

## Servicios ecosistémicos culturales de los cenotes del municipio de Tulum, Quintana Roo: usos, beneficios y amenazas

### *Cultural ecosystem services of the cenotes of the municipality of Tulum, Quintana Roo: uses, benefits and threats*

Elsi Margarita May Arias,\* Lucinda Arroyo Arcos\*\* y María Luisa Hernández Aguilar\*\*\*

Recibido: 21/10/2023. Aceptado: 15/01/2024. Publicado: 01/04/2024.

**Resumen.** Los servicios ecosistémicos se conceptualizan como todos aquellos procesos, bienes, valores y servicios que el ser humano extrae de forma tangible e intangible de los diferentes ecosistemas distribuidos por el mundo. Algunos ecosistemas son peculiares y de importancia local o regional, como es el caso de los cenotes (dolinas inundadas), característicos de la península de Yucatán y de gran importancia para la provisión de diversos servicios ecosistémicos, como el turismo y la recreación, clasificados dentro de la categoría de servicios culturales, tema de interés de este artículo. El objetivo fue analizar los servicios ecosistémicos culturales de los cenotes, las implicaciones de su uso y las amenazas a las que se exponen, se indagó sobre la relación hombre-naturaleza y su importancia socioeconómica en los territorios de mayor crecimiento turístico, como el municipio de Tulum, en el que las actividades turísticas se desarrollan en torno a espacios naturales y creados para fomento de la cultura, como sus playas, zonas arqueológicas, cenotes y cuevas. La investigación tiene un corte descriptivo y exploratorio con un proceso metodológico dividido en tres fases: 1) búsqueda y revisión de literatura en buscadores especializados, sitios web y páginas de sitios, así como consulta de bases de datos sobre hallazgos arqueo-paleontológicos del Instituto Nacional de

Antropología e Historia (INAH) e inventario de cenotes de la asociación civil Amigos de *Sian Ka'an*; 2) identificación de cenotes con mayor cantidad de visitas por medio de la base de datos Amigos *Sian Ka'an* y datos obtenidos de Google Earth. En esta fase del proceso fue de utilidad la herramienta espacial *Invest* para calcular las tasas de visitación y centrar la investigación en los cenotes con mayor número de visitas, y 3) clasificación de cenotes de acuerdo con la ubicación geográfica, procesos de disolución y una propuesta basada en la infraestructura y la accesibilidad. Toda la información cartográfica presentada en el trabajo fue procesada en los sistemas de información geográfica QGIS3 y ArcGIS 10.8. Entre los resultados obtenidos podemos destacar que la mayor cantidad de visitas se registró en Casa Cenote, Gran Cenote, Calavera, Dos Ojos, Yal Ku y Karwash, clasificados como prístinos y costeros principalmente, con administración privada, desarrollo de infraestructura turística dentro y fuera de las instalaciones, accesibilidad y cercanía a centros de población. Se identificaron dos servicios ecosistémicos culturales en los cenotes: a) turismo-recreación, cuyos principales beneficiarios son los turistas, la población trabajadora, los propietarios y los locales. Las actividades turísticas más importantes son *snorkel*, buceo, nado libre, *paddleboard*,

\*\*Estudiante del Doctorado en Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. Boulevard Bahía s/n esq. Ignacio Comonfort, col. del Bosque, 77019, Chetumal, Quintana Roo, México. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5348-8853>. Email: [emayarias@hotmail.com](mailto:emayarias@hotmail.com). Autora de correspondencia.

\*\* Profesora investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Campus Cozumel. Avenida Andrés Quintana Roo s/n, esq. Calle 110 sur. Col. Maravilla, 77600, Cozumel, Quintana Roo, México. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6696-7124>. Email: [larroyo@uqroo.edu.mx](mailto:larroyo@uqroo.edu.mx)

\*\*\* Profesora de Apoyo Técnico Académico de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Campus Chetumal. Boulevard Bahía s/n Esq. Ignacio Comonfort, col. Del Bosque, 77019, Chetumal, Quintana Roo, México. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7699-9418>. Email: [malu@uqroo.edu.mx](mailto:malu@uqroo.edu.mx)

observación de flora y fauna, senderismo y tirolesa; b) educación-investigación, incentivado por los hallazgos arqueológicos y paleontológicos del Pleistoceno o la Edad de Hielo en cuevas y cavernas, así como el descubrimiento de complejos sistemas de ríos subterráneos interconectados entre sí. Este servicio ecosistémico tiene un impacto a nivel global, como lo exponen las nuevas teorías y un mayor conocimiento del pasado, del presente y sus prospecciones, aunado al creciente interés multidisciplinar y científico por los ecosistemas kársticos. El buceo especializado, y sea como exploración por investigadores y como deporte extremo por turistas, principalmente extranjeros, ha crecido al punto de existir empresas de capacitación y certificación, tiendas especializadas para renta de equipo y guías especializados en buceo. Se analizó una compleja organización en la prestación de servicios turísticos y beneficios en cadena, así como impactos negativos derivados principalmente de la masificación de los cenotes, vacíos legales y una débil gestión. Sin embargo, Tulum es un destino turístico con un segmento ligado a la búsqueda de la armonía interior, la conexión con la cultura y el cuidado del medio ambiente, situación que puede ser aprovechada para dar a los cenotes un uso más sostenible y resaltar la espiritualidad, la apreciación de la naturaleza, el paisaje, el arte, la identidad y la pertenencia, entre otros servicios ecosistémicos culturales.

**Palabras clave:** ecosistema kárstico, depresiones, turismo, análisis espacial.

**Abstract (DL).** Ecosystem services are conceptualized as all those processes, goods, values and services that humans extract tangibly and intangibly from the different ecosystems distributed throughout the world. Some ecosystems are peculiar and of local or regional importance, as is the case of the cenotes (flooded sinkholes), characteristic of the Yucatan Peninsula and of great importance for the provision of diverse ecosystem services, such as tourism and recreation, classified within the category of cultural services, the subject of interest of this article. The objective was to analyze the cultural ecosystem services of the cenotes, the implications of their use and the threats to which they are exposed, the human-nature relationship and their socio-economic importance in the territories of greatest tourist growth, such as the municipality of Tulum, where tourist activities are developed around natural spaces created for the promotion of culture, such as its beaches, archaeological zones, cenotes and caves. The research is descriptive and exploratory with a methodological process divided into three phases: 1) literature search and review in specialized search

engines, websites and web pages, as well as consultation of databases on archaeo-paleontological findings of the National Institute of Anthropology and History (INAH) and inventory of cenotes of the civil association Amigos de Sian Ka'an; 2) identification of cenotes with the highest number of visits through the database Amigos Sian Ka'an and data obtained from Google Earth. In this phase of the process, the InVEST spatial tool was useful to calculate visitation rates and focus the research on the cenotes with the highest number of visits, and 3) classification of cenotes according to geographic location, dissolution processes, and a proposal based on infrastructure and accessibility. All the cartographic information presented in the work was processed in QGIS3 and ArcGIS 10.8 geographic information systems. Among the results obtained we can highlight that the highest number of visits was registered in Casa Cenote, Gran Cenote, Calavera, Dos Ojos, Yal Ku and Karwash, mainly classified as pristine and coastal, with private administration, development of tourist infrastructure inside and outside the facilities, accessibility and proximity to population centers. Two cultural ecosystem services were identified in the cenotes: a) tourism-recreation, whose main beneficiaries are tourists, the working population, owners and locals. The most important tourist activities are snorkeling, scuba diving, free swimming, paddleboarding, flora and fauna observation, hiking and zip-lining; b) education-research, encouraged by archeological and paleontological findings from the Pleistocene or Ice Age in caves and caverns, as well as the discovery of complex systems of interconnected subway rivers. This ecosystem service has a global impact, as shown by new theories and a greater knowledge of the past, the present and its prospections, together with the growing multidisciplinary and scientific interest in karst ecosystems. Specialized diving, both as exploration by researchers and as an extreme sport for tourists, mainly foreigners, has grown to the point that there are training and certification companies, specialized equipment rental stores and specialized diving guides. A complex organization in the provision of tourism services and chain benefits was analyzed, as well as negative impacts derived mainly from the overcrowding of cenotes, legal loopholes and weak management. However, Tulum is a tourist destination with a segment linked to the search for inner harmony, connection with culture and care for the environment, a situation that can be taken advantage of to give the cenotes a more sustainable use and highlight spirituality, appreciation of nature, landscape, art, identity and belonging, among other cultural ecosystem services.

**Keywords:** karst ecosystem, karstic ecosystem, depressions, tourism, spatial analysis.

## INTRODUCCIÓN

La definición y clasificación de los servicios ecosistémicos ha sido un proceso continuo, resultado del arduo trabajo de investigadores, académicos y diversos grupos comprometidos con el

ambiente. Los beneficios que emanan de los ecosistemas y rinden algún provecho de forma directa o indirecta a la sociedad incluyen: a) procesos, b) servicios, c) bienes y d) valores (Costanza *et al.*, 2017; Osaka *et al.*, 2021; Watson *et al.*, 2019).

Los servicios ecosistémicos son todos aquellos beneficios que las personas obtienen de la diversidad de ecosistemas distribuidos por el planeta y mediante los cuales satisfacen sus necesidades y búsqueda de desarrollo social y económico. Este concepto se forma con bases científicas asociadas a las nociones de las ciencias naturales y sociales, y con relación al binomio hombre-naturaleza (FAO, 2023; Guan y Xiong, 2022; B. Wang *et al.*, 2022).

La taxonomía general de los servicios ecosistémicos incluye aquellos de: 1) soporte; 2) regulación; 3) abastecimiento y 4) culturales (Hu *et al.*, 2022; Luo *et al.*, 2021; MEA, 2005; Meacham *et al.*, 2022). Los servicios de soporte son aquellos indispensables para la producción de todos los demás (Avendaño-Leadem *et al.*, 2020; MAE *et al.*, 2018); los servicios de regulación se refieren a los procesos ecosistémicos que regulan las condiciones ambientales (FAO, 2023), mientras que los servicios de abastecimiento o provisión son todos aquellos productos extraídos de la naturaleza, es decir, beneficios materializados por los mismos ecosistemas (Monsalve-Castro *et al.*, 2019). Entre los servicios de abastecimiento se contemplan las materias primas, alimentos y recursos hídricos, en los de regulación el ecosistema tiene la función de regular los gases, el clima, el medio ambiente y procesos hidrológicos; en los servicios de soporte se considera la conservación del suelo, nutrientes y el mantenimiento de la biodiversidad (Shi *et al.*, 2020; B. Wang *et al.*, 2022).

