales muestra que los años con mayor anomalía fueron 2014 - 2015. El promedio de las anomalías anuales es 0.7765 cm en espesor de agua equivalente, con una desviación estandar de 1.5575 y un coeficiente de variación (CV) del 2.00, se observa una prevalencia de anomalías anuales positivas, Figura 4.10.

Las anomalías gravitacionales mensuales muestran una estacionalidad anual, la mediana de las anomalías por mes tiene valores positivos de diciembre a junio, y valores negativos de julio a noviembre. En el mes de marzo se tiene un máximo y en el mes de setiembre un mínimo. En los meses de febrero y abril hubieron valores atípicos de la anomalía gravitacional, Figura 4.6.



Figura 4.5. Variación de las anomalías gravitacionales por año

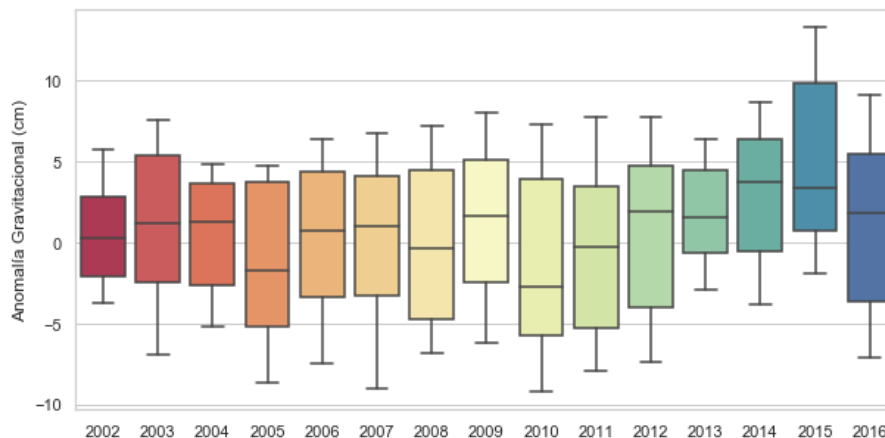


Figura 4.6. Variación de las anomalías gravitacionales por mes

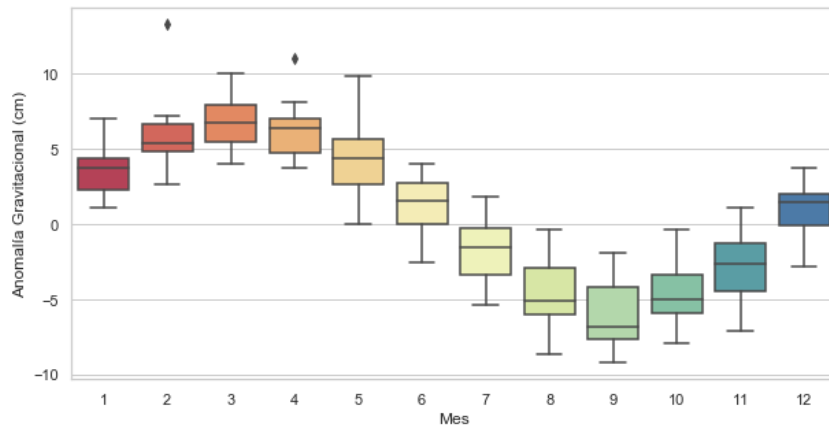


Figura 4.7. Mapas de la anomalía gravitacional por año



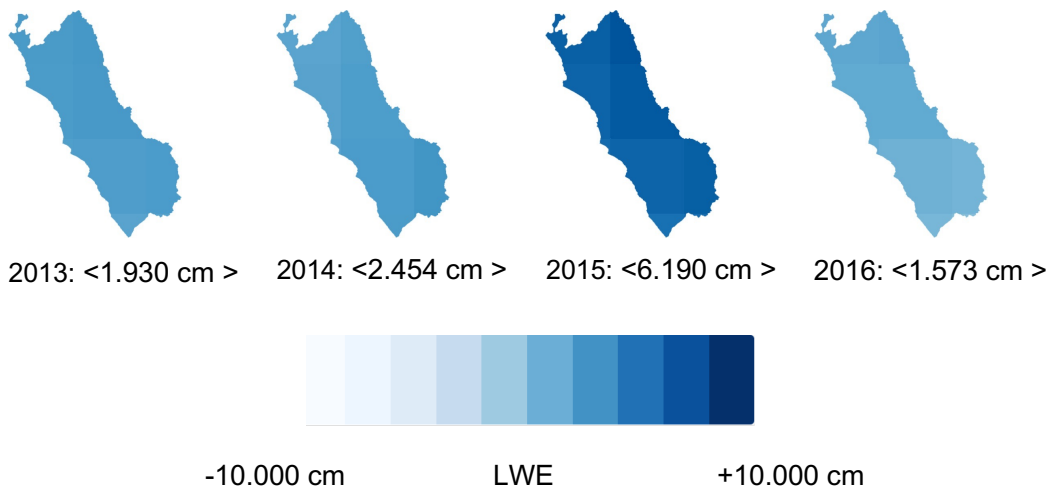
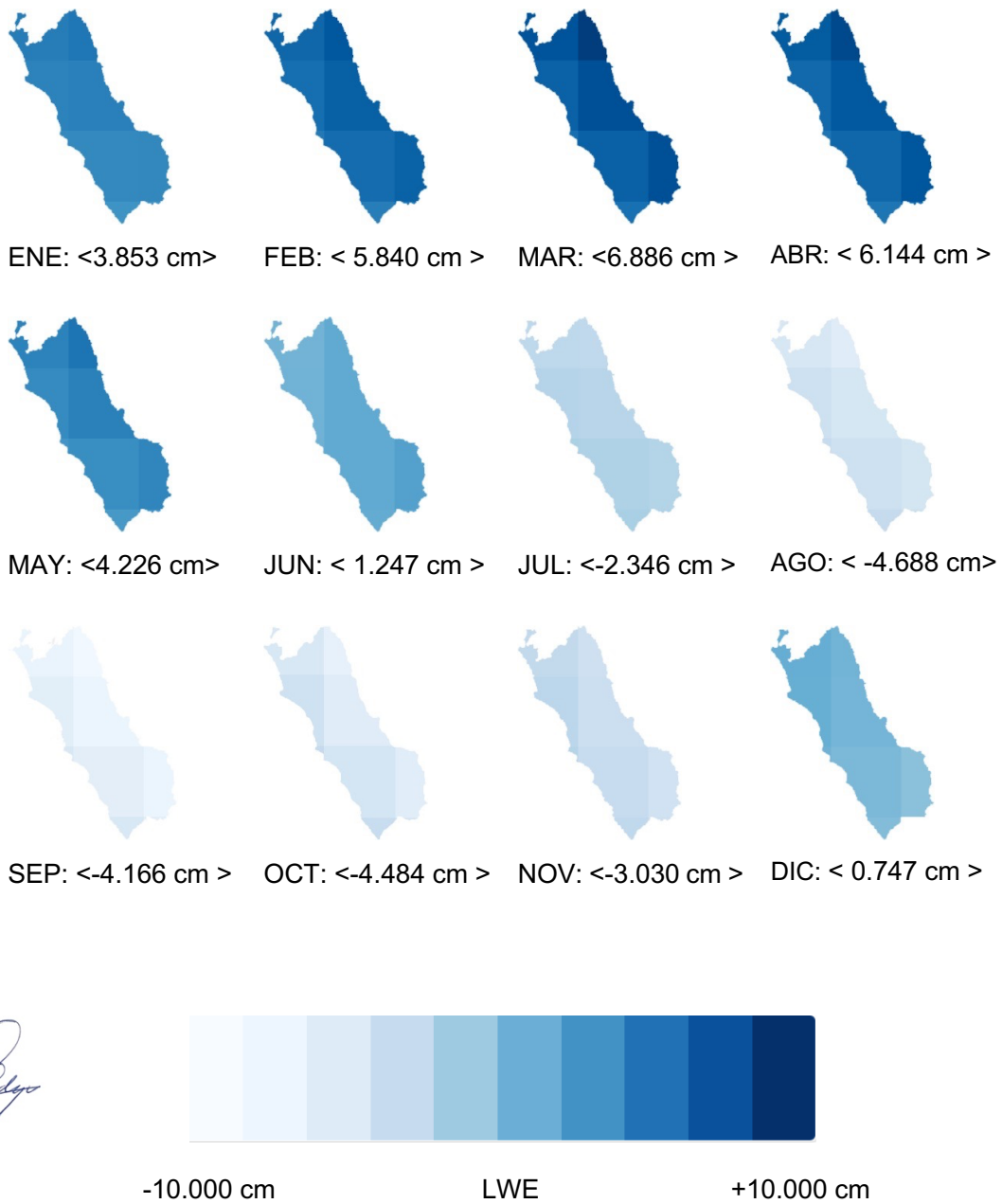




Figura 4.8. Mapas de la anomalía gravitacional por mes

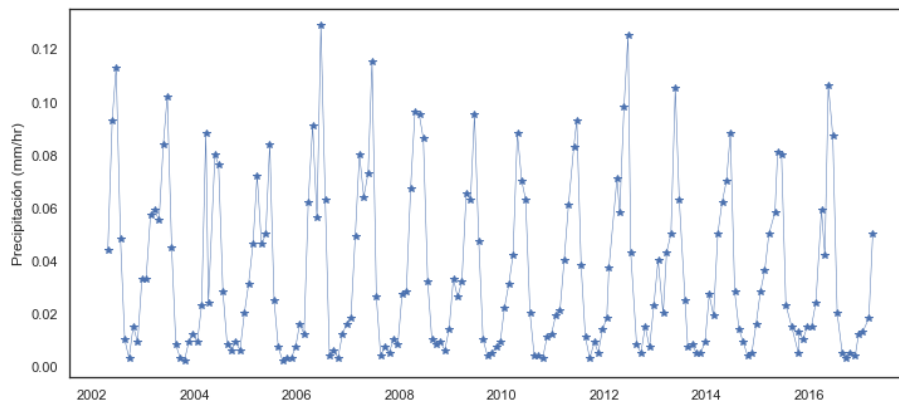


Se elaboraron mapas de la anomalías gravitacionales por año y por mes, se observa valores positivos altos en el periodo 2012 - 2016, con anomalías gravitacionales negativas en los años 2005 y 2010, Figura 4.7; en las anomalías gravitacionales por mes se observa que un gradiente negativo de Este a Oeste entre los meses de enero a junio, y un gradiente postivo de julio a diciembre, Figura 4.8

### Análisis visual de los datos de precipitación TRMM 3B34V7

Se calculó el promedio de los datos de precipitación mensual sobre el área de estudio para el periodo 04/2002 al 12/2016, la serie resultante muestra que los años con precipitaciones mayores a 0.100 mm/hr fueron los años 2003, 2006-2007, 2012-2013 y 2016, Figura 4.9.

