

DYNAMICS OF THE COASTAL KARST AQUIFER IN NORTHERN YUCATÁN PENINSULA

Lisa Heise^{1*}, Antonio Cardona Benavides², Erik Iván Salazar Perales³, Eduardo H. Graniel Castro^{4†}

Abstract

The Yucatán Peninsula lacks surface water; consequently, groundwater resources are indispensable to the water supply. Due to the high recharge rate of the shallow karst aquifer, the state of Yucatán does not face a water scarcity problem but instead faces a threat to water quality, one of the most important ecosystem services. Groundwater underlying Mérida discharges at the coastline and several anthropogenic and natural (saltwater intrusion) sources contaminate the water and compromise its quality. The main purpose of this research was to characterize the current status of the complex coastal aquifer system in the northwestern region of the Yucatán Peninsula, while addressing both quantity and quality issues through the investigation of the hydraulic conditions and the hydrochemical water composition. This information was used to understand the systems' dynamics and its importance for the diverse ecosystems, as well as the impacts of climate change (CC) on the karst terrain. Because of the climatic conditions and high hydraulic conductivity of the subsoil, natural recharge is very dynamic; a direct relationship between groundwater head evolution and precipitation was identified in the monitoring wells. Spatial and temporal variations of water quality were determined. Natural discharge at the coastal zone was investigated from artesian wells; influence of tidal fluctuations, natural and induced recharge by precipitation and wastewater injection were identified. The aquifer flow system functions as a fundamental component and driving force of ecosystems and depends on climate variables as they directly influence ground-water recharge and shows the indispensable need for sustainable management of the study area to enhance its adaptive capacity to CC.

Keywords: Yucatán, Groundwater, Karst

Introducción

El CC puede tener fuertes impactos sobre el ciclo hidrológico y consecuentemente sobre el agua subterránea como parte del ciclo del agua cuya recarga depende en gran medida de la precipitación y de la interacción del acuífero con cuerpos de agua superficial (Kumar, 2012). La relación entre la variabilidad climática y el agua subterránea es compleja y aún poco estudiada. El aumento del nivel del mar incrementa la intrusión salina sobre todo en acuíferos costeros y reduce la disponibilidad de agua dulce (Kumar, 2012). Durante el siglo pasado el uso mundial agua sufrió un incremento de ocho veces, acompañado del la cuadruplicación de la población mundial y consecuentemente de un aumento del 50 % en el consumo de agua por persona (Chapin et al., 2011). El agua subterránea es indispensable para el abastecimiento de agua para consumo humano porque varias regiones como el Estado de Yucatán

¹ Programa de Intercambio de Estancias Técnicas de Alto Nivel México-Alemania CONACYT-GIZ 2015-2016.

² Facultad de Ingeniería, Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), SLP, México.

³ Ecoterra Servicios Ambientales, Ciudad de México, Distrito Federal, México.

⁴ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY), Mérida, México.

* *Autora correspondiente:* Campo Experimental Centro de Chiapas, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Km 3.5 Carretera Ocozocoautla-Cintalapa, Ocozocoautla, Chiapas, México, C.P. 29140.
Email: lisa.heise7@gmail.com

prácticamente carecen de agua superficial y el acuífero es el único recurso hídrico disponible (Bauer-Gottwein et al., 2011).

El proyecto de investigación CONAGUA-CONACYT S0012-2010-02 titulado “Evaluación de la calidad del agua subterránea que subyace a la ciudad de Mérida y su impacto en la zona costera del estado de Yucatán” (Clave de Registro: 148167) inició en el año 2011 en respuesta a la necesidad de un manejo sustentable de los recursos de agua subterránea, fundamental servicio ecosistémico. En el marco del proyecto se desarrollaron varias tesis, entre ellas los trabajos de maestría del primer y tercer autor, penúltima considerada como objeto de investigación del presente trabajo partiendo del manejo sustentable del agua subterránea como estrategia de adaptación al cambio climático.

Los acuíferos kársticos juegan un papel muy importante porque el 20-25 % de la población mundial depende del servicio ecosistémico, agua dulce, proporcionado por sistemas hidrológicos kársticos (Ford & Williams, 2007).

