

EL ABATIMIENTO DEL ACUÍFERO KÁRSTICO DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN OBSERVADO POR UNA MISIÓN SATELITAL

Eduardo Jiménez Hernández^{1*}; Kamel Didan¹; Armando Barreto Muñoz¹ Ali Behrang²,
William K. Smith³

¹Vegetation Index and Phenology Lab research group. Biosystems Engineering. The University of Arizona. Tucson AZ 85719 USA.

²Department of Hydrology and Atmospheric Science, University of Arizona, Tucson, AZ 85719, USA

³School of Natural Resources and the Environment, University of Arizona, Tucson, AZ 85719, USA

eduardojh@arizona.edu (*Autor de correspondencia)

Resumen

A pesar de que la cuantificación y monitoreo del agua subterránea en acuíferos sigue siendo un reto, la misión satelital “Gravity Recovery and Climate Experiment” (GRACE) nos permite estimar y modelar los movimientos de masa de agua, haciendo posible conocer la dinámica los recursos hídricos a escala regional. En este trabajo se compararon datos de la misión GRACE, cuya principal variable es el “almacenamiento de agua terrestre”, con elevaciones piezométricas obtenidas por CONAGUA en 492 pozos de observación ubicados en el acuífero kárstico de la Península de Yucatán. El periodo de análisis fue de 2002 a 2023 identificándose rangos de abatimiento de 7 mm año⁻¹ entre 2002 y 2013, 36 mm año⁻¹ de 2014 a 2020, y 51 mm año⁻¹ de 2021 a 2023, corroborados por datos piezométricos. Sin embargo, la correlación entre los datos mensuales de GRACE y la piezometría anual es moderada ($r=0.4363$, $\rho=0.4909$). El monitoreo de acuíferos con apoyo de observaciones de satélite es especialmente relevante para México, donde aún se tienen importantes retos presupuestales que limitan el levantamiento de datos de campo a una resolución espacial y temporal apropiada.

Palabras claves: agua subterránea, sensores remotos, GRACE, balance hídrico.

Introducción

La cuantificación y monitoreo del agua subterránea en acuíferos sigue siendo un reto, sin embargo, la misión satelital “Gravity Recovery and Climate Experiment” (GRACE) nos permite estimar y modelar los movimientos de masa de agua, haciendo posible conocer la dinámica los recursos hídricos a nivel regional y global. La misión GRACE tiene su origen en una colaboración entre la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de los Estados Unidos y el German Research Centre for Geosciences (GFZ) de Alemania, quienes se dieron a la tarea de desarrollar un método para estudiar agua subterránea desde observaciones espaciales (JPL, 2024). Esta misión consiste en dos fases, GRACE (2002-2017) y GRACE Follow-On (2018 a la fecha) a las que por simplicidad se les llamará GRACE, entre ambas cubren un periodo de medición desde 2002 a la actualidad. La misión mide cambios mensuales en el campo gravitacional de la Tierra, que sirven como proxy para estimar las reservas de agua en continentes, hielo y océanos, así como también deformaciones de la corteza terrestre causadas por sismos (JPL, 2024; Wahr et al., 1998).

La misión GRACE se compone de dos satélites idénticos que se siguen mutuamente en una órbita alrededor de la Tierra, separados 220 km uno del otro (Figura 1 a). La forma en la que estos satélites miden cambios en el campo gravitacional (NASA, n.d.-b), se presenta en la Figura 1 b), en el paso 1 ambos satélites viajan y la distancia entre ellos es conocida. Conforme orbitan la Tierra, áreas con una gravedad ligeramente mayor (debido a una mayor concentración de masa) afectan primero al satélite frontal, jalándolo y alejándolo del segundo satélite, esto se ilustra en el paso 2. Conforme continúan, en el paso 3, el segundo satélite es jalado también al pasar por el área con la anomalía gravitacional acercándose de nuevo al satélite frontal. Finalmente, en el paso 4, el satélite frontal deja de ser influenciado por la masa y mientras que el segundo sigue siendo atraído por la masa, volviéndose a incrementar su separación. Estos cambios minúsculos en la separación entre ambos satélites son detectados por un sistema de medición de distancia con microondas. Mientras que un acelerómetro de alta precisión se encarga de medir las aceleraciones no gravitacionales, como las debidas a la resistencia de la atmósfera. La posición exacta de los satélites sobre la Tierra es determinada por el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) a una precisión de centímetros o menos. Toda esta información se usa para elaborar mapas mensuales del campo gravitacional promedio de la Tierra, ofreciendo detalles de cómo se comportan los cambios de masa en el planeta, que en la mayoría de los casos se deben a movimientos de agua (NASA, n.d.-a).

Los datos de GRACE generalmente se utilizan como “almacenamiento de agua terrestre” (AAT), que se define como todas las formas de agua almacenadas por encima y debajo de la superficie de la Tierra, incluyendo el contenido de agua en el suelo, hielo y nieve; agua almacenada en ríos, lagos y reservorios, contenido de agua vegetal, y el agua subterránea en los acuíferos (Li et al., 2024; Syed et al., 2008). Los datos de GRACE se han utilizado exitosamente para detectar abatimiento de agua subterránea a escala regional. Junto con datos de precipitación, evapotranspiración (ET), índices de vegetación (IV) y mediciones in-situ se han utilizado para estudiar la desecación del mar Aral causado por la implementación intensiva de proyectos de irrigación (Singh et al., 2018). Se ha estudiado también el abatimiento del acuífero en Central Valley, California en un periodo de sequía como resultado de extracción de agua para la agricultura (Liu et al., 2022). De forma similar, datos de GRACE

se han utilizado para confirmar y validar cambios en agua subterránea detectados por medio de un modelo calibrado a nivel cuenca en Indonesia (Rusli et al., 2023). Originalmente, los datos de GRACE eran problemáticos en zonas costeras, la resolución espacial hace que se tenga un efecto importante ocasionado por la intrusión de la señal del océano, que a su vez causa incertidumbre en la identificación de agua continental, sin embargo, diversas soluciones han sido propuestas para este problema, siendo los “mascons” una de las más usadas (Mu et al., 2019; NASA/JPL, 2023; Watkins et al., 2015). Un ejemplo es de la utilización de estos datos se encuentra en el acuífero costero de Texas, (Gyawali et al., 2022). Las variaciones en el AAT se han utilizado para ligar el abatimiento de aguas subterráneas a sus diferentes causas, por ejemplo, se ha detectado que el incremento en el consumo de agua debido a la intensificación de proyectos de riego y la minería son los principales factores en el abatimiento del recurso hídrico en la región de Shadong, China (Li et al., 2024).