Figura 4.9. Precipitación mensual sobre la Region Lima - Callao



La precipitación media anual de precipitación es de 0.035 mm/hr, con una desviación estándar de 0.006 mm/hr y un coeficiente de variación (CV) de 0.17. En los años 2012 y 2016 se encontraron valores atípicos. En cuanto a su variabilidad interanual se distingue los cambios positivos entre 2005 - 2006, 2011 - 2012, 2015 - 2016 y los cambios negativos 2002 -2003, 2012 - 2013, Figura 4.10.

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, Figura 4.11.

Figura 4.10. Variación de la precipitación por año

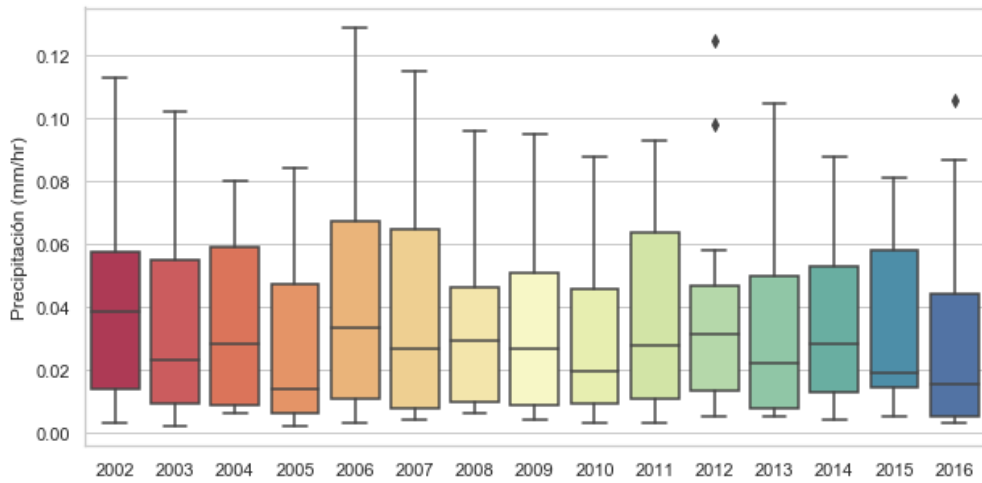
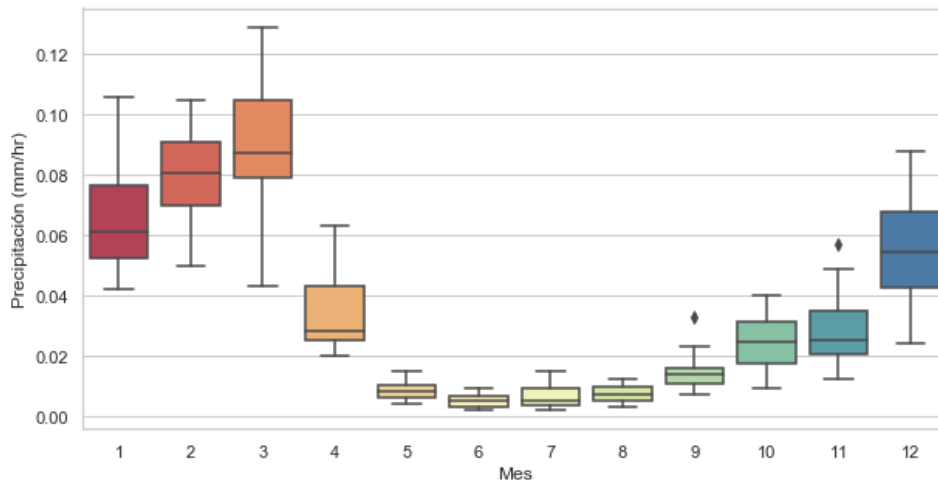


Figura 4.11. Variación de la precipitación por mes



Se elaboraron mapas de la precipitación por año y por mes, se observó que la precipitación mínima ocurrió en el año 2005 con un valor de 0.026 mm/hr  $\pm$  1.8% y la máxima en el año 2006 con un valor de 0.044 mm/hr  $\pm$  2.4%, Figura 4.12.

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), es decir existe un gradiente negativo de Este a Oeste, durante todo el año, Figura 4.13.

Figura 4.12. Mapas de la precipitación anual

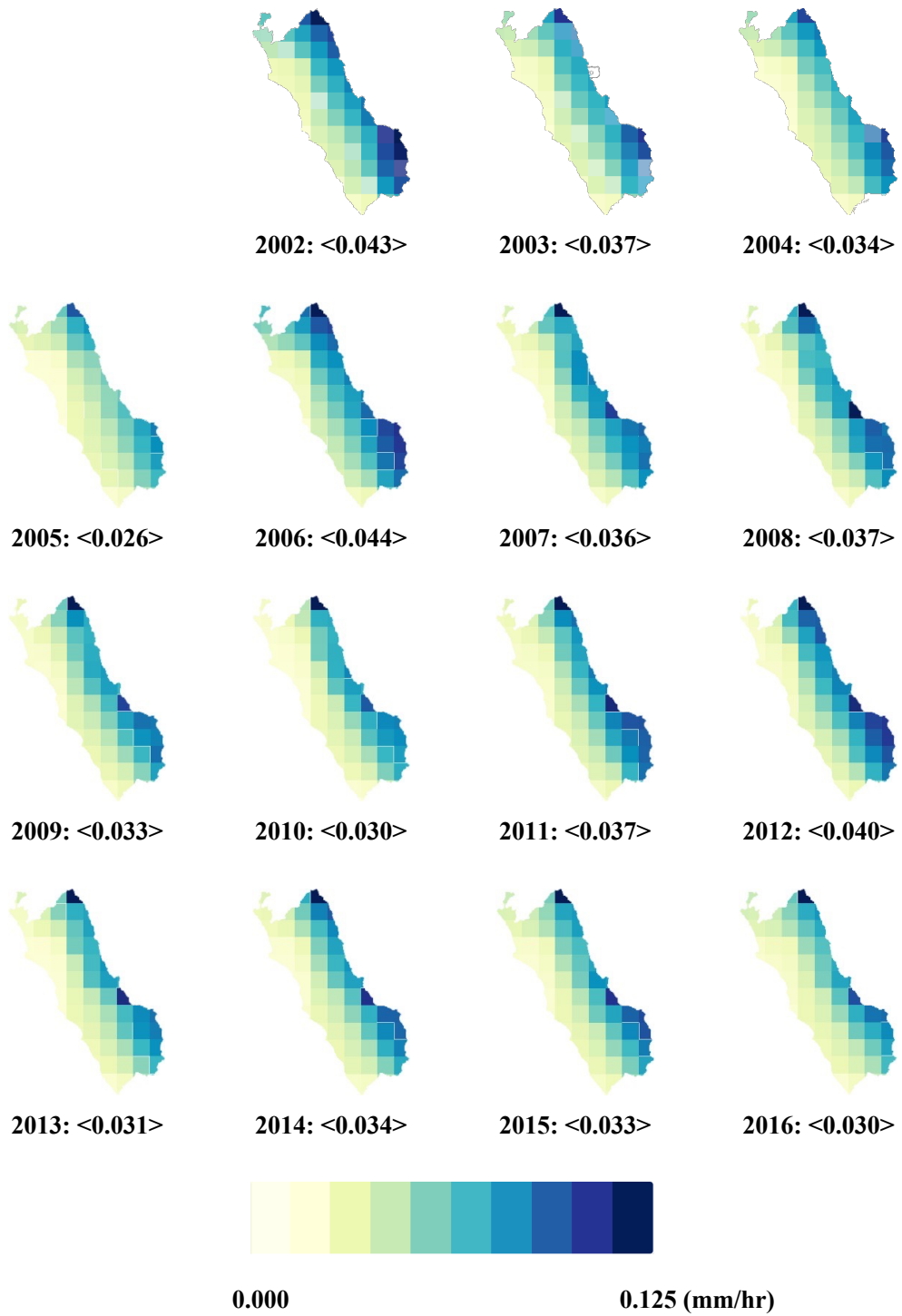
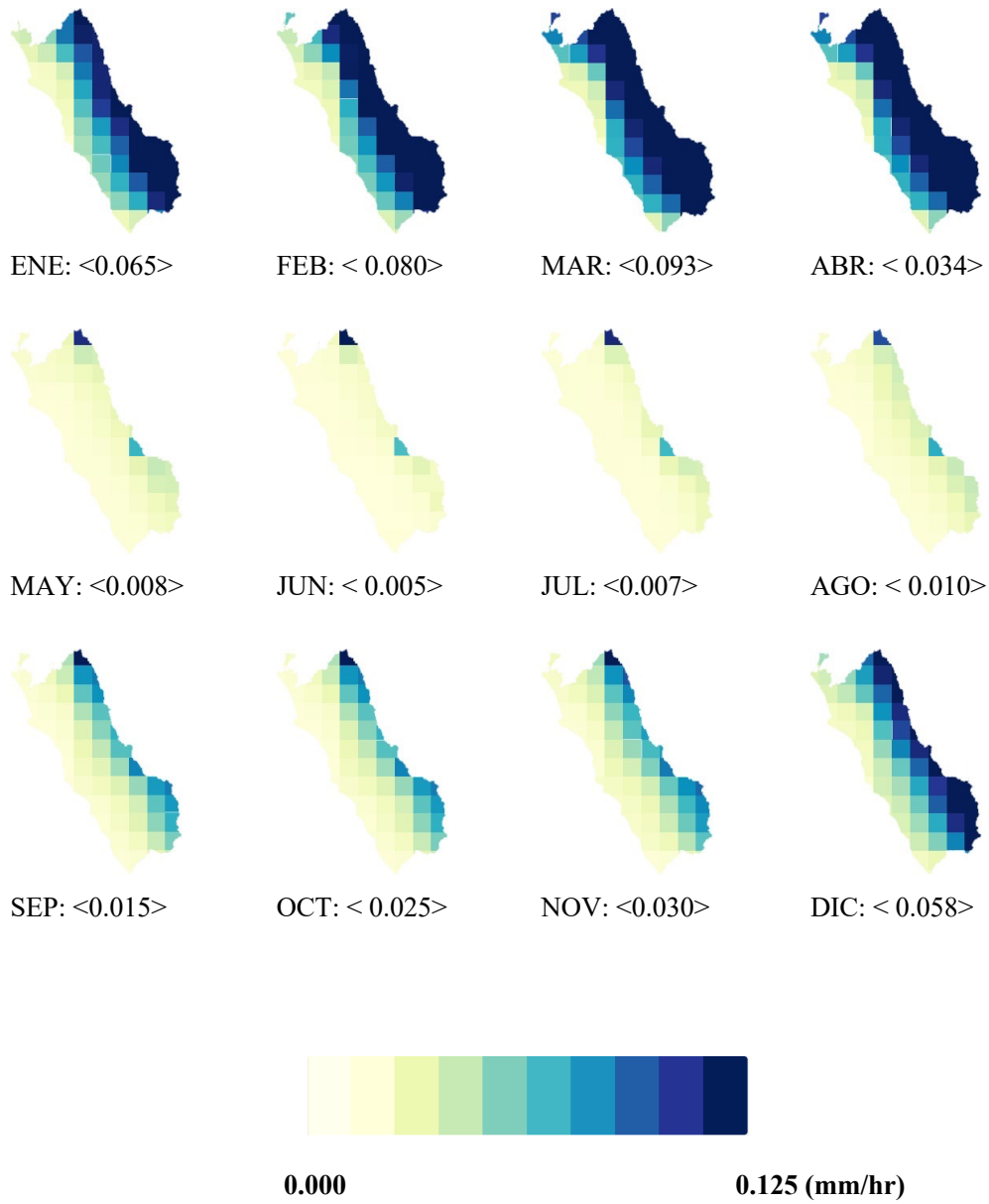