Debido a las condiciones climáticas y la alta conductividad hidráulica del material geológico originado por procesos de karstificación, la recarga natural del acuífero es muy dinámica, siendo el acuífero kárstico un sistema complejo subterráneo de cuevas y canales interconectados muy vulnerable a la contaminación. Los siguientes factores principales deterioran la calidad del agua en el Estado de Yucatán:

- (i) la infiltración de agua residual por fosas sépticas inadecuadas (Febles-Patrón & Hoogesteijn, 2008)
- (ii) la ausencia de sistema centralizado para el tratamiento de aguas residuales (Marín et al., 2000),
- (iii) el uso del acuífero como cuerpo receptor de aguas residuales (Marín et al., 2003) y
- (iv) la afectación de gran parte del acuífero por intrusión salina (Bauer-Gottwein et al., 2011).

La zona de estudio comprende un área de aproximadamente 1600 km² del acuífero transfronterizo de 165 000 km² que incluye partes de México, Guatemala y Belize (Bauer-Gottwein et al., 2011). El clima de la región es tropical cálido subhúmedo (Aw) y en la franja costera se denomina seco estepario (BS). En la zona metropolitana de Mérida anualmente llueve aproximadamente 1024 mm mientras que en Progreso hay una precipitación anual de 500 mm. La figura 1 visualiza la zona de estudio con los pozos de observación alrededor de la ciudad de Mérida y los pozos artesianos (manantiales) en la zona costera.

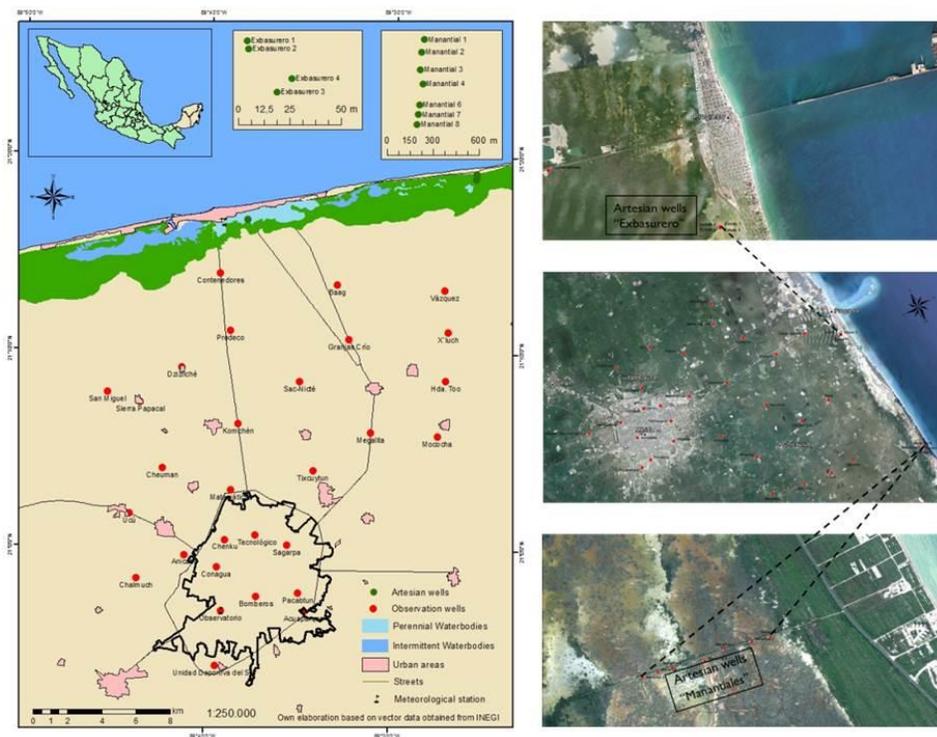


Figura 1. Zona de estudio con pozos perforados y pozos artesianos de observación

Objetivos

El objetivo principal de la investigación fue entender el funcionamiento y la dinámica del sistema de flujo y de la zona de descarga del acuífero para poder evaluar cualitativamente los impactos de contaminación y caracterizar el estado actual del sistema. Con el fin de alcanzar este propósito se definieron los siguientes objetivos específicos:

- (i) determinar la evolución espacial y temporal de la carga hidráulica y del flujo de agua,
- (ii) medir el flujo de descarga del agua subterránea en pozos artesianos de la zona costera,
- (iii) determinar las variaciones en el espesor y la profundidad de la zona de mezcla de aguas,
- (iv) analizar la composición físico-química del agua subterránea, meteórica, de laguna y del mar y
- (v) obtener y analizar datos meteorológicos de la zona de estudio.