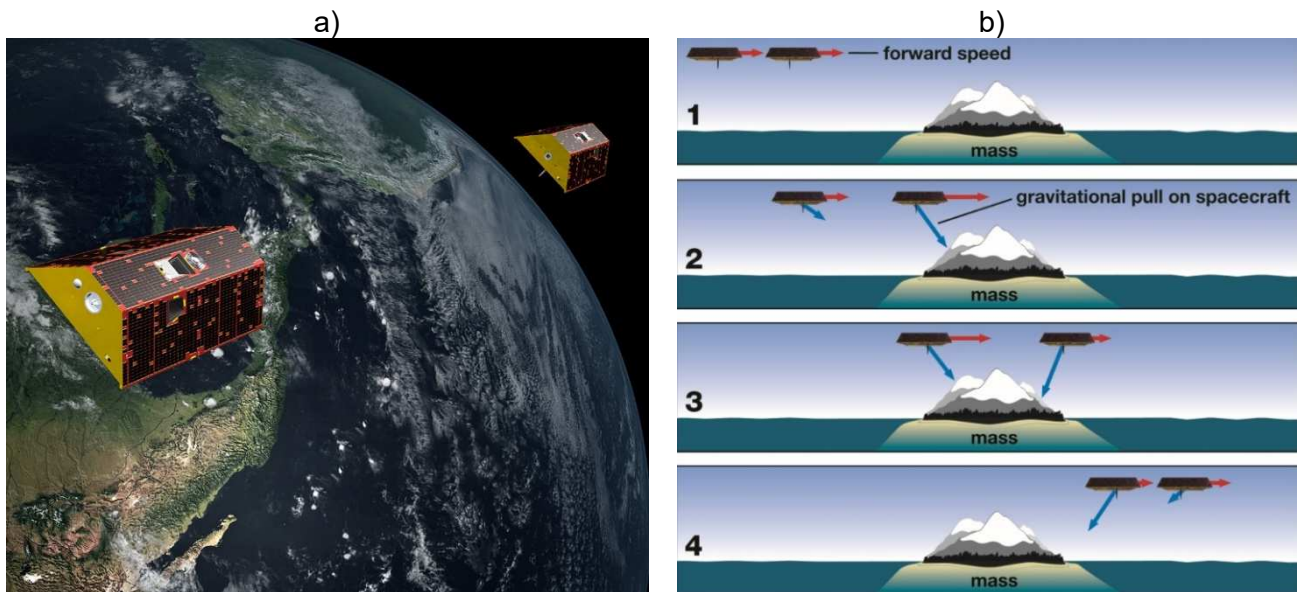


Figura 1. a) Ilustración de los satélites idénticos que conforman la misión GRACE-FO, b) ilustración de los satélites siendo afectados por una concentración de masa que causa un incremento en el campo gravitacional. Créditos: NASA (n.d.-b).

En México, los datos de la misión GRACE se han utilizado muy poco para estudiar recursos hídricos, siendo el Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua (IMTA) pionero en el campo (Pedrozo Acuña, 2023). Un ejemplo de su utilización es el desarrollo de una herramienta para evaluar y mapear la sustentabilidad hídrica en el territorio nacional para fines de planeación, desarrollo y operación de los sistemas hídricos (Breña Naranjo et al., 2023), que incorpora información de GRACE tal y como se ha utilizado para monitorear el balance hídrico en los EEUU (Famiglietti & Rodell, 2013).

El objetivo de este trabajo es utilizar los datos de GRACE, junto con datos piezométricos obtenidos de pozos de observación, para monitorear el almacenamiento de agua terrestre en la Península de Yucatán para el periodo de 2002 a 2023.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio seleccionada es el acuífero kárstico de la Península de Yucatán (Bauer-Gottwein et al., 2011), que se ubica entre México, Guatemala y Belice. Para investigar la hidrología de la región, se prefirió esta delimitación geofísica del acuífero sobre la hecha por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que considera límites políticos. La región de interés se ubica entre $86^{\circ} 44' 25''$ y $92^{\circ} 28' 1''$ O, y entre $16^{\circ} 58' 21''$ y $21^{\circ} 35' 21''$ N. La Península de Yucatán tiene un relieve plano compuesta principalmente por roca caliza que ha propiciado la predominancia de formaciones kársticas. Consecuentemente, se tiene una alta frecuencia de cuerpos de agua subterráneos o “cenotes”, y los escurrimientos superficiales perennes o ríos son prácticamente inexistentes en la parte central y norte de la península (Figura 2). Por esta razón, la hidrología de la Península de Yucatán se basa en flujos de precipitación y evapotranspiración (Uuh-Sonda et al., 2018).

