



RIESGO DE INUNDACIÓN ANTE LLUVIAS EXTREMAS EN EL KARST DE LA CIUDAD DE MÉRIDA YUCATÁN MÉXICO †

[FLOOD RISK DUE TO EXTREME RAINS IN THE KARST OF THE CITY OF MÉRIDA YUCATÁN MEXICO]

Francisco Bautista-Zuñiga^{1*} and Yameli Aguilar-Duarte²

¹ Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua carretera a Pátzcuaro No. 8701. Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta. C.P. 58190. Morelia, Michoacán, México. Email: leptosol@ciga.unam.mx

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Av. Correa Rachó por calle 15, Col. Díaz Ordaz, Mérida, Yucatán, México. C.P. 97130. Email: yaguilarduarte@gmail.com

*Corresponding author

SUMMARY

Background. Yearly hurricanes and tropical storms formed in the Atlantic are natural flooding hazards to The Yucatan Peninsula due to unplanned land use changes when new urban areas are to be developed on karstic soils such as in the case of the municipality of Merida. **Objective:** This work aimed to generate a flood risk map due to extreme meteorological events when storms and hurricane occurred in the municipality of Merida. **Methodology:** To assess flood risk on a detailed scale, the main input was the digital elevation continuum; it was classified into three classes of elevations: very high risk, less than 4 meters above sea level (m.a.s.l.); high from 4 to 7 m.a.s.l.; medium from 7 to 10 m.a.s.l.; and low, greater than 10 m.a.s.l.; the population layer by localities was included in order to estimate the amount of population at risk by type of flood. **Results:** the areas with high to very high risk of flooding due to tropical storms and hurricanes are located in the north of Merida, where urban areas are in continuous expansion. These results were validated during the recent flood events. **Implications:** It is recommended that areas with high to very high risk of flooding be declared as eco-archaeological and environmental protected natural areas. **Conclusions:** In the north of Mérida are located 41197 ha (46% of the total area) with the water table below 7 m from the ground surface so continuous urban growth is not recommended. The flooding risks of this area ranged from high to very high due to the rise of the water table during storms and hurricanes.

Key words: Climate change; sea level; hurricane; storm.

RESUMEN

Antecedentes: Los huracanes y las tormentas tropicales que se forman año con año son amenazas naturales que, combinado con cambios de uso de suelo sin planeación, generan desastres y grandes daños tanto a escala regional como local. **Objetivo:** El objetivo de este trabajo fue la realización de un mapa de riesgo de inundación ante eventos meteorológicos extremos como los huracanes en el municipio de Mérida. **Metodología:** Para evaluar el riesgo de inundación a escala detallada el insumo principal fue el continuo de elevación digital; se clasificó en clases de elevaciones: muy alto riesgo menor a 4msnm; alto de 4 a 7 msnm; medio de 7 a 10 msnm; y bajo de mayor a 10 msnm; se incluyó la capa de población por localidades del municipio con la finalidad de estimar la cantidad de población en riesgo por clase de inundación. **Resultados:** las zonas de alto a muy alto riesgo de inundación ante el paso de tormentas tropicales y huracanes se localizan principalmente al norte del municipio de Mérida, donde también continúan procesos de crecimiento urbano; los resultados son validados con los eventos de inundaciones recientes. **Implicaciones:** Se recomienda que las zonas de alto a muy alto riesgo de inundación ante altas precipitaciones pluviales sean declaradas como áreas naturales protegidas de tipo eco-arqueológico y ambiental. **Conclusiones:** En el norte del municipio de Mérida se localizan zonas bajas con menos de 7 m de distancia del manto freático a la superficie, ocupan un área de 41197 ha (46% de la superficie total); se recomienda no continuar el crecimiento urbano ya que es de alto a muy alto riesgo de inundaciones por ascenso del manto freático ante el paso de tormentas y huracanes.

Palabras clave: Cambio climático; nivel del mar; huracanes; tormenta.

† Submitted December 11, 2020 – Accepted January 14, 2021. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.

ISSN: 1870-0462.

ORCID information: FBZ: 0000-0001-9128-5803; YAD 0000-0002-7007-1360.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático puede ya estar comenzando a afectar las poblaciones costeras del mundo por dos razones: el ascenso en el nivel del mar (Dangendorf *et al.*, 2019) y por el aumento de la frecuencia y magnitud de los huracanes (Hallegatte *et al.*, 2016; Woodward y Samet, 2018). Se calcula que los daños por tormentas y huracanes fueron del orden de los 58 billones de dólares tan solo durante el 2018 (Al Kazimi and Mackenzie 2016; Spencer y Strobl, 2020). Comprender los cambios regionales y locales de las zonas costeras ante los eventos meteorológicos extremos es de suma importancia, ya que afectan la supervivencia y la economía de millones de personas.

Ambos efectos del cambio climático (ascenso del nivel del mar y aumento de la frecuencia y magnitud de tormentas y huracanes) podrían presentarse en las tierras bajas del karst de Yucatán (Appendini *et al.*, 2019), tales como las islas de barrera, las planicies litorales y las planicies kársticas, todas ellas con altitudes menores de 10 msnm (Bautista *et al.*, 2015; Plomaritis *et al.*, 2018; Hafsi *et al.*, 2020).

Los suelos pueden utilizarse como indicadores tempranos de inundación debido a que la morfología del perfil muestra rasgos de disminución y/o detención de la infiltración (condiciones reductoras) (Bautista *et al.*, 2015). Otra situación de alerta temprana es la elaboración de mapas de riesgo de inundación (UNISDR, 2009), como la identificación de las planicies costeras que se localizan a menos de 10 msnm ya que en dichos territorios puede favorecerse el ascenso del agua ante eventos extremos de lluvia por la presencia de tormentas tropicales, frentes fríos y huracanes (Ramos-Reyes *et al.*, 2016).

El desconocimiento del funcionamiento de los paisajes geográficos y del funcionamiento de los flujos subterráneos del agua en condiciones de karst dificultan una planificación adecuada del uso del territorio, particularmente en las zonas urbanas (Dávila y León, 2011). La generación de mapas de riesgo son una forma de alerta temprana que deben seguir utilizándose en la planificación de infraestructura urbana y carretera.

Los huracanes y tormentas tropicales han causado inundaciones en el estado de Yucatán año con año (CONAGUA, 2016, 2017); pero durante el año 2020 la precipitación pluvial fue superior al 150% anual debido a la presencia de tres huracanes y dos tormentas tropicales (CONAGUA, 2020). Las inundaciones fueron severas, en altitud y duración. Las pérdidas materiales fueron cuantiosas y también hubo varios decesos. Particularmente, al norte de la ciudad de Mérida se suscitaron inundaciones en varias poblaciones urbanas y rurales debido al ascenso del

agua del manto freático a la superficie, es decir, los flujos subterráneos del agua emergieron en la parte baja de la planicie kárstica-costera debido a la gran precipitación pluvial del centro y sur del estado de Yucatán.

