



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

TÍTULO DE LA TESIS

**HACIA UNA DEFINICIÓN CUANTITATIVA DE  
CENOTE**

Tesis que para obtener el título de  
LICENCIADA EN BIOLOGIA

PRESENTA:

KENYA JOHANA MOGUEL VALDIVIESO

DIRECTOR (A): DR. FERNANDO NUNO DIAS MARQUES  
SIMÕES

AGOSTO 2023



## Dedicatoria

---

*“Cuando puedes medir aquello de lo que estás hablando y lo expresas en números, sabes algo de ello; pero si no puedes medirlo, cuando no puedes expresarlo en números, tu conocimiento es escaso e insatisfactorio; puede ser el principio del conocimiento, pero apenas has avanzado en tus pensamientos del estado de la ciencia, sea cual sea el tema.” —sir William Thompson, lord Kelvin.*

---

Quiero agradecer a mi familia que ha sido el combustible que permite mi motor correr. Sin duda, la libertad y confianza que me brindan son los pilares que me hacen seguir, no puedo estar más feliz de mi parentela. Me contagian de amor.

Sobre todo, a mi Madre. Es ella quien me motiva de más, ella cree en mí incluso si yo no lo hago.

Agradezco a las personas que han cruzado mi camino y a las que han permitido que yo cruce en el de ellos, aprendo de todos algo que se vuelve parte de mí y hace que me sienta tan enriquecida en la vida. Las interacciones humanas son un bálsamo que calma cualquier tormenta.

En fin, agradezco a todos los que compartieron conmigo este viaje y dejaron huella.

## Contenido

Dedicatoria .....	1
Contenido .....	2
Tabla de Ilustraciones .....	3
Resumen .....	5
Introducción .....	6
Antecedentes .....	7
Procesos de formación .....	8
Clasificación de los cenotes .....	11
Los cenotes y los asentamientos humanos .....	15
Delimitación jurídica de los cenotes .....	18
Objetivos .....	21
General .....	21
Específico .....	21
Justificación .....	21
Metodología .....	23
Resultados .....	24
Definiciones literarias .....	24
Análisis de <i>corpus</i> .....	32
Componentes unitarios de los cenotes .....	33
Microcuenca de captación .....	36
Ventana kárstica .....	40
Zona Vadosa .....	42
Espejo de agua .....	44
Zona inundada o zona saturada .....	46
Fondo del cenote .....	49
Discusión y conclusión .....	50
Referencias .....	57

## Tabla de Ilustraciones

<b>FIG 1</b> SÍNTESIS DE LOS PROCESOS FORMATIVOS DE LOS CENOTES PROPUESTO POR LOS AUTORES..	11
<b>TABLA 1</b> RECOPIACIÓN DE DEFINICIONES DE CENOTE.....	25
<b>FIG 3</b> GRÁFICA DE FRECUENCIA DE APARICIÓN DE LA DEFINICIÓN DE CENOTE EN LAS DISTINTAS DISCIPLINAS.....	32
<b>TABLA 2</b> PALABRAS CLAVES RESULTANTES DE ANÁLISIS DE CORPUS, EN LA TABLA SÓLO MOSTRAMOS LAS 7 PALABRAS CON MAYOR PRESENCIA EN EL CORPUS. ESTO ES IMPORTANTE PARA OBSERVAR RASGOS SEMÁNTICOS EN LAS DEFINICIONES DE CENOTE.....	33
<b>FIG 4</b> LOS COMPONENTES QUE CONFORMAN UN CENOTE ESTÁN DIFERENCIADOS POR COLORES UTILIZANDO UN CENOTE SE IDENTIFICAN DESDE LOS COMPONENTES EPIKÁRSTICOS (I.E MICROCUENCA Y VENTANA KÁRSTICA) HASTA LOS ENDOKÁRSTICOS (I.E ZONA VADOSA, ESPEJO DE AGUA, ZONA INUNDADA Y FONDO).....	34
<b>FIG 5</b> REPRESENTACIÓN GRÁFICA COMPARANDO CADA UNO DE LOS SEIS ELEMENTOS. MOSTRANDO SU APLICACIÓN EN DOS CENOTES DE DIFERENTE ESTRUCTURA: CILÍNDRICO Y OTRO EN FORMA DE JARRO (HALL, 1936).....	35
<b>FIG 6</b> EL PAPEL DE LA CUENCA DE CAPTACIÓN ES FUNDAMENTAL PARA EL ARRASTRE DE LA MATERIA ORGÁNICA Y EL APORTE DE AGUA METEÓRICA. EL VOLUMEN DE ESTOS APORTES SERÁ MODIFICADO POR LA VARIACIÓN MORFOLÓGICA DE LA CUENCA.....	37
<b>FIG 7</b> LA CUENCA ESTÁ ESTRICTAMENTE OBLIGADA A VARIAR DEPENDIENDO DE LA TOPOGRAFÍA DEL TERRENO CIRCUNDANTE.....	38
<b>FIG 8</b> LOS MATERIALES DEL TERRENO DONDE SE ENCUENTRE ESTE ELEMENTO TAMBIÉN INFLUIRÁN EN EL APORTE DEL AGUA METEÓRICA.....	39
<b>FIG 9</b> LA ESTRUCTURA DE LA VENTANA KÁRSTICA NO VARÍA SÓLO EN LA GEOMETRÍA QUE PUEDE ADQUIRIR, TAMBIÉN EN LA INCLINACIÓN DE LA VENTANA CON RESPECTO AL DEL TERRENO.....	41
<b>FIG 10</b> LA ZONA VADOSA ES EL ELEMENTO QUE CONDUCE LOS ELEMENTOS DEL EXTERIOR AL INTERIOR Y ES UN PUNTO CLAVE QUE CONFIGURA LA ACCESIBILIDAD AL ESPEJO DEL AGUA.....	43
<b>FIG 11</b> POLÍGONO QUE REPRESENTA EL ESPEJO DE AGUA DE KANKIRIXCHÉ. EL ÁREA DEL ESPEJO DE AGUA ES DE 345.562 M <sup>2</sup> . ESTE ES UN EJEMPLO DE LOS RESULTADOS DE APLICAR LA METODOLOGÍA DESCRITA. LA ESCALA ES DE 1:100.....	44
<b>FIG 12</b> LA VARIACIÓN DEL ESPEJO DE AGUA ESTÁ ESTRECHAMENTE RELACIONADA CON LA ESTRUCTURA DE LA ZONA VADOSA. REPRESENTA QUE LA FORMA DE DONA ES DADA POR EL COLAPSO DEL TECHO DE LA BÓVEDA QUE CREA UNA ISLA EN EL MEDIO DE LA PISCINA.....	45
<b>FIG 14</b> LOS PASAJES LATERALES SON UN RESULTADO DE LA DINÁMICA DE EROSIÓN EN LA MATRIZ ROCOSA. SE PUEDEN ENCONTRAR EN LA ZONA VADOSA COMO EN LA ZONA INUNDADA Y CADA UNO	