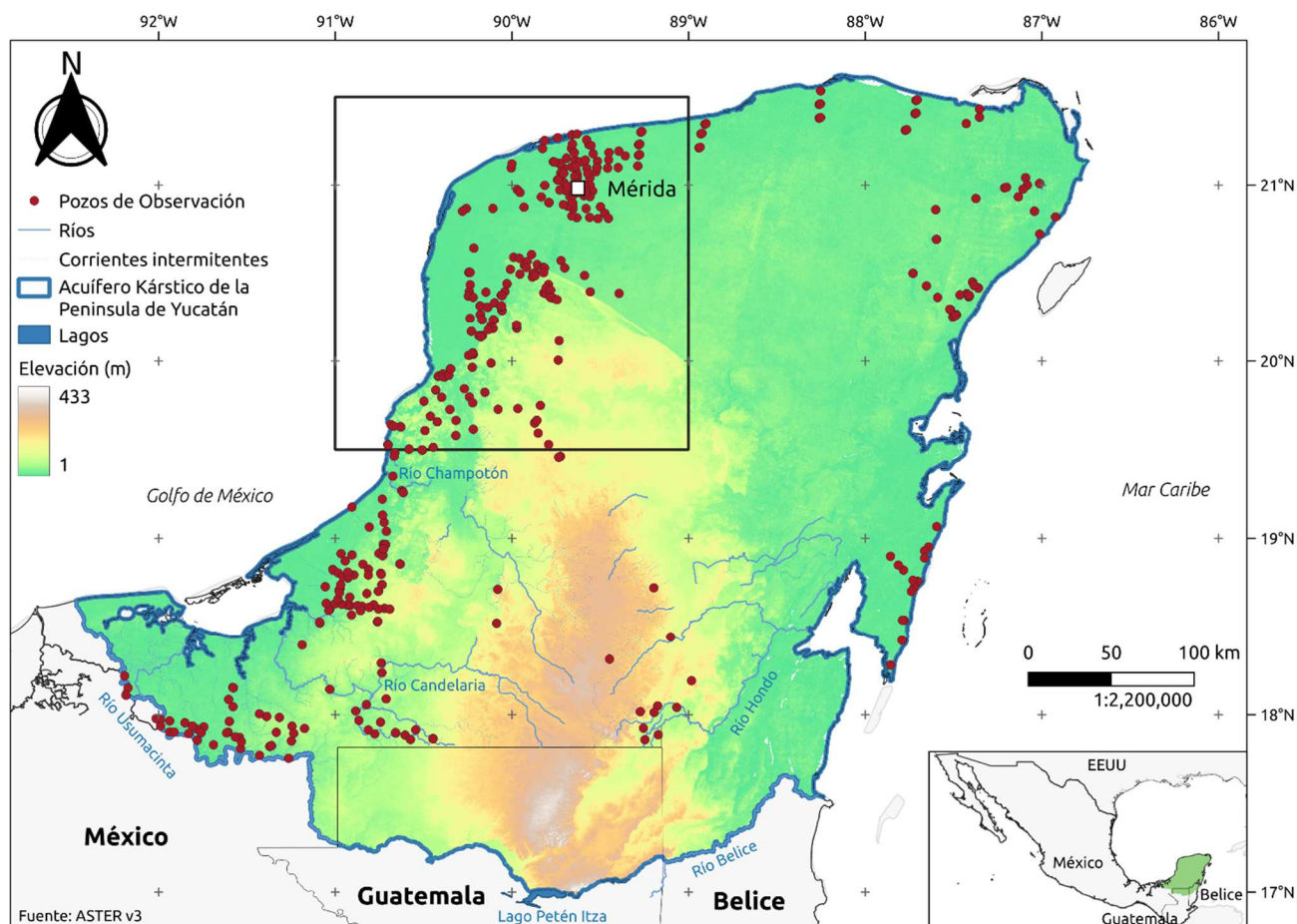


Figura 2. Delimitación del acuífero kárstico de la Península de Yucatán (Bauer-Gottwein et al., 2011), y la ubicación de pozos de observación de CONAGUA.

Datos de “Almacenamiento de Agua Terrestre”

Los datos de GRACE se obtuvieron del conjunto llamado “JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height Coastal Resolution Improvement”

versión RL06.1Mv03 (NASA/JPL, 2023), disponibles en: [https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/TELLUS GRAC-GRFO MASCON CRI GRID RL06.1 V3#](https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/TELLUS_GRAC-GRFO_MASCON_CRI_GRID_RL06.1_V3#).

Estos datos son procesados por el laboratorio “Jet Propulsion Laboratory” (JPL) de la NASA, y contiene datos mensuales globales en una cuadrícula a resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (aproximadamente de 50×50 km). Estos datos son anomalías de almacenamiento/altura de agua relativo a una media temporal calculada de 2004 a 2009, por lo que más que estimar la cantidad de agua, indican el movimiento de la masa de agua mes a mes. El periodo de análisis de estos datos fue de 2002 a 2023.

Este conjunto de datos utiliza bloques de concentración de masa, conocidos como “mascons” (Watkins et al., 2015), que son derivados de resolver variaciones del campo gravitacional en términos de funciones de concentración de masa en domos esféricos geolocalizados (Wahr et al., 1998). La solución de mascons consiste de 4,551 estimaciones relativamente independientes de superficie de cambio de masa que han sido derivados usando una cuadrícula de mascons de 3° . También emplea un filtro de mejoramiento de resolución costera (Coastal Resolution Improvement, CRI) aplicado a mascons costeros que mezclan masa de tierra y océanos, de manera que separan la masa de cada uno reduciendo el error causado por la filtración de señal del océano a la tierra a lo largo de la costa (NASA/JPL, 2023). La aplicación de esta corrección cobra particular importancia en zonas costeras como el caso de la Península de Yucatán.

