



ANATOMÍA DE UN CENOTE CON EL USO DE DRON †

[ANATOMY OF A CENOTE WITH USE OF DRON]

Neftaly Gijón-Yescas¹, Yameli Aguilar-Duarte^{*2}, Oscar Frausto-Martínez³
and Francisco Bautista-Zuñiga⁴

¹Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.
Carretera Mérida-Xmatkuil, Km. 15.5, Mérida, Yucatán, México. C.P. 97100.
Email:neftally@gmail.com

²Centro de Investigación Regional Sureste (CIRSE) del Instituto Nacional de
Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Av. Correa Rachó por
calle 15, Col. Díaz Ordaz, Mérida, Yucatán, México. C.P. 97130. Email:
yaguilarduarte@gmail.com

³Universidad de Quintana Roo, Boulevard Bahía s/n Col. del Bosque, Chetumal,
Quintana Roo, México. C.P. 77019. Email: fraustomartinezoscar@gmail.com

⁴Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional
Autónoma de México, Antigua carretera a Pátzcuaro, Col. Ex Hacienda de San José
de la Huerta, Morelia, Michoacán, México. C.P. 58190. Email:fbzuniga@gmail.com

^{*}Corresponding author

SUMMARY

Background: Detailed geomorphological analysis of the karst depressions in Yucatán has received little attention because the measurement of morphometric parameters taken in the field involves a lot of work, time and costs. A pioneering exercise is presented that arose with two questions. What would be the characteristics of the relief that can be observed and / or measured in a cenote through images acquired with a drone? Would they be features similar to those seen with Google Earth images? **Objective:** To identify the units of the relief and morphometry of a cenote using images from two different platforms. **Methodology:** An open cenote located in the municipality of Chapab, Yucatán, was studied. A flight was carried out with a drone obtaining 259 images in 14 minutes, with which an orthomosaic, a digital elevation model and a point cloud were generated. We proceeded to the analysis of the data of the visible range (RGB), work with filters in ArcMap; the same spatial analysis procedure was performed with an image from Google Earth. **Results:** Nine units of the relief were identified in detail (permanent lake, intermittent lake, an area subject to flooding, beach, mouth, flooded slope, upper slope, scarp and lake coast); the differences between inputs are mainly in the morphometric parameters and in the values of the elevations. **Implications:** Drones facilitate imaging that allows detailed characterization of karst depressions to represent attributes that cannot be expressed on small scales. **Conclusion:** The anatomy of the Polol cenote technically corresponds to a sinkhole that houses a karst lake; nine relief units were identified that reveal limnological processes generating a karst-lacustrine environment that leads to the geomorphological enrichment of this region.

Keywords: aguada; doline; RGB; Structure from Motion; Yucatan; Google Earth.

RESUMEN

Antecedentes: El análisis geomorfológico detallado de las depresiones kársticas en Yucatán ha recibido poca atención debido a que la medición de los parámetros morfométricos tomados en campo implica mucho trabajo, tiempo y costos. Se presenta un ejercicio pionero que surgió con dos preguntas ¿Cuáles serían las características del relieve que se pueden observar y/o medir en un cenote mediante imágenes adquiridas con dron? ¿Serían características similares a las observadas con imágenes de Google Earth? **Objetivo:** Identificar unidades del relieve y parámetros morfométricos de un cenote usando imágenes de dos diferentes plataformas. **Metodología:** Se estudió un cenote abierto ubicado en el municipio de Chapab, Yucatán. Se realizó un vuelo con un dron obteniendo 259 imágenes en 14 minutos con lo cual se generó un ortomosaico, un modelo digital de elevación y una nube de puntos. Se procedió al análisis de los datos del rango visible (RGB), trabajo con filtros en ArcMap; el mismo procedimiento de análisis espacial se realizó con una imagen de Google Earth. **Resultados:** Se identificaron a detalle nueve unidades del relieve (lago permanente, lago intermitente, zona sujeta a inundación, playa, boca, ladera inundada, ladera superior, escarpa y litoral lacustre); las diferencias entre insumos están principalmente en los parámetros morfométricos y en los valores de las elevaciones. **Implicaciones:** Los drones facilitan la obtención de imágenes que permiten la caracterización detallada de las

† Submitted July 28, 2020 – Accepted December 22, 2020. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.
ISSN: 1870-0462.

depresiones kársticas para representar atributos que no se pueden expresar a escalas pequeñas. **Conclusión:** La anatomía del cenote Polol técnicamente corresponde a una dolina que alberga un lago kárstico; las unidades del relieve revelan procesos limnológicos generando un ambiente kárstico-lacustre que conlleva al enriquecimiento geomorfológico de esta región.

Palabras clave: aguada; dolina; RGB; estructura del movimiento; Yucatán; Google Earth.

INTRODUCCIÓN

Uno de los rasgos característicos de la región peninsular yucateca, son los cenotes. El término “cenote” (del maya “dzonot” o ts’onot) (Beddows *et al.*, 2007) es un término regional que se ha utilizado para designar a las depresiones u oquedades naturales originadas en las rocas y que contienen agua ya sea permanente o temporalmente; los cenotes son geoformas resultado de la disolución y colapso de las rocas solubles como la caliza, proceso conocido como karstificación en el ámbito de las geociencias (Waltham, Bell y Culshaw, 2005).

Entre los primeros estudios fisiográficos del karst yucateco destacan los reportados a principios del siglo XX. Cole (1910) reportó un diagrama esquemático donde ejemplifica la diversidad de depresiones kársticas, su distribución de acuerdo a las elevaciones y su interacción con las aguas subterráneas. Pearse, Creaser, Hall, and Hubbs, (1936) reconocen de manera general cinco tipos de cenotes de acuerdo a su morfología considerando atributos cualitativos como el tamaño de la apertura de la depresión que conduce a las aguas subterráneas y la interacción con la luz solar, siendo uno de ellos el “cenote abierto” o “aguada”, una depresión que se caracteriza por tener pendientes ligeramente inclinadas albergando un cuerpo de agua expuesto en la superficie. De acuerdo a Gutierrez *et al.*, (2007) las aguadas de la región no son muy profundas, teniendo como máximo alrededor de 20 m de profundidad.

Así mismo, limnológicamente el término “cenote” ha sido reconocido dentro de las clasificaciones de los lagos por su origen disolutivo sobre la roca soluble (Schmitter-Soto *et al.*, 2002). De acuerdo a Valero-Garcés *et al.*, (2014) los lagos ocurren en casi todos los contextos geográficos, geológicos y climáticos donde los factores geomorfológicos permiten la creación de un espacio de alojamiento (cuenca) y el equilibrio hidrológico es adecuado para acumular agua.

Por otra parte, en zonas predominantemente de planicies como Yucatán, el análisis de formas del relieve de baja altitud es un desafío en la disciplina geomorfológica (Denizman, 2003; Fragoso-Servón *et al.*, 2015; Frausto y Ihl, 2008; Colín Olivares, Frausto Martínez y Rodríguez Castillo, 2019). El relieve de Yucatán se ha caracterizado a una escala de resolución 1:50,000 donde la información de las curvas de nivel está a 10 metros y ha permitido el reconocimiento planimétrico de tres tipos básicos de depresiones

(dolinas, úvalas y poljes); donde las dolinas son en número las dominantes y están distribuidas principalmente en las planicies (Aguilar *et al.*, 2016).

Las dolinas pueden presentar procesos de inundación permanente y temporal, así como pueden estar en contacto con el acuífero; en algunos casos desarrollan procesos limnológicos que generan relieves complejos requiriendo una caracterización geomorfológica más fina, no obstante, estos procesos no son posibles representarlos a una escala 1:50,000, por lo que es necesario realizar estudios morfométricos detallados (Bondesan, Meneghel y Sauro, 1992). Los estudios morfométricos en dolinas se han realizado de forma tradicional utilizando mapas topográficos de baja resolución y fotografías aéreas generando modelos digitales de elevación (MDE) con resolución y precisión insuficientes (Wu, Deng y Chen, 2016). Asimismo, el trabajo de campo es una alternativa para la obtención de datos precisos sin embargo, su realización es costosa y requiere de mucho tiempo (Basso *et al.*, 2013).