DE ESTOS ELEMENTOS CONTENDRÁ MEDIDAS ÚNICAS QUE CONFIGURARÁ LA INTERCONECTIVIDAD.  
..... 48

**Fig 15** DIVERSIDAD DE MATERIALES QUE PUEDEN DEPOSITARSE EN EL FONDO DE CENOTE Y QUE CONFIGURARÁ LAS CARACTERÍSTICAS DE ESTE COMPONENTE..... 50

**Fig 16** APLICABILIDAD DE LA SEGMENTACIÓN DE LOS CENOTES COMO INDICADORES DEL TIPO DE ACTIVIDAD, FAUNA Y ESTRUCTURAS DE ACCESIBILIDAD QUE SE PERMITEN DE ACUERDO A LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL ELEMENTO..... 54

## Resumen

La variedad de estructuras kársticas que encontramos en la región es vasta y la una transición morfológica por la evolución de la roca caliza tiende a crear confusión a la hora de diferenciar un morfotipo kárstico de otro. Los cenotes son una forma de disolución natural de la roca caliza que está en contacto permanente con el acuífero, sin embargo, la definición brindada tiende a utilizarse para otras estructuras kársticas. Por lo tanto, es imperante la necesidad de caracterizar los límites implícitos de los cenotes que permita diferenciarlos de otras estructuras kársticas.

Al entrar en el contexto literario de los cenotes, encontramos rasgos semánticos que describen la estructura y, por lo tanto, describen los patrones del objeto físico. Durante la compilación de la base de conceptos, es evidente que existe una discordancia en las descripciones de cenote que se han usado. El dibujo analítico a partir de estos rasgos semánticos nos permitió extrapolar los conceptos clave a una representación gráfica.

La simplificación geométrica de la estructura nos redujo a seis componentes elementales que representan las fases e interfases de los cenotes: 1) La microcuenca de captación; 2) La ventana kárstica; 3) zona vadosa; 4) El espejo de agua; 5) La zona inundada; 6) El fondo. Con ello, se busca fundamentar una definición cuantitativa proponiendo métricas específicas en cada componente para datar las características físicas del cenote, que sea útil bajo los márgenes de la amplia variabilidad y constante transformación de las estructuras kársticas.

De esta manera, la implementación de las medidas para el estudio de los cenotes deriva en la interpretación de elementos importantes para la gestión, como la capacidad de carga del sistema o en el sentido ecológico, la disponibilidad de nicho. Con el datado sistemático de los componentes elementales del cenote será efectivo proponer asertivamente programas de educación, restauración, mantenimiento, explotación turística e histórica de los cenotes, de tal manera que consideren las transiciones evolutivas de la geología de la región.