Figura 4.13. Mapas de la precipitación mensual

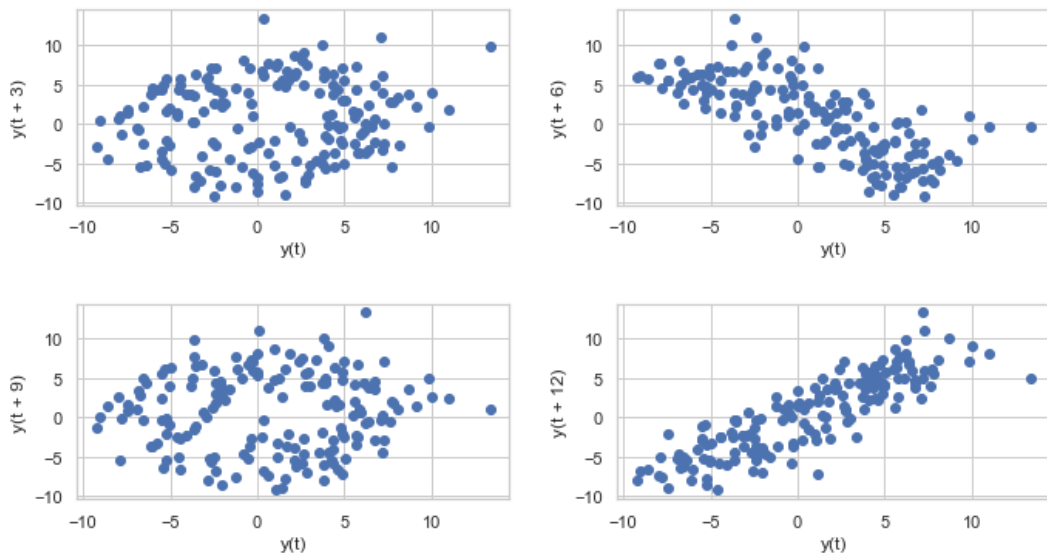


#### 4.6.2. Análisis de autocorrelación de los datos GRACE y TRMM

##### Análisis de autocorrelación de los datos de anomalía gravitacional GRACE

Se realizaron graficas con diferentes retrasos para identificar si existe autocorrelación entre los datos. Se observó que los datos con un retraso  $L = 6$  meses presentan una correlación negativa y con un retraso  $L = 12$  meses con una correlación positiva, lo que sugiere una marcada estacionalidad intranual con ciclos anuales, Figura 4.14.

Figura 4.14. Gráficas de los datos con retrasos 3, 6, 9 y 12 meses con respecto a los datos originales de las anomalías gravitacionales



Se realizó la superposición de los datos originales y los datos retrasados 12 meses, notándose claramente que las anomalías gravitacionales tiene un ciclo anual, Figura 4.15.

Se calculó la función de autocorrelación, observándose que existe una fuerte autocorrelación negativa con un coeficiente de correlación de  $-0.7372$  para un retraso  $L = 6$  meses, lo que sugiere una marcada estacionalidad intranual. Para un retraso  $L = 12$  meses el coeficiente de correlación es de  $0.8644$ , notando que las anomalías gravitacionales tienen un ciclo anual, Figura 4.16.

Figura 4.15. Gráfica de los datos con retraso  $L = 12$  meses con los datos originales de las anomalías gravitacional

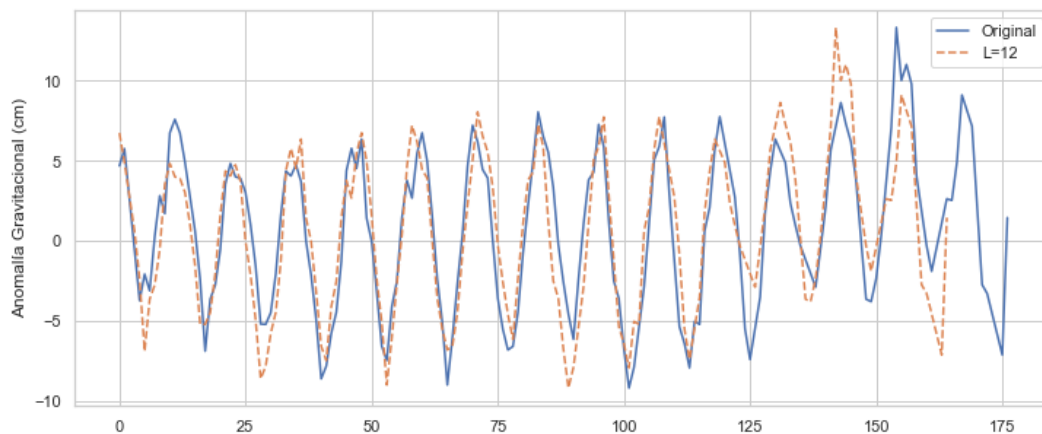
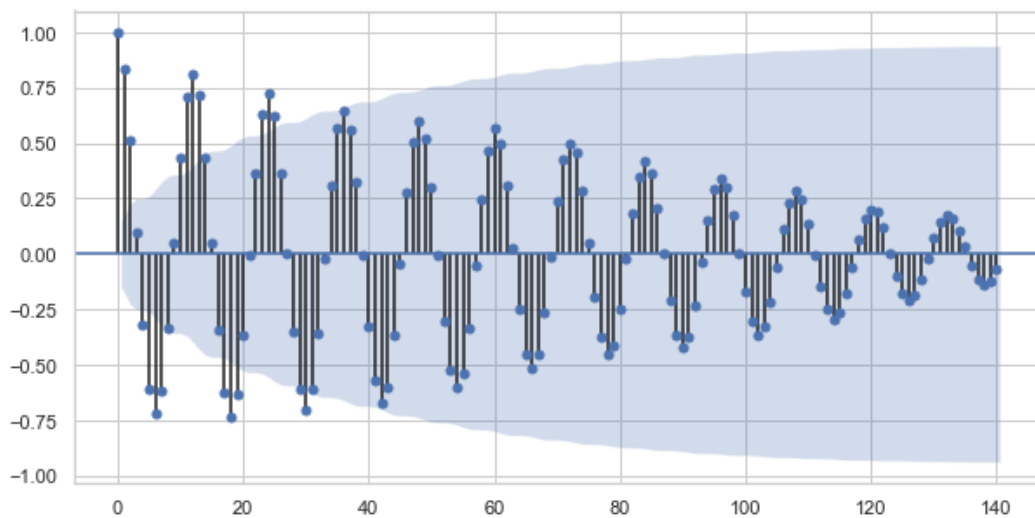
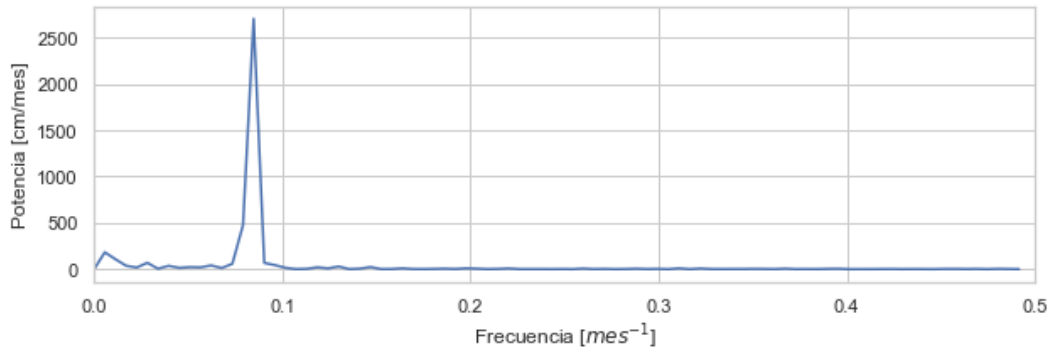