Los servicios ecosistémicos culturales (SEC), objeto de estudio del presente trabajo, se definen como los beneficios intangibles que las personas obtienen de un ecosistema por medio de interacciones físicas y cognitivas (Banarsyadhimi *et al.*, 2022; MEA, 2005). Los SEC incluyen brindar sentido de lugar, patrimonio cultural, recreación, turismo, lo estético, espiritual y religioso; la apreciación de la naturaleza y el paisaje, el arte y la ciencia, la identidad y pertenencia, entre otros (Arnaiz-Schmitz *et al.*, 2021; Csurgó y Smith 2022; De Groot *et al.*, 2010). Esta categoría trata de entender el modo de vivir de las personas, los valores, sus historias, las prácticas materiales y simbólicas de sus territorios (Csurgó y Smith 2022; Fish *et al.*, 2016). En este sentido se destaca la importancia de la naturaleza

y la cultura de la península de Yucatán (Infante-Ramírez y Arce-Ibarra, 2015), fusionadas en paisajes peculiares de gran importancia para la región.

En el paisaje kárstico de la región, algunas de las formas más significativas son las dolinas, depresiones circulares provocadas por el hundimiento del terreno, y si contienen agua se conocen como cenotes. Estos, a su vez, se clasifican por su grado de desarrollo del karst, (Ayuntamiento de Tulum 2021-2024 y Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, 2023). El término regional de cenote tiene su origen en la lengua maya "dzonot", que significa abismo (Arroyo-Arcos *et al.*, 2019; Hernández-Aguilar, 2019), utilizado de manera general para referirse a depresiones naturales originadas en la roca y con presencia permanente o estacional de agua (Gijón-Yescas *et al.*, 2021). Constituyen el rasgo topográfico y característico más importante del territorio, distribuidos principalmente en la zona norte (Beddows *et al.*, 2007; Mondragón-Mejía *et al.*, 2019).

Las clasificaciones en torno a los cenotes destacan por los siguientes aspectos. Por su forma: a) forma de vaso, b) forma de aguada, c) cántaro, y d) forma de caverna (Hall, 1936). Por sus características hidrobiogeoquímicas: a) cenotes jóvenes, y b) cenotes viejos o lóticos (Schmitter-Soto *et al.*, 2002). En cuanto a su ubicación geográfica: a) costeros (agua dulce y marina mezclada), y b) internos (agua dulce o ligeramente salobre) (Navarro-Mendoza, 1988). Con respecto a los procesos de disolución de la roca: a) endokarst (en el subsuelo se forman cenotes cerrados), y b) exokarst (en la superficie se forman cenotes abiertos), cuando los procesos se desarrollan tanto en el subsuelo como en la superficie, los cenotes son de tipo semiabierto (Hernández-Aguilar, 2019).

Estas clasificaciones y diferenciaciones permiten entender su diversidad de servicios ecosistémicos. Estos ambientes proveen mantenimiento de biodiversidad de especies (National Geographic Society *et al.*, 2021), lo cual resalta la importancia biogeográfica de la región, en especial por los grupos microfaunísticos de invertebrados acuáticos, macrofauna y especies primitivas, así como endémicas, particularmente crustáceos dentro de un ambiente altamente oligotrófico (Pohlman y

Brankovits, 2017; Ruíz-Cancino *et al.*, 2019), presentes principalmente en cenotes costeros y cuevas inundadas.

Al igual que la fauna, la vegetación circundante a estos cuerpos de agua muestra características diferenciadas (Flores y Espejel, 1994), por ejemplo, en los cenotes costeros domina la vegetación de selva baja subcaducifolia y manglar, mientras que en los internos predomina la vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia (INEGI, 2020). Los cenotes también proporcionan refugio y son hábitat de múltiples especies silvestres (MacSwiney G. *et al.*, 2007; Martos-López, 2007).

La formación de suelos, el mantenimiento de sus nutrientes y la conservación de las características biofísicas, forman parte de los servicios ecosistémicos de soporte vinculados a los cenotes.

Dentro de los servicios de aprovisionamiento destaca la producción y almacenamiento de agua, ya que estos son la principal fuente de agua dulce para los habitantes y la vida silvestre (Cortés-Campos, 2018; Llanes-Salazar y Rejón-Márquez, 2022). En algunas comunidades se les ha dado un uso pesquero, lo que representan una fuente de alimento (MacSwiney G. *et al.*, 2007; Martos-López, 2007). A lo anterior se puede sumar la producción de madera, fibras, plantas medicinales y energía (SEDUMA *et al.*, 2011).

En los servicios ecosistémicos de regulación destacan: la depuración de masas de agua, barrera de inclusión salina, gradiente hidráulico, mantenimiento térmico y captura de carbono (López-Monzalvo, 2017; Méndez-González, 2010; SEDUMA *et al.*, 2011).

Finalmente, los servicios ecosistémicos culturales, como el turismo y la recreación, las experiencias espirituales, de saberes y apreciación, así como de reflexión y desarrollo son importantes desde hace cientos de años. Por ejemplo, para los antiguos mayas de la península de Yucatán, los cenotes formaron parte indisoluble de su cosmovisión (Cortés-Campos, 2018; Mondragón-Mejía *et al.*, 2019).

Estos cuerpos de agua continúan simbolizando espiritualidad y muchos pueblos mantienen creencias vinculadas a ellos, sin embargo, su uso actual se ha extendido a actividades turísticas y servicios de educación e investigación (Gabriel *et al.*, 2009;

Infante-Ramírez y Arce-Ibarra 2015). En las dos últimas décadas, los cenotes han despertado gran interés en ciencias de investigación histórica como la arqueología y la paleontología.

En el sentido económico los cenotes se han transformado en un producto de la oferta turística-recreativa, con beneficios tangibles para familias enteras. Sin embargo, el acelerado desarrollo de la infraestructura turística, inmobiliaria y las visitas masivas sin control, suman a la vulnerabilidad intrínseca de estos ecosistemas. Por eso este artículo pretende analizar los servicios culturales de los cenotes del municipio de Tulum, Quintana Roo, sus usos, beneficios y amenazas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El municipio de Tulum, en el estado de Quintana Roo, es parte de la península de Yucatán, plataforma formada por rocas solubles, principalmente calizas y dolomitas, que se configuraron con sedimentos calcáreos de especies marinas (Suárez-Morales y Rivera-Arriaga, 1988). Este territorio presenta una compleja estructura hidrogeológica asociada a los procesos kársticos que dieron origen a sistemas de cuevas subacuáticas, consideradas entre las más grandes del planeta: Sac Actún y Ox Bel Ha. La primera con aproximadamente 228 cenotes localizados y la segunda con cerca de 152 (Monroy-Ríos, 2019; QRSS, 2022). La ciudad de Tulum se ubica entre estos dos sistemas de ríos subterráneos. En correlación al patrón de distribución de estos sistemas de ríos subterráneos, cuevas y cenotes, se encuentra una serie de fallas y fracturas (Figura 1).

### Diseño metodológico

La investigación parte de un diseño metodológico descriptivo y exploratorio, dividido en tres fases (Figura 2).

**Fase 1).** Consulta de literatura y bases de datos. Se rastreó literatura en buscadores especializados, así como en sitios web y páginas de sitio. Se solicitó a la Dirección General de Desarrollo Urbano Sustentable Municipal registros y bases de datos de cenotes, al igual que a la Asociación

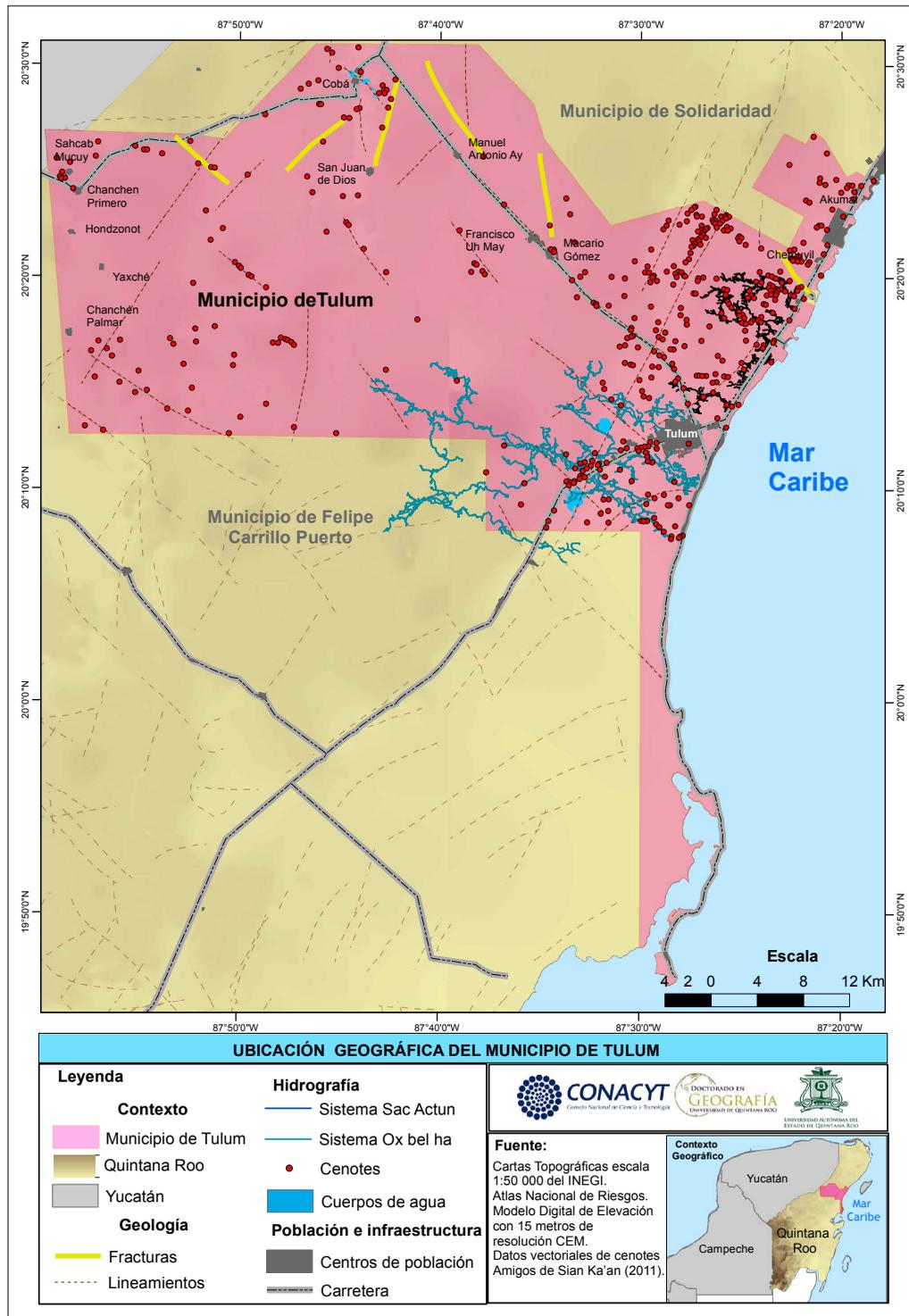


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del municipio de Tulum. Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de las cartas topográficas escala 1:50 000; Atlas Nacional de Riesgo, Modelo de Elevación Digital con 15 metros de resolución del INEGI y datos vectoriales de cenotes Amigos de *Sian Ka'an* (2011).