Los eventos hidrometeorológicos extremos que originaron las inundaciones en el municipio de Mérida Yucatán, fueron: las tormentas “Amanda” y “Cristóbal” que sucedieron del 29 de mayo al 7 de junio, ambas con lluvias torrenciales durante nueve días consecutivos (SMN, 2020); los huracanes “Gamma” (del 29 de septiembre al 5 de octubre) y Delta (del 6 al 8 de octubre) ambos con categoría 2; y el huracán Zeta que llegó con categoría 1 (del 26 al 28 de octubre) (Servicio Mareográfico Nacional, 2020).

Tormentas y huracanes generaron procesos en el mar como el incremento en el nivel del mar por efecto de la marea de tormenta; procesos tierra adentro como fuertes vientos y lluvias intensas y prolongadas que provocaron un aumento de la recarga de los acuíferos, aumento del nivel freático y, consecuentemente, las inundaciones en el municipio de Mérida. Dichas inundaciones fueron motivo de numerosas notas periodísticas en los medio digitales e impresos, así como en las redes sociales. No estuvieron previstas en el Atlas de Riesgo del Municipio de Mérida (2018). Esto motivó la realización de este trabajo sobre el mapa de riesgo de inundación ante eventos meteorológicos extremos en el municipio de Mérida, Yucatán, México.

Los eventos meteorológicos extremos deben ser contemplados en la planeación del uso del territorio (Ihl *et al.*, 2007), esta es la razón de que se argumente que los desastres son social y políticamente construidos. Los gobiernos deben tomar decisiones para proteger a la población y tomar en cuenta las estrategias de acción de la población (Hernández-Aguilar y López-Montejo, 2020; Metcalfe *et al.*, 2020).

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio

El municipio de Mérida, Yucatán (México), es un municipio que se localiza en la planicie kárstica-costera (Figura 1) (Bautista *et al.* 2015). Los flujos regionales de aguas subterráneas van de sur a norte y se descargan hacia las zonas costeras donde se presentan las descargas submarinas (Perry *et al.*, 1995; González-Herrera *et al.*, 2002) (Figura 1). La vegetación corresponde selva baja espinosa y selva baja caducifolia (Flores y Espejel 1994).

Por su ubicación geográfica, el municipio de Mérida se ve amenazado por huracanes durante la temporada comprendida de mayo a noviembre, originados generalmente en el este del Mar Caribe en el Océano

Atlántico, y que viajan hacia el Golfo de México, la Florida, la costa del este de los Estados Unidos de Norteamérica o se disipan al llegar a las frías aguas del Atlántico Norte (CONAGUA-SEMARNAT, 2012). La mayor parte de estos fenómenos generados en esta zona, adquieren grandes magnitudes debido a que se desplazan enormes distancias sobre las cálidas aguas del Atlántico tropical, que entre otros factores alimentan de energía a dichos fenómenos y sus efectos suelen ser devastadores para las zonas alcanzadas (Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial del Municipio de Mérida, 2006).

El subtipo climático predominante en el municipio es Aw_0 (Orellana *et al.* 1999), lo cual permite tener longitudes del periodo de crecimiento (LPC) de 2 a 4 meses. La LPC se expresa en meses húmedos consecutivos, inicia cuando la precipitación pluvial excede a la mitad de la evapotranspiración potencial y finaliza cuando la precipitación pluvial es menor a la

mitad de la evapotranspiración potencial (Delgado *et al.*, 2017).

Estrategia metodológica

Para evaluar el riesgo a las inundaciones a escala detallada el insumo principal fue el continuo de elevación digital (CEM) reportado por el INEGI (2013) que es un insumo cartográfico de fácil acceso. Para representar las diferencias en elevaciones sobre el nivel del mar, se definieron cuatro clases de elevación: menor a 4 m, de 4 a 7 m, de 7 a 10 m y mayor de 10 m sobre el nivel del mar que corresponden a cuatro clases de riesgo de inundación desde muy alto, alto, medio y bajo, respectivamente. Se definieron estas clases de riesgo debido a que las áreas inundadas, fueron tomadas como base para definir la altura de alto riesgo de inundación y se definieron las demás clases con aumento de 3 m de altitud. Podemos decir que el modelo de las clases de inundación fue elaborado con base en experiencia empírica reciente.

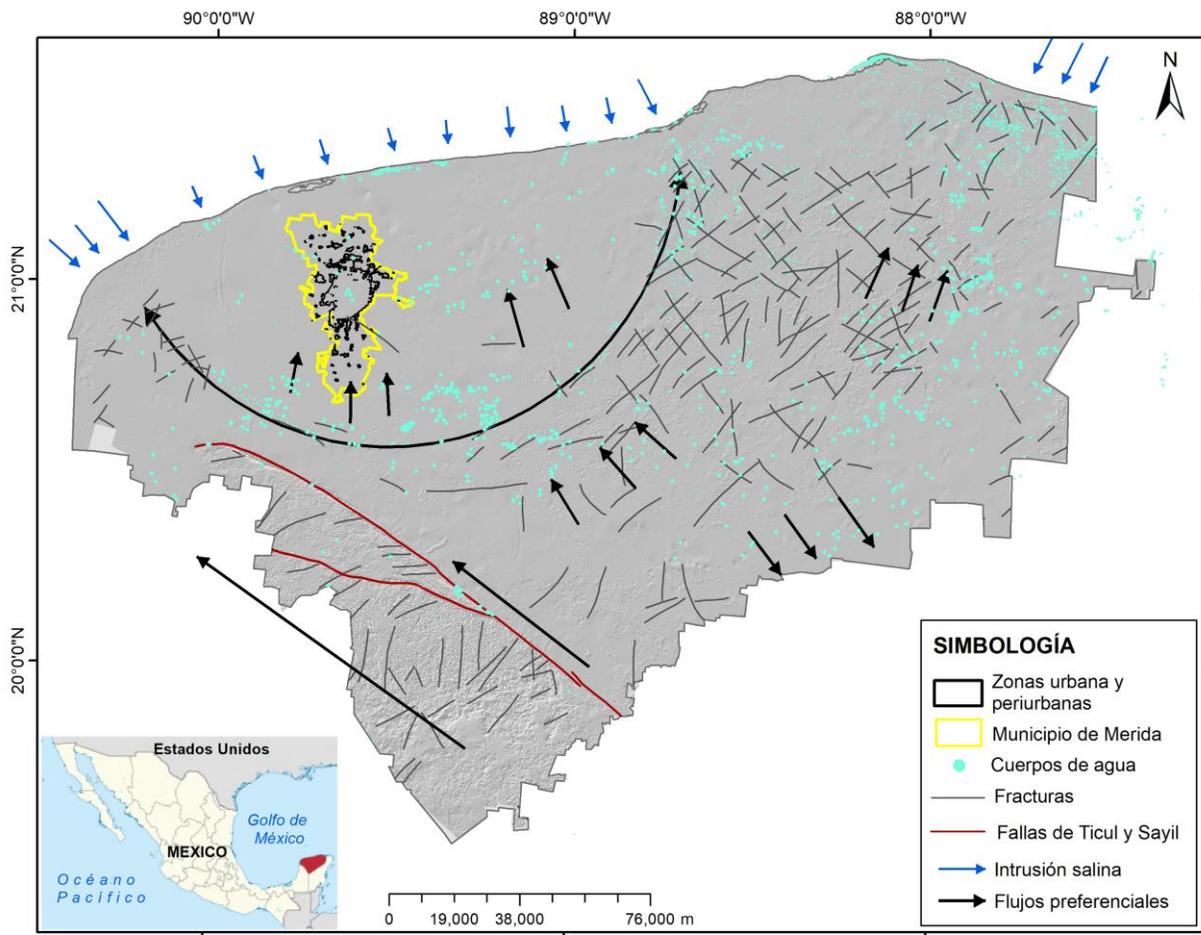


Figura 1. Ubicación del municipio de Mérida con las zonas urbanas y periurbanas, así como los flujos del agua subterránea.