Metodología

Para abordar los problemas y alcanzar los objetivos planteados se realizó un análisis integral hidrogeológico e hidroquímico de la zona de estudio. La metodología se divide en la sección hidráulica y la de calidad de agua.

En la parte hidráulica un análisis integral de las variaciones temporales y espaciales en el sistema de flujo del acuífero relacionadas a eventos de precipitación y recarga inducida de origen humano fue realizado. Durante el período de un año se analizaron 29 pozos de observación de hasta 60 m de profundidad en la zona metropolitana y 11 pozos artesianos donde el agua subterránea descarga libremente en una laguna somera costera. Las cargas hidráulicas se monitorizaron en 20 de los pozos de observación constantemente instalando unos transductores de presión (Figura 2) y en los pozos artesianos se registraron de forma manual con la ayuda de un tubo-PVC (Figura 3).

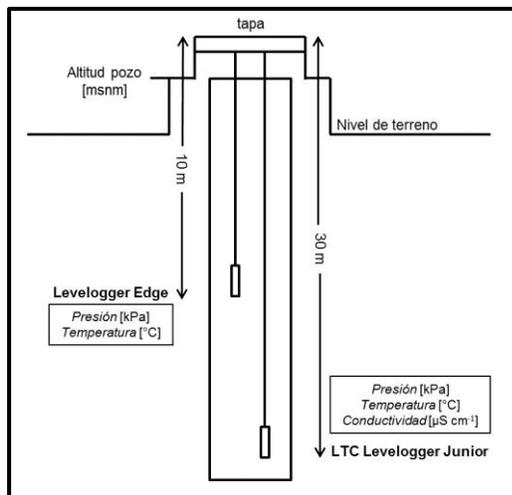


Figura 2. Transductores instalados en pozo

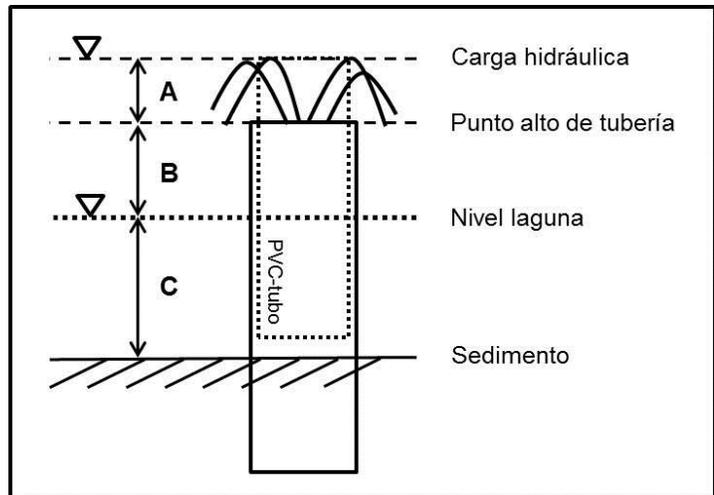


Figura 3. Medición de carga hidráulica en pozo artesiano

La calidad de agua fue analizada in situ cada 2-3 meses mediante la sonda multiparamétrica Hydrolab MS5 Multiprobe para obtener perfiles de calidad de los parámetros físico-químicos conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (TDS), temperatura, pH, potencial redox y oxígeno disuelto.

Además se realizaron dos campañas de muestreo, durante las temporadas de lluvia y estiaje, tomando muestras a diferentes profundidades del agua subterránea, agua meteórica, agua de la laguna costera y del océano que fueron analizadas en un laboratorio para obtener concentraciones de cationes y aniones mayores, elementos traza, metales pesados y coliformes.

Resultados y discusión

Respecto a la parte hidráulica se detectaron variaciones significativas en la dinámica del flujo del agua subterránea, tanto espacial como temporalmente, una respuesta muy directa de la carga hidráulica a la recarga natural (eventos de precipitación) y una relación directa entre la carga hidráulica de los pozos artesianos y la marea es decir las fases lunares. El monitoreo del nivel freático mediante los transductores en la mayoría de los pozos de observación mostró una respuesta muy rápida a la recarga por eventos de precipitación. Dado que la recarga del acuífero es muy dinámica y el terreno kárstico presenta una alta heterogeneidad tanto en la superficie como en el subsuelo, la infiltración del agua de lluvia o de la escorrentía no es uniforme.