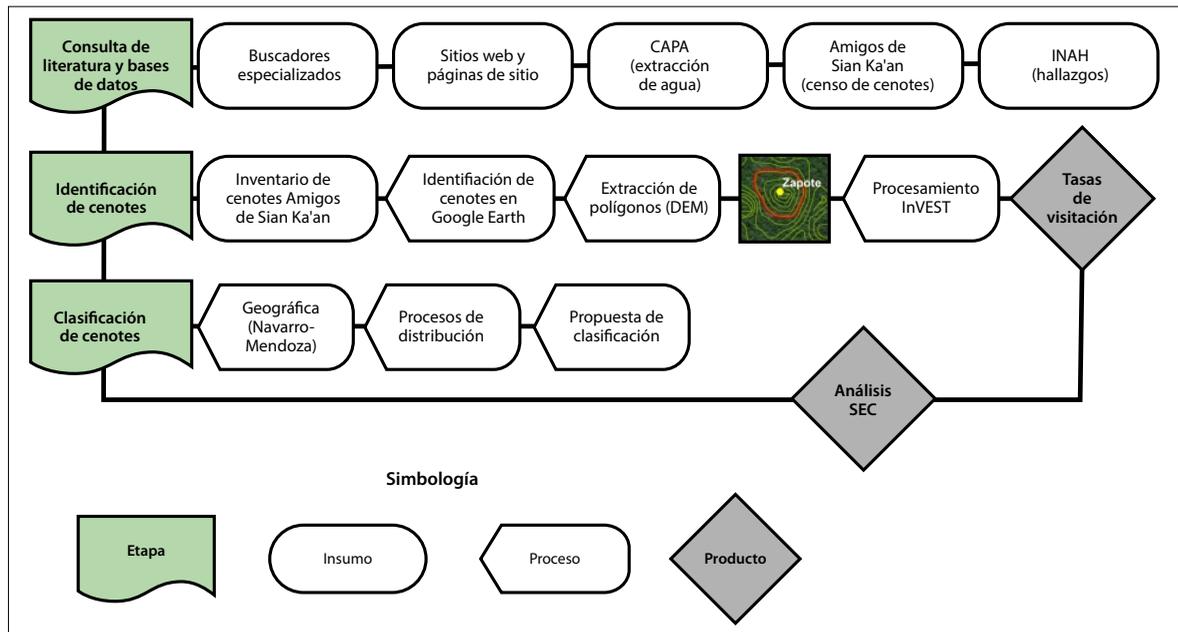


Figura 2. Diagrama metodológico.

Civil Amigos de *Sian Ka'an*. Al Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) sobre vestigios arqueológicos y antropológicos descubiertos en cenotes y cuevas; a la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo (CAPA) la ubicación de los cenotes que son aprovechados para la extracción de agua. Las solicitudes al INAH y CAPA se llevaron a cabo a través de la Plataforma Nacional de Transparencia. Por cuestiones de seguridad nacional, no fue posible obtener la ubicación de los cenotes utilizados para la extracción de agua, sin embargo, en trabajo de campo se identificó un cenote en Chemuyil que abastece agua a la comunidad de Akumal y al resort Bahía Príncipe. En la visita a la Dirección General de Desarrollo Urbano Sustentable se constató que no hay un inventario de cenotes, pese a su importancia señalada en el Reglamento de Cenotes y Cavernas del Municipio de Tulum. Algunos datos se obtuvieron a través de la observación y entrevistas no estructuradas durante las visitas a algunos cenotes en trabajo de campo durante 2023.

**Fase 2).** Identificación de cenotes con mayor número de visitación. Se utilizó la herramienta InVEST 3.13.0 (Integrated Valuation of Ecosystem

Services and Tradeoffs) de Natural Capital Project, específicamente su modelo de recreación. Esta herramienta crea insumos para desarrollar cartografía, utilizados para conocer el manejo recreativo del ecosistema analizado.

Este instrumento genera tasas de visitación a partir de fotografías georreferenciadas del sitio web Flickr, es decir, el número de visitas en cenotes a partir de imágenes georreferenciadas y compartidas en el sitio, lo que mejora la falta de datos empíricos (no todos los cenotes llevan registro de las visitas) y disminuye los costos de visitar cada uno de los cenotes con actividades turísticas. El modelo permite promediar el número de fotografías/usuario/días por mes y año.

La base de datos vectoriales, utilizados para mostrar la distribución de cenotes, fue proporcionada por la asociación civil Amigos de *Sian Ka'an* (2011) en formato .shp, estos a su vez se identificaron en Google Earth (reconociendo los turísticos principalmente). Puesto que la herramienta InVEST trabaja con archivos vectoriales de tipo polígono, se creó un nuevo archivo sobreponiendo la capa de cenotes (tipo puntos) en la capa depresiones kársticas (tipo polígono) identificadas a través de curvas

de nivel de un metro de equidistancia y extraídas de un modelo digital de elevación de imágenes (DEM) Alos Palsar con 12.5 m de resolución. Como polígonos, insumos para InVEST, se utilizaron las escarpas de las depresiones kársticas que coincidían con los cenotes en forma de puntos.

**Fase 3).** Clasificación de cenotes. A partir del objeto vectorial espacial tipo punto (cenotes) se realizó la clasificación propuesta por Navarro-Mendoza (1988), descrita en la introducción, ya que explica la espacialidad de los cenotes, desde el punto de vista geográfico (costeros e internos). También se realizó la clasificación de acuerdo con los procesos de disolución (abiertos, cerrados y semiabiertos). Sin embargo, estas clasificaciones no fueron suficientes para el análisis de los servicios ecosistémicos culturales. Por lo tanto, partiendo de las características encontradas de localización, infraestructura y accesibilidad, se propuso una nueva clasificación en la que interviene el factor humano:

- Cenotes prístinos: se encuentran alejados de centros de población y servicios públicos/privados. Algunos de ellos no han sido identificados por encontrarse dentro de la espesa vegetación, carecen del mínimo adecuamiento de infraestructura, son inaccesibles o de difícil acceso. En algunos casos, los cenotes son de poco interés para el turismo, pero proveen otros beneficios ambientales, culturales y económicos.
- Cenotes no prístinos: aquellos ampliamente conocidos, gestionados de manera privada, pública o colectiva (por los ejidos), son muy accesibles, se encuentran dentro de los principales centros de población o cercanos a ellos, así como a las principales vías de comunicación. Estos también se caracterizan por diferentes niveles de desarrollo en la infraestructura, su organización en torno a actividades turísticas y su belleza paisajística. Todos han sido bautizados con un nombre relacionado a su ubicación o alguna otra característica específica.

Para la elaboración de los mapas, se utilizaron, además de la capa de cenotes, áreas geoestadísticas

básicas (AGEB), infraestructura (carreteras), división política nacional y estatal, cuerpos de agua de INEGI, así como datos vectoriales de agentes perturbadores geológicos del Atlas Nacional de Riesgo y sistemas de cuevas subterráneas de Quintana Roo Speleological Survey. La cartografía se diseñó en los programas de Sistemas de Información Geográfica (GIS) ArcMap 10.8 y QGIS3, con lo que fue posible realizar un análisis espacial de los servicios ecosistémicos culturales.

## RESULTADOS

Por medio del procesamiento de los insumos cartográficos se identificó que los cenotes abiertos al público (no prístinos), se distribuyen principalmente en la zona turística a lo largo de la costa (cenotes costeros, de acuerdo con Navarro-Mendoza, 1988), sobre todo en la parte norte de la ciudad. El área donde se distribuyen corresponde a las zonas circundantes a la cabecera municipal, centros de población y aquellas en las que se extienden nuevos proyectos inmobiliarios (Figuras 3 y 4). En algunos de ellos se presenta el fenómeno de la haloclina, que consiste en una capa de separación entre agua dulce y salada por diferencia de densidad (Cenote Tours, 2022; Schmitter-Soto, Escobar-Briones *et al.*, 2002).

Por su parte, los cenotes prístinos (Figuras 3 y 5), sin infraestructura, poco conocidos o sin interés turístico se localizan en la parte oeste y noreste del municipio, cerca de la carretera 307 y Chemuyil, en zonas con poca o nula población y en línea a fracturas y lineamientos, principalmente en la fractura que atraviesa el municipio de norte a sur (Figura 3).

Los cenotes internos pueden contener agua dulce y salada, y se encuentran enclavados en la espesa vegetación. Se caracterizan por una mayor dispersión y en su mayoría son prístinos, por ende, tienden a estar mejor conservados y proveer un mayor número de servicios ecosistémicos de regulación, provisión y soporte, mientras que los servicios culturales son casi nulos.

Con el modelo de turismo y recreación de InVEST, utilizado en esta investigación, se crearon