Palabras clave: karst, morfología, cenote, dolina, Yucatán, cuantitativo

## Introducción

La complejidad estructural de los cenotes ha permitido adentrarlos en ámbitos multifacéticos donde se aprovechan los recursos que forman parte de estos ecosistemas. Se han presentado como importantes centros de diversidad biológica (Palacios-Vargas et al., 2015; Macario-González et al., 2021). Así mismo han sido fuentes de recursos necesarios para el asentamiento de las poblaciones (Ligorred, Josep y Ventura, 2008; Ángeles, 2015). Además, han sido relacionados con el sector productivo al tener un valor económico como sistemas de riego, abrevaderos o depósitos de desechos industriales (Escolero et al., 2002). Sumado con la venta de servicios turísticos por el nivel de conservación de las formas cavernosas, de la calidad del agua y su relación histórica con los sitios arqueológicos (Callaghan-Capetillo et al., 2020). El aprovechamiento de los cenotes no sólo se limita al uso cotidiano para la obtención de agua, también se perfilaron como centros de culto y depósitos funerarios, de acuerdo con la cosmovisión particular de las culturas también se plantean como ejes cósmicos y venerados objetos de ofrenda (González y Rojas, 2006; Ángeles, 2015; García, 2015).

La necesidad de comprender y dar una definición *ad hoc* a los cenotes subyace por la alta estimación y explotación que reciben estas estructuras kársticas. Al ser manipulados en diversos aspectos del entendimiento humano, existe una disparidad al momento de citar a los cenotes como medios físicos que tenderá a generalizar y tornar a la ambigüedad su uso literario. Constantemente se mantiene una brecha entre las definiciones literales y la realidad, alimentada por la gran diversidad estructural que adquieren los cenotes. El uso de la morfometría como una técnica de aproximación implica un margen amplio de resultados para el entendimiento del desarrollo del sistema kárstico. La implementación de los elementos de cenote como parámetros para cuantificar la morfología de los cenotes será útil para reconocer los patrones de desarrollo del sistema kárstico, para generar un panorama de la variedad de cavidades subterráneas en Yucatán y para entender las implicaciones estructurales de los cenotes de tal manera que se tome en cuenta el grado de vulnerabilidad a la hora de implementar planes de manejo.

## Antecedentes

Los cenotes son un tipo de desarrollo kárstico que ha estado sometido a diversos debates concernientes a la caracterización del objeto, los modelos de desarrollo y el tecnicismo adecuado para referirse a ellos. Aguilar y colaboradores (2016) menciona que las características de la Península de Yucatán como el corto periodo de exposición, mineralogía inestable de carbonatos someros, pocos procesos tectónicos, un manto freático cercano a la superficie, el ambiente semiárido y tropical y los procesos de mezcla provoca que la formación del sistema kárstico de Yucatán no siga el modelo canónico descrito por Bakalowicz en 2005 (Aguilar et al., 2016). Ford y Williams (2007) detallan una serie de aplicaciones donde la morfometría kárstica permite analizar que existen patrones espaciales de desarrollo y una descripción objetiva de los tipos de dolina. Los cenotes son parte del desarrollo kárstico de la región y en cuanto a esto sólo se han establecido metodologías para observar la cantidad de cenotes por región (Bautista et al., 2011; Pardo-Igúzquiza et al., 2017; Paredes et al., 2019).

Diversos autores se han concentrado en la caracterización geométrica de las redes kársticas observando que sistematizar la toma de datos disminuye los errores intrínsecos del esfuerzo de muestreo (Collon et al., 2021; Vuilleumiaer et al., 2012). Ayuda a reconocer los patrones de desarrollo del karst, que están estrechamente relacionadas con las direcciones de las fallas y fracturas preferenciales. (Perry et al., 2002; Zamora-Luria et al., 2020; Collon et al., 2021; Ford & Williams, 2007; Kambesis & Coke, 2013; Pardo-Igúzquiza et al., 2017). En este caso la interpretación geométrica permite cambiar la percepción caótica que se tiene del desarrollo kárstico. Akpınar-Ferrand (2011) desarrolló una serie de indicadores descriptivos para caracterizar las aguadas, con esto observó una amplia variación en tamaño, forma y ubicación de estas estructuras; así mismo concluye en que las características de las aguadas varían a lo largo de la región y repasa en que existen patrones generales entre ellas.

Por otro lado, existe una complejidad de terminología en las formaciones kársticas. Casi todas las formaciones kársticas se conocen por diversos nombres, cada uno derivado por el uso regional (Gupta, 2011). Al mismo tiempo, la complicación al establecer el criterio de definición de una estructura geológica yace en la cronología del proceso formativo. Es evidente que el desarrollo kárstico data de hace por lo menos 120 millones de años (M.A.) por lo que la base de la categorización debe tomar en cuenta los modelos evolutivos del karst. Para esto, Sauro (2003) propone que lo mejor es nombrar a las estructuras de acuerdo con la situación del tiempo presente, aunque, sin la formulación del modelo evolutivo sigue siendo difícil de comprender el arreglo topográfico.