La disponibilidad de los vehículos aéreos no tripulados o drones equipados con diferentes sensores y el desarrollo de la técnica Structure from Motion (SfM) han permitido que las técnicas fotogramétricas se utilicen en aplicaciones geomorfológicas con las ventajas de su bajo costo (comparado con otros métodos) y una alta resolución espacial y temporal (Shintani y Fonstad, 2017; Kasvi *et al.*, 2019). El uso de drones y la técnica SfM en estudios morfométricos ha permitido mejorar aún más la precisión y la velocidad de los levantamientos topográficos (Fernández de Castro Martínez *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2017).

El uso de drones en estudios geomorfológicos sobre el karst aún no ha sido utilizado de manera amplia comparado con herramientas como los datos convencionales de satélite y la tecnología Light Detection and Ranging (LiDAR) (Silva *et al.*, 2017; Telbisz *et al.*, 2016). Entre los pocos estudios realizados con dron en zonas kársticas está el reportado por Silva *et al.*, (2017) quienes utilizaron un MDE de alta resolución generado con LiDAR y ortofotos adquiridas con dron para analizar la morfología kárstica y su relación con el sistema de fracturas en la Cuenca Potiguar, Brasil. Sus principales resultados indican que al menos cuatro grados principales de evolución kárstica controlada por fracturas y lechos sedimentarios fueron encontrados en la Cuenca Potiguar.

Ramsey, Griffiths and Stokes, (2014) examinaron el potencial de las imágenes obtenidas con dron para mapear, documentar y monitorear cambios del paisaje kárstico generados por las actividades silvícolas en la selva costera al norte de la isla de Vancouver, Canadá. Los autores concluyen que los drones equipados con cámaras digitales de alta resolución son una herramienta prometedora y rentable para científicos y gestores del karst.

Oliveira *et al.*, (2019) acoplaron los datos obtenidos con dron y observaciones en campo para analizar las propiedades geométricas y la distribución espacial de dolinas en la costa rocosa central de Algarve al sur de Portugal. Los autores demuestran que el uso de drones permite una descripción morfométrica precisa, rápida y de bajo costo de las dolinas kársticas. Asimismo, agregan que no encontraron estudios previos de análisis morfométricos de relieves kársticos realizados con dron en esta zona.

Se reconoce que existe una gran oportunidad para aplicar esta tecnología en paisajes kársticos (Silva *et al.*, 2017; Telbisz *et al.*, 2016) principalmente cuando los recursos económicos son limitados. El presente trabajo presenta un ejercicio pionero de carácter

exploratorio, que surgió con dos preguntas básicas: ¿Cuáles serían las características del relieve que se pueden observar y/o medir en un cenote abierto (aguada) mediante imágenes adquiridas con dron? ¿Serían características similares a las observadas con imágenes de Google Earth? Por lo tanto, el objetivo de este ejercicio fue la identificación de unidades del relieve y parámetros morfométricos de un “cenote abierto”, usando imágenes de dos diferentes plataformas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El área de estudio es un “cenote abierto”, también conocido como “aguada” denominada “Polol”. Técnicamente corresponde a una dolina que alberga un cuerpo de agua, ubicada en el municipio de Chapab, en la zona occidental del estado de Yucatán dentro del sistema del Anillo de Cenotes, en los límites con la Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes. Esta región es parte de la planicie kárstica con variaciones entre 10 a 20 ms.n.m. (Ihl *et al.*, 2007), donde predomina la actividad agrícola de temporal (Figura 1).

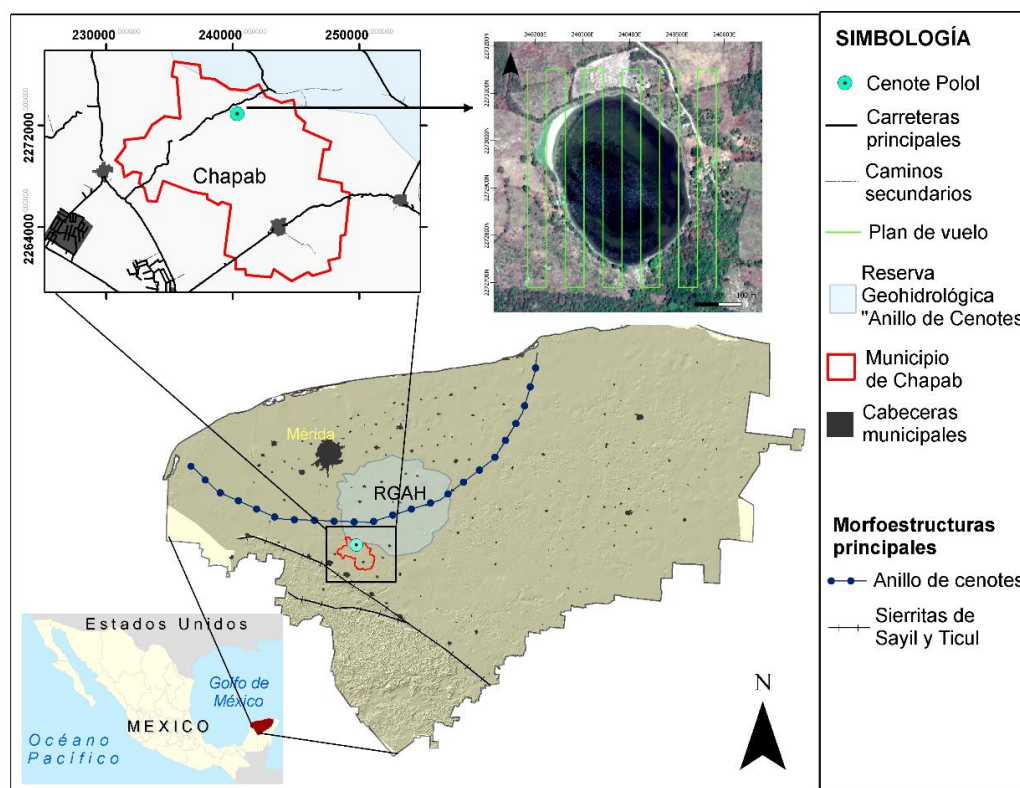


Figura 1. Área de estudio dentro del contexto estatal y municipal. En el ángulo superior derecho se presenta el plan de vuelo realizado para la zona de estudio.

La geología corresponde al Eoceno Medio del Miembro Pisté, conformado por calizas blancas o amarillentas a menudo masivas. La microfauna es abundante y está representada por numerosos foraminíferos y por algas calcáreas (López-Ramos, 1973). Los suelos son asociaciones de Leptosoles y Cambisoles (Bautista *et al.*, 2015). El clima es cálido subhúmedo y puede presentar una estación lluviosa de seis a siete meses según Delgado *et al.*, (2017).

Obtención y procesamiento de imágenes

El trabajo de gabinete inició con un reconocimiento virtual del área a volar usando Google Earth v7.3 (GE) para identificar posibles obstáculos y lograr una captura de datos exitosa. Con esta actividad es posible detectar peligros que pueden interferir con el vuelo del dron, como la altura variable de los árboles o torres de alta tensión (Duffy *et al.*, 2017).

Las imágenes aéreas del cenote se adquirieron a través de un dron DJI Phantom 3 Standard (DJI, Shenzhen, China). Los planes de vuelo autónomos para adquirir las imágenes aéreas se diseñaron usando la plataforma web DroneDeploy (DroneDeploy, Inc., E.U.). Los parámetros de vuelo fueron: altura (80 m), área (20 ha), traslape lateral (60%) y traslape frontal (70%). Una vez definidos los parámetros de vuelo, el sistema generó una serie de transectos que el dron recorrió en campo de forma autónoma (Figura 1).

El plan de vuelo autónomo se diseñó con la aplicación DroneDeploy a través de un dispositivo iPhone (sistema operativo iOS). La aplicación DroneDeploy se activó y sincronizó con el dron para realizar el vuelo autónomo y captura de las imágenes sobre el área especificada. El vuelo en campo se realizó el 10 de septiembre del 2016 con una duración aproximada de 14 minutos.