Figura 4.16. Función de autocorrelación de las anomalías gravitacionales



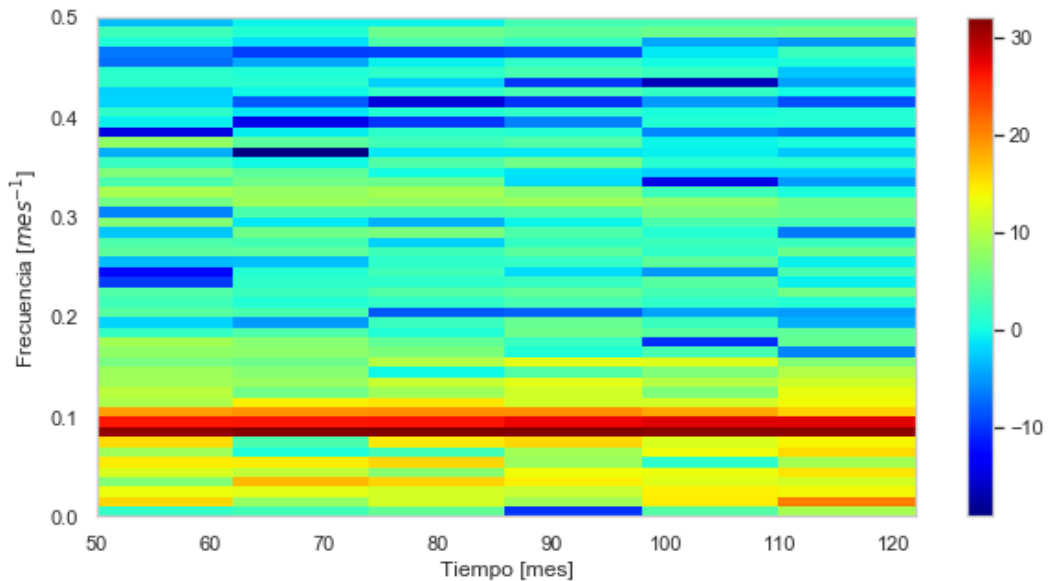
Se calculó el espectro de potencia de la serie de tiempo de las anomalías gravitacionales donde se puede apreciar que la frecuencia dominante  $f = 0.0847$   $mes^{-1}$  (12 meses), confirmando que las anomalías gravitacionales tienen un ciclo anual, Figura 4.17.

Figura 4.17. Espectro de potencia de las anomalías gravitacionales



Se calculó el espectrograma para una ventana de 100 meses con solapamientos de 97 meses, se puede apreciar que en toda la serie temporal están presente una sola frecuencia dominante,  $f = 0.08847 \text{ mes}^{-1}$  (12 meses), Figura 4.18.

Figura 4.18. Espectrograma de potencia de las anomalías gravitacionales con una ventana de 100 meses

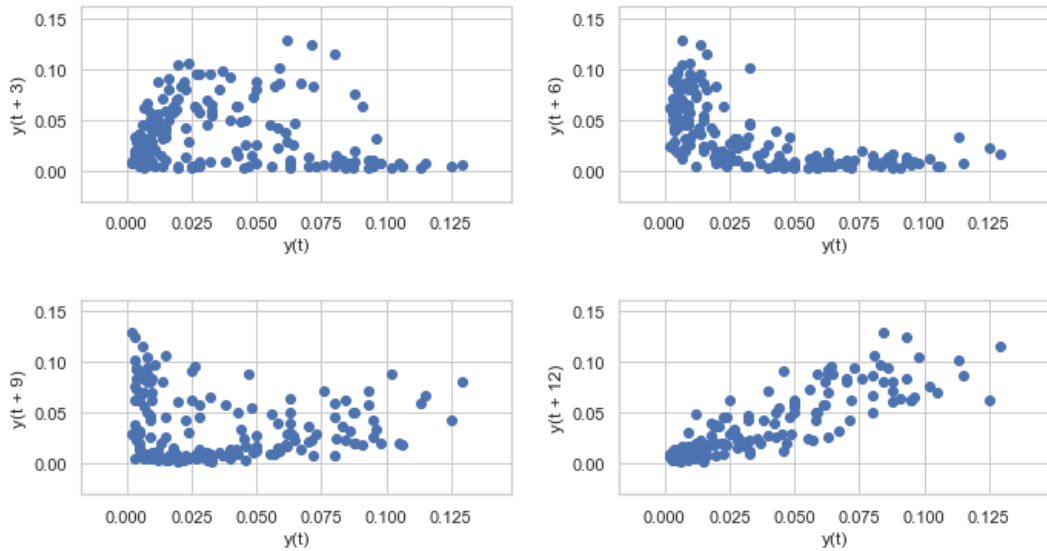


#### Análisis de autocorrelación de los datos de precipitación TRMM 3B34V7

Se realizaron graficas con diferentes retrasos para identificar si existe autocorrelación entre los datos. Se observó que los datos con un retraso de 12 meses con respecto a los datos originales presentan una tendencia lineal con autocorrelación positiva, lo que sugiere que la precipitación también tiene un ciclo anual bastante marcado, Figura 4.19.



Figura 4.19. Gráficas de los datos con retrasos 3, 6, 9 y 12 meses con respecto a los datos originales de la precipitación



Se realizó la superposición de los datos originales y los datos retrasados 12 meses, notándose claramente concordancia lo que confirma una estacionalidad anual de los serie de tiempo de la precipitación, Figura 4.20.

Se calculó la función de autocorrelación determinando que existe una fuerte autocorrelación negativa con un coeficiente de correlación de  $-0.6135$  para un retraso  $L = 6$  meses, lo que sugiere una marcada estacionalidad intranual y para un retraso  $L = 12$  meses el coeficiente de correlación fue de  $0.8650$ , confirmandose que la precipitación tiene un ciclo anual, Figura 4.21.

Figura 4.20 Superposición de los datos con retraso  $L = 12$  meses con respecto a los datos originales de precipitación

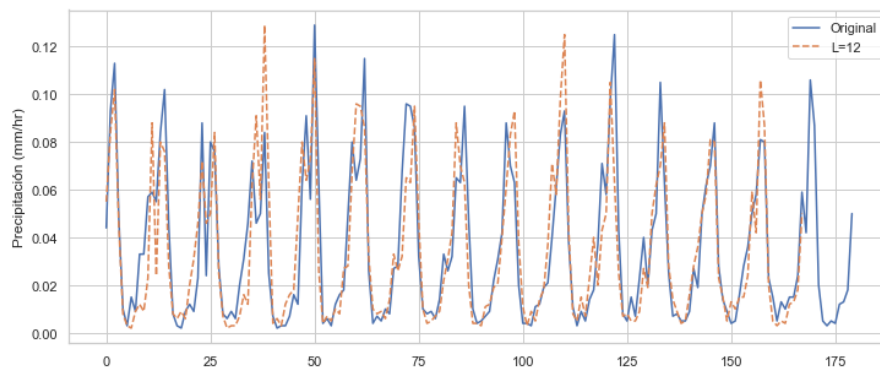
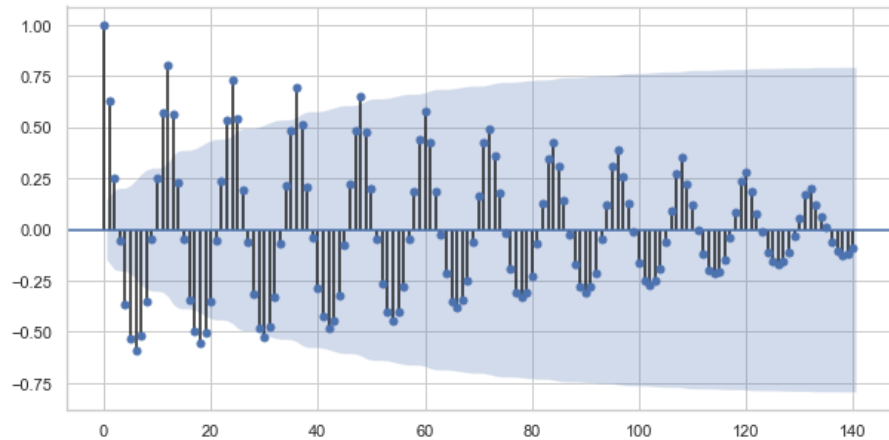
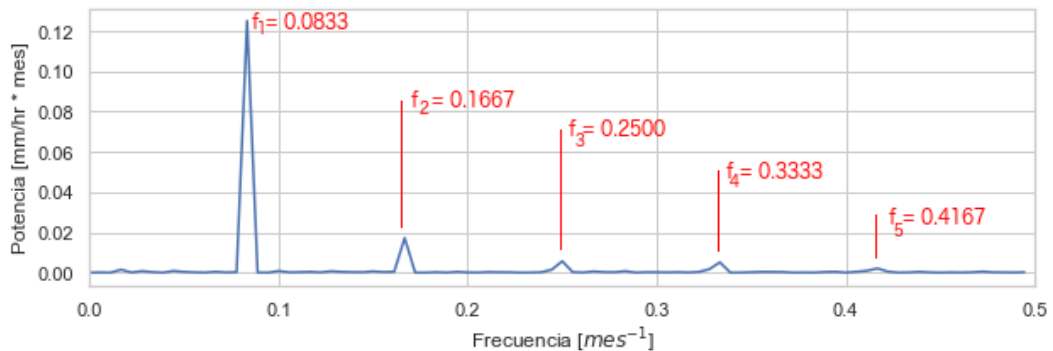