### Procesos de formación

La roca caliza en la que yace la península de Yucatán se modifica constantemente por los factores abióticos que inciden en ella, generando un paisaje heterogéneo. Uno de los factores que juega un papel preponderante es el agua. El agua al entrar en contacto con el dióxido de carbono atmosférico crea ácido carbónico que es un ácido débil pero suficiente para disolver la roca caliza. Este mecanismo donde el agua en conjunto con otros factores ambientales configura la roca caliza se le denomina proceso de karstificación. (Callaghan-Capetillo et al., 2020; Díaz-Arce et al., 2000; Ford & Williams, 2007; Ramos, 1975; Suárez-Morales & Rivera-Arriaga, 1998)

El agua crea cavernas subterráneas en forma de domos que, por eventos de fluctuaciones hídricas, el peso en el estrato superficial, la presencia de fracturas o zonas de fragilidad estructural en la roca, colapsan creando un acceso al acuífero. La superficie de la roca es más resistente que la capa interior, como es común en las regiones calizas, por lo que el agua se abre camino por las grietas de la capa superior, esto sumado con el flujo hídrico subterráneo, crea cavernas con los techos intactos que eventualmente pueden colapsar creando un cenote (Cole, 1910; Schmitter-Soto et al., 2002; Ordoñez-Crespo y García-Rodríguez, 2010).

La materia orgánica (M.O.) en descomposición promueve un efecto redox particularmente observado en cenotes profundos que se extiende incluso en el horizonte de agua salina. La presencia de la materia orgánica define el equilibrio geoquímico, observable en la recristalización en los cenotes con baja cantidad de M.O. pero que está ausente en aquellos cenotes con mayor cantidad de actividad orgánica. La M.O. se hunde a través de la columna de agua del cenote y decae en la presencia del agua salobre rica en sulfatos provocando una disminución en la cantidad de oxígeno de la capa profunda de agua, seguido de una reducción y producción de  $H_2S$  y  $HS^-$  aumentando la capacidad disolutiva del agua (Gaona-Vizcaíno et al., 1980; E. C. Perry et al., 2002; Schmitter-Soto, Comín, Escobar-Briones, Herrera-Silveira, Alcocer, Suárez-morales, et al., 2002; Socki et al., 2002; Socki et al., 1984; Steinich et al., 1996). La intrusión de la M.O. puede provenir de fuentes externas y se observa que es proporcional a la cobertura vegetal alrededor de los cenotes, esto sumado a la productividad primaria permite catalogar a los cenotes como sistemas heterotróficos. (Gaona-Vizcayno et al., 1980; Schmitter-Soto et al., 2002)

Torres-Talamante y colaboradores (2011) concuerdan al describir un mecanismo de formación que involucra el efecto redox. Al mantenerse la actividad metabólica, se altera la química del agua que está en contacto con la roca caliza acelerando la formación de los cenotes. Incluso indica que hay una diferenciación morfológica entre los cenotes formados por colapso mecánico y los creados por actividad oxido-reductora. A los de segundo orden les denomina cenotes tipo *pit* que se caracterizan por ser de tipo profundo con paredes verticales. Usualmente la haloclina es muy evidente y también mantiene activo el proceso disolutivo de la roca. Coke (2012) enlista a los cenotes más profundos registrados del estado de Yucatán en el siguiente orden: cenote Sabak-Há (“agua humeante” en Maya) con una profundidad aproximada de -147 m, el cenote Xkolac (-121 m), y el cenote Ucil (-118 m).