Las imágenes capturadas se subieron a la plataforma DroneDeploy para su procesamiento fotogramétrico en línea con la técnica SfM. Dentro de los productos generados se obtuvo el ortomosaico (resolución de 3.2 cm/px), el MDE (resolución 6.4 cm/px) y la nube de puntos; todos con proyección WGS84/UTM zona 16N. Tanto la imagen como la nube de puntos se procesaron en ArcGIS 10.4, donde se manipularon los datos del rango visible (RGB) y trabajo con filtros en ArcMap para la clasificación de rasters, isoclusters y contornos para la identificación de la elevación, pendiente, número de retornos y el contorno. Adicionalmente se trabajó con una imagen de GE con fecha del 4 de mayo del 2016 siguiendo el mismo procedimiento.

Posteriormente, se procedió a la diferenciación de las unidades del relieve y análisis comparativo de las imágenes. La diferenciación se realizó con base en la propuesta de Peña Monné, (1997) , De Pedraza

Gilsanz, (1996) y Frausto e Ihl, (2008), basado en los elementos y unidades del relieve así como en los cambios del paisaje a escala detallada (Figura 2).

Los indicadores morfométricos calculados fueron (Bondesan, Meneghelly Sauro, 1992): a) perímetro; b) superficie; c) longitud máxima (LMax) que es la medida entre los puntos más distantes; d) ancho máximo (WMax) definida como la línea recta entre cotas extremas perpendicular al LMax, pero no necesariamente cruza el punto más profundo de la depresión; e) compacidad, comparación entre la longitud del perímetro con la circunferencia de un círculo con igual superficie que la geoforma y f) circularidad, compara el área de la geoforma con el área de un círculo cuya circunferencia es igual al perímetro de la geoforma.

Finalmente, para comparar la resolución altimétrica obtenida con el MDE de GE *versus* con las imágenes adquiridas con dron y procesadas con SfM se generaron dos transectos, uno longitudinal y otro transversal. Para generar los perfiles sobre el MDE obtenido con SfM se utilizó el software QGIS 3.10.6 y el *plug-in* "Profile tool". Para obtener las elevaciones con GE, los perfiles se importaron al software Global Mapper 20 y con las herramientas "Digitizer tool" y la opción "Analysis/Measurement" se obtuvieron los datos del MDE del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) v3 con una resolución de 30 m.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Unidades del relieve

Con los parámetros especificados en el plan de vuelo, se capturaron 259 fotografías para formar el ortomosaico (Figura 3A) con una resolución de 3.2 cm/px. La imagen de GE analizada tiene una resolución aproximada de 1 m (Zhu y Li 2013) (Figura 3B).

Tanto en la imagen de GE (Figura 4) como en el ortomosaico de SfM (Figura 5), se pudieron identificar unidades del relieve de la geoforma que revelan un desarrollo kárstico-lacustre: lago permanente, lago intermitente, zona sujeta a inundación, playa, boca, ladera inundada, ladera superior, escarpa y el litoral lacustre (De Pedraza, 1996; Valero-Garcés *et al.*, 2014). Sin embargo, el litoral lacustre solo se identificó en la imagen obtenida con el dron.

La "boca" corresponde al centro de la dolina que se establece comúnmente en la intersección de dos o más fracturas. La "escarpa" se observa como un desnivel en el terreno que delimita dos superficies más o menos planas, formadas por el proceso disolutivo-erosivo. La "ladera" se ve como una porción de terreno inclinada (pendiente promedio de 16%), lo que nos permite

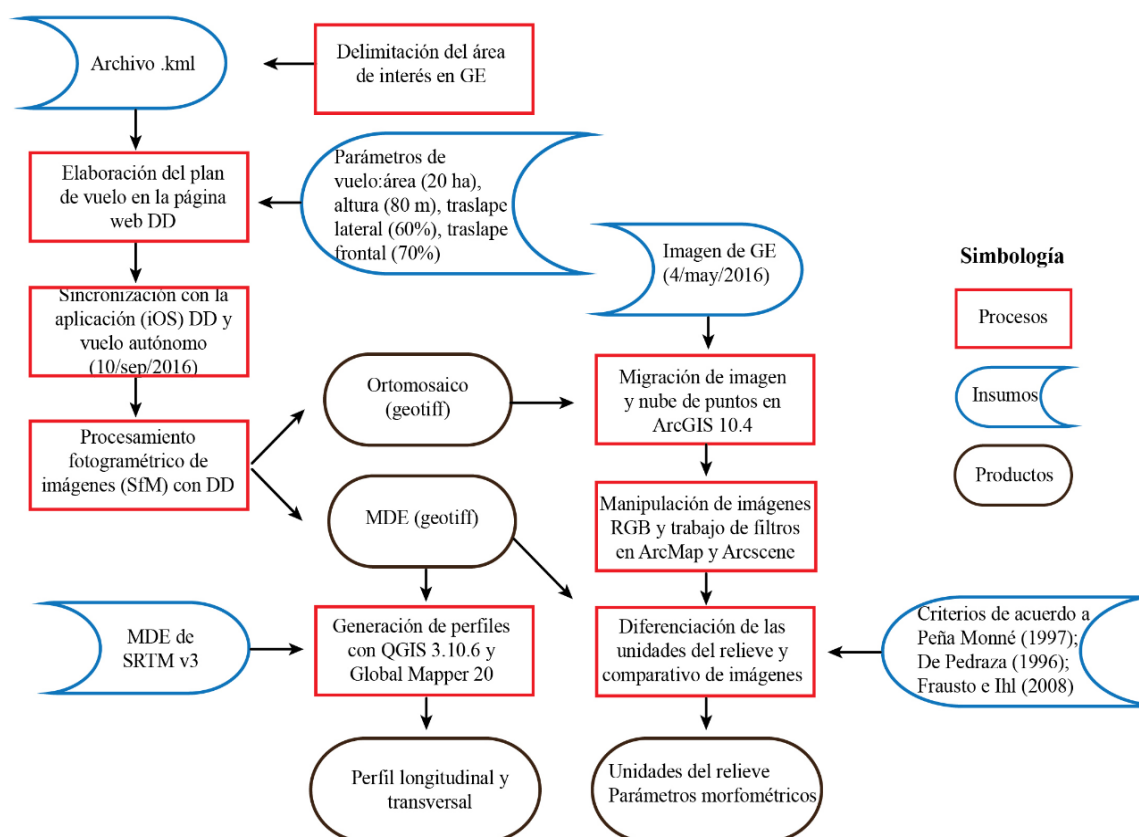


Figura 2. Diagrama metodológico general. DD: DroneDeploy; GE: Google Earth; SfM: Structure from Motion, SRTM: Shuttle Radar Topography Mission.

identificar dos tipos, por su posición como "ladera superior" y por el proceso de inundación como "ladera inundada". La diferencia entre la escarpa y la ladera está en función de la geometría de los elementos -que aun siendo mínimos en altura-, se evidencia el cambio en la pendiente.

Los "lagos" son cuerpos de agua que ocupan una depresión en la tierra firme, sin comunicación directa con el mar, ocurren en casi todos los contextos geográficos, geológicos y climáticos donde los factores geomórficos permiten la creación de un espacio de alojamiento (cuenca) y el equilibrio hidrológico es adecuado para acumular agua (Valero-Garcés *et al.*, 2014). En el lecho de rocas carbonatadas y evaporíticas, los procesos kársticos como la disolución y el colapso son muy efectivos para crear patrones de drenaje centrípeto y depresiones para el desarrollo de lagos (Valero-Garcés *et al.*, 2014).

Los lagos se clasifican según el origen de la cuenca o cuerpo receptor en la que se encuentran. Hutchinson, (1957) permite establecer 12 tipos de lagos en los que se encuentran los lagos de disolución, situados en zonas deprimidas debidas a la disolución o colapso en

materiales karstificables como las calizas; en este caso aplica para un lago kárstico en una dolina. Se observan dos áreas claramente definidas: primero el "lago permanente" con tonos más azules, lo que indica un suministro continuo de agua y coincide con la boca de la dolina. Luego tenemos el "lago intermitente" con una influencia temporal del agua.

Este tipo de lagos suelen tener algún grado de conexión con los acuíferos, característica que los hacen sistemas muy sensibles a los equilibrios hidrológicos regionales, experimentando fluctuaciones en los niveles del lago, como ocurren en lagos kársticos de otras regiones (Valero-Garcés *et al.*, 2014).