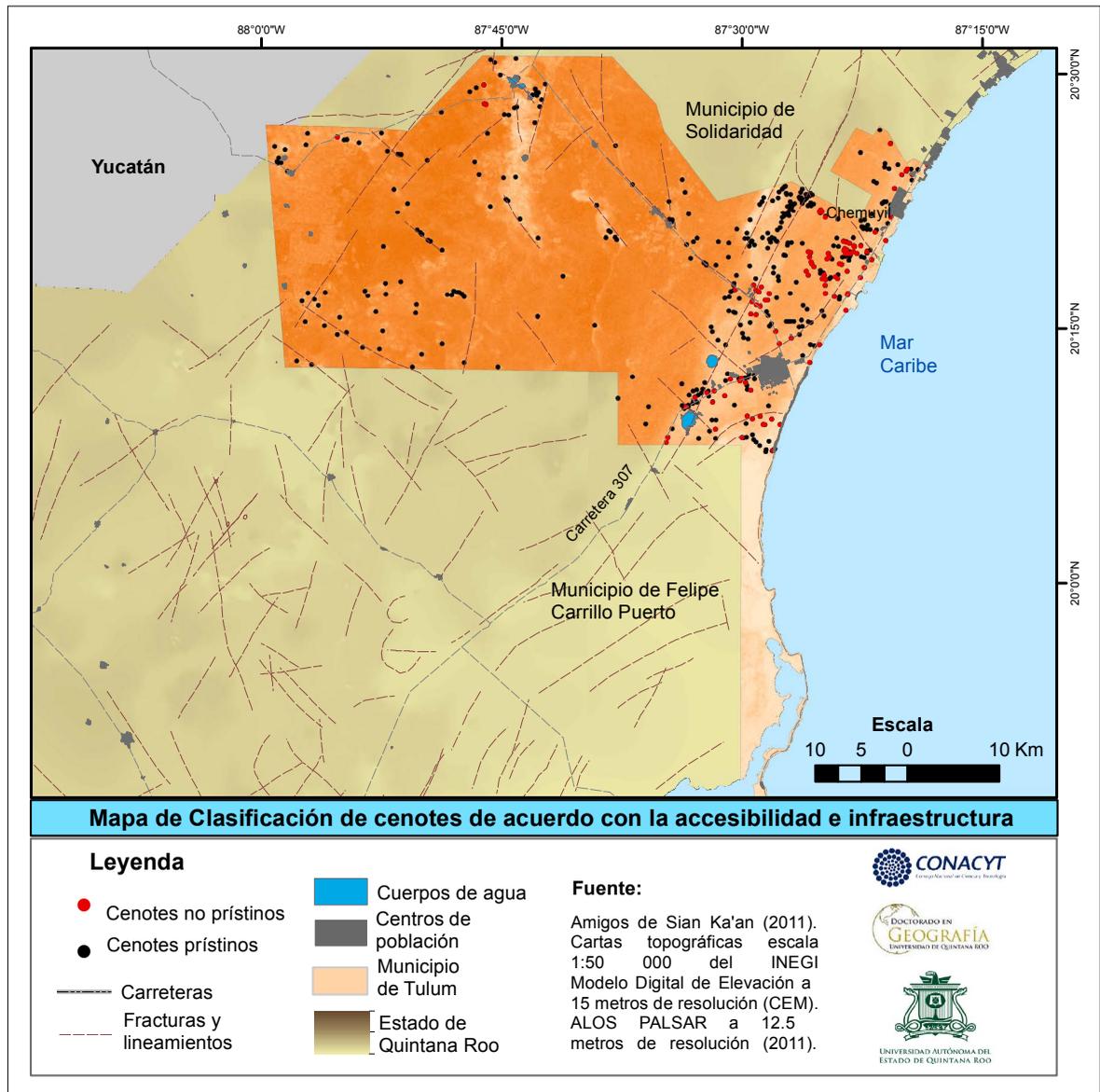


Figura 3. Mapa de clasificación de cenotes de acuerdo con la accesibilidad e infraestructura. Fuente: elaboración propia con datos de Amigos de Sian Ka'an (2011), cartas topográficas escala 1:50 000 del INEGI, Modelo Digital de Elevación del CEM a 15 metros de resolución y Alos Palsar a 12.5 metros de resolución (2011).

rangos de promedio de visitación, esto permitió prestar mayor atención a algunos cenotes (Figura 6).

Se identificaron seis cenotes con las mayores tasas de visitación (Tabla 1): el rango de mayor visitación pertenece a Casa Cenote o Cenote Manatí, posiblemente por su cercanía a playas y la desembocadura de sus aguas al mar Caribe. Le sigue Gran

Cenote, popular por sus dimensiones y conexión con cuevas y cavernas; cenote Calavera conocido por su peculiar forma y los cursos de acreditación de buceo que se ofrecen en el sitio; Dos ojos, un sistema de dos cenotes y una cueva; cenotes *Yal Kú* en la caleta de Akumal y cenote *Carwash*, utilizado anteriormente como lavadero de coches.



Figura 4. Foto de cenotes no prístinos con uso recreativo. a) cenote Escondido y, b) cenote Casa Tortuga. Fuente: los autores.



Figura 5. Fotos de cenotes prístinos ubicados en Chemuyil: a) cenote murciélago y b) cenote abastecimiento de agua potable de CAPA. Fuente: los autores.

Los cenotes *Taak Bi Ha*, *Batcave* (cuevas), *Escondido*, *Mutul-Ha*, *Choo Ha* (cuevas), *Tanka*, *Cristal*, *Xunaan ha*, el *Pit*, *Nic Te Ha*, *Tak Be Ha* y *Nohoch Na Chich* y *Cristal* también tienen visitas significativas de acuerdo con InVEST; estos cenotes no prístinos son atractivos a los visitantes por su particular belleza, la cercanía con los centros de población, dotación de infraestructura y accesibilidad.

Los cenotes con mayores índices de visitación se encuentran fácilmente en páginas de internet y son de mayor promoción por tour operadores, guías y agencias de turismo, que realizan alianzas con sus administradores. Esta colaboración ha permitido un mayor número de turistas, empleos y beneficios de forma directa e indirecta, pero también un pro-

ceso de masificación que está provocando impactos negativos. Algunas de las prácticas insostenibles observadas en estos cenotes fue la concentración masiva de visitantes en distintos horarios, incorporación de flora exótica, grandes modificaciones en la infraestructura natural y distintos tipos de basura. Los cenotes con mayor número de visitas no cuentan con estudios de capacidad de carga y han presentado algunos problemas derivados de la masificación turística, entre ellos, la presencia de la bacteria *Escherichia coli* registrada en 2022 por la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepris) durante los estudios de calidad de agua en los cenotes Calavera, Casa Cenote y cenote Cristal. Otro impacto derivado de las altas tasas de visitación es la disminución de

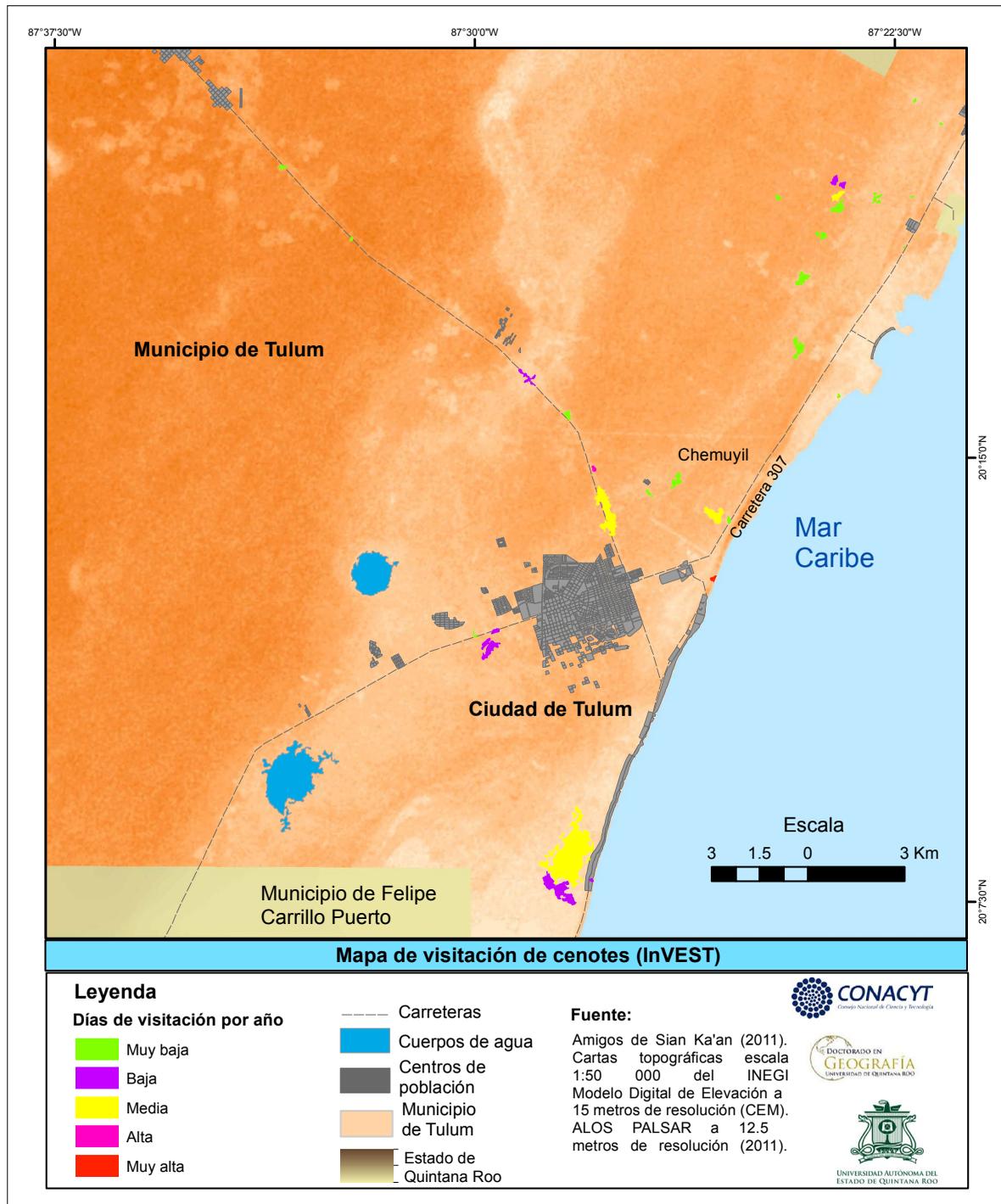


Figura 6. Mapa de visitación de cenotes (InVEST). Fuente: elaboración propia con datos de Amigos de *Sian Ka'an* (2011), Cartas topográficas escala 1:50 000 del INEGI, Modelo Digital de Elevación del CEM a 15 metros de resolución y Alos Palsar a 12.5 metros de resolución (2011).

Tabla 1. Cenotes con mayores días de visita.

Nombre	Características físicas	Tipo	Ubicación	Nivel de visita	Especies representativas	Infraestructura turística	Servicios turísticos	Tipo de propiedad
Casa Cenote o Cenote Manatí (Por los manatíes)	Abierto Costero Cuevas subterráneas Halodina	No prístino	Zona residencial de Tankah	Muy alta	Manglares Manatíes Cocodrilo	Regaderas Camastros Baños Restaurante Señalética	Buceo, Paddleboard Esnórquel Observación de flora y fauna Renta de equipo para actividades acuáticas Alimentos y bebidas	Administración privada
Gran Cenote (Por su tamaño)	Semiabierto, Interno Forma parte del sistema Sac Actun	No prístino	Carretera Tulum-Cobá	Alta	Vegetación selvática Tortugas	Estacionamiento Plataformas, Barandales, Escaleras, Casilleros, Vestidores Restaurante	Nado libre Buceo Nado con tortugas Renta de equipo para realizar actividades recreativas Guías Alimentos y bebidas	Propiedad privada
Calavera o Temple of doom (Por la forma que se aprecia desde las alturas)	Joven, Semiabierto Interno	No prístino	Carretera Tulum-Coba	Media	Vegetación selvática	Escaleras Barandales Baños Estacionamiento Camastros	Buceo especializado Cursos de acreditación Renta de equipo para actividades acuáticas	Administración privada
Dos ojos	Sistema de dos cenotes y una cueva Formación de espeleotemas Emplazamiento de fósiles Forma parte del sistema Sac Actun Interconexión con otros cenotes	No prístino	Carretera federal 307	Media	Vegetación selvática Murecillos	Casilleros, Restaurantes Tiendas de recuerdos, Zonas de descanso, Estacionamiento Regaderas Restaurante Vestidores Escaleras Barandales	Renta de equipo de buceo y Bicicletas Buceo (diferentes niveles), Snorkel, Tirollesa, Visitas al Museo de la Prehistoria Senderismo Guía	Pertenece al parque Dos Ojos (alberga al cenote Jaguar, El Pit, Monos, Misterio Maya y Nicté-Ha), un proyecto del Ejido Jacinto Pat
Yal Ku (Laguna Yal-Ku o Caleta Yal-Ku)	Costero conexión subterránea al mar a través de cuevas	No prístino	Akumal	Baja	Manglares Peces Reptiles Aves	Casilleros Barandales Escaleras Puentes Baños Regaderas Renta de equipo Restaurante Cabañas Hammacas Sillas	Snorkel	Propiedad privada (Parque)
Carwash (Aktun Ha)	Cenote abierto De interior Pertenece al sistema Sac Actun Cuevas subterráneas	No prístino	Carretera Tulum- Coba.	Baja	Vegetación submarina Tortugas Peces Lagartos	Infraestructura incluyente Estacionamiento Mesas Plataforma de saltos Casilleros Baños Vestidores Senderos	Snorkel Buceo Observación flora y fauna	

avistamiento de manatíes en cenote Manatí (Casa Cenote), a los cuales debe su nombre.