Figura 4.21. Función de autocorrelación de los datos de precipitación



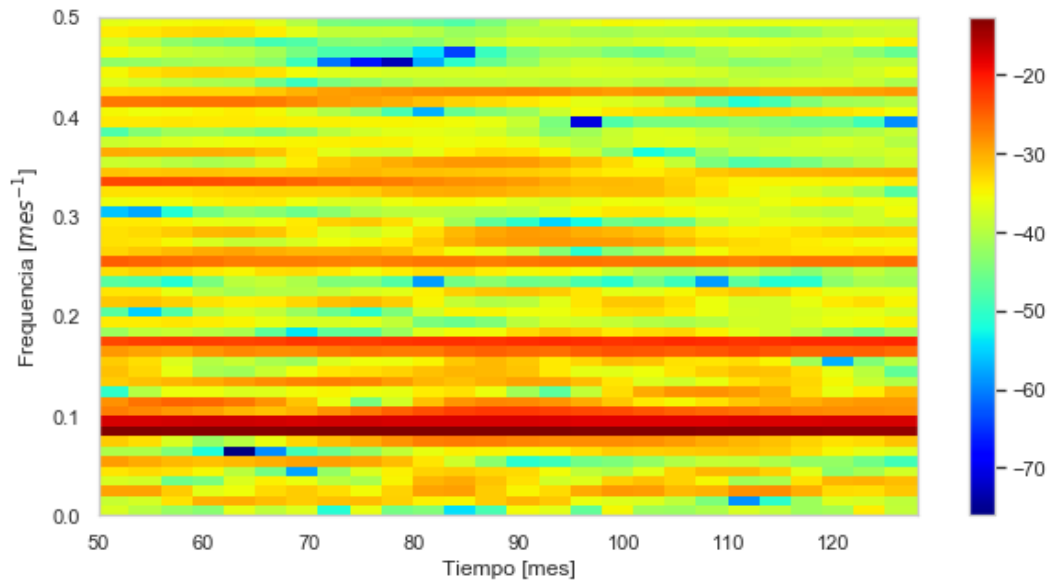
Para identificar frecuencias dominantes sobre la serie de tiempo, se calculó el espectro de potencia obteniéndose las frecuencias más influyentes en la serie de tiempo de la precipitación, siendo las frecuencias dominantes  $f_1 = 0.0833 \text{ mes}^{-1}$  (12 meses),  $f_2 = 0.1667 \text{ mes}^{-1}$  (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), Figura 4.22.

Figura 4.22. Espectro de potencia de la precipitación



Se calculó el espectrograma para una ventana de 100 meses con solapamientos de 97 meses, se puede apreciar que en toda la serie temporal están presentes las cinco frecuencias dominantes,  $f_1 = 0.0833 \text{ mes}^{-1}$  (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, Figura 4.23.

Figura 4.23. Espectrograma de potencia de la precipitación con una ventana de 100 meses



#### 4.6.3. Descomposición de las series de datos GRACE y TRMM

##### Prueba de estacionariedad de la serie de tiempo GRACE

Se utilizó el test de Dickey-Fuller aumentado, implementado en el módulo de python statsmodels para probar la estacionariedad de la serie temporal de las anomalías gravitacionales. En este test, la hipótesis nula es que la serie de tiempo no es estacionaria y la hipótesis alternativa es que la serie de tiempo es estacionaria, para un cierto valor de lags o retrasos. Al aplicar el test el valor p resultó ser 0.2454, lo que permite aceptar la hipótesis nula, es decir, la serie de tiempo de las anomalías gravitacionales no es estacionaria.

##### Descomposición de la serie de tiempo de los datos GRACE

Se descompuso la serie de tiempo bajo un modelo aditivo: Tendencia + Estacionalidad + Residuo, teniendo en cuenta el ciclo anual antes observado. El componente Residuo presenta una media de 0.0115 con una desviación estandar de 1.2506. El componente Tendencia evidencia un incremento de la anomalía gravitacional desde el 2012 hasta el 2015, Figura 4.24.

### Prueba de estacionariedad de la serie de tiempo TRMM

Se utilizó el test de Dickey-Fuller aumentado para probar la estacionariedad de la serie temporal de la precipitación. Al aplicar el test el valor p resultó ser 0.071, lo que permite aceptar la hipótesis nula con un nivel de significancia del 5%, es decir, la serie de tiempo de la precipitación no es estacionaria.

### Descomposición de la serie de tiempo de los datos TRMM

Se descompuso la serie de tiempo bajo un modelo aditivo: Tendencia + Estacionalidad + Residuo, para un periodo anual el componente Residuo presenta una media cero y con una desviación estandar de 0.011. El componente Tendencia muestra que los años de menor precipitación fueron 2004 - 2005, 2009 - 2011, 2014 - 2016 y los años de mayor precipitación fueron 2002 - 2003, 2006 - 2008 y 2011 - 2012, Figura 4.25.

Figura 4.24. Descomposición de la serie de tiempo de las anomalías gravitacionales usando un modelo aditivo

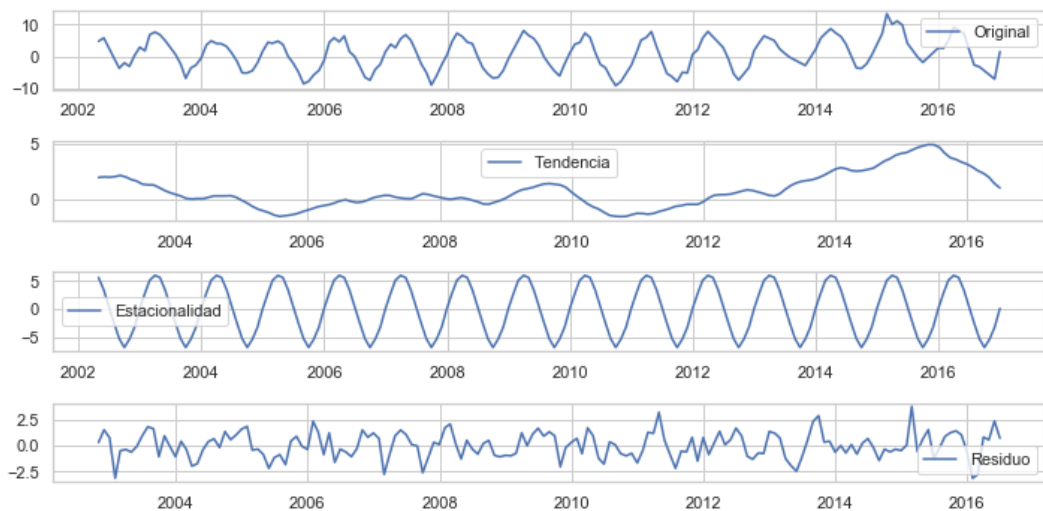
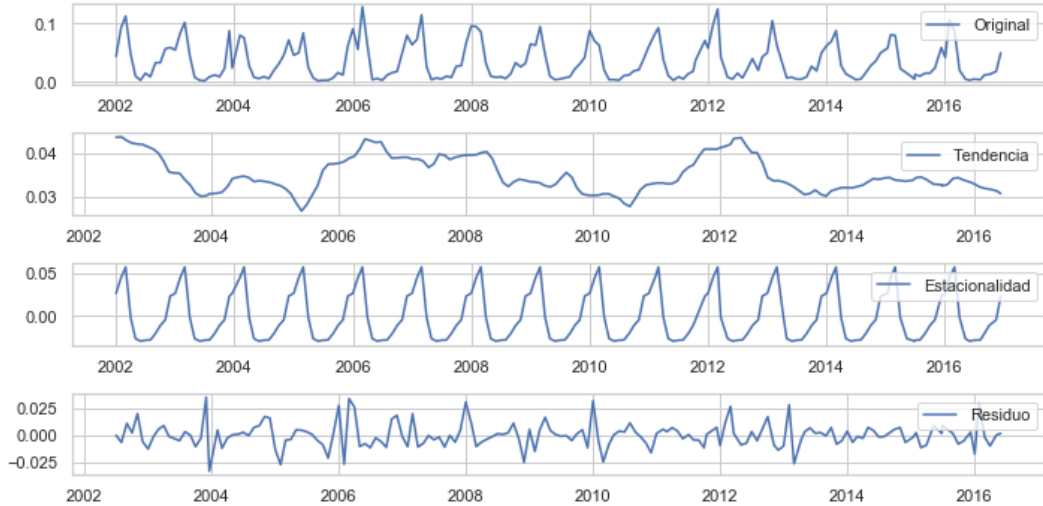


Figura 4.25. Descomposición de la serie de tiempo de la precipitación usando un modelo aditivo



#### 4.6.4. Análisis de correlación cruzada entre los datos GRACE y TRMM

Debido a que la series GRACE y TRMM no son estacionarias se utilizó el componente Estacional de cada serie de tiempo para establecer su correlación cruzada, Figura 4.26. Se encontró que para un retraso  $L = 1$  mes el coeficiente de correlación cruzada entre ambos series de datos es 0.8591 y para un retraso  $L = 2$  meses, el coeficiente de correlación cruzada es de 0.8677, Figura 4.27.