La unidad "litoral lacustre" agrupa las zonas de aguas poco profundas alrededor de los márgenes del lago afectados por las olas. La "playa" se observa como una superficie más o menos plana, adyacente -en este caso- al lecho del lago con evidencia de mayores procesos de sedimentación. La "zona sujeta a inundaciones" se define como la superficie que es inundada durante eventos hidrometeorológicos extraordinarios, tales como fuertes lluvias, tormentas y huracanes.

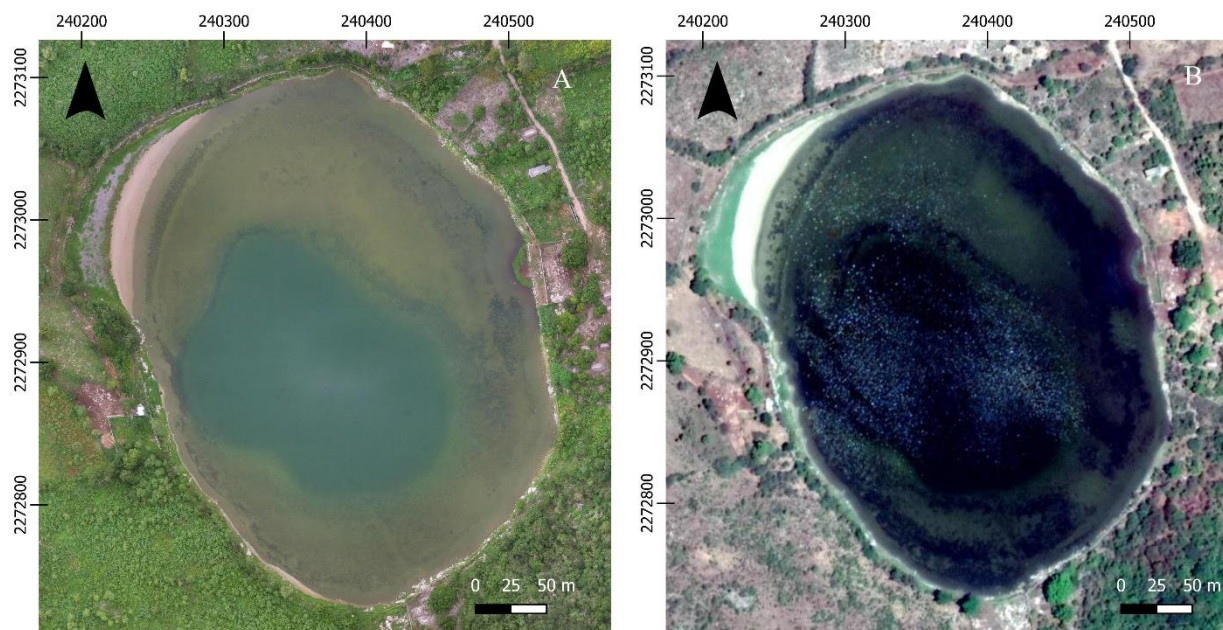


Figura 3. A) Ortomosaico obtenido con 259 imágenes de dron y procesado con la técnica Structure from Motion ; B) Imagen obtenida de Google Earth.

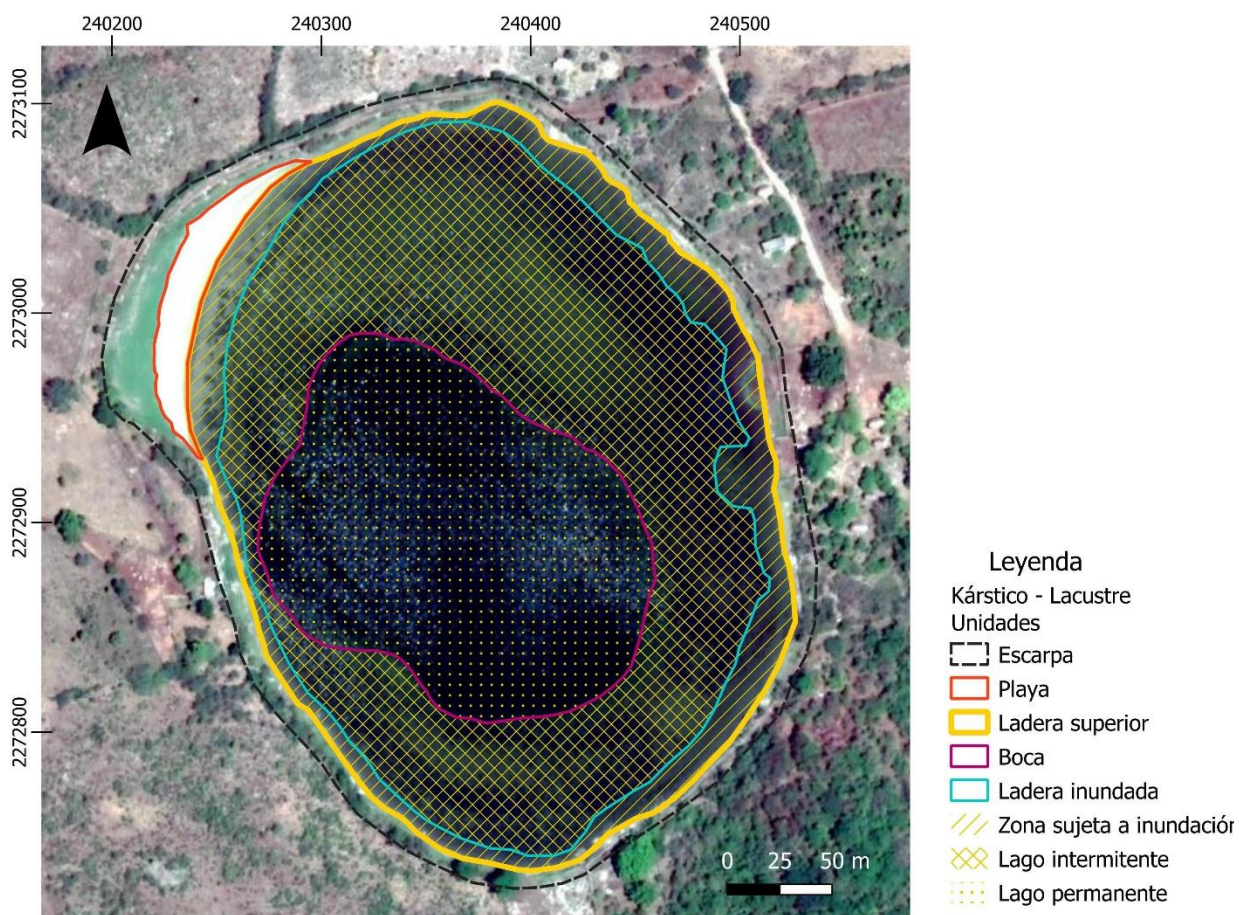


Figura 4. Unidades del relieve identificadas con la imagen obtenida de Google Earth.