Algunos de los cenotes cercanos a la costa y conectados a cuevas presentan el fenómeno de la haloclina al igual que singulares paisajes subterráneos, los cuales son ideales para realizar buceo (de investigación y deporte extremo), actividad ampliamente desarrollada en el municipio. Los de gran belleza escénica, infraestructura turística y accesibilidad son usados en la práctica de actividades que no requieren profesionalización y son los más visitados. Una minoría se utiliza como abrevadero (lugar destinado para la cría y alimentación de ganado), se encuentran dentro de la clasificación de cenotes no prístinos, carecen de infraestructura y se localizan cercanos a potreros o dentro de ellos. Por otra parte, también hay cenotes que se ubican en polígonos pertenecientes a áreas naturales protegidas, por su importancia ambiental, como los tres que se encuentran en el Área Natural Protegida Xcacel-Xcacelito, en ellos la gestión permite un mayor cuidado y control en el número de visitantes (Figura 7).

Además del turismo, otros de los servicios ecosistémicos culturales provistos por los cenotes, se relacionan con la ciencia, la exploración, el legado y la identidad cultural. En los cenotes y cuevas se han encontrado restos arqueológicos y paleontológicos útiles a investigadores y científicos para reconstruir parte de la historia, dar respuestas a diversas interrogantes y crear modelos futuros. El buceo especializado y con fines científico-educativos se realiza principalmente en cenotes prístinos, cercanos a vías de comunicación, señalados en la Figura 7: El Pet Cementery, El Pit Cuevas, Abejas, Angelita, Carwash, Manatí, Dos pisos y El Koi. En algunos también se han identificado vestigios arqueopaleontológicos, conexiones con cavernas, importantes nichos ecológicos y el fenómeno de la haloclina, al mismo tiempo, estos cuerpos de agua generan percepción de identidad dentro de los pueblos mayas, forman parte de su cosmovisión y su relación con el medio ambiente. Las cuevas sumergidas de Tulum son ricas en evidencia fósil y prehistórica (Rojas-Sandoval, 2021), tal como lo evidencia la Tabla 2 y la Figura 8.

Tabla 2. Hallazgos arqueo-paleontológicos encontrados en cenotes pertenecientes al municipio de Tulum, Quintana Roo

Cenote	Sistema de cuevas	Subsistema	Tipo de hallazgo	Hallazgo
Las Palmas	Ox Bel Ha	Mukal	Arqueológico	La señora de las Palmas, el abuelo de Muknal, madera quemada
Naharon o Cristal	Ox Bel Ha	Naranjal	Arqueológico	Esqueleto de Eva/mujer de Naharon
El Templo	Templo		Arqueológico	El hombre del templo o el extraviado
Las Calaveras			Arqueológico	122 cráneos humanos de la época prehispánica
Aktun-Ha			Arqueológica	Madera quemada
El Pit (Jacinto Pat)	Sac Aktun	Dos Ojos	Arqueo-paleontológico	Una nueva especie de felino
Cenote Chanhoh	Ton Há		Arqueológico	Tres esqueletos humanos, entre ellos Ixchel
La chimenea			paleontológico	
Hoyo negro	Sac Aktun	Aktun Hu	Arqueo-paleontológico	Esqueleto de Nahia, sinsacro de un perezoso gigante de Tierra, tigre dientes de sable, gonfoterio, osos, armadillos, tapires

Fuente: elaboración propia con datos de González-González *et al.* (2008); González-González *et al.* (2014); INAH (2020); Rojas-Sandoval y González (2006).

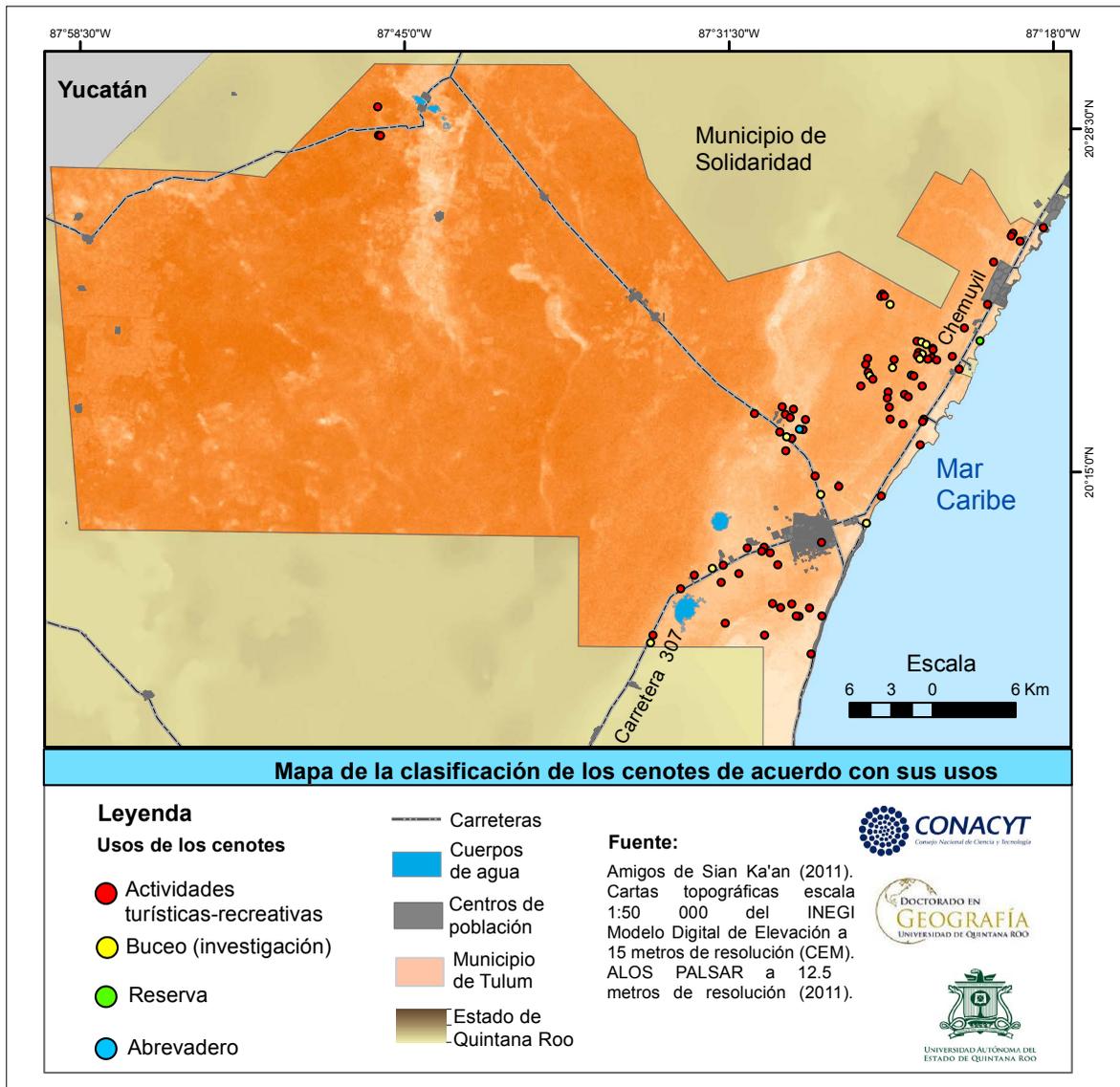


Figura 7. Mapa de la clasificación de los cenotes de acuerdo con sus usos. Fuente: elaboración propia Amigos de Sian Ka'an (2011), Cartas topográficas escala 1:50 000 del INEGI, Modelo Digital de Elevación del CEM a 15 metros de resolución y Alos Palsar a 12.5 metros de resolución (2011).

En toda la península de Yucatán se han identificado restos históricos de la cultura maya, sin embargo, en el cenote Calaveras de Tulum, se ha hecho el mayor descubrimiento de restos humanos prehispánicos y en buen estado de conservación. En otros cenotes y cuevas se han descubierto restos humanos (pertenecientes a diez individuos) de la Era de Hielo, que ponen en duda teorías sobre

los primeros pobladores del continente y abren la posibilidad a nuevas explicaciones sobre el origen del hombre americano. También se han encontrado restos de megafauna, algunos extintos, especies de las cuales no se conocía su existencia y otras que se han adaptado. Estos restos permiten tener conocimiento del paleoclima de la región y los ecosistemas prehistóricos. Algunos cenotes y cuevas han sido