Figura 4.26. Componente estacional de los datos GRACE y TRMM

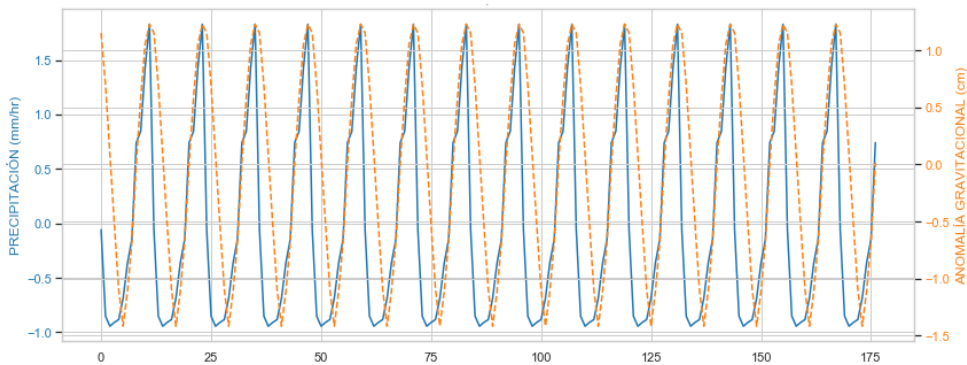
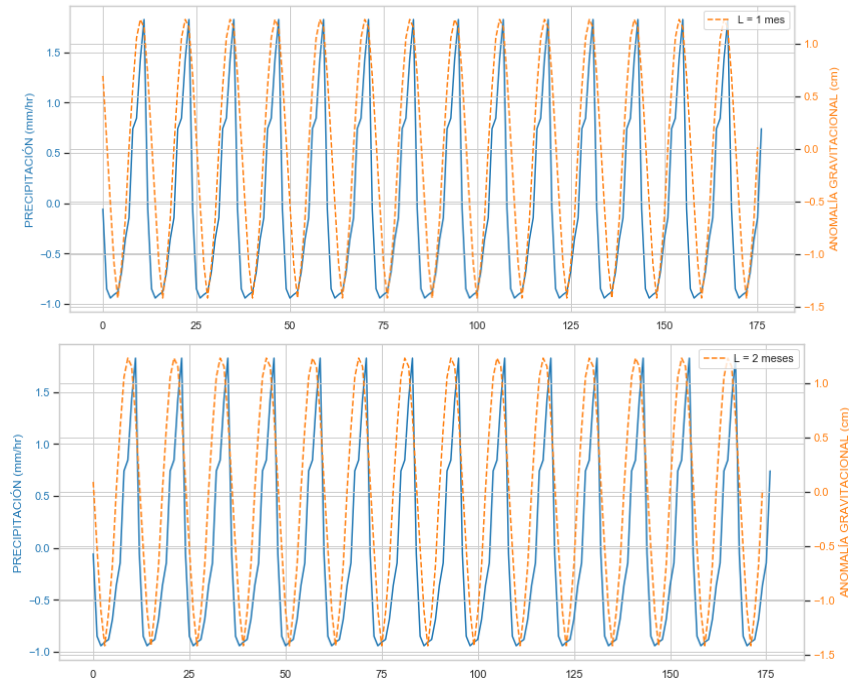


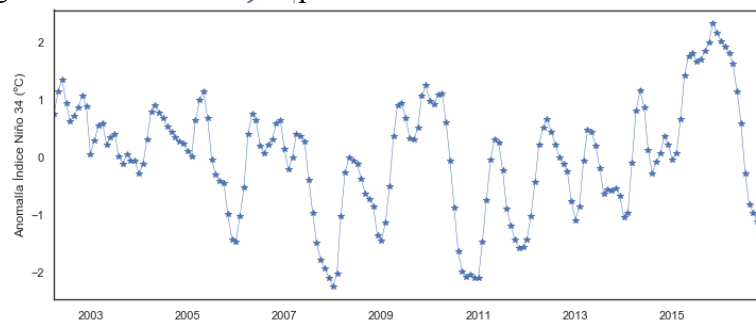
Figura 4.27. Datos estandarizados GRACE y TRMM desfasados L =1 mes y L = 2 meses



#### 4.6.5. Análisis de los datos de anomalía del Índice Niño 3.4

Se utilizarán los datos del índice del Niño 34 para identificar evento extremos de El Niño, para el periodo analizado 04/2002 - 12/2016 se han identificado cinco eventos de El Niño y La Niña. Estos eventos incluyen el evento débil de La Niña en 2008/2009, el evento moderado de El Niño en 2009/2010, el evento fuerte de La Niña en 2010/2011 y el evento fuerte de El Niño en 2015/2016, el cual se aprecia con las anomalías positivas y negativas de mayor intensidad en la serie de tiempo del índice Niño 3.4, Figura 4.28.

Figura 4.28. Serie de tiempo de los datos del índice de el Niño 3.4



## **CAPITULO V: RESULTADOS**

### **5.1. Resultados descriptivos**

El análisis de autocorrelación, correlación cruzada y descomposición de las series de tiempo de los datos GRACE y TRMM, mostró que ambas series presentan ciclos anuales, pero con variaciones intranuales diferentes. Las anomalías gravitacionales que están relacionadas con los cambios en el agua total almacenada varían en un ciclo anual, de -4.166 cm a 6.886 cm de setiembre a marzo, aumenta de diciembre a mayo y disminuyen de junio a noviembre. Respecto a la distribución espacial se presenta un gradiente negativo de Este a Oeste de enero a junio, y un gradiente positivo de julio a diciembre.

La precipitación presenta un ciclo anual, aunque evidencia otras frecuencias de menor potencia espectral de 6, 4 y 3 meses. La precipitación aumenta desde agosto hasta marzo, luego disminuye rápidamente hasta mayo, seguido de un periodo seco de mayo a agosto. Respecto a la distribución espacial, la precipitación es mayor en la parte andina que en la costa durante todo el año.

### **5.2. Resultados inferenciales**

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

Se encontró que los eventos de El Niño moderado 10/2009 - 05/2010 y El Niño fuerte 03/2015 - 06/2016, están estrechamente relacionados con un incremento de las anomalías gravitacionales. Existe un aumento significativo en las anomalías gravitacionales que no se percibe en los datos de precipitación relacionado con El Niño 03/2015 - 06/2016.



## **CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados**

El análisis correlación cruzada de los datos de precipitación y las anomalías , gravitacionales con un coeficiente de correlación de 0.8677, así como la identificación de los eventos moderado y fuerte de El Niño en las las anomalías , gravitacionales, en la Región Lima-Callao, en el periodo 2002 - 2016, demuestran la hipótesis general

El análisis de autocorrelación de la precipitación y las anomalías gravitacionales evidencias ciclos anuales, con fluctuaciones entre valores máximos y mínimos intranual en la Región Lima -Callao, en el periodo 2002 - 2016, demostrando la primera hipótesis específica.

El análisis visual evidencia que los eventos El Niño moderado y fuerte tiene un influencia en el incremento de las anomalías gravitacionales en la Región Lima - Callao, en el periodo 2002 - 2016, demostrando la primera hipótesis específica.

### **6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios**

Los resultados mostrados son consistentes con muchos de los estudios realizados mencionados en los antecedentes. Existe una relación entre la precipitación y los eventos extremos del fenómeno de El Niño sobre las anomalías gravitacionales que están relacionadas con el agua total almacenada.





## CONCLUSIONES

El presente estudio muestra las capacidades de los datos de anomalía gravitacional GRACE y los datos de precipitación TRMM 3B437 para proporcionar conocimientos importantes y efectivos en el campo de la hidrología que revelan información valiosa sobre los cambios de almacenamiento de agua total terrestre.

Los eventos El Niño moderado y fuerte tienen una fuerte influencia sobre las anomalías gravitacionales más que en la precipitación sobre la región Lima - Callao. Por lo que el impacto del fenómeno El Niño sobre la región Lima - Callao puede monitorearse a partir de las anomalías gravitacionales en lugar de las precipitaciones. Incrementos significativos en el agua total almacenada originaría inundaciones y deslizamientos, causando pérdidas económicas, sociales, de la vida y la salud en los pobladores de la capital del Perú. Se debe poner atención a las diversas cuencas hidrográficas de la región Lima - Callao y protegerlos de los embates del fenómeno El Niño.

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.




## **RECOMENDACIONES**

La presente investigación deja abierta la posibilidad de analizar con mayor detalle los mecanismos de recarga del agua total almacenada, ampliado el estudio sobre las regiones vecinas a la región Lima - Callao. También queda abierto la posibilidad de extender el análisis a otras regiones de la costa del Perú, así como ampliar el periodo de estudio. Contrastar con datos in situ sobre regiones donde se disponga de más información.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'R. Rojas', located in the center of the page.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA (2021). Autoridad Administrativa del Agua Cañete - Fortaleza. Recuperado el abril de 2021, de <https://www.ana.gob.pe/organos-desconcentrados/autoridad-administrativa-del-agua-canete-fortaleza>.
- Abdelmalik, K. W., & Abdelmohsen, K. . (2019). 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*, 160(103596. ISO 690 ).
- Abelen, S., Seitz, F., Abarca del Rio, R., & Güntner, A. (2015). Droughts and floods in the La Plata basin in soil moisture data and GRACE. *Remote Sensing*, 7(6), 7324-7349.
- Awange, J. L., Gebremichael, M., Forootan, E., Wakbulcho, G., Anyah, R., Ferreira, V. G., & Alemayehu, T. . (2014). Characterization of Ethiopian mega hydrogeological regimes using GRACE, TRMM and GLDAS datasets. *Advances in water resources*(74), 64-78.
- Ballari, D., Castro, E., & Campozano, L. (2016). VALIDATION OF SATELLITE PRECIPITATION (TRMM 3B43) IN ECUADORIAN COASTAL PLAINS, ANDEAN HIGHLANDS AND AMAZONIAN RAINFOREST. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information*, 41.
- Chen, J. L., Wilson, C. R., Tapley, B. D., Yang, Z. L., & Niu, G. Y. (2009). 2005 drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114 (B5).
-  Chen, J. L., Wilson, C. R., & Tapley, B. D. (2010). The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE. *Water Resources Research*, 46(12).
- Chen, J., Li, J., Zhang, Z., & Ni, S. (2014). Long-term groundwater variations in Northwest India from satellite gravity measurements. *Global and Planetary Change*, 116, 130-138.
- Chen, J. L., Wilson, C. R., Tapley, B. D., Scanlon, B., & Güntner, A. (2016). Long-term groundwater storage change in Victoria, Australia from satellite gravity and in situ observations. *Global and Planetary change*, 139, 56-65.
- Chavez, S. P., & Takahashi, K. (2017). Orographic rainfall hot spots in the Andes-Amazon transition according to the TRMM precipitation radar and in situ data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(11), 5870-5882.