Aunque se estima que el promedio de la elevación de la ciudad de Mérida (cabecera municipal) es de 9 msnm (Zetina-Moguel *et al.*, 2018), en todo el municipio existe un gradiente de mayor a menor elevación que va de sur a norte, donde las zonas más altas están entre 10 a 12 msnm ubicadas principalmente hacia el sur; y hasta 15 msnm en zonas muy puntuales distribuidas como pequeños montículos.

En este modelo la amenaza o peligro son las precipitaciones pluviales, sin que se piense que esa agua fue la causante de las inundaciones, porque en realidad, el agua que ocasionó las inundaciones llegó por debajo del suelo de los paisajes geográficos adyacente al municipio de Mérida. Estudios reportados por Zetina *et al.*, (2018) mencionan que, dada la proximidad del nivel freático a la superficie del terreno, y porque el acuífero que subyace a Mérida es somero del tipo libre con porosidad dual por su naturaleza kárstica, existe el riesgo que ocurra un ascenso extraordinario del nivel freático.

En el análisis se incluyó la capa de población por localidades del municipio tomada del censo de 2010 (INEGI, 2010). Otros elementos de análisis y discusión fueron: el crecimiento de la ciudad y el modelo de crecimiento territorial propuesto en el POET del Municipio publicado en el 2006.

Se utilizó un sistema de información geográfica datum NAD27 y la proyección Lambert. Se trabajó con el software ArcMap 10.4.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El riesgo a las inundaciones en Mérida, Yucatán

El riesgo de inundación por ascenso del agua del nivel freático sigue el mismo patrón, de menor a mayor de sur a norte. Así, la zona con “muy alto” riesgo se ubica en el extremo norte del municipio con un área de 18861 ha que corresponde al 21% de la superficie del municipio, con una población de 8446 habitantes que representan el 1% (Figura 2, Cuadro 1). En esta superficie se distribuyen 22 localidades: Sierra Papacal, Xcunya, Cosgaya, Tamanché, Noc Ac, Temozón Norte, Suytunchen, San Diego Texan, Santa María Yax, San Gerardo, Misnébalam, Unidad Revolución, Las Palmas, Pequeña Australia, San Gabriel, Komchen, El Zapote, Geisy Guadalupe, Pochote, San Julián, Paraíso, Ever Green, San Lorenzo Suytunchen.

La zona con “alto” riesgo también se encuentra al norte con 22336 ha (25% de la superficie municipal) (Figura 2), con una población de 25250 habitantes que representa el 3% de la población (Cuadro 1). En esta superficie se encuentran cerca de 50 localidades entre

las que están con mayor población las siguientes: Candel, Cholul, Chablekal, Sitpach, Dzitya, Xcanatun, La Ceiba, Tixcatal, Chalmuch, Tixcuytun, Sac-Nicté, Dzidzilché, Cheuman, Dzibilchaltun, San Antonio Hool, Juliana, San Manuel, San José Kuche, La Ceiba dos, Las Quintas, Flamboyanes, San Isidro, El Caporal y Francisco Villa.

Aunque en total en población, solo represente el 4% (de acuerdo al censo del INEGI, 2010), la realidad debe ser mayor pues la tendencia al aumento en el crecimiento de ambas zonas es una realidad que aún no ha sido documentada. Actualmente en ambas zonas el crecimiento urbano, de infraestructura y vivienda ha crecido (Navarro-Tec *et al.*, 2018) se han ocupado como áreas urbanas zonas que originalmente estaban propuestas para áreas naturales protegidas, debidas a sus características geográficas, ambientales y culturales (POET, 2006).

La zona de mayor extensión tiene un riesgo medio con 38302 ha (43% de la superficie), donde habita la mayor parte de la población (794056 habitantes, 95.6%). Incluye principalmente parte de la ciudad de Mérida y localidades periurbanas del poniente, oriente y sur, representados en 60 localidades como: San José Tzal, Molas, Leona Vicario, Dzununcan, San Pedro Chimay, Tahdzibichen, Oncan, Santa Cruz Palomeque, Susulá, Xmatkuil, Santa María Chí, San Ignacio Tesip, Kikteil, entre otras (Figura 2).

La zona con riesgo bajo, tiene 9504 ha (11% de la superficie municipal) se ubica principalmente al sur del municipio, aunque también en las localidades de Yaxnic, San Antonio Tzacala, Texan Cámara, Dzoyaxché, Santa Gertrudis Dos y otros tres innominados.

Los suelos del norte del municipio de Mérida son muy percolantes, del grupo de los Leptosols (Bautista *et al.*, 2015); no hay presencia de alta densidad de dolinas (Fragoso *et al.*, 2014; Aguilar *et al.*, 2016) aunque sí hay registros de cenotes (Ligorred Perramón y Ventura Dzib, 2008); no corresponde con una zona de “Bajos inundables” (Palacio *et al.*, 2002; Palacio *et al.*, 2005); y no corresponde con las zonas de mayor precipitación pluvial del estado (Delgado *et al.*, 2011, 2017); por lo que el fenómeno que explica las inundaciones en el norte del municipio de Mérida, es el resultado de una combinación de dos efectos asociados a las tormentas y huracanes sucedidos continuamente: 1) al ascenso del nivel medio del mar de manera temporal como producto de las mareas de tormenta, los cuales se registraron por el Servicio Mareográfico Nacional; y 2) la acumulación de lluvia tierra adentro que generó una recarga excesiva conduciendo a la saturación del acuífero y consecuentemente al ascenso del agua del manto freático hacia la superficie.

Durante el evento “Gamma”, en Celestún, se registró un ligero incremento del nivel del mar de cerca de 15 cm; en la estación de Sánchez Magallanes, ubicada en Tabasco, se registró un aumento de 40 cm del nivel del mar; este registro se mantuvo hasta la fecha de reporte del 6 de octubre (Servicio Mareográfico Nacional, 2020). Para el evento “Delta” el mayor registro en el aumento del nivel de mar fue para la estación de Puerto Morelos Quintana Roo que presentó hasta 1 m; seguido de Isla Mujeres en donde se registró un 70 cm; en las estaciones yucatecas (Telchac, Sisal y Celestún) el registro fue de 50 cm para las dos primeras y 40 cm para la última (Servicio Mareográfico Nacional, 2020). Para el evento “Zeta”, las estaciones yucatecas registraron aumentos entre 20 y 25 cm del nivel del mar (Servicio Mareográfico Nacional, 2020).