Datos piezométricos

Los datos piezométricos consisten en elevación del nivel del agua, en metros sobre el nivel del mar, colectados anualmente por la CONAGUA en 492 pozos de observación en la Península de Yucatán de 1996 a 2023. Las mediciones, hechas mientras los pozos no se encontraban en operación, fueron tomadas una o dos veces al año tratando de capturar los periodos de estiaje y de lluvias (comunicación personal con el Organismo de Cuenca de la Península de Yucatán). Sin embargo, no se tienen mediciones en algunos años causando que se tengan datos faltantes. El conjunto está disponible en: <https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/red-piezometrica-mapas> (CONAGUA, 2023).

Análisis con series de tiempo y correlación

Los datos mensuales de GRACE se agregaron por año para compararlos con los datos piezométricos anuales. La correlación entre ambas series de tiempo se obtuvo mediante los coeficientes de correlación de Pearson (ecuación 1) y de Spearman.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

donde, r_{xy} es el coeficiente de correlación de Pearson, n es tamaño de la muestra, x_i y y_i son los valores individuales de las variables x y y , respectivamente, indicadas por el índice i ; mientras que \bar{x} y \bar{y} son sus respectivas medias muestrales. La correlación de Spearman (ρ) es tiene la misma ecuación que el de Pearson, simplemente en vez de aplicarse sobre los valores

individuales, los datos se ordenan y la ecuación se aplica sobre su respectivo índice que indica su orden.

El procesamiento de los datos se llevó a cabo con el lenguaje de programación Python y la librería *scipy*. Debido a que la serie de tiempo de GRACE tiene varios periodos de datos faltantes se utilizó el método iterativo de *Singular Spectrum Analysis* (SSA) para su estimación, a través de la librería *Rssa* del lenguaje de programación R.

Resultados y Discusión

La serie de tiempo de almacenamiento de agua terrestre de GRACE se sometió a imputación de datos faltantes con el método iterativo de SSA (Beckers & Rixen, 2003). La serie de tiempo aparenta tener tres periodos diferentes, el primero de 2002 a 2013, el segundo de 2014 a 2020, y el tercero de 2021 a 2023 (Figura 3). Estos periodos se delimitaron con base en dos eventos de recarga identificados por un incremento repentino en el almacenamiento de agua en 2013 y 2020. Se ajustaron modelos lineales para los tres periodos identificándose rangos de abatimiento de 7 mm año^{-1} entre 2002 y 2013, 36 mm año^{-1} de 2014 a 2020 y de 51 mm año^{-1} de 2021 a 2023.

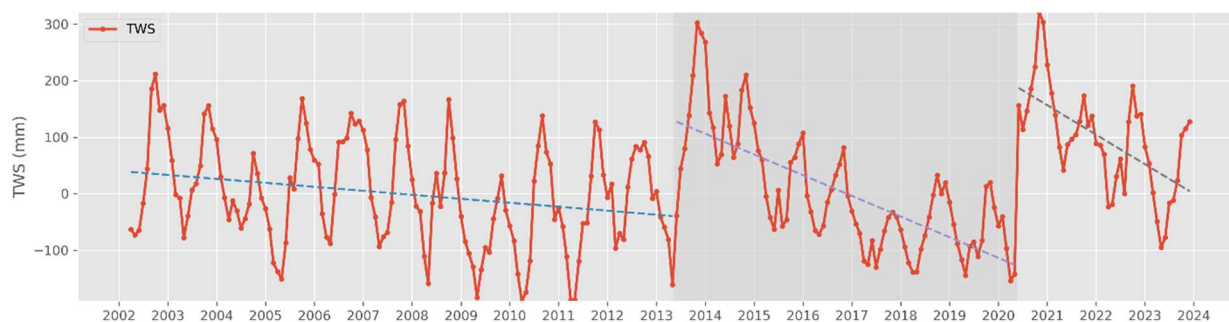


Figura 3. Serie de tiempo de “almacenamiento de agua terrestre” en mm, (TWS, por sus siglas en inglés de *terrestrial water storage*) de la misión GRACE para la Península de Yucatán mostrando tres periodos delimitados por eventos de recarga.

Se obtuvieron promedios anuales de la serie de tiempo mensual de GRACE, ya con imputación de datos, para compararlos con los datos anuales de nivel de agua (en metros sobre el nivel del mar) obtenidos de los pozos de observación. En la Figura 4 se muestran las dos series de tiempo para la región alrededor de la ciudad de Mérida, delimitada por un rectángulo en la Figura 2 y que cuenta con 243 pozos. Dado que los datos de GRACE se presentan como lámina equivalente de agua, se uniformizaron las unidades a metros, aunque en la figura se presenten diferentes unidades. El coeficiente de Pearson es de $r=0.4363$ ($p\text{-value}=0.04796$) y la rho de Spearman es $\rho=0.4909$ ($p\text{-value}=0.02525$), ambos indican una correlación moderada entre el almacenamiento de agua terrestre y el nivel del manto freático. Se puede observar que la serie de tiempo de GRACE tiene una tendencia decreciente pronunciada de 2002 a 2011, mientras que el nivel de agua permanece casi constante hasta 2012. Después de 2013 las tendencias en general siguen el mismo patrón, ambas crecen y decrecen de manera sincrónica, aunque en diferente proporción y en ocasiones con un retraso de uno a dos años entre sus puntos de inflexión. En la serie de piezometría también se identifica un incremento súbito en 2013, el cual se mantiene y vuelve a bajar hasta 2018. Sin embargo, el incremento detectado

en 2020 en la serie mensual de GRACE, no se observa en la serie de piezometría, aunque si se tiene un incremento de 2018 en adelante. Cabe mencionar que las series anual y mensual (Figura 3) de GRACE ambas siguen un patrón similar de tendencias crecientes y decrecientes, aunque en la serie anual los picos máximos se presentan un año después que en la serie mensual y su incremento no es tan repentino. Este análisis presenta evidencia de la dinámica del abatimiento y recarga del acuífero kárstico de la Península de Yucatán para diferentes periodos.