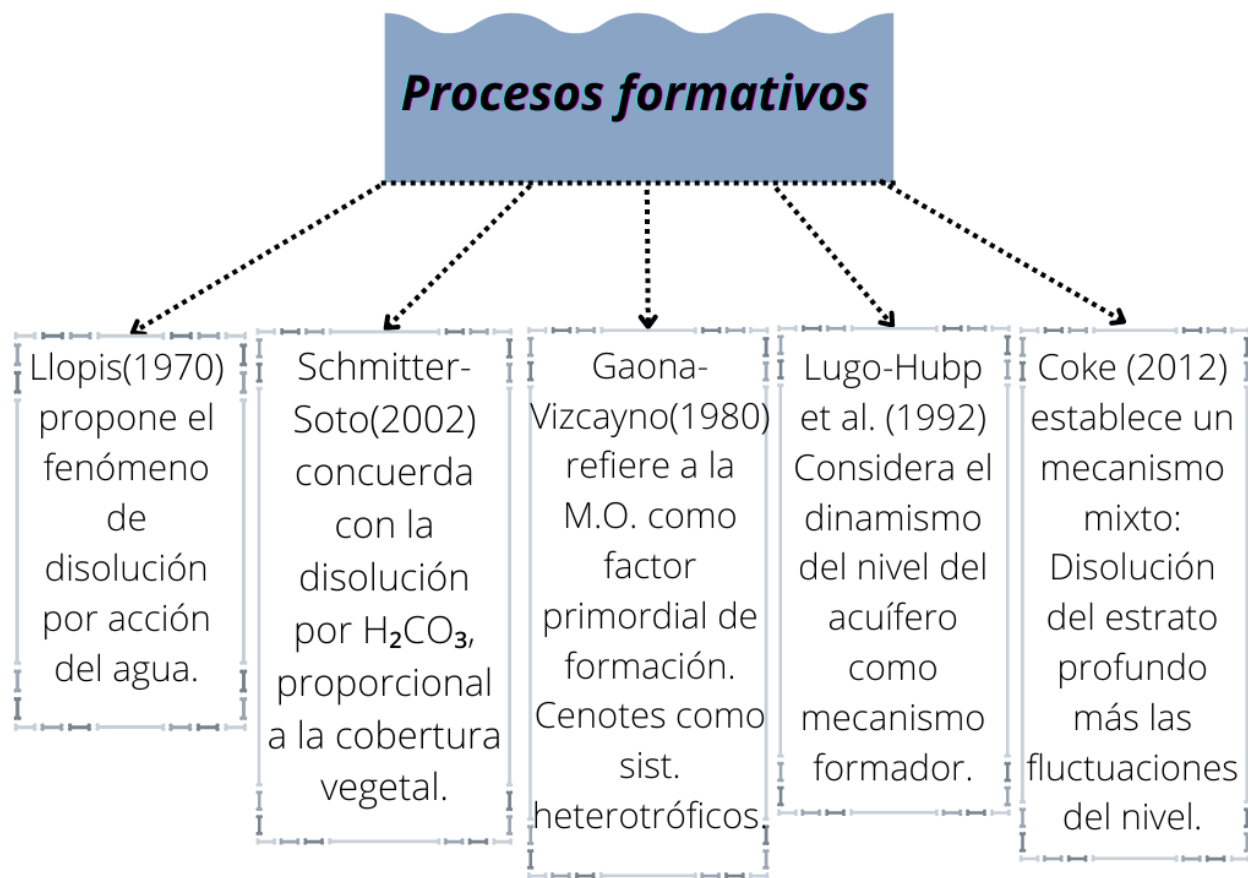
Lugo-Hubp et al. (1992) considera el dinamismo en el nivel del manto freático como mecanismo de formación de los cenotes. Puesto que al eliminar el soporte hidrostático ejercido por el agua se puede producir un colapso en el techo de las cavidades. Si el nivel

del agua subterránea se encuentra encima de las galerías o se eleva hasta ellas por un ascenso en el nivel del mar, se forma un cenote típico.

Coke(2012) establece un mecanismo mixto que provoca la formación de los cenotes donde suma la disolución del estrato profundo y las fluctuaciones del nivel del agua que en conjunto provocan el colapso del estrato superficial y en consecuencia se abren pozos semicirculares, donde sí el nivel del acuífero está encima de las galerías o se eleva hacia ellas por un ascenso del nivel del mar, se formará un cenote, cuando las galerías se secan, se trata de una cueva.(Lugo-Hub et al., 1992) Además, clasifica el tamaño del colapso en función de la forma, tamaño y la profundidad de la fosa submarina.

La posición horizontal del estrato es un factor importante en la configuración de las paredes verticales y los pasajes horizontales de los cenotes. Debido a que la permeabilidad del estrato permite la infiltración del agua a través de la roca en lugar de escurrir lateralmente, facilitando la interconectividad de las galerías y grietas. Ya sea por la gran extensión de la caverna o por la degradación continua del techo, eventualmente colapsa dando como resultado un cenote. (Cole, 1910; Lugo-Hubp et al., 1992)

Al analizar los mecanismos de formación se pueden observar patrones donde los factores fundamentales son: la acción disolutiva del agua en la matriz de roca caliza y los procesos oxido-reductivos propiciados por la descomposición de la materia orgánica alóctona o autóctona que acelera las transformaciones biogeoquímicas del agua. Al mismo tiempo, este segundo mecanismo permite el desarrollo de cenotes con una clasificación propia que son los cenotes tipo *pit* caracterizados por paredes predominantemente verticales y por ser profundos. La profundidad de los cenotes y la cercanía a las costas actualiza un nuevo componente que configura la estructura general de los cenotes que es la haloclina, una barrera química horizontal que estratifica la columna de agua. Se menciona que juega un papel importante en la configuración de las depresiones kárstica porque las oscilaciones posicionales de esta componente favorecen a que actúe como un agente corrosivo que también genera variación estructural en el karst. **(Fig. 1)**



**Fig 1** Síntesis de los procesos formativos de los cenotes propuesto por los autores

### Clasificación de los cenotes

Debido a la condicionante de paulatina erosión en la roca caliza, se crea una importante diversidad de estructuras kársticas que siguen siendo cenotes por la premisa de estar constantemente en contacto con el manto freático y permanecer comunicadas en alguna medida con el exterior directa o indirectamente. (Chnaid-Gamboa, 1998, Beddows et al., 2002; Villafañe y Guendulain, 2015; Monroy-Ríos, 2016)

Hall (1936) propone una escala nominal para la identificación de las variantes morfológicas de los cenotes que se pueden dividir en cuatro tipos:

- El cenote abierto con paredes casi verticales.