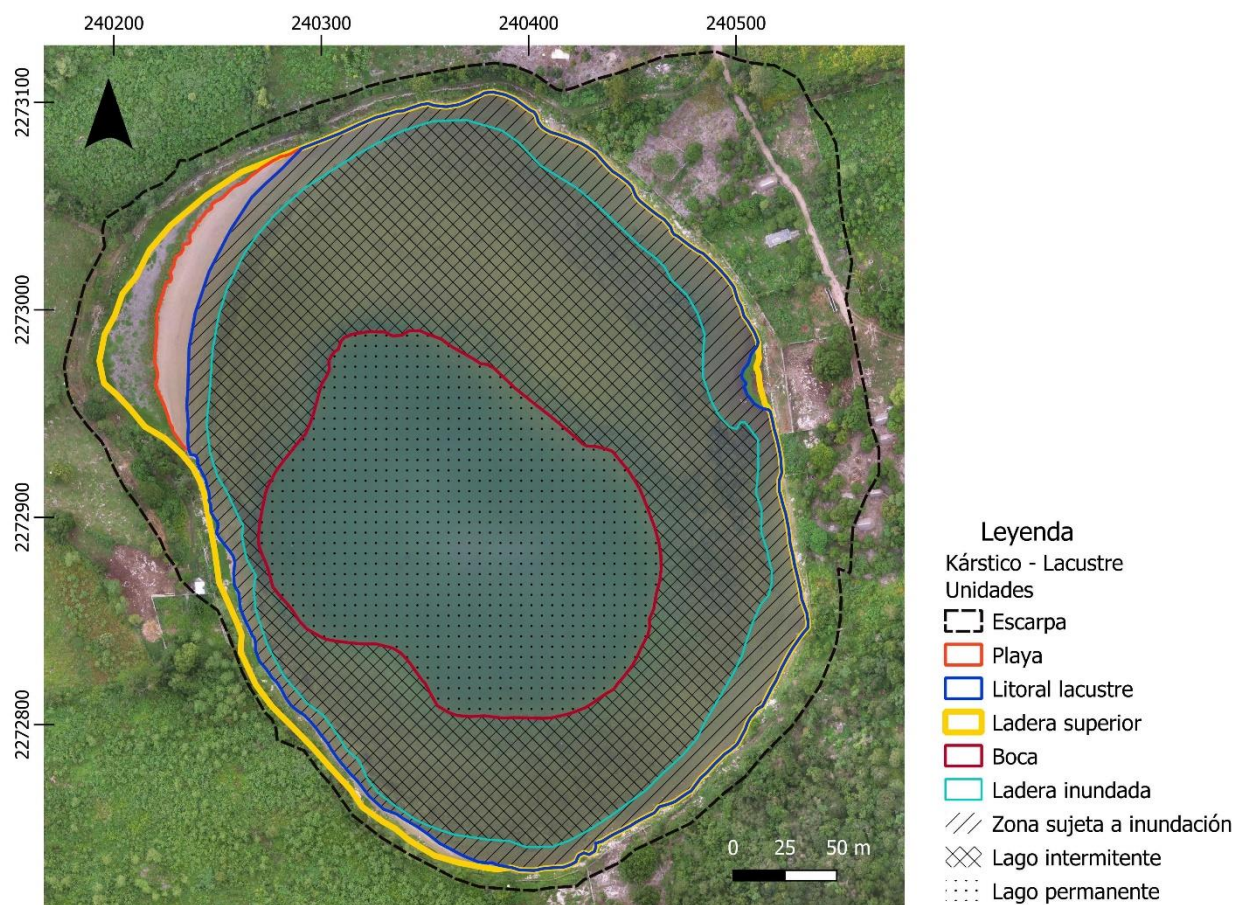


Figura 5. Unidades del relieve identificadas en el ortomosaico obtenido con dron y la técnica Structure from Motion.

Indicadores morfométricos

El ortomosaico obtenido con SfM permitió obtener valores más altos de los indicadores morfométricos como LMax, WMax, superficie y perímetro en comparación con los obtenidos con GE. Las mayores diferencias se reflejan en la superficie, el perímetro y el WMax de la dolina y el lago (Tabla 1).

Con respecto a los índices de compacidad y circularidad, las diferencias fueron mínimas con ambos insumos. El índice de compacidad obtuvo valores ligeramente superiores, solo por centésimas en

ambos insumos. Por otro lado, el índice de circularidad mostró valores ligeramente inferiores a uno, también por centésimas con ambos insumos. Estos índices permiten interpretar la geoforma como circular lo que caracteriza a una dolina. La dolina es la forma superficial “diagnóstica” de los paisajes kársticos. Desde el punto de vista morfodinámico, la dolina constituye una unidad hidrográfica elemental comparable a una simple cuenca -para este caso particular, una cuenca circular cerrada- que con su sistema de pendientes, podría transportar agua hasta los puntos de absorción en el fondo en una red subterránea (Bondesan, Meneghelly Sauro, 1992).

Tabla 1. Características morfométricas principales.

Indicadores morfométricos	Google Earth		SfM		Diferencias	
	Dolina	Lago	Dolina	Lago	Dolina	Lago
LMax (m)	371.20	356	416.70	376.79	45.50	20.79
WMax (m)	291.52	268.70	404.50	281.50	112.98	12.8
Superficie (m ²)	87395.16	75285.26	118673.75	82677.86	31278.59	7392.6
Perímetro (m)	1089.35	1006.64	1292.25	1071.30	202.90	64.66
Compacidad	1.03	1.02	1.05	1.04	0.01	0.01
Circularidad	0.92	0.93	0.89	0.90	-0.03	-0.02

Comparativa de perfiles

La Figura 6 presenta los transectos trazados sobre la dolina. La comparación de los perfiles obtenidos con los MDEs de GE y SfM se reportan en la Figura 7. Las elevaciones obtenidas con GE fueron mayores que las obtenidas con SfM para ambos transectos asimismo, en las gráficas (Figura 7A y 7B) se observa que en los perfiles obtenidos con SfM se delimita la forma de la depresión (aún bajo el agua), contrario al comportamiento de los perfiles generados con GE. En el transecto 1 (Figura 7A), las diferencias de elevaciones mínima y máxima fueron de 1.4 y 30.5 m respectivamente entre ambos perfiles. En el transecto 2 (Figura 7B), las diferencias de elevaciones mínima y máxima fueron de 2.3 y 23.4 m respectivamente entre ambos perfiles. Cabe mencionar que la fotogrametría aérea se ha utilizado para el levantamiento batimétrico de cuerpos de agua poco profundos siempre y cuando el fondo sea visible (y con suficiente textura) y las imágenes adquiridas estén cercanas al nadir (Westaway, Lane y Hicks, 2000, 2001; Lane *et al.*, 2010).

Implicaciones teóricas y metodológicas

En Yucatán han existido diversos mitos en relación a su geografía: mitos como el de “no hay suelos en Yucatán” (Bautista Zúñiga, 2010) y “Yucatán es plano” (Bautista Zúñiga *et al.*, 2010), se suma otro todavía muy arraigado que dice “no hay lagos ni ríos”, haciendo alusión de que es una región que carece de ríos caudalosos o grandes lagos; sin embargo, los cenotes y las aguadas son los nombres locales para designar a una variedad de cuerpos de agua -muchos de ellos superficiales- que están contenidas en depresiones de diferentes dimensiones. El reporte de Valero *et al.*, (2014) los reconoce como “lagos kársticos” y para América son abundantes en Florida y Yucatán.

Existen numerosos reportes de estos cuerpos de agua desde el contexto hidrogeológico (Perez-Ceballos *et al.*, 2012), sobre la contaminación (Polanco Rodríguez *et al.*, 2014; Hoogesteijn Reul, Febles-Patrón y Nava-Galindo, 2015) y en general aspectos biológicos y de manejo (Sosa-Escalante y Chable-Santos, 2013). Pero desde el punto de vista morfológico hay pocas aproximaciones a detalle como las clasificaciones etnoecológicas que reportan Munro-Stasiuk *et al.*, (2014) basadas en Hall (1977) y Ruiz-Silva *et al.*, (2007) ambas aún de carácter cualitativo con nombres regionales; y la propuesta de Aguilar *et al.*, (2016) con un estudio de la morfometría planimétrica y una clasificación técnica de depresiones.

Este ejercicio como estudio pionero con tecnologías geoespaciales emergentes, representa un ejemplo de la utilidad de las imágenes de alta resolución obtenidas

con dron y procesadas con la técnica SfM, en donde se definen unidades del relieve en torno a una dolina y un desarrollo kárstico-lacustre que revelan procesos limnológicos generando relieves complejos (Valero-Garcés *et al.*, 2014) y permiten enriquecer la caracterización geomorfológica del centro de Yucatán.

De acuerdo a De Pedraza Gilsanz, (1996) “el análisis de los fenómenos lacustres presenta diversos enfoques, si bien todos ellos pueden reunirse en tres: genéticos, sedimentológicos y ecológicos (niveles tróficos, ecotermicidad, etc.), en geomorfología, estos temas suelen quedar incluidos dentro del proceso exógeno al que se asocian genéticamente”. Por esta razón, es de interés las clasificaciones basadas en dichos aspectos como la propuesta por Hutchinson, (1957) que define a los “lagos de disolución” como aquellos situados en zonas deprimidas, debido a la disolución o colapso de materiales karstificables y que se pueden encontrar en: lagos de dolina, poljes, sumideros y cenotes.