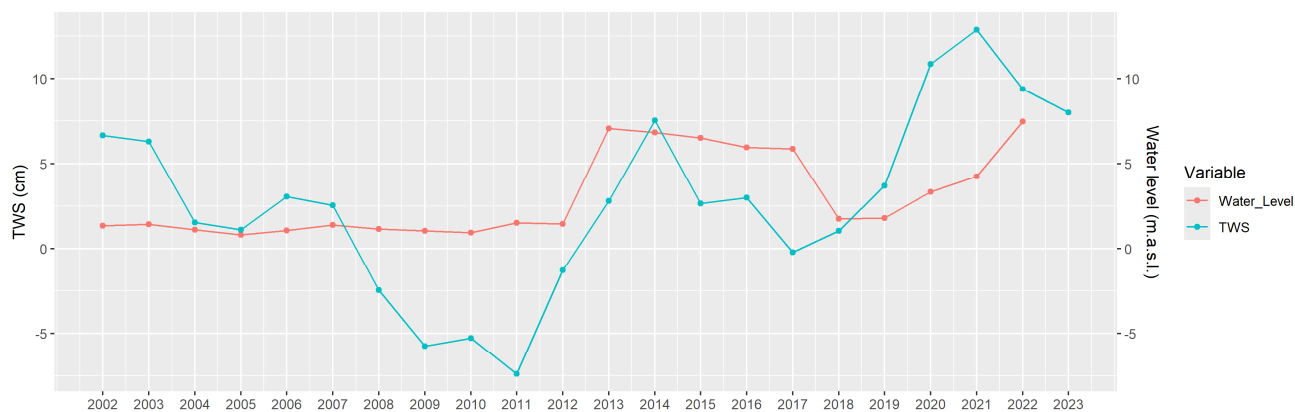


Figura 4. Series de tiempo de almacenamiento de agua terrestre (TWS) en cm y el nivel del manto freático, en metros sobre el nivel del mar para el acuífero kárstico de la Península de Yucatan, para 243 pozos alrededor de la Ciudad de Mérida.

Aunque la correlación no es alta, los datos de satélite son útiles para complementar los datos piezométricos en el monitoreo de recursos hídricos. Sin embargo, se debe tener cuidado en la forma que se analizan de forma conjunta, ya que al intentar compara la serie piezométrica de los 492 pozos con los datos de almacenamiento de agua, la correlación es baja: $r=0.1182$ ($p\text{-value}=0.6004$), $\rho=0.1699$ ($p\text{-value}=0.4478$). Una primera explicación para esta correlación baja viene de que la cantidad de datos faltantes es significativa, sin embargo, en un análisis posterior se eliminaron aquellos pozos con más de 10 años de datos faltantes, que es la mitad del periodo analizado, quedando solamente 94 pozos. Aunque en este caso los coeficientes de correlación fueron incluso más bajos $r=-0.0488$ ($p\text{-value}=0.8291$) y $\rho=0.1530$ ($p\text{-value}=0.4949$). Otra razón podría ser la baja frecuencia de los datos de nivel del agua, ya que se toman una o dos veces por año. Los datos anuales no son suficientes para capturar la variabilidad temporal causada por las estaciones de lluvia y estiaje. En la Figura 3 se puede observar que los datos mensuales de GRACE muestran estas temporadas en cada año, mientras que en la Figura 4, ya con los promedios anuales, se pierde esta temporalidad. Además, los datos de nivel de agua tampoco muestran esta variación temporal. Finalmente, la distribución espacial de los pozos de observación es una razón más que puede sesgar el análisis. En la Figura 2 se puede observar que la mayoría de los pozos se encuentran cerca de las zonas costeras, mientras que en áreas de la zona central de la Península de Yucatán no se tiene ningún pozo.

Conclusiones

En este trabajo se realizó un monitoreo del acuífero kárstico de la Península de Yucatan utilizando datos de “almacenamiento de agua terrestre” de la misión satelital GRACE, y

elevaciones piezométricas obtenidas por CONAGUA en 492 pozos de observación. El periodo de análisis fue de 2002 a 2023 identificándose, con los datos de satélite, rangos de abatimiento de 7 mm año^{-1} entre 2002 y 2013, 36 mm año^{-1} de 2014 a 2020, y 51 mm año^{-1} de 2021 a 2023, corroborados por datos piezométricos. Sin embargo, la correlación entre los datos de GRACE y la piezometría es moderada ($r=0.4363$, $p=0.4909$) debido a que los datos piezométricos anuales no alcanzan a capturar el efecto de la estacionalidad de los periodos de lluvia y de estiaje, así como por la distribución espacial de los pozos. Otros factores como la extracción de agua del acuífero, utilizada para riego y para consumo urbano, también pueden influir en la variación temporal de ambas variables. Sin embargo, esta actividad es difícil de observar con estos datos ya que dicha extracción puede darse de manera continua a lo largo del año, por lo que se requiere un análisis con datos del uso de agua para riego y consumo urbano, entre otros. El monitoreo de acuíferos con apoyo de observaciones de satélite es especialmente relevante para México, donde aún se tienen importantes retos presupuestales que limitan el levantamiento de datos de campo a una resolución espacial y temporal apropiada.