La Figura 4 muestra las variaciones en la dirección de flujo de agua subterránea por la variación de la carga hidráulica en cuatro diferentes meses durante el periodo de estudio.

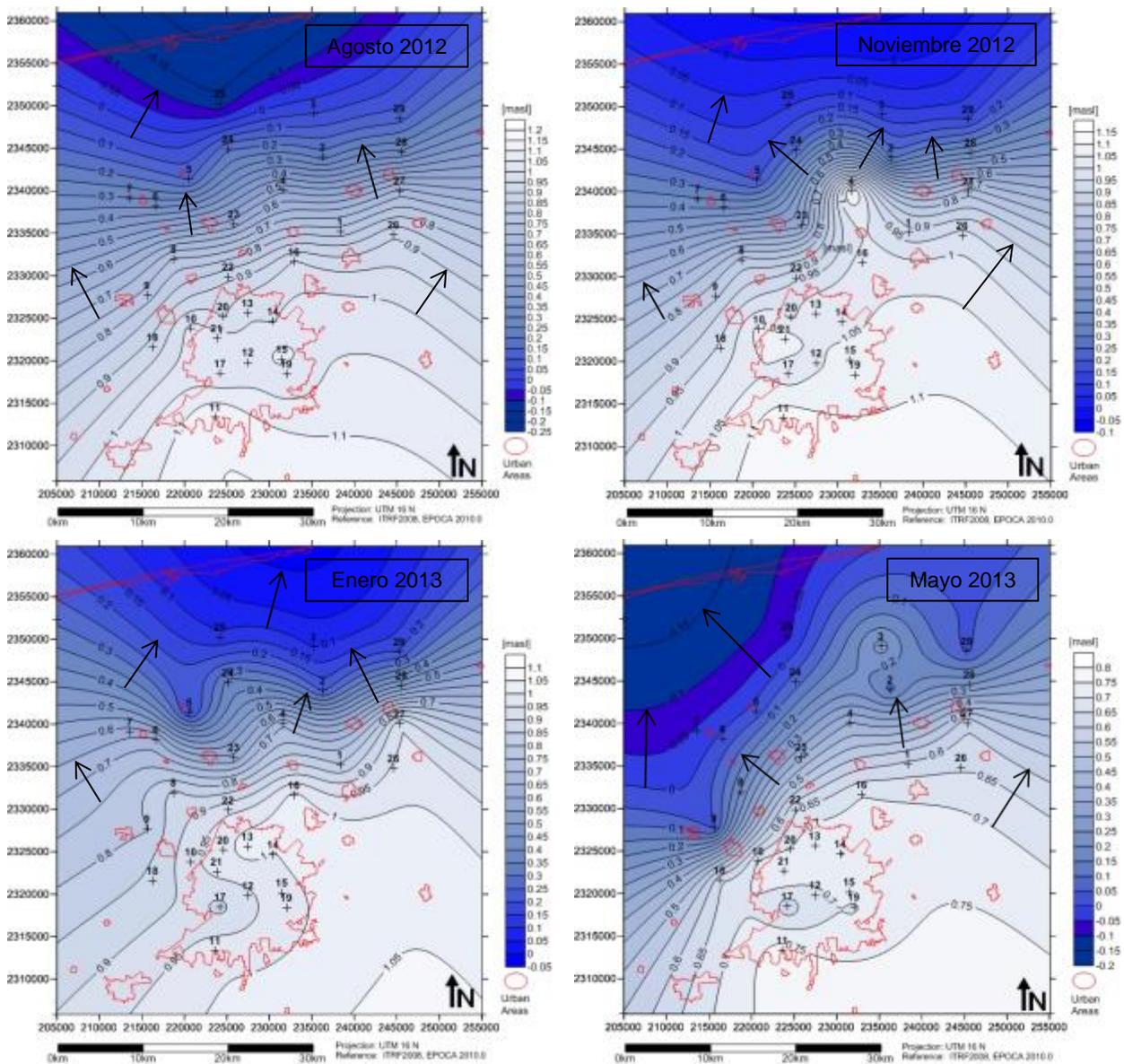


Figura 4. Variación de direcciones de flujo del agua subterránea en cuatro meses diferentes

Mediante los perfiles de calidad de los parámetros físico-químicos registrados con la sonda multi-paramétrica no se detectó una interfase marcada entre agua dulce y salada sino una zona de transición dinámica. Se obtuvieron la profundidad (2-42 m) y el espesor (2-15 m) de la zona de mezcla.