Por otro lado, los flujos regionales del agua subterránea van de sur a norte y ya han sido reportados (Perry *et al.*, 1995; González-Herrera *et al.*, 2002) y es probable que hayan influido en las inundaciones ya que las precipitaciones pluviales fueron muy altas, producto del paso de las tormentas tropicales “Amanda” (168.7 mm) y “Cristóbal” (848.8 mm) (SMN, 2020) así como los huracanes Gamma, Delta y Zeta que sucedieron de manera continua en los meses de septiembre y octubre y que de acuerdo a datos registrados en la estación del observatorio de Mérida, las precipitaciones acumuladas fueron de 1384.2 mm en septiembre y de 1896.6 mm en octubre (CCPY, 2020). En promedio, generó una cantidad de lluvia acumulada de 1511.8 mm para todo Yucatán, lo que representa cerca del 150.1% de lo que llueve en un año sobre la entidad (CCPY, 2020). Esta lluvia constituyó una gran recarga del acuífero, saturando los conductos subterráneos lo que ocasionó un afloramiento del agua, esta situación se presentó no solamente en el norte de la ciudad de Mérida (Figura 3A, 3B y 3C), ya que ocurrió al oriente de Mérida (Figura 3D) con un ascenso del agua de más de 5 m.

De acuerdo a datos proporcionado por académicos y profesiones en el Foro “Reflexiones sobre las lluvias atípicas 2020 y sus impactos” realizado el 19 de noviembre y organizado por la CONAGUA (CCPY, 2020), se resalta lo siguiente:

- Por medio de un perfil piezométrico del tramo Mérida-Progreso (localidad de Komchén), se registraron aumentos en el nivel freático en diferentes puntos del norte de la ciudad, de hasta 5 m por arriba del nivel del mar.
- En varios puntos de esta zona norte también se presentó este aumento (Figura 3) ya que incluso se observaron cenotes llenos de agua (Bojórquez-Urzaiz, 2020).

Aun cuando los patrones generales de los flujos subterráneos del agua están bien entendidos para la península de Yucatán, van de las partes altas a las bajas del paisaje de manera radial (Herrera y Comín, 2000; Suárez y Rivera, 2000). A nivel local esos patrones están regulados por los cambios litológicos, estructuras geológicas, fracturas, fallas y conductos de disolución sin estar plenamente conocidos a escala de detalle (1: 25 000 o mayor) (Sandoval y Heredia, 2018; Zetina-Moguel *et al.*, 2018), en el karst unos procesos pueden suscitarse a nivel regional pero no necesariamente a nivel local (Pacheco *et al.*, 2004).

Los flujos locales del agua subterránea no son bien conocidos y se advierte que es necesario pasar del modelo global radial que corresponde a la escala regional (Figura 1) a modelos con mayor detalle para cada zona en particular (Bautista *et al.*, 2011).

Por debajo del suelo (Leptosol menor de 25 cm de espesor) se localiza la laja que es una roca caliza dura consolidada la cual le da soporte al suelo, por debajo de la laja se localiza el sascab que es una caliza poco consolidada, blanda y por debajo del sascab se encuentra la coquina, una roca compuesta por restos de organismos marinos (Querejeta *et al.*, 2007). El manto freático se mueve por los conductos subterráneos que se forman en el sascab (la caliza blanda) si esos conductos llegaran a obstruirse o a saturarse el agua tendería a subir a la superficie a través de las fracturas de la caliza consolidada, la laja, lo cual provocaría las inundaciones (Figura 4). De acuerdo a Zetina-Moguel *et al.*, (2018) “*las subidas del agua subterránea en el karst de la planicie norte se explican mediante un fenómeno similar a los movimientos de marea debida a diferencias de carga hidráulica entre localidades situadas en un medio complejo que incluye flujos subterráneos en medios granulares y flujos turbulentos en conductos y canales cavernosos*”.

Al norte del municipio de Mérida corresponde con la parte más baja de la planicie kárstica-costera, con una profundidad del manto freático menor de 5 m (González *et al.*, 2004). Toda la zona norte del municipio de Mérida fue clasificada como de alto a muy alto riesgo de inundación debido a la escasa altitud con respecto al manto freático, es por esto que se recomienda no promover el crecimiento urbano más allá del periférico, incluso debería pensarse en decretar como área de protección arqueo-ecológica la zona de muy alto riesgo de inundación, teniendo en cuenta además la presencia de numerosos sitios de interés arqueológico ya identificados como los montículos y vestigios cercanos a las comisarías de Xcunyá, Xcanatún, San Antonio Hool (en el fraccionamiento Las Américas), estructuras cercanas a la ex-hacienda de San Pedro Cholul, entre otras (Ligorred Perramon y Paredes Guerrero, 2021; PDU, 2012).