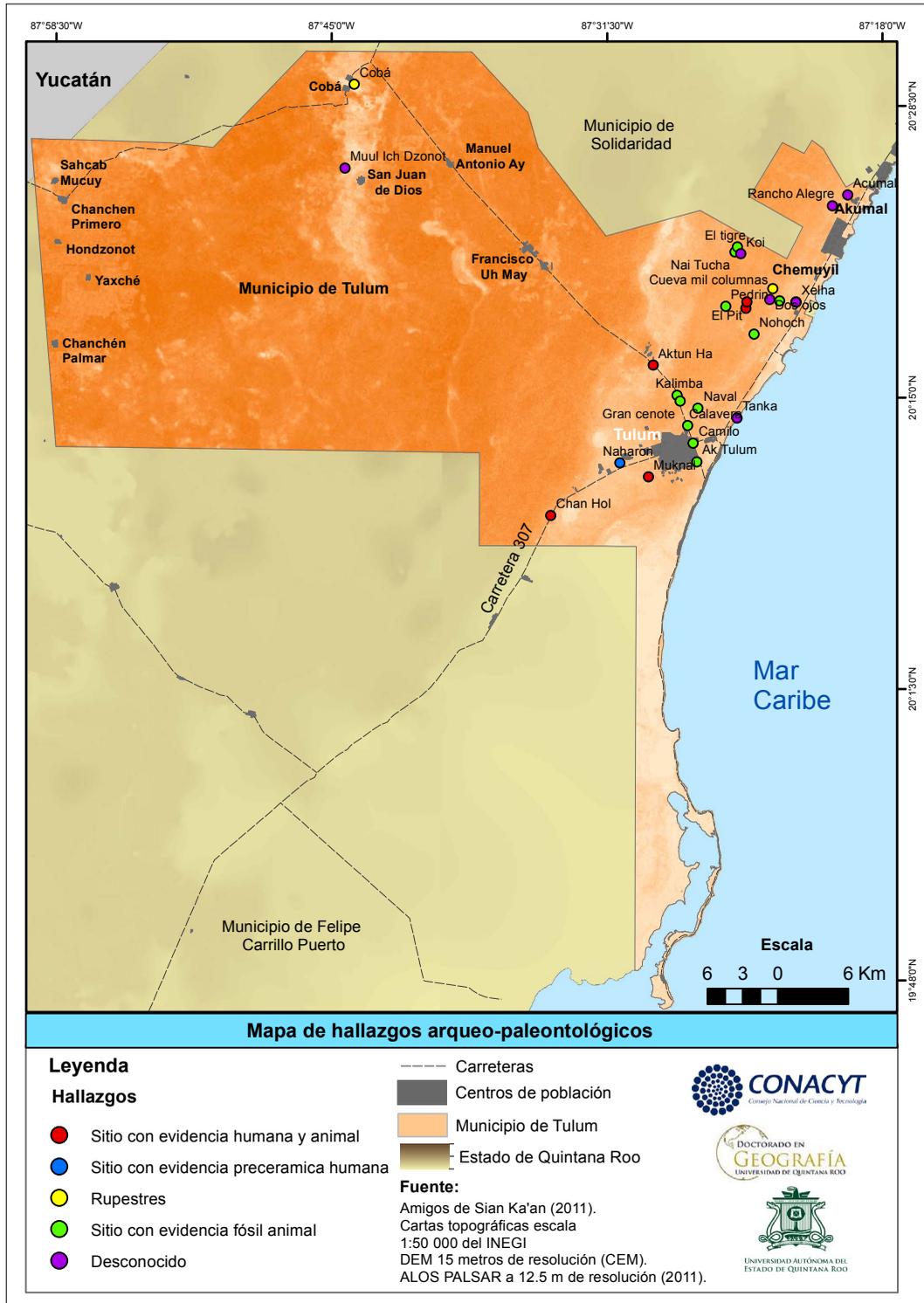


Figura 8. Mapa de hallazgos arqueo-paleontológicos. Fuente: Martos-López (2007) y datos obtenidos del INAH por medio de la Plataforma Nacional de Transparencia.

saqueados por el valor que representan para algunos coleccionistas.

En la Figura 8 se observa que la mayoría de los cenotes en los cuales se ha encontrado algún tipo de hallazgo arqueológico, corresponden a cenotes cercanos a la costa y no prístinos, y la mayoría de los cenotes con evidencia fósil animal se ubican muy cerca de la ciudad con dirección a Cobá. La accesibilidad ha permitido un mayor conocimiento sobre los cenotes y sistemas de cuevas que se distribuyen cerca de la costa.

## DISCUSIÓN

Actualmente, los cenotes tienen una gran relevancia para el desarrollo económico, cultural y social de la península de Yucatán. En la zona conocida como el anillo de cenotes, en el estado de Yucatán, los servicios ecosistémicos culturales basados en la naturaleza, el paisaje y valores espirituales han beneficiado a las comunidades con ingresos, empleos, especialización del trabajo, revalorización de la identidad y mejoras en la infraestructura (López-Monsalvo (2017)). En el caso específico del área de estudio de esta investigación, resaltan dos servicios ecosistémicos culturales, los cuales han propiciado un cambio en la dinámica del territorio e incentivado el desarrollo de todo un segmento turístico.

En primer lugar, el SEC turismo y recreación de cenotes se ha vuelto cada vez más importante dentro de la oferta turística de la región, especialmente después de la pandemia del COVID-19, dándole a la península de Yucatán un sello único incluso a nivel internacional. El número de visitas está relacionado con la dotación de infraestructura, la accesibilidad y las peculiaridades escénicas de cada cenote, por lo que la mayor visitación se observa en aquellos cercanos a la ciudad, servicios básicos y turísticos. En Tulum, el uso recreativo se extiende a otros ejidos y comunidades casi a la par de la expansión urbana. En años recientes, las playas del Caribe se han inundado de sargazo, lo que ha impactado en la imagen paradisiaca proyectada. El malestar de los visitantes por este fenómeno ha aumentado las visitas a diferentes cenotes que

poseen características propias y que se han resaltado mediante la promoción de paquetes y rutas con visitas guiadas. Alrededor del turismo de cenotes se ha formado toda una industria con beneficios económicos palpables a través de los costos de entrada, la renta de equipo para actividades de buceo, snorkel y otras actividades acuáticas, renta de bicicletas, motos y coches, renta de casilleros, venta de trajes de baño y bloqueadores *ecofriendly*, tiendas de artesanías, creación de hoteles cercanos o dentro de las instalaciones, venta de alimentos, renta de estacionamiento, servicio de guías, creación de parques temáticos, actividades de turismo de aventura y ecoturismo, tour operadores, cursos, capacitaciones y certificaciones; con beneficios para locales, ejidatarios, nacionales y extranjeros. Toda esta dinámica vinculada a los servicios ha provocado un fuerte movimiento migratorio con crecimiento exponencial en el número de habitantes y, por ende, la expansión urbana descontrolada, el desarrollo de la industria inmobiliaria, de la construcción y la comercialización, así como la especulación y privatización del suelo urbano.

En segundo lugar, el SEC investigación y educación de cenotes se encuentra relacionado con los hallazgos arqueopaleontológicos de las últimas décadas en cuevas y cenotes de Tulum y el descubrimiento de laberintos y sistemas complejos de ríos subterráneos. Esto ha provocado el desplazamiento de investigadores de todas partes del mundo y de académicos e investigadores nacionales y locales, entre ellos geólogos, geógrafos, espeleólogos, espeleólogos acuáticos, antropólogos y biólogos. Los cenotes y cuevas desde esta perspectiva han funcionado como una capsula del tiempo que ha comenzado a abrirse y un laboratorio disponible para todas las ciencias, que favorece el desarrollo del conocimiento científico.

Una actividad con un alto nivel de desarrollo en el municipio de Tulum, y que se relaciona tanto con el turismo y la investigación, es el buceo especializado. Incluso se han abierto tiendas con renta de equipo que incluyen entradas a cenotes, pertenecientes en su mayoría a extranjeros. También se ofrecen cursos y certificaciones para diferentes niveles de buceo (cenote Calavera es uno de los cenotes donde se realizan prácticas) y se crean

alianzas para la promoción de la actividad como un producto más.

Los servicios ecosistémicos culturales y las diferentes actividades realizadas en los cenotes y, en consecuencia, a sus alrededores, también tienen impactos negativos como el uso intensivo de los cenotes (Suárez-Morales y Rivera-Arriaga, 1988), contaminación de cuerpos de agua (Duhart, 2022; Organización Editorial Mexicana, 2022), degradación en la calidad del agua (Leal-Bautista *et al.*, 2013), saqueo de piezas prehispánicas y arqueológicas, desplazamiento e introducción de especies, disputas e incertidumbre respecto a la tenencia de la tierra, derivados principalmente de la falta de estudios de capacidad de carga (Arroyo Arcos *et al.*, 2019), la mala gestión, los vacíos legales, la modificación de los espacios naturales para la construcción de megaproyectos (Marín-Marín *et al.*, 2020), la vulnerabilidad intrínseca de los ecosistemas de cuevas y cenotes, la poca coordinación entre organismos involucrados, la desinformación y la falta de educación sobre el funcionamiento sistémico de los ecosistemas, el débil proceso de gobernanza, la diferencia de interés sobre los servicios ecosistémicos y el uso insostenible de los cenotes, así como la desigualdad en las figuras de la tenencia de la tierra y los gestores de los cenotes.

Aunque el agua es un bien inalienable, sus contenedores, los cenotes, sí lo son, mediante la comercialización de los terrenos donde se encuentran (Cortés-Campos, 2018), por ello los cenotes pueden pertenecer a privados y colectivos, tener mínimas restricciones y sus propios reglamentos internos.

La masificación turística de estos espacios, además de ejercer presión sobre el medio ambiente, también lo hace en las experiencias de visitantes y locales (Mondragón-Mejía *et al.*, 2019). Parte de la masificación se debe a los grupos guiados que llegan de otras áreas turísticas cercanas a Tulum. Los cenotes han pasado de ser un espacio sagrado a un producto de la mercantilización, incluso los gestionados por ejidos.

En las zonas turísticas con alta diversidad ecológica existe una estrecha relación entre los servicios ecosistémicos y el turismo, ya que los primeros desempeñan un rol importante para el desarrollo

del turismo especialmente en zonas rurales, además de ser indispensables para el desarrollo y la continuidad humana (J. Wang *et al.*, 2023; SEMARNAT, 2021). En los entornos urbanos los servicios ecosistémicos también son de suma importancia para el desarrollo, sin embargo, es evidente la falta de investigaciones que profundicen en las relaciones entre lo urbano, los servicios ecosistémicos y el desarrollo del turismo (Muyibul *et al.*, 2023).

Aunque Tulum es uno de los pocos municipios con reglamento para el manejo de cenotes, cuevas y caverna (Reglamento de cenotes y cavernas del municipio de Tulum), existen vacíos legales, derivados principalmente de la falta de información y conocimiento, así como la ineficiente gestión. Aun cuando se sabe de la vulnerabilidad del sistema kárstico, continúan como prioridad las obras que generen mayor derrama económica. Los responsables de la administración pública se han inclinado a crear productos competitivos, capaces de captar mercados turísticos internacionales (Toledo *et al.*, 2008), sin pensar en el costo-beneficio de sus acciones. Es necesario entender la compleja relación hombre-naturaleza, no solo la importancia de los ecosistemas y sus beneficios para el desarrollo y la continuidad humana (SEMARNAT, 2021), sino también los impactos negativos derivados de su uso.

## CONCLUSIONES

El turismo y la recreación dependen de ecosistemas saludables, al mismo tiempo esta actividad incentiva el desarrollo de las comunidades locales, siempre y cuando se realice bajo esquemas de responsabilidad y conocimiento, ya que, de otra manera, se transforma en un riesgo para la provisión de otros servicios ecosistémicos tales como agua, alimento y hábitat para distintas especies, investigaciones y mantenimiento de la biodiversidad.