La figura 5 muestra la influencia de la marea sobre la carga hidráulica y el flujo de descarga registrados en los pozos artesianos en el transcurso de un día, un día después de cuarto menguante, en el caso de julio 2012 y un día antes de luna nueva en el caso de marzo 2013.

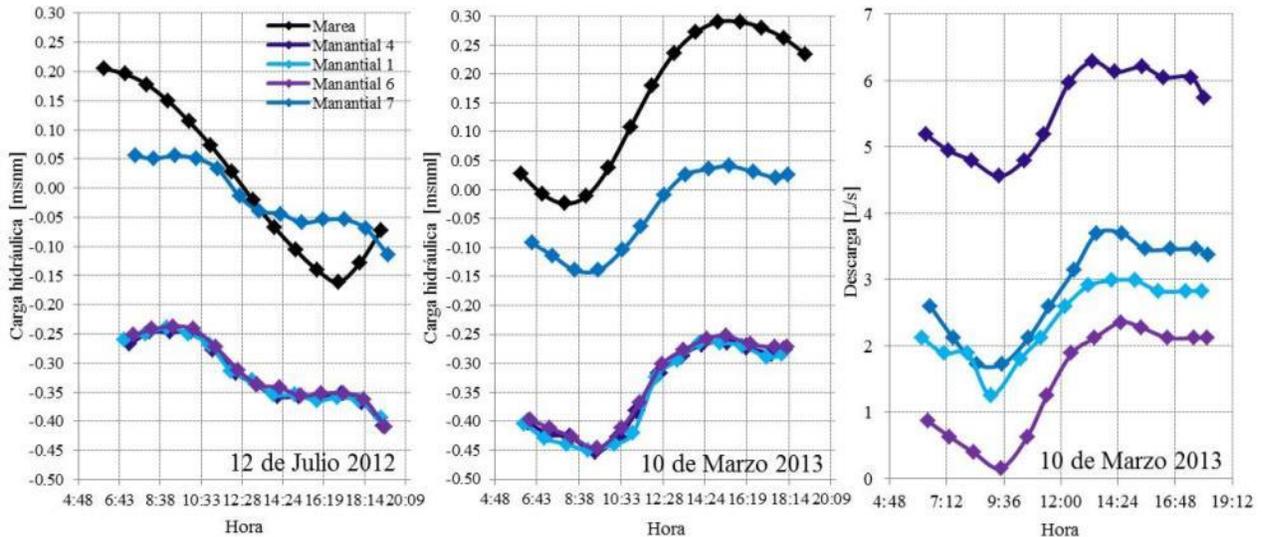


Figura 5. Variación de la carga hidráulica y la descarga en los pozos artesianos

Los resultados del análisis de las muestras de agua demostraron que en gran parte de la zona de estudio el agua no es apta para el consumo humano. Incluso sin considerar la calidad bacteriológica, alrededor del 50% de las muestras intermedias y someras excedieron los límites permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de agua potable para al menos un parámetro (Tabla 1). En el caso de las muestras profundas, incluso las de los pozos más alejados de la costa, todas mostraron valores de TDS, Na⁺ y Cl⁻ excediendo los límites, indicando el avance de la intrusión salina hacia el continente.

El agua 65 % del agua para el abastecimiento urbano es extraída de dos campos de pozos en la zona sur de Nérída en los cuales Cuevas et al. (2015) demostraron que el agua del principal campo de pozos es de buena calidad excepto por los nitratos y las bacterias (coliformes fecales).