- D-103133, G.-F. L.-3. (2020). Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-on (GRACE-FO). Recuperado el abril de 2021, de PODAAC: [https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/gracefo/docs/GRACE-FO\\_L3\\_Handbook\\_JPL.pdf](https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/gracefo/docs/GRACE-FO_L3_Handbook_JPL.pdf).
- D-103922, G.-F. L.-2. (2019). *GRACE-FO Mission Documentation*. Recuperado el abril de 2021, de PODAAC: <https://podaac.jpl.nasa.gov/gravity/gracefo-documentation>.
- Famiglietti, J. S., Lo, M., Ho, S. L., Bethune, J., Anderson, K. J., Syed, T. H., Swenson, S.C., Caroline R., & Rodell, M. (2011). Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley. *Geophysical Research Letters*, 38(3).
- Hasan, E., Tarhule, A., Hong, Y., & Moore, B. (2019). Assessment of physical water scarcity in Africa using GRACE and TRMM satellite data. *Remote Sensing*, 11(8), 904.
- Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (1992). *Statistical methods in water resources* (Vol. 49). Virginia, Virginia, USA: Elsevier.
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., & Nelkin, E. J. (2010). The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA). En H. F. Gebremichael M., *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology* (págs. 3-22). Springer, Dordrecht.
- Landerer, F., W., & Swenson S., C. (2012). Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water Resources Research*, 48(W04531), 1-11.
- Mantas, V. M., Liu, Z., Caro, C., & Pereira, A. J. S. C. . (2015). Validation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products in the Peruvian Andes. *163*, 132-145. ISO 690.
- Rodell, M., Velicogna, I., & Famiglietti, J. S. (2009). Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 460(7258), 999-1002.
- Sawicz, K., Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P. A., & Carrillo, G. . (2011). Catchment classification: empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern USA. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(9), 2895-2911.
- Scanlon, B. R. (2016). Global evaluation of new GRACE mascon products for hydrologic applications. *Water Resources Research*, 52(12), 9412-9429.
- Scheel, M. L. M., Rohrer, M., Huggel, C., Santos Villar, D., Silvestre, E., & Huffman, G. J. (2011). 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*, 15(8), 2649-2663.
- Swenson, S., & Wahr, J. (2002). Methods for inferring regional surface-mass anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) measurements of time-variable gravity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B9, ETG-3).
- Swenson, S. (Dataset accessed [2021-01-01] at <https://doi.org/10.5067/TELND-NC005.de> 2012). GRACE monthly land water mass grids NETCDF RELEASE 5.0. Ver. 5.0. . *PO.DAAC, CA, USA*.
- Swenson, S., & Wahr, J. (2006). Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. *Geophysical Research Letters*, 33(8).
- Tang, G., Clark, M. P., Papalexiou, S. M., Ma, Z., & Hong, Y. (2020). Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets. *Remote Sensing of Environment*, 240(111697).
- Trenberth, Kevin & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). (2020). "The Climate Data Guide: Nino SST Indices (Nino 1+2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI)." Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices>.
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Ries, J. C., Thompson, P. F., & Watkins, M. M. (2004). GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, 305(5683), 503-505.
- Yadav, M., Wagener, T., & Gupta, H. (2007). Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. *Advances in water resources*, 30(8), 1756-1774.
- Yirdaw, S. Z., Snelgrove, K. R., & Agboma, C. O. (2008). GRACE satellite observations of terrestrial moisture changes for drought characterization in the Canadian Prairie. *Journal of Hydrology*, 356(1-2), 84-92.
- Yong, B., Liu, D., Gourley, J. J., Tian, Y., Huffman, G. J., Ren, L., & Hong, Y. (2015). Global view of real-time TRMM multisatellite precipitation analysis: Implications for its successor global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 283-296.
- Xie, P., & Arkin, P. A. . (1996). Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions. *Journal of climate*, 9(4), 840-858.


# ANEXO



## Matriz de Consistencia

### ANOMALÍAS DEL CAMPO GRAVITACIONAL EN LA REGIÓN LIMA - CALLAO

**AUTOR: Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe**

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p><b>Problema general:</b> ¿Cómo están relacionadas las variaciones de la anomalía gravitacional con la precipitación y los eventos de EL Niño en la Región Lima-Callao en el periodo 2002 - 2016?</p> <p><b>Problemas específicos</b> ¿Cómo son las variaciones interanuales y estacionales de la anomalía gravitacional y la precipitación en la Región Lima - Callao en el periodo 2002 - 2016?</p> <p>¿Existe influencia de los eventos de El Niño en las anomalías gravitacional en La región Lima - Callao en el periodo 2002 - 2016?</p>	<p><b>Objetivo general:</b> Explicar la relación entre las anomalías gravitacionales, la precipitación y los eventos de El Niño en la Región Lima-Callao, en el periodo 2002 - 2016.</p> <p><b>Objetivos específicos:</b> Explicar las variaciones interanuales y estacionales de las anomalías gravitacionales y la precipitación en la Región Lima -Callao, en el periodo 2002 - 2016.</p> <p>Identificar la influencia de los eventos El Niño en las anomalías gravitacionales en La región Lima - Callao en el periodo 2002 - 2016.</p>	<p><b>Hipótesis general:</b> Existe una relación entre la precipitación, los eventos moderados y fuertes de El Niño en las anomalías gravitacionales, en la Región Lima-Callao, en el periodo 2002 - 2016.</p> <p><b>Hipótesis específicas:</b> Las precipitación y las anomalías gravitacionales presentan ciclos anuales, con fluctuaciones entre valores máximos y mínimos intranual en la Región Lima - Callao, en el periodo 2002 - 2016.</p> <p>Los eventos de El Niño moderado y fuerte tiene un influencia en el incremento de las anomalías gravitacionales en la Región Lima - Callao, en el periodo 2002 - 2016.</p>	<p><b>Variables:</b></p> <p><b>Independiente V1:</b> <b>Precipitación</b></p> <p><b>Dependiente V2:</b></p> <p><b>Agua total almacenada.</b> Indicadores: 1.1. Anomalía gravitacional</p> <p><b>Variable Interviniente:</b></p> <p><b>V3: Eventos de moderados y fuertes de El Niño.</b></p> <p>Indicadores: 3.1. Índice de EL Niño 3.4.</p>	<p><b>Tipo:</b> Cuantitativo</p> <p><b>Nivel:</b> Explicativo</p> <p><b>Diseño:</b> No experimental</p> <p><b>Técnica:</b> Observación remota</p> <p><b>Instrumento:</b> Datos con instrumentos satelitales.</p> <p><b>Método:</b> Método de análisis de autocorrelación, correlación cruzada y espectros de potencia.</p> 

## Base de datos GRACE Tellus de la Región Lima -Callao

Date	lwe thickness_jpl	lwe thickness_csr	lwe thickness_gfz
2002-04-30	4.506	2.47	7.077
2002-05-31	4.283	5.037	7.94
2002-08-31	-6.187	-1.076	-3.934
2002-09-30	1.399	-3.568	-4.079
2002-10-31	-4.104	-2.475	-2.777
2002-11-30	1.589	0.78	-1.568
2002-12-31	1.921	1.87	4.656
2003-01-31	3.081	4.214	-2.196
2003-02-28	5.91	8.885	5.46
2003-03-31	7.999	8.045	6.718
2003-04-30	6.501	7.752	5.951
2003-05-31	4.843	3.206	6.678
2003-07-31	0.826	0.876	0.107
2003-08-31	-3.393	-1.629	-2.159
2003-09-30	-4.725	-5.359	-10.602
2003-10-31	-3.779	-3.346	-3.827
2003-11-30	-2.918	-2.582	-2.78
2003-12-31	-1.05	-0.343	-0.255
2004-01-31	2.97	4.682	2.933
2004-02-29	5.835	4.604	4.056
2004-03-31	3.384	3.354	5.255
2004-04-30	3.749	3.733	4.231
2004-05-31	3.605	2.685	2.77
2004-06-30	1.222	0.463	1.317
2004-07-31	-1.137	-1.834	-1.721
2004-08-31	-5.285	-4.39	-5.915
2004-09-30	-5.345	-5.754	-4.558
2004-10-31	-3.799	-3.889	-5.783
2004-11-30	-2.128	-0.966	-3.08
2004-12-31	2.669	0.956	1.185
2005-01-31	3.71	3.879	5.478
2005-02-28	3.422	3.966	4.771
2005-03-31	4.104	4.432	5.706
2005-04-30	3.352	4.519	3.231
2005-05-31	0.925	-1.532	0.495
2005-06-30	-1.313	-2.658	-2.462
2005-07-31	-5.8	-5.754	-3.249
2005-08-31	-8.795	-8.455	-8.613
2005-09-30	-8.377	-8.17	-6.95
2005-10-31	-6.776	-5.833	-4.756
2005-11-30	-4.55	-3.627	-5.204
2005-12-31	-0.869	-1.174	-1.776
2006-01-31	3.971	4.342	4.828
2006-02-28	6.22	6.253	4.856
2006-03-31	5.277	4.725	3.579
2006-04-30	6.369	5.492	7.202