Referencias Bibliográficas

- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R. N., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., & Merediz-Alonso, G. (2011). Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, *19*(3), 507–524. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0699-5>
- Beckers, J. M., & Rixen, M. (2003). EOF Calculations and Data Filling from Incomplete Oceanographic Datasets. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *20*(12), 1839–1856. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020<1839:ECADFF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<1839:ECADFF>2.0.CO;2)
- Breña Naranjo, A., Zetina Robleda, E. F., & Soriano Monzalvo, J. C. (2023). *Rediseño del riesgo hídrico en México* (No. 4; Perspectivas IMTA). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2023-04>
- CONAGUA. (2023). *Relación de acuíferos con red piezométrica. Registro de datos piezométricos por pozo de observación. Mapa que muestra la ubicación de las redes y pozos piezométricos. Hidrógrafos de pozos* [Shapefile]. <https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/red-piezometrica-mapas>
- Famiglietti, J. S., & Rodell, M. (2013). Water in the Balance. *Science*, *340*(6138), 1300–1301. <https://doi.org/10.1126/science.1236460>
- Gyawali, B., Murgulet, D., & Ahmed, M. (2022). Quantifying Changes in Groundwater Storage and Response to Hydroclimatic Extremes in a Coastal Aquifer Using Remote Sensing and Ground-Based Measurements: The Texas Gulf Coast Aquifer. *Remote Sensing*, *14*(3). <https://doi.org/10.3390/rs14030612>
- JPL. (2024). Overview—Monthly Mass Grids. *Gravity Recovery and Climate Experiment - GRACE TELLUS*. <https://grace.jpl.nasa.gov/data/monthly-mass-grids/>
- Li, W., Bao, L., Yao, G., Wang, F., Guo, Q., Zhu, J., Zhu, J., Wang, Z., Bi, J., Zhu, C., Zhong, Y., & Lu, S. (2024). The analysis on groundwater storage variations from GRACE/GRACE-FO in recent 20 years driven by influencing factors and prediction in Shandong Province, China. *Scientific Reports*, *14*(1), 5819. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55588-3>
- Liu, P.-W., Famiglietti, J. S., Purdy, A. J., Adams, K. H., McEvoy, A. L., Reager, J. T., Bindlish, R., Wiese, D. N., David, C. H., & Rodell, M. (2022). Groundwater depletion in California's

- Central Valley accelerates during megadrought. *Nature Communications*, 13(1), 7825. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35582-x>
- Mu, D., Xu, T., & Xu, G. (2019). Detecting coastal ocean mass variations with GRACE mascons. *Geophysical Journal International*, 217(3), 2071–2080. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz138>
- NASA. (n.d.-a). GRACE-FO Mission. *GRACE-FO*. Retrieved September 30, 2024, from <https://gracefo.jpl.nasa.gov/mission/overview/>
- NASA. (n.d.-b). How GRACE-FO Measures Gravity. *GRACE-FO*. Retrieved September 30, 2024, from <https://gracefo.jpl.nasa.gov/resources/50/how-grace-fo-measures-gravity/>
- NASA/JPL. (2023). *JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height Coastal Resolution Improvement (CRI) Filtered Release 06.1 Version 03* [Dataset]. NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/TEMSC-3JC63>
- Pedrozo Acuña, A. (2023). *Información satelital del agua subterránea: Herramienta clave para la sustentabilidad ambiental* (No. 8; Perspectivas IMTA). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2023-08>
- Rusli, S. R., Bense, V. F., Taufiq, A., & Weerts, A. H. (2023). Quantifying basin-scale changes in groundwater storage using GRACE and one-way coupled hydrological and groundwater flow model in the data-scarce Bandung groundwater Basin, Indonesia. *Groundwater for Sustainable Development*, 22, 100953. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100953>
- Singh, A., Behrangi, A., Fisher, J. B., & Reager, J. T. (2018). On the desiccation of the South Aral Sea observed from spaceborne missions. *Remote Sensing*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/rs10050793>
- Syed, T. H., Famiglietti, J. S., Rodell, M., Chen, J., & Wilson, C. R. (2008). Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS. *Water Resources Research*, 44(2), 2006WR005779. <https://doi.org/10.1029/2006WR005779>
- Uuh-Sonda, J. M., Gutiérrez-Jurado, H. A., Figueroa-Espinoza, B., & Méndez-Barroso, L. A. (2018). On the ecohydrology of the Yucatan Peninsula: Evapotranspiration and carbon intake dynamics across an eco-climatic gradient. *SI Hydrological Processes - Latin America*, 32, 2828–2896. <https://doi.org/10.1002/hyp.13230>
- Wahr, J., Molenaar, M., & Bryan, F. (1998). Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B12), 30205–30229. <https://doi.org/10.1029/98JB02844>
- Watkins, M. M., Wiese, D. N., Yuan, D., Boening, C., & Landerer, F. W. (2015). Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(4), 2648–2671. <https://doi.org/10.1002/2014JB011547>

DEPLETION OF THE YUCATAN PENINSULA KARST AQUIFER OBSERVED WITH A SATELLITE MISSION

Eduardo Jiménez Hernández^{1*}; Kamel Didan¹; Armando Barreto Muñoz¹ Ali Behrangji², William K. Smith³

¹Vegetation Index and Phenology Lab research group. Biosystems Engineering. The University of Arizona. Tucson AZ 85719 USA.

²Department of Hydrology and Atmospheric Science, University of Arizona, Tucson, AZ 85719, USA

³School of Natural Resources and the Environment, University of Arizona, Tucson, AZ 85719, USA

eduardojh@arizona.edu (*Correspondence)

Abstract

Despite the challenges in quantifying and monitoring groundwater in aquifers, the "Gravity Recovery and Climate Experiment" (GRACE) satellite mission allows us to estimate and model water mass movements, making it possible to understand water resource dynamics at regional scales. In this study, GRACE data, as "terrestrial water storage," was compared with piezometric levels obtained by CONAGUA from 492 observation wells located in the karstic aquifer of the Yucatan Peninsula. The analysis period was from 2002 to 2023, identifying depletion rates of 7 mm year⁻¹ between 2002 and 2013, 36 mm year⁻¹ from 2014 to 2020, and 51 mm year⁻¹ from 2021 to 2023, corroborated by piezometric data. However, the correlation between monthly GRACE data and annual piezometry is just moderate ($r = 0.4363$, $\rho = 0.4909$). Satellite-supported aquifer monitoring is especially relevant for Mexico, where budget constraints limit field data collection at appropriate spatial and temporal resolutions.