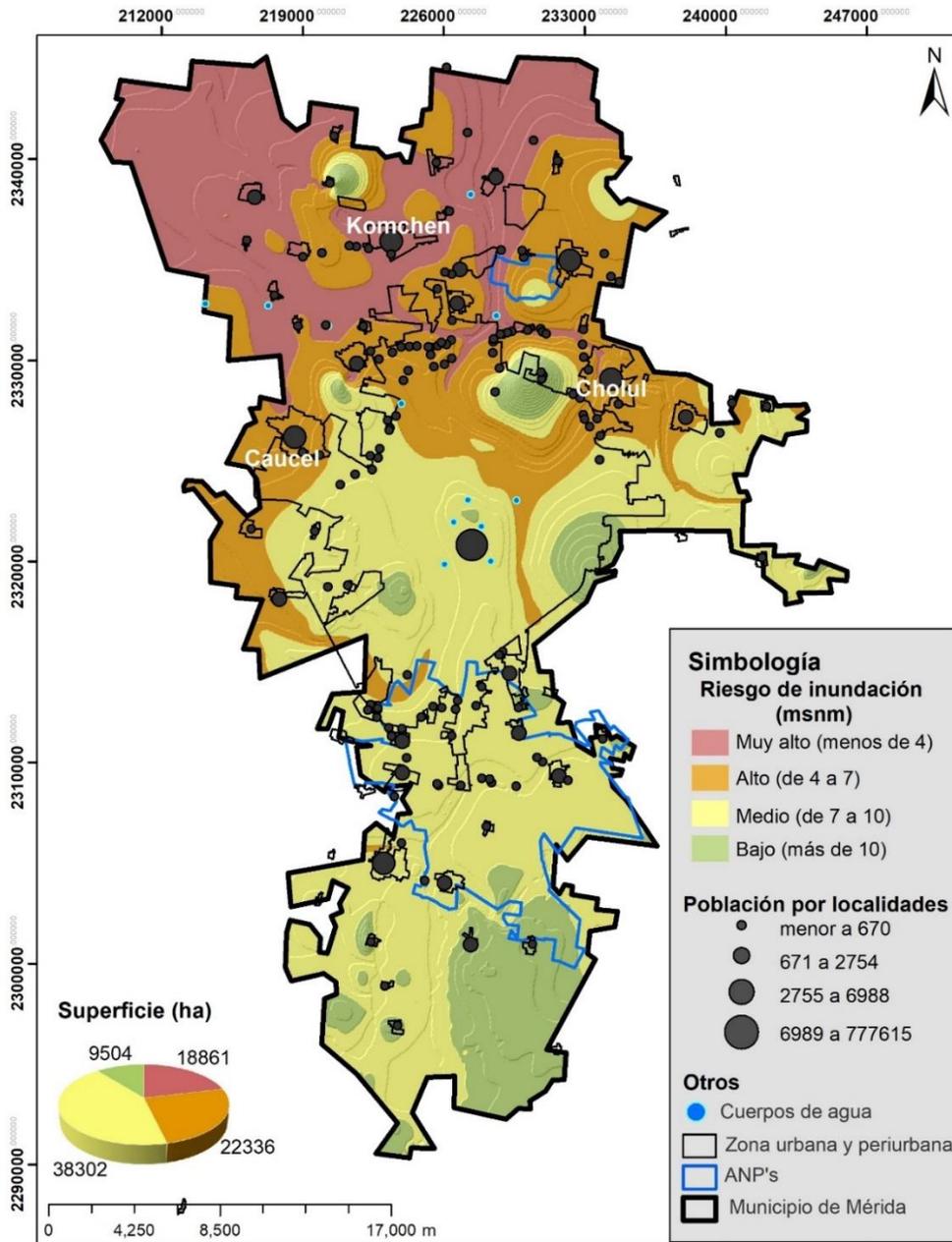


Figura 2. Mapa de riesgo a la inundación por ascenso del nivel medio del mar y el ascenso del agua del manto freático para el municipio de Mérida.

En el mapa de modelos de uso territorial del POET del municipio de Mérida (2006) se incluyeron nuevas propuestas de ANP con una superficie total de 31953.75 ha, de las cuales la mayor extensión - 19793.89 ha- están ubicadas en el norte del municipio (que coinciden con las áreas con clase de riesgo muy alto de inundación), 8645.49 ha en el sur (ampliación para la Reserva Ecológica Cuxtal, con riesgo de inundación medio-bajo), 2709.15 ha para la zona norponiente (con riesgo de inundación medio y alto) y

805.21 ha en el oriente (con riesgo de inundación medio y alto).

El proceso de ascenso y descenso del manto freático debería estar bien documentado, para esto se requiere una extensa red de piezómetros que permitan conocer con detalle, mediante mapas, los cambios en el nivel de profundidad del manto freático a lo largo del año y durante varias temporadas, así como su relación con el relieve mediante un análisis a mayor detalle con insumos LiDAR.



Figura 3. Inundaciones en las zonas de alto y muy alto riesgo A) Fraccionamiento periurbano Las Américas (Foto: GL-Drone); B) Una comisaría periurbana del norte del municipio (Foto: cortesía ciudadana); C) La Reserva Dzibilchaltún -también al norte- con varias zonas inundadas incluso con el cenote Xlakah rebosado (Foto: Escalante, 2020). Otras evidencias por ascenso del nivel freático: D) Planta de tratamiento de aguas residuales instalado en un banco de materiales (Foto: Eco-Yucatán, 2020); E) rejollada fotografiada el 31 de octubre de 2019 en la Reserva Geohidrológica del Anillo de cenotes; y F) la misma rejollada fotografiada después del paso de la tormenta Cristóbal, 10 de junio de 2020 (Fotos: Yameli Aguilar).

El POET del municipio de Mérida (2006), en su reporte de la Fase I “Caracterización del Municipio de Mérida”, en su sección de “Huracanes” se menciona: *En los últimos años se ha observado un incremento en el número de huracanes tropicales formados en la cuenca del Océano Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México. Esto se debe a que se presentan ciclos de altas y bajas en las formaciones de estos sistemas meteorológicos, que se repiten en un lapso que va desde los 25 hasta los 40 años, habiendo terminado el último ciclo a fines de los años 60s del siglo pasado. Prácticamente casi es un hecho que nos encontramos en el inicio de un nuevo ciclo de alta en la formación en el número de huracanes para esta cuenca, siendo*

esto notorio a partir del año de 1995 y continuo a partir del año 2002, la cual se espera tenga una duración de cuando menos dos décadas” (POET de Mérida, 2006 Fase 1, página 16).

El POET del municipio de Mérida también reconocía el proceso del crecimiento demográfico del área urbana de la ciudad de Mérida y el desequilibrio ambiental, social y económico que se estaba generando en la región, por lo que indicaba que estos procesos deberían minimizarse en el corto plazo. Asimismo, ya se identificaba que este crecimiento se debía a un proceso creciente de especulación de la tierra basada en la compra de tierras ejidales.

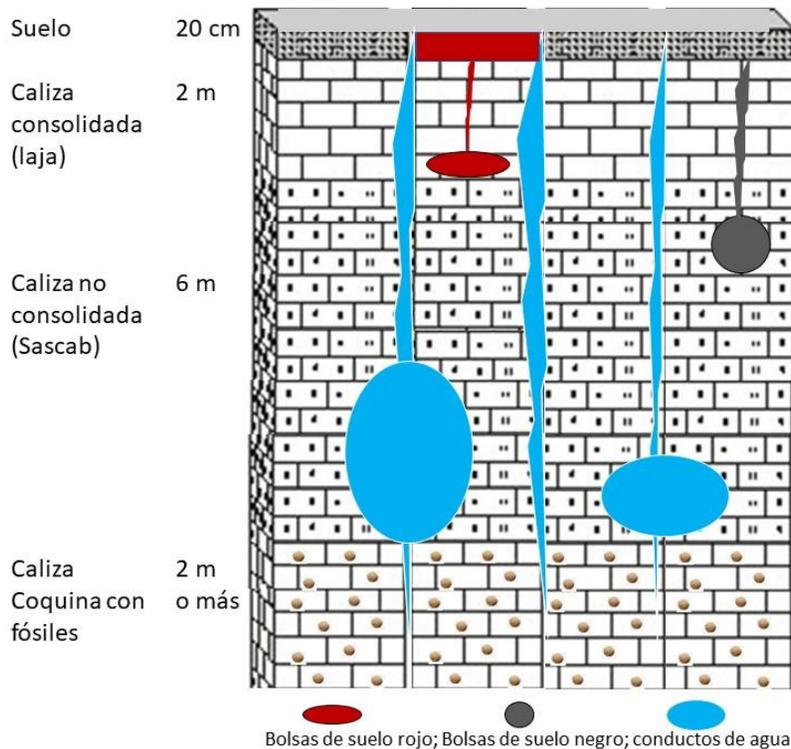


Figura 4. Perfil esquemático de los tres principales tipos de calizas; principales suelos, así como conductos y fisuras verticales y horizontales por donde se generan los flujos preferenciales del agua (Elaborado por Fco. Bautista).