El abordaje de los servicios ecosistémicos constituye una herramienta de planificación/gestión del territorio para los tomadores de decisiones, así como una oportunidad social para modificar los patrones de consumo y transitar hacia un aprovechamiento responsable que garantice la provisión de los servicios. Los gobiernos han rebasado su ca-

pacidad para un crecimiento ordenado de la ciudad y el rápido aumento del turismo en el territorio, lo que se traduce en un área de oportunidad para crear mecanismos de gestión de cenotes y rescatar la idea inicial de Tulum como una alternativa turística, regular las actividades turísticas en los cenotes y aprovechar las tendencias *Holistic Wellnes* que caracterizan a Tulum. La espiritualidad y la salud mental son servicios ecosistémicos que apenas se observaron en algunos cenotes; sin embargo, Tulum vive una atmósfera de espacios exclusivos en armonía con la naturaleza, con santuarios de la hospitalidad, terapias de sanación, cocina gourmet, yoga, estilos *eco-chic* y espacios arquitectónicos rústicos. Este segmento está muy ligado a la búsqueda de la armonía interior, la conexión con la cultura y el cuidado del medio ambiente. También se observó que, por la belleza escénica de estos espacios, son ideales para cursos de modelaje y fotografía profesional.

Existe un área de oportunidad para nuevas investigaciones sobre servicios ecosistémicos de los cenotes, desde perspectivas sociales, económicas y físicas que complementen este trabajo mediante metodologías empleadas en el estudio de otros ecosistemas. Futuras investigaciones tendrán que enfrentarse a algunas limitaciones como: 1) la falta de insumos y capital intelectual; 2) la información dispersa, a veces contradictoria y confusa; 3) la accesibilidad a bases de datos sobre la caracterización o ubicación de los cenotes y finalmente, y 4) el acceso a cenotes enclavados en la selva.

## REFERENCIAS

- Arnaiz-Schmitz, C., Herrero-Jáuregui, C., y Schmitz, M. F. (2021). Recreational and Nature-Based Tourism as a Cultural Ecosystem Service. Assessment and Mapping in a Rural-Urban Gradient of Central Spain. *Land*, 10(4), 343. <https://doi.org/10.3390/land10040343>
- Arroyo Arcos, L., Bolan Sorchini, S., y Hernández Aguilar, M. L. (2019). Potencial turístico del sistema de cenotes del municipio de Tulum, México. En O. Frausto Martínez (Ed.), *Conocimientos y saberes sobre el karst tropical de México* (pp. 177-196). [https://www.researchgate.net/publication/335541363\\_Potencial\\_turistico\\_del\\_sistema\\_de\\_cenotes\\_del\\_municipio\\_de\\_Tulum\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/335541363_Potencial_turistico_del_sistema_de_cenotes_del_municipio_de_Tulum_Mexico)
- Avendaño-Leadem, D., Cedeño-Montoya, B., y Arroyo-Zeledón, M. S. (2020). Integrando el concepto de servicios ecosistémicos en el ordenamiento territorial. *Revista Geográfica de América Central*, 2(65), 63-90. <https://doi.org/10.15359/rgac.65-2.3>
- Ayuntamiento de Tulum 2021-2024, y Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. (2023). *Avances Atlas de Riesgos del Municipio de Tulum, Quintana Roo, 2023*. Ayuntamiento de Tulum, Quintana Roo 2021-2024.
- Banarsyadhimi, U. R. A. M. F., Dargusch, P., y Kurniawan, F. (2022). Assessing the Impact of Marine Tourism and Protection on Cultural Ecosystem Services Using Integrated Approach: A Case Study of Gili Matra Islands. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12078. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912078>
- Beddows, P., Blanchon, P., Escobar, E., y Torres-Talamante, O. (2007). Los Cenotes de la Península de Yucatán. *Arqueología Mexicana*, 83, 32-35. <https://arqueologiamexicana.mx/mexico-antiguo/los-cenotes-de-la-peninsula-de-yucatan>
- Braat, L. C., y de Groot, R. (2012). The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy. *Ecosystem Services*, 1(1), 4-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.011>
- Cenote Tours. (2022, mayo 12). ¿Qué es una haloclina? <https://www.cenotetours.com/es/articulos/que-es-una-haloclina/>
- Cortés-Campos, I. (2018). Los cenotes en el mercado de tierras ejidales del oriente de Yucatán (2013-2016). *Península*, XIII(1), 181-202. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-57662018000100181&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-57662018000100181&lng=es&tlng=es).
- Costanza, R., de Groot, R., Braat, L., Kubiszewski, I., Fioramonti, L., Sutton, P., Farber, S., y Grasso, M. (2017). Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *En Ecosystem Services* (Vol. 28, pp. 1-16). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>
- Csurgó, B., y Smith, M. K. (2022). Cultural Heritage, Sense of Place and Tourism: An Analysis of Cultural Ecosystem Services in Rural Hungary. *Sustainability*, 14(12), 7305. <https://doi.org/10.3390/su14127305>
- De Groot, R. S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L., y Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 7(3), 260-272. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.10.006>

- De Groot, R. S., Fisher, B., Christie, M., Aronson, J., Brat, L., Haines-Young, R. H., Gowdy, J. M., Maltby, E., Neuville, A., Polasky, S., Portela, R., y Ring, I. (2010). Chapter 1, Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation. En P. Kumar (Ed.), *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations* (Vol. Chapter 1, pp. 9-40). Ecological and Economic Foundations; Earthscan, Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849775489>
- Duhart, M. (2022, agosto 25). Bejil-Há: una historia de éxito en Chemuyil tras la sombra de la destrucción. [Archivo de Vídeo]. [https://www.youtube.com/watch?v=v2WbhUF0\\_RQ](https://www.youtube.com/watch?v=v2WbhUF0_RQ)
- FAO. (2023). *Servicios ecosistémicos y biodiversidad*. Organización de Las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <https://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/>
- Fish, R., Church, A., Willis, C., Winter, M., Tratalos, J. A., Haines-Young, R., y Potschin, M. (2016). Making space for cultural ecosystem services: Insights from a study of the UK nature improvement initiative. *Ecosystem Services*, 21, 329-343. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.09.017>
- Flores, J. S., y Espejel, I. (1994). *Tipos de vegetación de la Península de Yucatán. Etnoflora Yucatanense* (J. S. Flores, Ed.). Universidad Autónoma de Yucatán.
- Gabriel, J. J., Reinhardt, E. G., Peros, M. C., Davidson, D. E., van Hengstum, P. J., y Beddows, P. A. (2009). Palaeoenvironmental evolution of Cenote Aktun Ha (Carwash) on the Yucatan Peninsula, Mexico and its response to Holocene sea-level rise. *Journal of Paleolimnology*, 42(2), 199-213. <https://doi.org/10.1007/s10933-008-9271-x>
- Gijón Yescas, N., Aguilar Duarte, Y., Frausto Martínez, O., y Bautista Zuñiga, F. (2021). Anatomía de un cenote con el uso de dron. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(30). <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/3634>
- González González, A. H., Rojas Sandoval, C., Terrazas, A., Sanvicente, M. B., Stinnesbeck, W., Avilés, J., de Los Ríos-Paredes, M. M., y Acevez, E. (2008). The arrival of humans on the Yucatan Peninsula: Evidence from submerged caves in the state of Quintana Roo, Mexico. *Current Research in the Pleistocene*, 25, 1-24. [https://www.researchgate.net/publication/310750546\\_The\\_arrival\\_of\\_humans\\_on\\_the\\_Yucatan\\_Peninsula\\_Evidence\\_from\\_submerged\\_caves\\_in\\_the\\_state\\_of\\_Quintana\\_Roo\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/310750546_The_arrival_of_humans_on_the_Yucatan_Peninsula_Evidence_from_submerged_caves_in_the_state_of_Quintana_Roo_Mexico)
- González González, A. H., Terrazas, A., Stinnesbeck, W., Benavente, M. E., Avilés, J., Rojas, C., Padilla, J. M., Velásquez, A., Acevez, E., y Frey, E. "Dino." (2014). The first human settlers on the Yucatan Peninsula: Evidence from drowned caves in the State of Quintana Roo (South Mexico). 323-337. [https://www.researchgate.net/publication/290914765\\_The\\_first\\_human\\_settlers\\_on\\_the\\_Yucatan\\_Peninsula\\_Evidence\\_from\\_drowned\\_caves\\_in\\_the\\_State\\_of\\_Quintana\\_Roo\\_South\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/290914765_The_first_human_settlers_on_the_Yucatan_Peninsula_Evidence_from_drowned_caves_in_the_State_of_Quintana_Roo_South_Mexico)
- Guan, M., y Xiong, C. (2022). The Net Spatio-Temporal Impact of the International Tourism Is-Land Strategy on the Ecosystem Service Value of Hainan Island: A Counterfactual Analysis. *Land*, 11(10), 1694. <https://doi.org/10.3390/land11101694>
- Hall, F. G. (1936). *Physical and chemical survey of cenotes of Yucatan. The cenotes of Yucatán* (AS Pearse, AP Creaser, y FG Hall, Eds.). Carnegie Institute of Washington.
- Hernández Aguilar, M. L. (2019). Riesgo de hundimientos y subsidencia kárstica en la zona maya de Quintana Roo. En O. Frausto (Ed.), *Conocimientos y saberes sobre el karst tropical de México*. [http://seidcyt.coqcyt.gob.mx/images/pdf/capitulos\\_libros/pxcjr-12hGlGSQq6Fnr3PXesjeINgtmSBLkAHphEa.pdf](http://seidcyt.coqcyt.gob.mx/images/pdf/capitulos_libros/pxcjr-12hGlGSQq6Fnr3PXesjeINgtmSBLkAHphEa.pdf)
- H. Ayuntamiento de Tulum. (2018). *Reglamento de cenotes y cavernas del municipio de Tulum*. Acta de cabildo del Ayuntamiento de Tulum. <https://tulum.gob.mx/Transparenciaftp/2022/Secretaria%20Gral/I/1er%20TRIM/?C=M;O=A>
- Hu, C., Wang, Z., Li, J., Liu, H., y Sun, D. (2022). Quantifying the Temporal and Spatial Patterns of Ecosystem Services and Exploring the Spatial Differentiation of Driving Factors: A Case Study of Sichuan Basin, China. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.927818>
- INAH. (2020, April 26). Proyecto Arqueológico de Cenotes y Cuevas de Quintana Roo. Cenote Aktun Ha, Tulum, Q. Roo. Cámara de los Ancestros (10,750 - 10,250 CalYrBP). Arqueología Subacuática México. <https://arqsubmx.weebly.com/blog/cenote-aktun-ha>
- INEGI. (2020). *Inventario Nacional de Viviendas 2020*. Indicadores de población y vivienda por manzanas. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/?app=inv>
- Infante Ramírez, K. D., y Arce Ibarra, A. M. (2015). Percepción local de los servicios ecológicos y de bienestar de la selva de la zona maya en Quintana Roo, México. *Investigaciones Geográficas*, 86. <https://doi.org/10.14350/ig.36593>
- Leal-Bautista, R. Ma., Lenczewski, M., Morgan, C., Gahala, A., y McLain, J. E. (2013). Assessing Fecal Contamination in Groundwater from the Tulum Region, Quintana Roo, Mexico. *Journal of Environmental Protection*, 4(11), 1272-1279. <https://doi.org/10.4236/jep.2013.411148>
- Llanes Salazar, R., y Rejón Márquez, K. (2022). Agua amenazada. Informe sobre la grave contaminación del Anillo de Cenotes en la Península de Yucatán