- El llamado cenote maduro o tipo aguada con paredes que retroceden sobre el nivel del agua. Usualmente se mantienen secos o contienen poca agua durante la temporada de lluvias.
- En forma de jarrón con una pequeña apertura que gradualmente va expandiéndose conforme se acerca al nivel del agua y por debajo de éste.
- Tipo cueva con una entrada hacia un lado.
- Se han registrado formas intermedias, pero la mayoría podrían clasificarse en alguna de las categorías antes descritas.

Otra clasificación brindada por Navarro-Mendoza et al. (1988) y Marín et al. (1990) bifurca dos tipos generales de cenotes:

Cenotes ubicados en la línea costera (hasta 1-2 km de la costa):

Con agua dulce y marina mezcladas de manera más o menos homogéneas, resultando en aguas salobres sin una haloclina definida; las termoclinas son casi imperceptibles y en el fondo predomina la influencia del régimen de mareas. Las paredes están conformadas por rocas no consolidadas, predominando el mangle y la materia orgánica comprimida, usualmente con cavernas asociadas. Son más someros con profundidades que van desde los 3 m a los 35 m de profundidad. La fauna que se encuentra en este tipo de cenotes es principalmente ictiológica con componentes de origen marino que ingresan temporalmente. La coloración del agua está en función de la estación. Durante la época de lluvias adquieren un color amarillo-verdoso y en la temporada de secas son muy transparentes.

Cenotes alejados de la línea costera (3-8 km de la costa):

Conteniendo agua dulce o ligeramente salobre; este tipo de cenotes pueden mostrar una haloclina contrastante en la entrada de las cavernas y comúnmente están comunicadas con el mar. Llegan a alcanzar profundidades superiores a los 100 m y con paredes de más de 20 m de alto. Dependiendo de la estación pueden presentar una evidente

termoclina (hasta 7 °C de diferencia). Aunque el contacto con el agua marina no es tan marcado, existe una interconectividad con el mar mediante fisuras que permiten la filtración de agua marina que, debido a la diferencia de densidades, frecuentemente está por debajo de una lente de agua dulce. En las cavernas asociadas a estos cenotes se han registrado fuertes haloclinas, con cambios dentro de un rango de 1 a 35% de sales disueltas en pocos centímetros.

Una tercera separación brindada por Schmitter-Soto et al. (2002) asociada a la dinámica del flujo de agua del manto acuífero subterráneo propone dividir a los cenotes en:

Cenotes jóvenes o lóticos:

Donde el agua está bien interconectada con el agua subterránea por medio de fracturas o fisuras con una alta tasa de recambio. Son cenotes con buen flujo hídrico que es notable con la claridad del agua.

Cenotes maduros o lénticos:

Con un flujo lento de agua y baja tasa de renovación debido al bloqueo de la fuente de agua y el sifón; a pesar de que el agua subterránea sigue su camino a través del cenote, muchas de las vías de intercambio están bloqueadas por la acumulación de sedimento y/o el colapso ya sea de la bóveda o las paredes. Con el lento o nulo recambio de agua, la concentración de materia orgánica en los cenotes lénticos es mayor ya que la productividad primaria se ve favorecida, aumentando el estado trófico del cenote. Aunado a esto, el proceso modifica características tales como la turbidez, el aumento del pH y la concentración de oxígeno disuelto en la superficie, así como las condiciones anoxigénicas ácidas del fondo.

Sauro (2003) condiciona al término cenote dentro de la categoría de dolina de manto freático (*water-table doline*) típicas en zonas tropicales. Donde la cercanía a los trópicos favorece el desarrollo del karst debido al aumento de la cobertura vegetal. Diversos

autores concuerdan en que los cenotes deben estar conectados directamente al acuífero y estrictamente hablando, tomaremos esta característica como base para diferenciarlos de otras formas kársticas en la península de Yucatán (Chnaid-Gamboa, 1998; Houck Jr., 2006).

Así mismo, a los cenotes se les puede referir de distintas maneras de acuerdo con el rol que emplea dentro del contexto social y económico; sí son utilizados como principal fuente de agua para las comunidades dependientes se les denomina “pozos comunales” (en maya: *Chen Kah*), en el caso de ser utilizados para brindar servicios turísticos son considerados “balnearios ecológicos”(Perramón Ligorred, Josep; Ventura Dzib, 2008).

Los cenotes y los asentamientos humanos.

Los accesos que permitieron la obtención del agua directamente han sido los cenotes. Debido a estos puntos de abastecimiento de agua el asentamiento humano fue posible. Se estima que ha existido actividad antropogénica alrededor de los cenotes desde el Pleistoceno, hace aproximadamente 13, 000 años con el descubrimiento del cráneo y los dientes de una adolescente a quien nombraron Naia, en investigaciones realizadas en Hoyo Negro que es parte del sistema de cuevas de Sac Aktún (Arroyo-Cabrales et al., 2015).