La dolina “Polol” ha contribuido a la formación de un lago kárstico definido como pequeños lagos generalmente permanentes desarrollados en zonas de surgencias en áreas de karstificación activa (Camacho, 2009), sobre calizas y cercano al manto freático, ya que está ubicado en una planicie no mayor a 20 m.s.n.m. (Ihl *et al.*, 2007; Aguilar *et al.*, 2016) con acuíferos poco profundos (Marín-Stillman, L.E., Pacheco-Ávila, J.G., Méndez-Ramos, 2004).

Desde el punto de vista metodológico para este ejercicio, el uso de imágenes de diferentes insumos no reveló grandes diferencias entre las unidades del relieve identificadas, pero sí en los parámetros morfométricos y los valores altimétricos. Sin embargo, no se consideraron varios aspectos previos como la precisión absoluta, la fecha de la toma de las imágenes y un área buffer como zona de influencia, por lo que son aspectos importantes a considerar en estudios posteriores.

El uso de drones para estudios morfométricos y morfológicos del relieve es reciente (Fernández de Castro Martínez *et al.*, 2018) y permite una recolección rápida de imágenes aéreas de alta resolución espacial además, de la revisita de los sitios de interés en diferentes épocas de un mismo año (Ramsey, Griffiths y Stokes, 2014); en particular después de eventos meteorológicos extremos como sequías o inundaciones para el caso de las depresiones kársticas.

Diversos estudios coinciden que es necesario aplicar estas técnicas bajo diferentes condiciones y en un amplio rango de formas del relieve, procesos, escalas y ambientes (Gómez Gutiérrez *et al.*, 2016). Asimismo, los datos espaciales obtenidos con las fotografías aéreas adquiridas con dron, pueden ser

validados usando puntos de control terrestre (Ramsey, Griffiths y Stokes, 2014).

El uso de sensores multispectrales montados en drones, aportaría información más fina sobre otras características, ya que las estructuras de las dolinas en

diferentes áreas kársticas muestran una gran variabilidad dependiendo del papel que juegan los diferentes factores, tales como la litología, las condiciones estructurales de la roca, la topografía, las condiciones climáticas y las características heredadas de eventos morfodinámicos previos (Sauro, 2012).

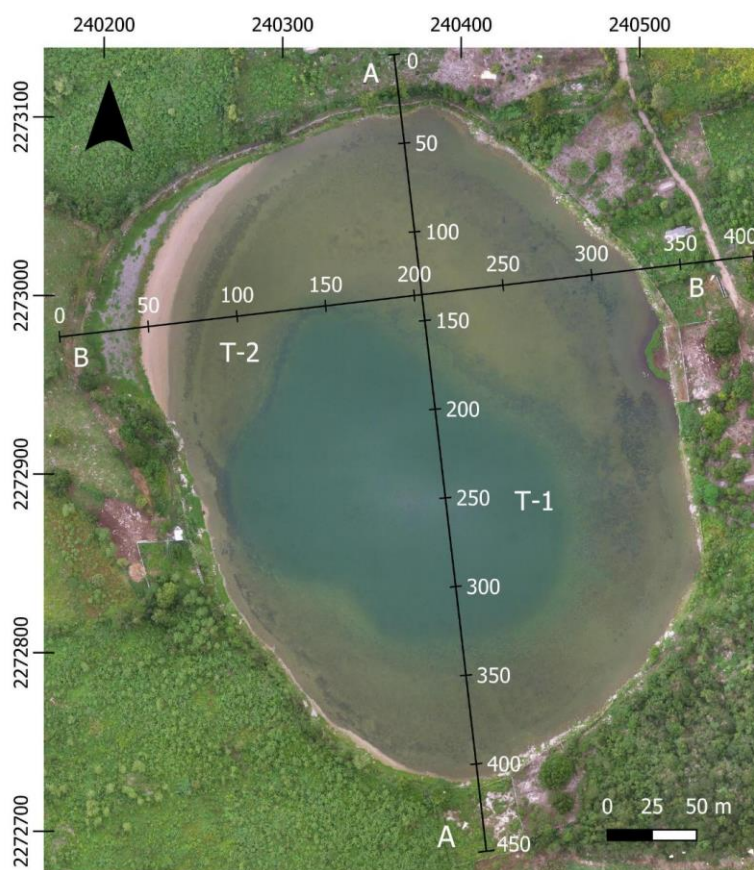


Figura 6. Transectos marcados para evaluar las elevaciones a través del análisis de perfiles.

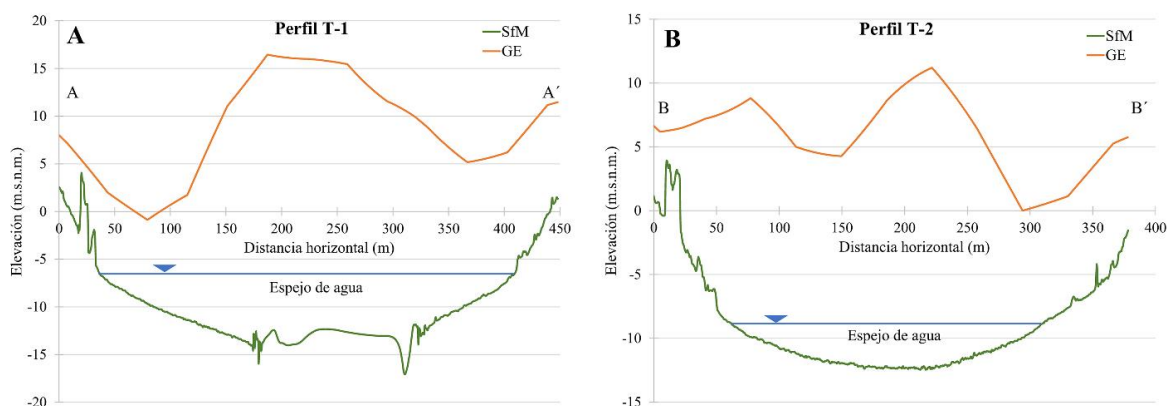


Figura 7. Comparación de perfiles de ambos modelos digitales de elevación (GE= Google Earth y SfM= Structure from Motion): A) transecto longitudinal de norte a sur (T-1); B) transecto transversal de oeste a este (T-2).

El conocimiento elemental de las características principales de una dolina es importante para diseñar estrategias para la conservación de los recursos naturales (Kueny y Day, 2002; Sosa-Escalante y Chable-Santos, 2013) y el manejo en áreas urbanas y rurales (Simón *et al.*, 2009; Basso *et al.*, 2013). Los drones representan una revolución tecnológica que nos permite caracterizar de manera rápida y precisa los recursos kársticos de un sitio (Ramsey, Griffiths y Stokes, 2014). Para desarrollar tecnologías adaptadas o proponer modelos de uso sostenible de dolinas y depresiones en general, necesitamos un conocimiento detallado no solo de sus atributos morfométricos, sino también de sus áreas de influencia. Los drones nos permitirían documentar cualquier perturbación en tiempo real causada por factores naturales o antrópicos.

CONCLUSIONES

La anatomía del cenote Polol técnicamente corresponde a una dolina que alberga un lago kárstico y se compone de una boca, lago perenne, lago intermitente, ladera inundada, ladera superior, escarpa, zona sujeta a inundación, playa y un litoral lacustre, revelando procesos limnológicos que generan un ambiente kárstico-lacustre y conlleva al enriquecimiento geomorfológico de esta región central de la entidad.

Las principales diferencias entre plataformas (imágenes de Google Earth *versus* técnica SfM) están en la cuantificación de los parámetros morfométricos y los valores de elevación. Con respecto a los parámetros morfométricos, las mediciones obtenidas con las imágenes de GE fueron subestimadas para el área, perímetro, longitud y ancho máximos; no así para los índices de circularidad y compacidad que fueron similares con ambos insumos (GE vs. SfM). El modelo digital de elevación generado con SfM permitió definir la depresión (aún bajo el agua), lo cual no sucedió con el MDE de GE, donde los valores de elevación fueron superiores y con un comportamiento irregular.