Tabla 1. Parámetros que exceden los límites de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994

Parámetros	Límite [mg L ⁻¹]	Somero [%]	Intermedio [%]	Profundo [%]	Manantiales [%]	Laguna [%]
TDS	1000	41.7	19.4	100.0	100.0	100.0
Dureza	500	29.2	8.3	90.0	87.5	50.0
Na ⁺	200	37.5	11.1	100.0	100.0	100.0
Cl ⁻	250	54.2	11.1	100.0	100.0	100.0
N-NO ₃	10	0.0	19.4	0.0	0.0	0.0
SO ₄ ⁼	400	0.0	0.0	70.0	0.0	0.0
As*	0.025	0.0	0.0	50.0	0.0	0.0
Hg	0.001	0.0	0.0	70.0	25.0	50.0
Pb	0.01	4.2	5.6	45.0	0.0	0.0

* El límite permisible para el arsénico se ajusta anualmente, se tomó en cuenta el último valor de la Nota 2 (2005)

Conclusiones

El agua subterránea de muchos de los pozos sin tratamiento previo no es apto para el consumo humano. La presencia de bacterias coliformes indica contaminación originada por aguas residuales de fosas sépticas inadecuadas. Los metales pesados encontrados en muestras profundas hacen suponer contaminación por inyección de aguas industriales o residuales.

Todo el sistema kárstico se mostró muy cambiante y su dinámica difícilmente previsible dado que depende de muchos factores intrínsecos y extrínsecos del sistema hidrológico que influyen en el comportamiento y la evolución de los contaminantes y del lente de agua dulce.

La mayoría de los parámetros hidráulicos y químicos evidenció una conexión con las condiciones meteorológicas pero en el acuitardo (tipo confinado) de la zona costera predomina la influencia de la marea. Por consiguiente se plantea que el acuífero es gobernado por dos sistemas diferentes uno dominado por la recarga y el otro por la descarga.

El funcionamiento y la dinámica de los ecosistemas costeros son muy sensibles a modificaciones pequeñas originadas por el cambio ambiental global (natural o antropogénico) que pueden alterar los ciclos geoquímicos y causar problemas de gran alcance perjudicando los servicios ecosistémicos.

El gran reto consiste en la reducción del impacto nocivo por contaminación natural y antropogénica sobre el acuífero para mantener el equilibrio de los ecosistemas vulnerables y sus servicios e incrementar su resiliencia y adaptación ante el CC. Cabe mencionar que para un manejo sustentable del acuífero de Yucatán es imprescindible crear conciencia ambiental respecto a la gravedad de la situación y la importancia de los recursos de agua subterránea en la población. Además es importante intensificar la participación social en la toma de decisiones respecto al desarrollo de la estrategia de adaptación al CC.

La complejidad y la heterogeneidad del sistema de acuífero kárstico costero se caracteriza por diversas interacciones, interrelaciones e interdependencias entre continente y océano, agua dulce y salada, agua subterránea y material geológico, entre otros. Asimismo el sistema complejo es expuesto a impactos antropogénicos e influencia climatológica que hacen más desafiante pero no imposible el manejo sustentable de la zona.

Referencias bibliográficas

- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., & Merediz-Alonso, G. (2011). Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, pp. 507-524.
- Chapin, S. F., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. (2011). Changes in the Earth System. In *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology* (2 ed., pp. 401-422). New York, USA: Springer.
- Cuevas, E., Pacheco, J., Cabrera, A., Coronado, V., Vázquez, J., & Comas, M. (2015). Calidad química y bacteriológica del agua subterránea en el principal campo de pozos para el abastecimiento de Mérida, Yucatán, México. *ResearchGate*.
- Febles-Patrón, J. L., & Hoogesteijn, A. (2008). Analysis of the Legal Framework for the Protection of Groundwater in Merida, Yucatan. *Ingeniería*, 12-3, pp. 71-79.
- Ford, D., & Williams, P. (2007). Karst Hydrogeology and Geomorphology. *John Wiley & Sons*, p. 576.
- Kumar, C. P. (octubre 2012). Climate Change and Its Impact on Groundwater Resources. *International Journal of Engineering and Science*, Vol. 1(5).
- Marín, L. E., Pacheco, J., & Escolero, O. (2003). Groundwater as a socio-economic constraint: the Yucatan Peninsula, Mexico example. *RMZ - Materials and Geoenvironment*, 50, No. 1, pp. 217-219.
- Marín, L. E., Steinich, B., Pacheco, J., & Escolero, O. A. (2000). Hydrogeology of a contaminated sole-source karst aquifer, Mérida, Yucatán, México. *Geofísica Internacional*, pp. 359-365.
- Secretaría de Salud (2000). *MODIFICACIÓN a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para Uso y Consumo Humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.*