En la península de Yucatán, se han obtenido ocho registros de esqueletos humanos encontrados en el sistema de cuevas y cavernas que nos permiten esclarecer un poco la actividad humana temprana en los cenotes (Del Río, 2022). De acuerdo con las evidencias y estudios antropogénicos, la cosmovisión humana hacia los cenotes no se limita sólo al refugio y recurso hídrico, también se le atañe un elevado respeto hacia estos sistemas, donde los primeros pobladores los categorizaron como centros de culto que enlazaba el mundo terrenal con el espiritual, más específicamente el *Xib'alb'a* (del quiché: "Lugar oculto"), definido como el mundo subterráneo regido por las divinidades de la enfermedad y la muerte. (Domínguez Ángeles, 2015a; González et al., 2014). De esta forma, se lleva a cabo la construcción simbólica de la naturaleza, en la que se le asigna un valor por su significado subjetivo (Pérez Flores, 2012).

Siguiendo la premisa de analizar a los cenotes como centros de culto, se concebía a estas estructuras como espacios sagrados que compartían la facultad de ser zonas de comunicación con lo espiritual, o ejes cósmicos. Dentro del entendimiento maya, había espacios naturales que por ser particulares (ya sea por la belleza o por la bonanza de sus recursos) automáticamente obtenían el título de sagrados. Aunque también se les consideraba así a aquellos lugares que habían sido consagrados mediante rituales y ofrendas simbólicas. Una forma común de realizar estos rituales era la celebración de inmolaciones humanas. El cenote Sagrado de Chichén Itzá es un centro de culto que

cumple con los puntos clave para ser denominado eje cósmico y venerado objeto de ofrenda.

Los mayas consideraban tres niveles en el universo: el celeste, el terrestre y el inframundo. Este último es al que denominaron *Xib'alb'a*. Se consideraban entradas al inframundo el mar, cuevas, ríos subterráneos y cenotes, que eran los vínculos. Dentro de esa cosmovisión, de los cenotes nació la vida y son los contenedores del *suhuy ha* (agua virgen), que es asociado con la creación y la fertilidad, de esta manera el agua de los cenotes es una oportunidad de renovación. (Domínguez Ángeles, 2015; Martos López, 2008)

Se consideraba que el agua de lluvia era la misma que la del mar y los ríos, manteniendo una constante dinámica del ciclo del agua que era relacionada con los movimientos de algunas serpientes. Uno de los dioses que residían en los cenotes era el dios *Chaak*, relacionado con las lluvias. Es por esto por lo que se les concebía como honorable centro de veneración, retomando el ejemplo del cenote sagrado de Chichén Itzá que era motivo de grandes peregrinaciones. Ángeles (2015) menciona que en los cenotes se tenía la noción de que vivía la mítica serpiente *Sukán* y que esta creencia puede provenir de una especie de anguila que habita en el agua subterránea y que mantiene un parecido con la serpiente celeste. Aparentemente se refiere a la especie *Ophisternon infernale*.

La evidencia de que los cenotes favorecieron los asentamientos humanos se respalda con investigaciones realizadas en Aktun Ha, donde se hallaron restos de hollín a 30 m de profundidad en el cenote Las Palmas. Al realizar dataciones con  $^{14}\text{C}$  se estimó que estos remanentes datan de hace ~8941-7740 años antes de la actualidad. Claramente, se necesita estar en un ambiente seco para encender una fogata por lo que esto nos indica que las poblaciones humanas residieron en los cenotes antes de las elevaciones marinas del post-Pleistoceno cuando la tabla de agua se mantuvo a ~30 m debajo del nivel actual. (Del Río, 2022; González et al., 2014; López-Martínez et al., 2020)

En el presente, aún se usan los cenotes activamente. Debido al desarrollo de las poblaciones en la península se han implementado mecanismos que tornan el aprovechamiento en explotación indiscriminada. A causa de las irregulares estrategias de manejo de recursos naturales, la falta de educación ambiental a los prestadores de servicios turísticos y pobladores aledaños, aunado el asentamiento de fábricas alrededor de los cenotes, estas estructuras kársticas están siendo vulneradas no sólo en el aspecto estructural, sino también en la calidad del agua. Esto es preocupante puesto que la interconectividad del acuífero promueve que las descargas puntuales de contaminantes se movilen por medio del agua a otras zonas del territorio, fomentando la contaminación del acuífero en su totalidad. Moreno-Pérez y colaboradores (2021) abordaron este tema al analizar niveles de contaminantes químicos y orgánicos registrados en 173 cenotes del estado de Yucatán. Entre los contaminantes evaluados se encuentran los pesticidas organoclorados, los hidrocarburos aromáticos policíclicos que son motivados por las emisiones de vehículos, los productos derivados del petróleo o la combustión incompleta de biomasa; esteroides fecales y bacterias entéricas. Son tóxicos y bioacumulables en las especies acuáticas y terrestres, por lo que pueden permanecer un tiempo prolongado y abarcar grandes distancias en la atmósfera. En este estudio concluyeron que el >92% de los cenotes analizados presentaban algún grado de contaminación. La mayoría de los cenotes presentaron contaminación de origen fecal, otros presentaron hasta 17 contaminantes distintos.