Las dolinas y en general las depresiones kársticas de la región no se han estudiado como una unidad morfológica que incluya una descripción detallada de las unidades del relieve y la morfometría. Las tecnologías emergentes como los drones son herramientas que facilitan la caracterización detallada del relieve con alta resolución espacial y temporal, información que es necesaria para una adecuada planeación del territorio.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada al primer autor para realizar los estudios de posgrado. Se

agradece a los árbitros por sus comentarios que ayudaron a enriquecer este trabajo.

Financiamiento. El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar los estudios de posgrado. Se agradece el apoyo financiero del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) a través del proyecto “Elementos del paisaje kárstico de la Península de Yucatán para el aprovechamiento de sus recursos naturales” (clave 2-1.6-11161434635-M-M.2-3).

Conflictos de interés. Todos los autores declaran que no hay conflicto de intereses relacionados con esta publicación.

Cumplimiento de estándares de ética. La investigación fue realizada y presentada por los autores bajo principios éticos y responsabilidad científica en el manejo de los datos.

Disponibilidad de datos. El autor de correspondencia podrá proporcionar la información o datos necesarios con previa solicitud.

REFERENCIAS

- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M.E., Frausto, O. y Ihl, T., 2016. Density of karst depressions in Yucatán state, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 78(2), pp.51–60. <<https://caves.org/pub/journal/PDF/v78/cave-78-02-51.pdf>>.
- Basso, A., Bruno, E., Parise, M. y Pepe, M., 2013. Morphometric analysis of sinkholes in a karst coastal area of southern Apulia (Italy). *Environmental Earth Sciences*, 70(6), pp.2545–2559. <<http://link.springer.com/10.1007/s12665-013-2297-z>>.
- Bautista, F., Frausto, O., Ihl, T. y Aguilar, Y., 2015. Actualización del mapa de suelos del Estado de Yucatán México: Enfoque geomorfopedológico y WRB. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 2(6), pp.303–315. <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282015000300006&nrm=iso>.
- Bautista Zúñiga, F., 2010. El Suelo. En: R. Durán y M. Méndez, eds. *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán*. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. pp.14–16. <<https://www.cicy.mx/documentos/CICY/sitios/Biodiversidad/pdfs/Cap1/05 Suelo.pdf>>.
- Bautista Zúñiga, F., Frausto Martínez, O., Ihl, T. y Aguilar Duarte, Y., 2010. El Relieve. En: R.

- Durán y M. Méndez, eds. *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán*. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. pp.7–9. <<https://www.cicy.mx/documentos/CICY/sitios/Biodiversidad/pdfs/Cap1/02Relieve.pdf>>.
- Beddows, P., Blanchon, P., Escobar Briones, E. y Torres-Talamante, O., 2007. Los cenotes de la península de Yucatán. *Arqueología Mexicana*, 14(83), pp.32–35. <<https://sds.yucatan.gob.mx/cenotes-grutas/documentos/cenotes-peninsula.pdf>>.
- Bondesan, A., Meneghel, M. y Sauro, U., 1992. Morphometric analysis of dolines. *International Journal of Speleology*, 21(1/4), pp.1–55. <<http://scholarcommons.usf.edu/ijss/vol21/iss1/1/>>.
- Camacho, A., 2009. *Lagos y lagunas kársticas sobre yesos*. España. <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/espacios-prottegidos/3190_tcm30-196769.pdf>.
- Cole, L.J., 1910. The Caverns and People of Northern Yucatan. *Bulletin of the American Geographical Society*, 42(5), pp.321–336. <<https://www.jstor.org/stable/199038?origin=crossref>>.
- Colín Olivares, O., Frausto Martínez, O. y Rodríguez Castillo, F., 2019. Cálculo automatizado de la profundidad de depresiones kársticas a escala detallada. En: *Conocimientos y saberes sobre el karst tropical de México*, Primera. CDMX. pp.56–77. <<http://www.amek.org.mx/wp-content/uploads/2019/10/LibroConocimiento-s-Capítulo-3.pdf>>.
- Dávila Burga, J., 2011. *Diccionario geológico*. Perú. <<http://biblioteca.ismm.edu.cu/wp-content/uploads/2017/06/Diccionario-geologico.pdf>>.
- Delgado, C., Bautista, F., Ihl, T.J. y Palma-López, D., 2017. Duración del periodo de lluvias y aptitud de tierras para la agricultura de temporal. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(12), pp.485–497. <<http://era.ujat.mx/index.php/rera/article/view/1320>> [Consultado 17 jun. 2020].
- Denizman, C., 2003. Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, lower Suwanee River basin, Florida. *Journal of Cave and Karst Studies*, 65(1), pp.29–35. <<http://w.caves.org/pub/journal/PDF/V65/v65n1-Denizman.pdf>>.
- Duffy, J.P., Cunliffe, A.M., DeBell, L., Sandbrook, C., Wich, S.A., Shutler, J.D., Myers-Smith, I.H., Varela, M.R. y Anderson, K., 2017. Location, location, location: considerations when using lightweight drones in challenging environments. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, pp.1–13. <<http://doi.wiley.com/10.1002/rse2.58>>.
- Fernández de Castro Martínez, G., Vázquez Selem, L., Palacio Prieto, J.L., Peralta Higuera, A. y García Romero, A., 2018. Geomorfometría y cálculo de erosión hídrica en diferentes litologías a través de fotogrametría digital con drones. *Investigaciones Geográficas*, (96). <<http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/59548>>.
- Fragoso-Servón, P., Pereira, A., Frausto, O. y Bautista, F., 2015. Geodiversity of a Tropical Karst Zone in South-East Mexico. En: *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. pp.609–618. <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-17435-3_68> [Consultado 25 jul. 2020].
- Frausto, O. y Ihl, T., 2008. Mapa de formas exocársticas del Norte de Quintana Roo a escala 1:50000. En: M.A. Gutiérrez Aguirre y A. Cervantes Martínez, eds. *Estudio geohidrológico del norte de Quintana Roo, México*. México: Universidad de Quintana Roo, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. p.111. <<http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/00046840>> [Consultado 25 jul. 2020].
- Gómez Gutiérrez, Á., Schnabel, S., Conoscenti, C., Carballo-Arias, N.A., Ferro, V., Di Stefano, C., Sanjosé Blasco, J.J., De Matías, J. y Berenguer Sempere, F., 2016. Elaboración de modelos 3D de diferentes morfologías y escalas utilizando técnicas Structure-from-Motion y fotografías terrestres. *Cuaternario y Geomorfología*, 30, pp.23–35. <<http://recyt.fecyt.es/index.php/CUGEO/article/view/cyg.v30i1-2.39594>> [Consultado 25 jul. 2020].
- Gutierrez, M.E., Cervantes, A., Gutiérrez-Aguirre, M. y Arce-Ibarra, A., 2007. Los cenotes y lagunas del centro y sur de la península de Yucatán. En: G. de la Lanza-Espino, ed. *Las aguas interiores de México: conceptos y casos*. México: AGT. pp.423–446. <https://www.researchgate.net/publication/272181154_Los_cenotes_y_lagunas_del_centro_y_sur_de_la_peninsula_de_Yucatan>.