Keywords: groundwater, remote sensing, GRACE, water balance.

Introduction

Quantifying and monitoring groundwater in aquifers remains a challenge; however, the GRACE satellite mission enables us to estimate and model water mass movements, making it possible to understand water resource dynamics on a regional and global scale. The GRACE mission originated from a collaboration between NASA (United States) and the German Research Centre for Geosciences (GFZ), aimed at developing a method to study groundwater from space-based observations (JPL, 2024). The mission has two phases: GRACE (2002–2017) and GRACE Follow-On (2018–present), from now on collectively referred to as GRACE, covering a measurement period from 2002 to the present. The mission measures monthly changes in Earth's gravitational field, which serve as a proxy for estimating water reserves on continents, ice, and oceans, as well as crustal deformations caused by earthquakes (JPL, 2024; Wahr et al., 1998).

GRACE mission consists of two identical satellites that follow each other in orbit, separated by 220 km (Figura 1 a). The manner in which these satellites measure changes in the gravitational field (NASA, n.d.-b), is presented in Figure 1 b), in step 1 both spacecraft are orbiting over the sea and the distance between them is relatively constant. In step 2, when the leading spacecraft encounters land, the land's higher gravity pulls it away from the trailing spacecraft, which is still over water. Once the second satellite also encounters the land, as shown in step 3, it too is pulled toward the higher mass and consequently toward the leading spacecraft. In step 4, as the lead spacecraft moves past the denser land mass, it is pulled back slightly by the higher gravity of the land. When both spacecraft are over water again, the trailing spacecraft is slowed by land before returning to its original distance behind the leading spacecraft. These changes in the separation between the satellites are detected by a microwave distance measurement system. While a high accuracy accelerometer accounts for non-gravitational forces like atmospheric drag. The exact positions of the satellites are determined using GPS, with a precision of centimeters or less. All this data is used to create monthly maps of Earth's average gravitational field, offering insights into mass changes, primarily due to water movements (NASA, n.d.-a).

GRACE data is generally utilized as “terrestrial water storage” (TWS), defined as all forms of water stored above and underneath the surface of the Earth, including soil water, ice and snow content, surface water storage represented by rivers, lakes and reservoirs, the vegetation water content, and groundwater storage (Li et al., 2024; Syed et al., 2008). GRACE data has been successfully utilized to detect the depletion of groundwater on a regional scale. Together with precipitation, ET, vegetation indices (VIs), and in-situ measurements it has been used for studying the desiccation of the Aral sea caused by the intensification of irrigation projects (Singh et al., 2018). The groundwater depletion in Central Valley, California in a period of megadrought as result of continuous water extraction for agriculture has also been investigated (P.-W. Liu et al., 2022). Similarly, GRACE data has been used to confirm and validate basin scale changes in groundwater in Indonesia detected with calibrated models (Rusli et al., 2023). Originally, GRACE data were problematic in coastal zones, its spatial resolution captured the effect caused by leaking signals from the ocean, which causes uncertainties in the detection of continental water, however, many solutions were proposed for this problem, being the “mascons” one of the most used (Mu et al., 2019; NASA/JPL, 2023; Watkins et al., 2015). An

example of these data has been utilized in to identify changes in groundwater in Texas coastal aquifer (Gyawali et al., 2022). TWS variations have also been utilized to link groundwater storage depletion to many causes, for example, it has been determined that an increased on the water consumption due to the intensification of irrigation and mining projects are the driver factors of groundwater depletion in the Shandong region in China (Li et al., 2024).

In Mexico, GRACE data has barely been utilized to study water resources, being the Mexican Institute for Water Technologies (IMTA) the pioneer in this area (Pedrozo Acuña, 2023). An example of its use, is the development of a tool for the evaluation and mapping of water sustainability in Mexico for planning, development, and operation of hydric systems (Breña Naranjo et al., 2023), which incorporates GRACE data, in a similar manner as has been used to monitor water balance in the United States (Famiglietti & Rodell, 2013).

The objective of this work is to utilize GRACE data, together with piezometric data obtained from observation wells, for the monitoring of groundwater storage in the Yucatan Peninsula in the period from 2002 to 2023.

Materials and Methods

Study Area

The selected study area is the Yucatan Peninsula karstic aquifer (Bauer-Gottwein et al., 2011), located in the border among Mexico, Guatemala, and Belize. To investigate the hydrology of the region, this geophysical delineation of the aquifer was preferred over the one made by the National Water Commission (CONAGUA), as the later considers political borders. The region of interest is located between $86^{\circ} 44' 25''$ and $92^{\circ} 28' 1''$ W, and between $16^{\circ} 58' 21''$ and $21^{\circ} 35' 21''$ N. The Yucatan Peninsula features a flat landscape composed of limestone which has led to the development of karstic formations. Consequently, underground water bodies (known as “cenotes”) are frequent and surface flow in perennial streams is practically inexistent in most of the peninsula (Figure 2). Therefore, the hydrology of the Yucatan Peninsula consists mostly of precipitation and evapotranspiration (Uuh-Sonda et al., 2018).

Terrestrial Water Storage data

GRACE data was obtained from the dataset “JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height Coastal Resolution Improvement” version RL06.1Mv03 (NASA/JPL, 2023), which is available at https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/TELLUS_GRACE-GRFO_MASCON_CRI_GRID_RL06.1_V3#.

This version utilizes mass concentration blocks or “mascons” (Watkins et al., 2015), which are derived from solving for monthly gravity field variations in terms of geolocated spherical cap mass concentration functions (Wahr et al., 1998). The complete Mascon solution consists of 4,551 relatively independent estimates of surface mass change that have been derived using an equal-area 3-degree grid of individual mascons. It also employs a Coastal Resolution Improvement (CRI) filter applied to those mixed land/ocean mascons to separate land and ocean mass, reducing signal leakage errors across coastlines (NASA/JPL, 2023). This correction is particularly important in coastal zones as in the case of the Yucatan Peninsula.