Cuadro 1. Superficie, población y principales localidades por clases de riesgo a la inundación.

Riesgo	Superficie ha (%)	Población total (%)	Principales localidades presentes
Muy alto	18861 (21)	8446 (1.0)	Sierra Papacal, Xcunya, Cosgaya, Tamanché, Noc Ac, Temozón Norte, Suytunchen, San Diego Texan, Santa María Yax, San Gerardo, Misnébalam, Unidad Revolución, Las Palmas, Pequeña Australia, San Gabriel, Komchen, El Zapote, Geisy Guadalupe, Pochote, San Julián, Paraíso, Ever Green, San Lorenzo Suytunchen
Alto	22336 (25)	25250 (3)	Caucel, Cholul, Chablekal, Sitpach, Dzitya, Xcanatun, La Ceiba, Tixcacal, Chalmuch, Tixcuytun, Sac-Nicté, Dzidzilché, Cheuman, Dzibilchaltun, San Antonio Hool, Juliana, San Manuel, San José Kuche, La Ceiba dos, Las Quintas, Flamboyanes, San Isidro, El Caporal. Francisco Villa, Kikteil.
Medio	38302 (43)	794056 (95.6)	Mérida, San José Tzal, Leona Vicario, Molas, Dzununcan, San Pedro Chimay, Sta. Cruz Palomeque, Tahdzibichen, Oncan, Xmatkuil, Opichén, Susulá, San Ignacio Tesip, Sta. María Chí, Kikteil, Petac, Hunxectamán, Jardines de Tahdzibiché,
Bajo	9504 (11)	2473 (0.3)	Yaxnic, San Antonio Tzacala, Texan Cámara, Dzoyaxché, Santa Gertrudis Dos, Los Limones y otros tres innominados

El resultado principal del POET del municipio de Mérida 2006 fue una propuesta de modelo de uso del territorio para favorecer el desarrollo local, considerando la protección del patrimonio arqueológico cultural y natural, al sugerir a cada unidad del territorio unas formas de uso del suelo y

unas políticas de conservación, protección, aprovechamiento y restauración. De este modelo de uso del territorio se destaca la creación de nuevas áreas naturales protegidas (ANP's) principalmente al norte del municipio, otra en el oriente y expandir al sur la Reserva de Cuxtal. Estos nuevos polígonos propuestas

como ANP estarían asociadas al patrimonio arqueológico y cultural y su creación permitiría recuperar la calidad de las aguas subterráneas, restablecer condiciones climáticas menos extremas para la ciudad y crear un entorno de áreas verdes en torno a la ciudad que pueda servir para la convivencia social, la educación ambiental y las actividades ecoturísticas como eje del desarrollo.

En el mapa de modelo de uso territorial propuesto por el POET del Municipio de Mérida (2006), la propuesta de una ANP en la zona norte del municipio coincide claramente con las zonas más bajas del relieve, donde el acuífero está a menor profundidad; también en el mismo POET propusieron la expansión de la ANP Cuxtal, una importante Reserva Ecológica destinada a la protección de los pozos de abastecimiento de agua para la mayor parte de la población urbana.

Los instrumentos para la elaboración de una política pública en materia de planeación territorial sustentable y con disminución de riesgos por eventos hidrometeorológicos existen; sin embargo, la inacción de las autoridades competentes no permitió la protección de la población.

Además, el área urbana ha crecido en promedio alrededor de 80% respecto de la década de los 80s (Navarro-Tec *et al.*, 2018); la superficie conurbada de Mérida aumentó a un ritmo anual promedio de 4.42% en 30 años (1990-2010), mientras que la población en la misma área creció a un ritmo menor de 2.26% anual (Navarro-Tec *et al.*, 2018); y del año 2018 al año 2020 la especulación inmobiliaria viene en ascenso, más construcciones de casas al norte de la ciudad en las zonas de alto riesgo de inundación (La Rejoyada, Residencial Kántara, Residencial Dzidzil-ha, Blue Cedar, Altozano la nueva Mérida, Casas Albir, Country Club, entre otras) y en el ANP de Cuxtal al sur de la ciudad que es la zona de recarga de agua potable del acuífero, esto hace vislumbrar un futuro de la ciudad de Mérida no alentador.

Otro punto que se destacó en el POET es una gran cantidad de bancos de materiales pétreos en operación y en fase de abandono, con 731.31 ha que representa el 0.83% de la superficie municipal, sin medidas de restauración en violación a la normatividad y que son fuentes de contaminación al aflorar los mantos freáticos. Lo peor de esta situación es que algunos bancos de materiales han servido para establecer plantas de tratamientos de aguas residuales, aumentando el peligro de la contaminación, ya que en la época de lluvias las aguas residuales se mezclan con las aguas expuestas del acuífero. Esta situación se agravó este año 2020, con bancos de materiales inundados por el aumento del nivel freático y contaminados por el desbordamiento de las plantas de tratamiento de residuos (Figura 3D).

Cualquier enfoque de planeación territorial y en un contexto de sistemas complejos como los paisajes kársticos, debe contar con un grupo de trabajo transdisciplinario para situar los puntos críticos de planeación a diferentes escalas tanto espaciales como temporales, es decir, geógrafos, edafólogos e hidrólogos, biólogos y profesionales de las ciencias del ambiente. El caso de las inundaciones no son un fenómeno exclusivo ni para el campo de la ingeniería hidráulica ni únicamente para los hidrogeólogos (Savenije, 2009), la prevención de los riesgos está en el ámbito de la planeación.

CONCLUSIONES

En el norte del municipio de Mérida se localizan zonas bajas con menos de 7 m de distancia del manto freático a la superficie por lo que se recomienda no sea utilizada para el crecimiento urbano ya que es de alto a muy alto riesgo de inundaciones por ascenso del agua del manto freático ante el paso de huracanes y tormentas.

El mapa de las clases de riesgo de inundación no es de tipo predictivo ya que cuenta con la comprobación y verificación de campo. Dicho mapa puede servir de base para la justificación para los decretos oficiales de las zonas propuestas como áreas naturales protegidas y su integración con la gestión de la red de parques ecoarqueológicos que contribuyen a proteger el patrimonio biocultural de la entidad.

Funding. DGAPA - Universidad Nacional Autónoma de México. Project: "Generación de modelos de evaluación ambiental de perfiles de suelos en zonas volcánicas y kársticas", Number: N209218.

Conflict of interest: None

Compliance with ethical standards. The research presents original data that have not been submitted to other journals at the same time.

Data availability. Data are available from the corresponding author (leptosol@ciga.unam.mx) upon reasonable request.