2006-05-31	1.274	0.739	2.237
2006-06-30	-0.405	0.382	-0.075
2006-07-31	-3.222	-3.502	-2.819
2006-08-31	-6.778	-6.448	-6.535
2006-09-30	-8.139	-7.472	-6.823
2006-10-31	-3.493	-3.447	-5.384
2006-11-30	-2.986	-1.943	-2.651
2006-12-31	0.99	1.227	2.112
2007-01-31	3.952	3.614	3.745
2007-02-28	2.88	2.798	2.323
2007-03-31	5.052	4.626	6.714
2007-04-30	6.989	6.636	6.612
2007-05-31	4.531	4.818	5.61
2007-06-30	2.81	0.741	1.143
2007-07-31	-2.641	-1.874	-2.573
2007-08-31	-4.058	-5.851	-5.323
2007-09-30	-7.76	-8.842	-10.413
2007-10-31	-5.538	-5.595	-7.082
2007-11-30	-2.039	-2.423	-3.528
2007-12-31	-0.328	0.437	1.029
2008-01-31	5.035	5.466	3.419
2008-02-29	6.65	6.262	8.735
2008-03-31	5.804	6.456	6.32
2008-04-30	4.693	4.728	3.923
2008-05-31	4.002	3.403	4.366
2008-06-30	0.019	-0.117	0.209
2008-07-31	-3.509	-4.366	-2.865
2008-08-31	-6.267	-5.281	-5.019
2008-09-30	-6.945	-7.218	-6.281
2008-10-31	-6.63	-6.844	-6.326
2008-11-30	-4.84	-3.83	-4.753
2008-12-31	-0.087	-0.721	-1.535
2009-01-31	2.144	2.468	2.024
2009-02-28	5.361	4.423	5.206
2009-03-31	8.239	7.79	8.111
2009-04-30	6.507	6.953	6.163
2009-05-31	6.299	5.472	4.84
2009-06-30	2.462	3.754	3.826
2009-07-31	0.496	-0.601	-0.604
2009-08-31	-3.401	-1.686	-2.626
2009-09-30	-5.749	-3.677	-4.32
2009-10-31	-6.502	-5.473	-6.489
2009-11-30	-3.329	-1.947	-1.846
2009-12-31	1.848	1.915	-0.626
2010-01-31	3.471	3.648	4.291
2010-02-28	5.019	4.569	3.279
2010-03-31	7.738	8.368	5.712
2010-04-30	6.708	5.431	5.517



2010-05-31	1.449	1.948	0.34
2010-06-30	-3.806	-3.003	-0.73
2010-07-31	-4.302	-4.874	-1.636
2010-08-31	-6.186	-4.454	-9.622
2010-09-30	-8.986	-8.228	-10.381
2010-10-31	-8.334	-7.485	-7.895
2010-11-30	-5.021	-4.852	-6.316
2010-12-31	-3.282	-2.643	-2.646
2011-02-28	6.44	5.68	3.079
2011-03-31	6.906	6.339	4.437
2011-04-30	8.007	7.093	8.097
2011-05-31	3.182	2.749	2.807
2011-07-31	-4.346	-4.692	-7.055
2011-08-31	-4.983	-6.617	-7.661
2011-09-30	-8.478	-6.815	-8.519
2011-10-31	-5.951	-6.238	-2.926
2011-11-30	-6.298	-6.289	-3.08
2011-12-31	0.312	3.265	-1.703
2012-01-31	1.819	3.302	1.153
2012-02-29	6.844	5.914	4.352
2012-03-31	7.365	8.559	7.359
2012-04-30	6.182	5.46	6.639
2012-06-30	3.737	4.009	0.428
2012-07-31	1.494	-1.832	-2.236
2012-08-31	-5.23	-6.212	-5.052
2012-09-30	-7.757	-7.147	-7.339
2012-11-30	-3.933	-2.583	-4.041
2012-12-31	2.876	1.28	1.233
2013-01-31	6.183	3.367	3.442
2013-02-28	5.698	5.607	7.756
2013-04-30	6.038	6.156	2.473
2013-05-31	3.426	4.059	-0.428
2013-06-30	1.742	0.718	0.392
2013-07-31	0.549	-0.099	-1.425
2013-10-31	-3.059	-2.739	-2.885
2013-11-30	0.964	-1.29	-0.951
2013-12-31	1.641	1.393	3.379
2014-01-31	5.656	3.677	7.684
2014-03-31	10.062	9.152	6.69
2014-04-30	8.172	6.927	6.775
2014-05-31	5.501	6.073	6.942
2014-06-30	3.938	3.899	3.539
2014-08-31	-3.94	-4.119	-2.881
2014-09-30	-5.923	-2.804	-2.67
2014-10-31	-2.279	-2.223	-2.575
2014-11-30	0.495	0.021	0.463
2015-01-31	6.918	6.424	7.873
2015-02-28	13.721	17.885	8.388

2015-03-31	11.236	10.463	8.361
2015-04-30	11.805	9.589	11.658
2015-05-31	10.521	8.299	10.605
2015-06-30	5.148	3.907	3.121
2015-08-31	1.352	-1.166	-1.127
2015-09-30	-1.751	-0.892	-3.064
2015-12-31	1.801	4.379	1.685
2016-01-31	2.849	0.575	4.169
2016-02-29	5.771	4.523	4.371
2016-03-31	9.427	8.389	9.518
2016-05-31	9.825	5.907	5.759
2016-06-30	0.357	3.565	2.63
2016-07-31	-3.716	-3.283	-1.23
2016-08-31	-2.776	-2.505	-4.602
2016-11-30	-11.135	-8.309	-1.943
2016-12-31	0.121	2.777	1.444

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'J. Ridge', is centered on the page.

### Base de datos TRMM 3B34V7 de la región Lima - Callao

Date	Precipitación (mm/hr)	Date	Precipitación (mm/hr)
2002-04-01	0.048	2009-09-01	0.009
2002-05-01	0.01	2009-10-01	0.022
2002-06-01	0.003	2009-11-01	0.031
2002-07-01	0.015	2009-12-01	0.042
2002-08-01	0.009	2010-01-01	0.088
2002-09-01	0.033	2010-02-01	0.07
2002-10-01	0.033	2010-03-01	0.063
2002-11-01	0.057	2010-04-01	0.02
2002-12-01	0.059	2010-05-01	0.004
2003-01-01	0.055	2010-06-01	0.004
2003-02-01	0.084	2010-07-01	0.003
2003-03-01	0.102	2010-08-01	0.011
2003-04-01	0.045	2010-09-01	0.012
2003-05-01	0.008	2010-10-01	0.019
2003-06-01	0.003	2010-11-01	0.021
2003-07-01	0.002	2010-12-01	0.04
2003-08-01	0.009	2011-01-01	0.061
2003-09-01	0.012	2011-02-08	0.083
2003-10-01	0.009	2011-03-01	0.093
2003-11-01	0.023	2011-04-01	0.038
2003-12-01	0.088	2011-05-01	0.011
2003-12-19	0.024	2011-06-01	0.003
2004-02-04	0.08	2011-07-05	0.009
2004-03-01	0.076	2011-08-01	0.005
2004-04-01	0.028	2011-09-01	0.014
2004-05-01	0.008	2011-10-01	0.018
2004-06-01	0.006	2011-10-16	0.037
2004-07-01	0.009	2011-12-13	0.071
2004-08-01	0.006	2012-01-01	0.058
2004-09-01	0.02	2012-02-01	0.098
2004-10-01	0.031	2012-03-01	0.125
2004-11-01	0.046	2012-03-20	0.043
2004-12-01	0.072	2012-05-01	0.008
2005-01-01	0.046	2012-06-01	0.005
2005-02-01	0.05	2012-07-01	0.015
2005-03-01	0.084	2012-08-01	0.007
2005-04-01	0.025	2012-09-01	0.023
2005-05-01	0.007	2012-10-01	0.04
2005-06-01	0.002	2012-11-06	0.02
2005-07-01	0.003	2012-12-01	0.043
2005-08-01	0.003	2013-01-01	0.05
2005-09-01	0.007	2013-02-01	0.105
2005-10-01	0.016	2013-03-01	0.063
2005-11-01	0.012	2013-04-11	0.025

2005-12-01	0.062	2013-05-01	0.007
2006-01-01	0.091	2013-06-01	0.008
2006-02-01	0.056	2013-07-01	0.005
2006-03-01	0.129	2013-08-01	0.005
2006-04-01	0.063	2013-09-01	0.009
2006-05-01	0.004	2013-10-01	0.027
2006-06-01	0.006	2013-11-01	0.019
2006-07-01	0.003	2013-12-01	0.05
2006-08-01	0.012	2014-01-01	0.062
2006-09-01	0.016	2014-02-01	0.07
2006-10-01	0.018	2014-03-01	0.088
2006-11-01	0.049	2014-04-01	0.028
2006-12-01	0.08	2014-05-01	0.014
2007-01-01	0.064	2014-06-01	0.009
2007-02-01	0.073	2014-07-01	0.004
2007-03-01	0.115	2014-08-01	0.005
2007-04-01	0.026	2014-09-01	0.016
2007-05-01	0.004	2014-10-01	0.028
2007-06-01	0.007	2014-11-01	0.036
2007-07-01	0.005	2014-12-01	0.05
2007-08-01	0.01	2015-01-13	0.058
2007-09-01	0.008	2015-02-01	0.081
2007-10-01	0.027	2015-03-01	0.08
2007-11-01	0.028	2015-04-01	0.023
2007-12-01	0.067	2015-05-12	0.015
2008-01-01	0.096	2015-06-29	0.005
2008-02-01	0.095	2015-07-01	0.013
2008-03-01	0.086	2015-08-01	0.01
2008-04-01	0.032	2015-09-01	0.015
2008-05-01	0.01	2015-10-01	0.015
2008-06-01	0.008	2015-11-01	0.024
2008-07-01	0.009	2015-12-11	0.059
2008-08-01	0.006	2016-01-04	0.042
2008-09-01	0.014	2016-01-29	0.106
2008-10-01	0.033	2016-03-01	0.087
2008-11-01	0.026	2016-04-01	0.02
2008-12-01	0.032	2016-05-07	0.005
2009-01-01	0.065	2016-06-01	0.003
2009-02-01	0.063	2016-07-01	0.005
2009-03-01	0.095	2016-08-08	0.004
2009-04-01	0.047	2016-09-01	0.012
2009-05-01	0.01	2016-10-01	0.013
2009-06-01	0.004	2016-11-13	0.018
2009-07-01	0.005	2016-12-11	0.05
2009-08-01	0.007		