Piezometric Data

Piezometric dataset consists of water elevation, in meters above sea level, obtained yearly from CONAGUA in 492 observation wells in Yucatan Peninsula from 1996 to 2023. Measurements, made while the wells were not in operation, were taken one or twice a year aiming to capture data for both dry and wet seasons (personal communication with River Basin Organization for the Yucatan Peninsula), however, not all years have records which results in many missing data. This dataset is available at: <https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/red-piezometrica-mapas> (CONAGUA, 2023).

Time series and correlation analysis

Monthly GRACE data was aggregated yearly for comparing with the annual piezometric data. The correlation of both time series was obtained through Pearson's (equation 1) and Spearman's correlation coefficients. In equation 1, r_{xy} is Pearson's correlation, n is the sample size, x_i and y_i are the individual values of variables x and y , respectively, indicated by index i ; while \bar{x} and \bar{y} , are their corresponding means. Spearman's correlation (ρ) has the same equation as Pearson; however, it's applied over the ranks of the sorted values.

Data processing was carried out in Python programming language and its scipy library. The GRACE missing data was gap filled with the *Singular Spectrum Analysis* (SSA) iterative method using the Rssa library in R programming language.

Results and Discussion

The TWS time series was gap filled with the SSA iterative method (Beckers & Rixen, 2003). The series appears to have three different periods, the first one from 2002 to 2013, second one from 2014 to 2020, and the third from 2021 to 2023 (Figure 3). These periods were determined based on two recharge events identified by sudden spikes in TWS, one in 2013 and other in 2020. Linear models were fitted for the three periods identifying depletion rates of 7 mm year⁻¹ between 2002 and 2013, 36 mm year⁻¹ from 2014 to 2020, and 51 mm year⁻¹ from 2021 to 2023.

Annual averages of the gap filled monthly time series were calculated to compare them with annual water level data (in meters above sea level), obtained from the observation wells. Figure 4 shows both time series for the region around the city of Merida, delimited with the rectangle shown in Figure 2, which has 243 observation wells. Given the GRACE data is presented as equivalent water depth, units were uniformized to meters for comparison. Pearson correlation between both series is $r=0.4363$ (p -value=0.04796) and Spearman's rho is $\rho=0.4909$ (p -value=0.02525), which indicate a moderate correlation between terrestrial water storage and the phreatic level. It can be observed that GRACE time series has a steeped decreasing trend from 2002 to 2011, while the water level remains almost constant until 2012. After 2013 both trends follow the same patterns in general, they increase and decrease synchronously, although in different proportion and, at times, with a lag of one or two years in their inflection points. In the piezometric series recharge events can also be identified, with a sudden increase in 2013, that is maintained until 2018 when it falls back. However, the increase detected in 2020, by the monthly GRACE data, is not shown in the piezometric series, although an increase is detected from 2018 onwards. Is worth mentioning, both annual and monthly (Figure 3)

GRACE time series follow a similar pattern of increasing and decreasing trends, even though in the annual series the maximum peaks from recharge events are shown a year later than the monthly series and its increase is not that sudden. This analysis presents evidence of the dynamics of depletion and recharge of the Yucatan Peninsula karst aquifer for different periods.

Although correlation is not strong, the satellite data can be utilized to complement piezometric data for water resources monitoring. However, analysis should be carried out with care, for example when the data from all the 492 observation wells is utilized the correlation is low: $r=0.1182$ ($p\text{-value}=0.6004$), $\rho=0.1699$ ($p\text{-value}=0.4478$). A first explanation on this low value comes from the fact that the missing data is substantial, however, in a later analysis the wells with more than 10 years of missing data, which is half the analyzed period, were discarded leaving only 94 wells. In this case correlation coefficients were even lower $r=-0.0488$ ($p\text{-value}=0.8291$) and $\rho=0.1530$ ($p\text{-value}=0.4949$). Another possible reason could be the low frequency of the water level data because they are taken one or twice a year. Yearly data is not enough to capture the temporal variability caused by the wet and dry seasons. In Figure 2, it can be observed that GRACE monthly data shows these seasons in each year, while in Figure 3, when data are averaged annually, this temporality is lost. Furthermore, the water level data also don't show this temporal variation. Finally, the spatial distribution of the observation wells is another reason why the analysis can be bias. In Figure 2 can be observed most of the wells are located near the coastal zones, leaving some areas in the central zone of the Yucatan Peninsula with not a single well.

Conclusion

In this work the monitoring of the Yucatan Peninsula karst aquifer was carried out utilizing data from terrestrial water storage from the GRACE satellite mission, and water levels obtained by CONAGUA from 492 observation wells. The analysis covers the period from 2002 to 2023 revealing depletion ranges of about of 7 mm year^{-1} between 2002 and 2013, 36 mm year^{-1} from 2014 to 2020, and 51 mm year^{-1} from 2021 to 2023, as indicated by satellite and corroborated by the piezometric records. However, the correlation between the GRACE and piezometric data was moderate ($r=0.4363$, $\rho=0.4909$). This moderate correlation may be attributed to the fact that annual piezometric data do not fully capture the effects of seasonal variations due to dry and wet seasons, as well as the uneven spatial distribution of observation wells which are mostly located near coastal areas. Additional factors, such as water extraction for irrigation and urban consumption, likely contribute to the temporal variations observed. However, these extraction activities are difficult to quantify using available data, as they occur continuously throughout the year. Future studies should integrate detailed data on water use for irrigation and urban consumption. Monitoring aquifers through satellite observations is especially crucial for Mexico, where challenges remain in allocating sufficient resources for collecting in situ data at appropriate spatial and temporal resolutions.