REFERENCIAS

- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M.E., Frausto, O., Ihl, T. 2016. Density of karst depressions in Yucatán state, Mexico: *Journal of Cave and Karst Studies*, 78(2), 51–60. <https://doi.org/10.4311/2015ES0124>
- Al Kazimi, A., Mackenzie, C. A. 2016. *The Economic Costs of Natural Disasters, Terrorist Attacks, and Other Calamities: An Analysis of*

- Economic Models that Quantify the Losses Caused by Disruptions. IEEE Systems and Information Engineering Design Conference (SIEDS '16).
- Appendini, C.M., Meza-Padilla, R., Abud-Russell, S., Proust, S., Barrios, R.E., Secaira-Fajardo, F. 2019. Effect of climate change over landfalling hurricanes at the Yucatan Peninsula. In *Climatic Change*; Springer. Berlin/Heidelberg, Germany.
- Ayuntamiento de Mérida. 2018. Atlas de riesgos del municipio de Mérida, Yucatán. Escenarios futuros ante el cambio climático. Ayuntamiento de Mérida 2015-2018-Protección Civil. Disponible en: <http://www.merida.gob.mx/municipio/portal/pcivil/archivos/AtlasDeRiesgosMerida.pdf>
- Bautista, F., Frausto, O., Ihl, T., Aguilar, Y. 2015. Actualización del mapa de suelos de Yucatán utilizando un enfoque geomorfo-pedológico y WRB. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2, 303-315.
- Bautista, F., Aguilar, Y., Batllori, E. 2011. Amenazas, vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la Península de Yucatán. *Teoría y Praxis*, 9, 9-31.
- Bojórquez-Urzaiz, C. 2020. Histórico e inédito crecimiento del manto freático de Mérida. Informe Fracto, [en línea] 10 de octubre. Disponible en: <https://informefracto.com/editorial/historico-e-inedito-crecimiento-del-manto-friatico-de-merida/> [acceso 20 de octubre de 2020]
- CCPY (Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán). 2020. *Foro: Reflexiones sobre las lluvias atípicas del 2020 y sus impactos* [Facebook] 19 de noviembre. Disponible en: https://www.facebook.com/watch/live/?v=288340392517953&ref=watch_permalink [Acceso 20 de noviembre].
- CONAGUA. 2016. Reporte del Clima en México. CONAGUA, México. <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/diagnostico-climatico/reporte-del-clima-en-mexico>
- CONAGUA. 2017. Reporte del Clima en México. CONAGUA, México. <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/diagnostico-climatico/reporte-del-clima-en-mexico>
- CONAGUA. 2020. Reporte del Clima en México. CONAGUA, México
- CONAGUA-SEMARNAT. 2012. Programa Hídrico Regional Visión 2030, Región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/12-sgp-17-12py.pdf>
- Dangendorf, S., Hay, C., Calafat, F.M., Marcos, M., Piecuch, C., Berk, K., Jensen, J. 2019. Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. *Nat. Clim. Chang*, 9, 705–710. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0531-8>.
- Dávila, P. R. A., León, H. 2011. Importancia de la hidrogeología urbana; ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63, 463-477.
- Delgado, C., Bautista, F., Orellana-Lanza, R., Reyes-Hernández, H. 2011. Classification and agroclimatic zoning using the relationship between precipitation and evapotranspiration in the state of Yucatan, Mexico. *Investigaciones Geográficas*, 75, 51-60.
- Delgado, C., Bautista, F., Ihl, T., Palma-López, D. 2017. Evaluación de la aptitud de tierras para la agricultura de temporal usando la duración del periodo de lluvia en el estado de Yucatán. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(12), 485-497.
- Eco-Yucatán, 2020. *Desborda planta de aguas residuales de Cielo Alto*. [Facebook] 21 de Julio, disponible en: [https://www.facebook.com/ECOentuciudad/posts/1610580835784698?__xts__\[0\]=68.ARCrSC_t7-qc7SxxthgbEbIDdd5h_c8KgzcKraRBmJZnwTI2PKsA1xIVyyfurNoCooqdv-qigqa6fvWSlAcSuUFGy7lyrWpYPqPMXwoZpVeSQNtvUsMGwn0lWhJWt0rSOEpmMwWet2vLBBspSBeAYv_U0NYJhxGz5u7QYc0xjqF8KgOBV4Bub7fUec0S8GHqLKzaNIh6XEIqZXwutno5FoR-owvd9Ej9LZeWzS4ABBD65aaXunsQf_Mr000UASzxfVmiKYBZYXk8P_oP-NXCR2LFkFSk89iPNzbrRWvcyK9n3lUmFS1iVmA3avKHezYjwYFVXYyMHwBya7hLHqKhzvcVQ&__tn__=-R](https://www.facebook.com/ECOentuciudad/posts/1610580835784698?__xts__[0]=68.ARCrSC_t7-qc7SxxthgbEbIDdd5h_c8KgzcKraRBmJZnwTI2PKsA1xIVyyfurNoCooqdv-qigqa6fvWSlAcSuUFGy7lyrWpYPqPMXwoZpVeSQNtvUsMGwn0lWhJWt0rSOEpmMwWet2vLBBspSBeAYv_U0NYJhxGz5u7QYc0xjqF8KgOBV4Bub7fUec0S8GHqLKzaNIh6XEIqZXwutno5FoR-owvd9Ej9LZeWzS4ABBD65aaXunsQf_Mr000UASzxfVmiKYBZYXk8P_oP-NXCR2LFkFSk89iPNzbrRWvcyK9n3lUmFS1iVmA3avKHezYjwYFVXYyMHwBya7hLHqKhzvcVQ&__tn__=-R) [Acceso 30 de julio de 2020]
- Escalante, H. 2020. Inundada zona arqueológica de Dzibilchaltún en Yucatán: Fotos. *El Heraldo de México*, [en línea] 17 de octubre. Disponible en: <https://heraldodemexico.com.mx/nacional/2020/10/17/inundada-zona-arqueologica-de-dzibilchaltun-en-yucatan-fotos-215985.html> [acceso 20 de octubre de 2020]