- (México). [https://www.dplf.org/sites/default/files/agua\\_amenazada\\_-\\_informe\\_contaminacion\\_anillo\\_de\\_cenotes\\_yucatan\\_mexico.pdf](https://www.dplf.org/sites/default/files/agua_amenazada_-_informe_contaminacion_anillo_de_cenotes_yucatan_mexico.pdf)
- López Monzalvo, M. L. (2017). *Los servicios ecosistémicos como estrategia para la valoración del agua subterránea de la Reserva Geohidrológica del Anillo de Cenotes, Yucatán*. Tesis de Maestría. CICY. <https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/428>
- Luo, X., Yang, J., Sun, W., y He, B. (2021). Suitability of human settlements in mountainous areas from the perspective of ventilation: A case study of the main urban area of Chongqing. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127467. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127467>
- MacSwiney G., M. C., Vilchis L., P., Clarke, F. M., y Racey, P. A. (2007). The importance of cenotes in conserving bat assemblages in the Yucatan, Mexico. *Biological Conservation*, 136(4), 499-509. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.12.021>
- MAE, UICN, y GIZ. (2018). *Programa de Desarrollo de Capacidades sobre Adaptación basada en Ecosistemas Manabí sAbE para líderes comunitarios*. Módulo 1. Programa Regional “Estrategias de Adaptación al cambio climático basadas en Ecosistemas en Colombia y Ecuador” (MAE, UICN, & GIZ, Eds.; MAE, UICN y GIZ). <https://www.ambiente.gob.ec/programa-regional-abe-ecuador/>
- Marín Marín, A. I., Zizumbo Villarreal, L., Palafox Muñoz, A., y Vargas Martínez, E. E. (2020). Conflictos ambientales del turismo: el caso del ejido José María Pino Suárez, Tulum, Quintana Roo. *Península*, 15(1). [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-576620000100105](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-576620000100105)
- Martos López, L. A. (2007). Los cenotes en la actualidad. Entre la veneración y la explotación. *Arqueología Mexicana*, XIV(83). <https://arqueologiamexicana.mx/mexico-antiguo/los-cenotes-en-la-actualidad-entre-la-veneracion-y-la-explotacion>
- MEA. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis* (Millennium Ecosystem Assessment, Ed.). World Resources Institute. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Meacham, M., Norström, A. V., Peterson, G. D., Andersson, E., Bennett, E. M., Biggs, R., Crouzat, E., Cord, A. F., Enfors, E., Felipe-Lucia, M. R., Fischer, J., Hamann, M., Hanspach, J., Hicks, C., Jacobs, S., Lavorel, S., Locatelli, B., Martín-López, B., Plieninger, T., y Queiroz, C. (2022). Advancing research on ecosystem service bundles for comparative assessments and synthesis. *Ecosystems and People*, 18(1), 99–111. <https://doi.org/10.1080/26395916.2022.2032356>
- Méndez González, L. (2010). *Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR) – Versión 2009-2012. Sitio Ramsar Anillo de Cenotes*. Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del Gobierno del Estado de Yucatán. Dirección de Conservación de la Biodiversidad. <https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/MX2043RIS.pdf>
- Mondragón-Mejía, J. A., Enseñat-Soberanis, F., y Blanco-Gregory, R. (2019). La percepción de multitud como indicador de gestión sostenible de los cenotes de uso turístico en Yucatán, México. *PASOS. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 17(6), 1143-1158. <https://doi.org/10.25145/j.pasos.2019.17.079>
- Monroy Ríos, E. (2019, agosto 4). Por las rutas del “Tren Maya.” Karst Geochemistry and Hydrogeology. <https://sites.northwestern.edu/monroyrios/2019/08/04/rutas-01/>
- Monsalve Castro, L. M., Valencia Trujillo, F. L., Guzmán Lenis, A. R., Duque Chaves, C. M., Pérez Giraldo, D. A., Valderrama L., C. F., y Polanco Puerta, M. F. (2019). Servicio ecosistémico de abastecimiento: alimentos. En *Servicios ecosistémicos: Un enfoque introductorio con experiencias del occidente colombiano* (pp. 34-56). Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD. <https://doi.org/10.22490/9789586516358.02>
- Muyibul, Z., Tan, X., Tuniyazi, J., y Du, R. (2023). Relationships between Tourism, Urbanization and Ecosystem Service Value in the Cities of Xinjiang in Northwest China. *Sustainability*, 15(5), 4190. <https://doi.org/10.3390/su15054190>
- National Geographic Society, Kalanbio A. C., y Cenoteando-UNAM. (2021). *Biodiversidad en cenotes de la península de Yucatán*. *Naturalista*. <https://www.biodiversidadencenotes.com/nosotros>
- Navarro-Mendoza, M. (1988). *Inventario ictico y estudios ecológicos preliminares de los cuerpos de agua continentales en la reserva de la biosfera de Sian Ka'an y áreas circunvecinas en Quintana Roo*. Centro de Investigaciones de Quintana Roo/Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología/United States Fish & Wildlife Service, Chetumal, México.
- Organización Editorial Mexicana. (2022, mayo 27). Chemuyil, el hogar de los guardianes de los cenotes. [Archivo de Vídeo]. <https://www.youtube.com/watch?v=qSwot46-CD0>
- Osaka, S., Bellamy, R., y Castree, N. (2021). Framing “nature-based” solutions to climate change. *WIREs Climate Change*, 12(5). <https://doi.org/10.1002/wcc.729>
- Perevochtchikova, M., y Oggioni, J. (2014). Global and Mexican analytical review of the state of the art on ecosystem and environmental services: A geographi-

- cal approach. *Investigaciones Geográficas*, 85, 47–65. <https://doi.org/10.14350/ig.41239>
- Pohlman, J. W., y Brankovits, D. (2017). Water column physical and chemical properties of Cenote Bang, a component of the Ox Bel Ha cave network within the subterranean estuary coastal aquifer of the Yucatan Peninsula, from December 2013 to January 2016. U.S. Geological Survey Data Release. <https://doi.org/10.5066/F7DJ5DJW>
- QRSS. (2022, septiembre 16). *Lista de Cuevas Inundadas por Longitud de Quintana Roo México*. Quintana Roo Speleological Survey. National Speleological Society (NSS). <https://qrss.caves.org/qlongesp.htm>
- Rojas Sandoval, C. (2021). Los primeros pobladores de Tulum. *Glifos*, 27, 6-11. <https://revistas.inah.gob.mx/index.php/glifos/article/view/16884>
- Rojas-Sandoval, C., y González, A. (2006). *Atlas arqueológico subacuático para el registro, estudio y protección de los cenotes en la Península de Yucatán*. <https://mydokument.com/atlas-arqueologico-subacuatico-para-el-registro-estudio-y-proteccion-de-los-cenotes-en-la-peninsula-de-yucatan.html>
- Ruíz-Cancino, G., Mejía-Ortiz, L. M., y Yáñez-Mendoza, G. (2019). La Biodiversidad oculta en los cenotes de la Isla de Cozumel. *Ciencia y Desarrollo*. <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=542>
- Schmitter-Soto, J. J., Comín, F. A., Escobar-Briones, E., Herrera-Silveira, J., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Díaz-Arce, V., Marín, L. E., y Steinich, B. (2002). Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico). *Hydrobiologia*, 467(1/3), 215–228. <https://doi.org/10.1023/A:1014923217206>
- Schmitter-Soto, J. J., Escobar-Briones, E., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., y Marín, L. (2002). Los cenotes de la península de Yucatán. En G. de la Lanza-Espino y J. García-Calderón (Eds.), *Lagos y presas de México* (2nd ed.) (pp. 337–381). AGT. [https://www.researchgate.net/publication/228984086\\_Los\\_cenotes\\_de\\_la\\_Peninsula\\_de\\_Yucatan](https://www.researchgate.net/publication/228984086_Los_cenotes_de_la_Peninsula_de_Yucatan)
- SEDUMA, SEMARNAT, y CONANP. (2011). *Saneamiento y manejo integral de cenotes (Sitio RAMSAR Anillo de Cenotes). Mecanismos de pago por servicios ambientales*. <https://sds.yucatan.gob.mx/cenotes-grutas/proyecto-saneamiento-cenotes.php>
- SEMARNAT. (2021, marzo 11). Servicios ambientales o ecosistémicos, esenciales para la vida. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/servicios-ambientales-o-ecosistemas-esenciales-para-la-vida?idiom=es>
- Shi, Y., Shi, D., Zhou, L., y Fang, R. (2020). Identification of ecosystem services supply and demand areas and simulation of ecosystem service flows in Shanghai. *Ecological Indicators*, 115, 106418. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106418>
- Suárez-Morales, E., y Rivera-Arriaga, E. (1988). Hidrología y fauna de los cenotes de la Península de Yucatán. *Revista de La Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 48, 37-47. <https://biblat.unam.mx/es/revista/revista-de-la-sociedad-mexicana-de-historia-natural/articulo/hidrologia-y-fauna-acuatica-de-los-cenotes-de-la-peninsula-de-yucatan>
- Toledo, V. M., Barrera-Bassols, N., García-Frapolli, E., y Alarcón-Chaires, P. (2008). Uso múltiple y biodiversidad entre los mayas yucatecos (México). *Interiencia*, 33(5), 345–352. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S037818442008000500007&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S037818442008000500007&lng=es&tlng=es)
- Vernes, K., y Devos, F. (2022). Use of cenotes and the cave environment by mammals on the Yucatan Peninsula, Mexico. *Biotropica*, 54(4), 881-892. <https://doi.org/10.1111/btp.13111>
- Wallace, K. J. (2007). Classification of ecosystem services: Problems and solutions. *Biological Conservation*, 139(3-4), 235–246. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.07.015>
- Wang, B., Hu, C., y Li, J. (2022). Coupling and Coordination Relationship between the Tourism Economy and Ecosystem Service Value in Southern Jiangsu, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 16136. <https://doi.org/10.3390/ijerph192316136>
- Wang, J., Han, G., You, J., Zhu, L., Li, Y., y Zhou, X. (2023). Analysis of the Spatial Relationship between Ecosystem Regulation Services and Rural Tourism. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 3888. <https://doi.org/10.3390/ijerph20053888>
- Watson, K. B., Galford, G. L., Sonter, L. J., Koh, I., y Ricketts, T. H. (2019). Effects of human demand on conservation planning for biodiversity and ecosystem services. *Conservation Biology*, 33(4), 942–952. <https://doi.org/10.1111/cobi.13276>