- [Consultado 25 jul. 2020].
- Hall, F.G., 1977. Cenotes y Aguadas. En: *Enciclopedia Yucatanense. Vol. I. Gobierno del Estado de Yucatán*. pp.67–80.
- Hoogesteijn Reul, A.L., Febles-Patrón, J.L. y Nava-Galindo, V.A., 2015. La contaminación fecal en cenotes de interés turístico y recreacional del estado de Yucatán. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 19(4), pp.169–175.
- Hutchinson, G.E., 1957. *A Treatise on Limnology. Volume I. Geography, physics, and chemistry*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Ihl, T., Martínez, O.F., Rojas López, J., Giese, S., Goldacker, S., Bautista Zúñiga, F. y Bocco Verdinelli, G., 2007. Identification of geodisasters in the state of Yucatán, Mexico. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen*, 246(3), pp.299–311.
<<http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=0077-7749&volume=246&issue=3&page=299>>.
- Kasvi, E., Salmela, J., Lotsari, E., Kumpula, T. y Lane, S.N., 2019. Comparison of remote sensing based approaches for mapping bathymetry of shallow, clear water rivers. *Geomorphology*, 333, pp.180–197.
<<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.017>>.
- Kueny, J.A. y Day, M.J., 2002. Designation of protected karstlands in Central America: A regional assessment. *Journal of Cave and Karst Studies*, 64(3), pp.165–174.
<<https://digital.lib.usf.edu/content/SF/S0/05/24/82/00001/K26-02033-v64n3-Kueny.pdf>>
[Consultado 25 jul. 2020].
- Lane, S.N., Widdison, P.E., Thomas, R.E., Ashworth, P.J., Best, J.L., Lunt, I.A., Sambrook Smith, G.H. y Simpson, C.J., 2010. Quantification of braided river channel change using archival digital image analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(8), pp.971–985.
<<http://doi.wiley.com/10.1002/esp.2015>>
[Consultado 1 oct. 2020].
- López-Ramos, E., 1973. *Estudio geológico de la Península de Yucatán*. México.
<https://www.amgp.org/api/administracion/publicaciones/5da7505d3fed8_1973_Ene_Mzo_02.pdf>.
- Lugo-Hubp, J., 2011. *Diccionario geomorfológico*. México D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
<<http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/32/32/95-1>>.
- Marín-Stillman, L.E., Pacheco-Ávila, J.G., Méndez-Ramos, R., 2004. Hidrogeología de la Península de Yucatán. En: B. Jiménez y L. Marín, eds. *El agua en México, vista desde la Academia Mexicana de Ciencias*. México, D. F. pp.159–176.
- Munro-Stasiuk, M.J., Manahan, T.K., Stockton, T. y Ardren, T., 2014. Spatial and Physical Characteristics of Rejolladas in Northern Yucatán, Mexico: Implications for Ancient Maya Agriculture and Settlement Patterns. *Geoarchaeology*, 29(2), pp.156–172.
<<http://doi.wiley.com/10.1002/gea.21468>>.
- Oliveira, S., Moura, D., Boski, T. y Horta, J., 2019. Coastal paleokarst landforms: A morphometric approach via UAV for coastal management (Algarve, Portugal case study). *Ocean & Coastal Management*, 167(May 2018), pp.245–261.
<<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.10.025>>.
- Pearse, A.S., Creaser, E.P., Hall, F.G. y Hubbs, C.L., 1936. *The Cenotes of Yucatan: A Zoological and Hydrographic Survey*. Carnegie Institution of Washington.
<https://books.google.com.mx/books/about/The_Cenotes_of_Yucatan.html?id=0iIuAAAAMAAJ&redir_esc=y> [Consultado 5 ago. 2020].
- De Pedraza Gilsanz, J., 1996. *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. España: Rueda, S.L.
- Peña Monné, J.L., 1997. *Cartografía geomorfológica básica y aplicada*. España: Logroño.
<http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46111999000300013>.
- Perez-Ceballos, R., Pacheco-Avila, J., Euan-Avila, J. y Hernandez-Arana, H., 2012. Regionalization based on water chemistry and physicochemical traits in the ring of cenotes, Yucatan, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 74(1), pp.90–102.
<<http://www.caves.org/pub/journal/PDF/V74/cave-74-01-90.pdf>>.
- Polanco Rodríguez, A.G., Navarro Alberto, J.A., Solorio Sánchez, J., Mena Rejón, G.J., Marrufo Gómez, J. y Del Valls Casillas, T.A., 2014. Contamination by organochlorine pesticides in the aquifer of the Ring of Cenotes in Yucatán, México. *Water and Environment Journal*, pp.1–11.

- <<http://doi.wiley.com/10.1111/wej.12080>>.
- Ramsey, C.L., Griffiths, P.A. y Stokes, T.R., 2014. Multi-rotor unmanned aerial vehicles (UAVS) and high-resolution compact digital cameras: A promising new method for monitoring changes to surface karst resources. *Acta Carsologica*, 43(2-3), pp.269-286. <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84921895945&partnerID=40&md5=1e829b6419bcbf24744f1ed7aeb45>>.
- Ruiz-Silva, J., Rivadeneyra, J., Pacheco, A., Sosa-Escalante, J.E. y Morales-Arjona, L.J., 2007. *Caracterización de los Cenotes y Grutas del Estado de Yucatán, México*. <https://www.researchgate.net/publication/317139635_Caracterizacion_de_los_Cenotes_y_Grutas_del_Estado_de_Yucatan_Mexico>.
- Sauro, U., 2012. Closed depressions in karst areas. En: *Encyclopedia of Caves*. pp.140-155. <https://www.researchgate.net/publication/279426479_Closed_Depressions_in_Karst_Areas>.
- Schmitter-Soto, J.J., Escobar-Briones, E., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M. y Marín, L.E., 2002. Los cenotes de la península de Yucatán. En: *Lagos y Presas de México*. México: AGT. pp.337-381.
- Shintani, C. y Fonstad, M.A., 2017. Comparing remote-sensing techniques collecting bathymetric data from a gravel-bed river. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), pp.2883-2902. <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2017.1280636>> [Consultado 1 oct. 2020].
- Silva, O.L., Bezerra, F.H.R., Maia, R.P. y Cazarin, C.L., 2017. Karst landforms revealed at various scales using LiDAR and UAV in semi-arid Brazil: Consideration on karstification processes and methodological constraints. *Geomorphology*, 295, pp.611-630. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.025>>.
- Simón, J.L., Soriano, M.A., Pocoví, A., Arlegui, L.E., Casas, A.M., Liesa, C.L., Luzón, A., Pérez, A., Pueyo, Ó., Pueyo, E., Mochales, T., Gracia Abadías, F.J. y Ansón, D., 2009. Riesgo de subsidencia kárstica en áreas urbanas: el caso de Zaragoza. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17, pp.303-315. <<https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/199933/267376>>.
- Sosa-Escalante, J.E. y Chable-Santos, J., 2013. Conservación y manejo de los cenotes. En: *Ordenamiento Territorial del Estado de Yucatán: Visión 2030*. México: Universidad Autónoma de Yucatán. pp.63-74. <https://www.researchgate.net/publication/267867858_Conseervacion_y_manejo_de_los_cenotes>.
- Telbisz, T., Látos, T., Deák, M., Székely, B., Koma, Z. y Standovár, T., 2016. The advantage of LiDAR digital terrain models in doline morphometry compared to topographic map based datasets – Aggtelek karst (Hungary) as an example. *Acta Carsologica*, 45(1), pp.5-18. <<http://ojs.zrc-sazu.si/carsologica/article/view/4138>>.
- Valero-Garcés, B., Morellón, M., Moreno, A., Corella, J.P., Martín-Puertas, C., Barreiro, F., Pérez, A., Giral, S. y Mata-Campo, M.P., 2014. Lacustrine carbonates of Iberian Karst Lakes: Sources, processes and depositional environments. *Sedimentary Geology*, 299, pp.1-29. <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0037073813001942>>.
- Waltham, T., Bell, F.G. y Culshaw, M., 2005. *Sinkholes and Subsidence*. 1a ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <<https://www.springer.com/gp/book/9783540207252>>.
- Westaway, R.M., Lane, S.N. y Hicks, D.M., 2000. The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(2), pp.209-226. <[https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(200002\)25:2%3C209::AID-ESP84%3E3.0.CO;2-Z](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1096-9837(200002)25:2%3C209::AID-ESP84%3E3.0.CO;2-Z)> [Consultado 1 oct. 2020].
- Westaway, R.M., Lane, S.N. y Hicks, D.M., 2001. Remote sensing of clear-water, shallow, gravel-bed rivers using digital photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(11), pp.1271-1281. <<https://research-information.bris.ac.uk/en/publications/remote-sensing-of-clear-water-shallow-gravel-bed-rivers-using-dig>> [Consultado 1 oct. 2020].
- Wu, Q., Deng, C. y Chen, Z., 2016. Automated delineation of karst sinkholes from LiDAR-derived digital elevation models. *Geomorphology*, 266, pp.1-10.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.006>.
- Zhu, C. y Li, Y., 2013. High Temporal Resolution Land Use/Land Cover Change from 1984 to 2010 of the Little River Watershed, Tennessee, Investigated Using Landsat and Google Earth Images. *Southeastern Geographer*, 53(3), pp.250–266. [http://dx.doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30002-2](http://dx.doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30002-2).