- Flores, J.S, Espejel, I. 1994. Etnoflora yucatanense: Tipos de vegetación de la península de Yucatán. Fascículo 3. Ed. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México. 135 pp.
- Fragoso-Servón, P., Bautista, F., Frausto, O., Pereira, A. 2014. Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1:50000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 31(1), 127-137.
<http://www.scielo.org.mx/pdf/rmcg/v31n1/v31n1a10.pdf>
- González-Herrera, R., Sánchez, I., Gamboa-Vargas, J. 2002. Groundwater-flow modeling in the Yucatan Karstic Aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 10, 539-552.
- González, R., Vadillo, I., Rodríguez, R., Carrasco, F. 2004. Sistema redox en un acuífero carbonatado afectado por lixiviados de basureros. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 4, 71-79.
- Hafsi, A., Aguilar-Becerra, C.D., Frausto, O. 2020. Sistema de alerta temprana basado en la comunidad ante fenómenos hidrometeorológico en localidades situadas en barras de litoral costera. En *Sistema de alerta temprana ante fenómenos hidrometeorológicos extremos en México*. Frausto, O., Morales, J.C., Aguilar, C.D. (Coordinadores). Ciudad de México. REDESCLIM-CONACYT. 29-53 pp.
- Hallegatte, S., Bangalore, M., Bonzanigo, L., Fay, M., Kane, T., Narloch, U. 2016. *Shock Waves: Managing the Impacts of Climate Change on Poverty*. Climate Change and Development. Washington, DC: World Bank. © World Bank. Recuperado en: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/22787>.
- Hernández-Aguilar, M.L., López-Montejo., G.D. 2020. Atlas de riesgos como instrumentos de sistemas de alerta tempranas. En *Sistema de alerta temprana ante fenómenos hidrometeorológicos extremos en México*. Frausto, O., Morales, J.C., Aguilar, C.D. (Coordinadores). Ciudad de México. REDESCLIM-CONACYT. 87-105 pp.
- Herrera, J., Comín, F. 2000. An introductory account of types of aquatic ecosystems of Yucatan Peninsula (SE México), en Munawar M., S. Lawrence, I. y D. Malley (ed.). *Aquatic ecosystems of Mexico*. Status and scope. The Netherlands: Backhuys Publishers, 213-227.
- Ihl, T., Frausto, O., Rojas, J., Giese, S., Goldacker, S., Bautista, F., Bocco, G. 2007. Identification of geodisasters in the state of Yucatan, Mexico. *Neues Jahrbuchfür Geologie und Paläontologie*, 246, 299-311.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1983. Carta geológica 1:250000. Secretaría de Programación y Presupuesto. México D.F.
- INEGI, 2013. Continuo de elevaciones mexicano 3.0. Obtenido de Obtenido de: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacion/mex/>
- INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010. Principales resultados por localidad. Obtenido de: <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/Localidad.aspx?ent=31&mun=050>
- Ligorred Perramon, J., Paredes, B. 2021. La conservación del patrimonio arquitectónico maya en contextos urbanos. Propuesta de una red de parques arqueológicos en Mérida Yucatán. Editorial Restauo Compás y Canto. En línea. Acceso: 01 de enero del 2021. https://editorialrestauro.com.mx/ligorred-perramon_paredes-guerrero2021/
- Ligorred Perramon, J., Ventura M. 2008. Manual de buenas prácticas en cenotes y pozos comunitarios de Mérida. Ayuntamiento de Mérida, Dirección de Desarrollo Urbano, Mérida Yucatán México. Disponible en: http://isla.merida.gob.mx/serviciosInternet/wsSIDU/descargas/normatividad/manual_cenotes_pozos.pdf
- Metcalfe, S.E., Schmoock, B., Boyd, D.S., De la Barreda-Bautista, B., Endfield, G.E., Mardero, S., Manzón, M., Medina, R., Munguia M.T., Navarro, S., Perea, A. 2020. Community perception, adaptation and resilience to extreme weather in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Reg Environ Change*, 20, 25. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01586-w>
- Navarro-Tec S., Orozco, M.G., Valdiviezo-Navarro, J. C., Ordaz, D., Moreno, M., Bermejo, C. 2018. Análisis del crecimiento urbano y su relación con el incremento de temperaturas en la ciudad de Mérida utilizando imágenes satelitales. *Research in Computing Science*, 147 (7), 285-294.
- Orellana, R., Balam, M., Bañuelos, I. 1999. Balance Ombrotérmico. Evaluación Climática. En: García de F A, Córdoba y OJ, Chico P de L P (eds.) *Atlas de procesos territoriales en*

- Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán México. pp. 282-293.
- Pacheco, J., Calderón, L., Cabrera, A. 2004. Delineación de la zona de protección hidrogeológica para el campo de pozos de la planta Mérida I, en la ciudad de Mérida, Yucatán, México. *Ingeniería*, 8(1), 7-16.
- Perry, E., Marin, L., McClain, J., Velazquez, G. 1995. Ring of Cenotes (sinkholes), northwest Yucatan, Mexico: Its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub impact crater. *Geology*, 23, 17-20.
- Palacio, A., Noriega, R., Zamora, P. 2002. Caracterización físico-geográfica del paisaje conocido como "bajos inundables": El caso del Área Natural Protegida Balamkín, Campeche. *Investigaciones Geográficas*, 49, 57-73.
- Palacio, G., Medina, V., Bautista, F., 2005. Diagnóstico ambiental de la costa del estado de Campeche: enfoque geomorfológico, pedológico y geopedológico. In: Bautista, F., Palacio, G. (Eds.), *Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán*, UACAM-UADY-INE, México D.F., México. pp. 59-72.
- Plomaritis, T. A., Ferreira, Ó., Costas, S. 2018. Regional assessment of storm related overwash and breaching hazards on coastal barriers. *Coastal Engineering*, 134, 124-133. doi: 10.1016/j.coastaleng.2017.09.003
- Programa de Desarrollo Urbano del Municipio de Mérida. 2012. En *Diario Oficial del Gobierno del estado de Yucatán* 27 de julio de 2012. No. 32, 157.
- Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial del Municipio de Mérida. 2006. Ayuntamiento de Mérida. <https://bitacoraordenamiento.yucatan.gob.mx/documentos/index.php?IdOrdenamiento=7#>
- Querejeta, J.I., Estrada-Medina, H., Allen, M.F., Jiménez-Osornio, J.J. 2007. Water source partitioning among trees growing on shallow karst soils in a seasonally dry tropical climate. *Oecologia*, 52:26-36. DOI 10.1007/s00442-006-0629-3
- Ramos-Reyes, R., Zavala-Cruz, J., Gama-Campillo, L. M., Pech-Pool, D., Ortiz-Pérez, M. A. 2016. Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 581-598.
- Savenije, H. H. G. 2009. The art of hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 157-161.
- Sandoval, I., Heredia, J.D. 2018. Caracterización físicoquímica y direcciones de flujo del agua subterránea en la zona noroeste de la península de Yucatán. *Realidad, datos y espacio revista internacional de estadística y geografía*. 9(2), 29-37.
- Servicio Mareográfico Nacional. 2020. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. URL: <http://www.mareografico.unam.mx/portal/index.php?page=reportes>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2020. Balance de las tormentas tropicales Amanda y Cristobal. Comunicado de prensa No. 444-20 con fecha 10 de junio de 2020. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/files/pdfs/comunicados-de-prensa/Comunicado444-20.pdf>
- Spencer, N., Strobl, E. 2020. Hurricanes, climate change, and social welfare: evidence from the Caribbean. *Climatic Change* (2020). <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02810-6>
- Suárez, E., Rivera, E. 2000. "The aquatic fauna of karstic environments in the Yucatan Peninsula, Mexico: an updated overview", en Munawar M., Lawrence, Malley, S. y D. (ed.). *Aquatic ecosystems of Mexico. Status and scope*. The Netherlands: Backhuys Publishers, 151-164.
- UNISDR (Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres). 2009. Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres de las Naciones Unidas. Ginebra, Suiza.
- Woodward, A. J., Samet, J. M. 2018. Climate Change, Hurricanes, and Health. *American journal of public health*, 108(1), 33-35. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2017.304197>
- Zetina-Moguel, C. E., Sánchez, I., González-Herrera, R., Osorio-Rodríguez, J. H., Barceló-Quintal, I. D., Méndez-Novelo, R. I. 2018. Modelación estocástica del nivel freático en pozos de la ciudad de Mérida, Yucatán, México. *Ingeniería*, 22, 25-35. 2, <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/96>.