Delimitación jurídica de los cenotes.

Es común que, al dar definiciones legales de los límites relativos a la ubicación de los recursos naturales, emerja inevitablemente la incertidumbre en la delimitación de esas restricciones como resultado de no ser capaces de localizar precisa y correctamente la ubicación de las instancias. (Green, 2010)

Es importante el conocer los límites que competen a la administración federal, estatal y municipal en torno a los espacios naturales con el fin de esclarecer los estatutos de lo que es permitido realizar tomando en consideración las características particulares del medio ambiente y evitar acciones que contravengan a las disposiciones que regulan la sanidad, el trato digno y respetuoso a la vida silvestre, así como de aplicar las sanciones correspondientes.(Paredes-Pérez, 2003)

En las disposiciones legales que regulan la protección de los recursos naturales se encuentran el Artículo 27 Constitucional que entabla la base del sistema jurídico mexicano en tema de protección ambiental. En el párrafo 4<sup>to</sup> del mencionado artículo se mencionan las sustancias reservadas a la Federación donde enuncia que:

*“CORRESPONDE A LA NACIÓN EL DOMINIO DIRECTO DE TODOS LOS RECURSOS NATURALES DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL Y LOS ZÓCALOS SUBMARINOS DE LAS ISLAS; DE TODOS LOS MINERALES O SUSTANCIAS QUE EN VETAS, MANTOS, MASAS O YACIMIENTOS CONSTITUYAN DEPÓSITOS CUYA NATURALEZA SEA DISTINTA DE LOS COMPONENTES DE LOS TERRENOS, TALES COMO LOS MINERALES DE LOS QUE SE EXTRAIGAN METALES Y METALOIDES UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA; LOS YACIMIENTOS DE PIEDRAS PRECIOSAS, DE SAL DE GEMA Y LAS SALINAS FORMADAS DIRECTAMENTE POR LAS AGUAS MARINAS; LOS PRODUCTOS DERIVADOS DE LA DESCOMPOSICIÓN DE LAS ROCAS, CUANDO SU EXPLOTACIÓN NECESITE SER UTILIZADAS COMO FERTILIZANTES; LOS COMBUSTIBLES MINERALES SÓLIDOS; EL PETRÓLEO Y TODOS LOS CARBUROS DE HIDRÓGENO SÓLIDOS, LÍQUIDOS O GASEOSOS, Y EL ESPACIO SITUADO SOBRE EL TERRITORIO NACIONAL, EN LA EXTENSIÓN Y TÉRMINOS QUE FIJE EL DERECHO INTERNACIONAL.” ART. 27. PÁRRAFO 4TO CONSTITUCIONAL.*

Es destacable que no separa el suelo del subsuelo y tampoco repara en que los propietarios de cualquier terreno cedidos por la federación son dueños de la superficie y

lo que está debajo de ella, aunque para ser explotado deberán sujetarse a lo dispuesto en la constitución federal y en la legislación específica de Minas y Petróleo.

En la Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán (LPMAEY) entabla que se deben de cumplir ciertas condiciones para que sean otorgados los permisos pertinentes de exploración, extracción y aprovechamiento de sustancias y minerales no reservados a la nación. En el capítulo primero, artículo 5<sup>to</sup> de la Ley Minera hace alusión a los elementos que no son de su competencia, donde se cita a las sustancias contenidas en suspensión o disolución por aguas subterráneas

En este sentido, la única sustancia reservada a la federación cuya extracción, explotación y aprovechamiento puede ser concesionada en el territorio yucateco, es la extracción de las sales y subproductos que se obtengan de salinas formadas directamente por el agua proveniente de mares actuales, superficiales o subterráneos (Art 4°, fracc. V, Ley Minera). No existiendo concesiones para extraer otros materiales, por lo que cualquier otra extracción en Yucatán sería de carácter clandestino. Estos permisos son otorgados por el Ayuntamiento del municipio o municipios donde se localice el ecosistema subterráneo.

Las cuevas, cavernas y cenotes de Yucatán carecen de los productos mencionados en la Ley Minera que se pudieran explotar, puesto que su composición es casi en su totalidad de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), además en el artículo 44 de la LPMAEY menciona que para toda actividad que implique destrucción, extracción y/o comercialización de materiales de una cueva requiere de los permisos otorgados por el Ayuntamiento, que debe realizarse bajo los lineamientos que la Secretaría de Ecología establezca. Sin embargo, es notorio que han sido alteradas irreversiblemente para transformarlos en sitios de interés turístico e industrial, principalmente. Al mismo tiempo, la alteración de los cenotes es tan drástica que hace ver la nula aplicación de las sanciones pertinentes de las autoridades que competen. (Paredes-Pérez, 2003)

Dentro de las modificaciones que se les aplica a los cenotes están:

- La eliminación del guano.
- Instalación de luces permanentes.
- Construcción de estructuras de acceso para hacer más fácil y cómoda la estancia del turista.
- Instalación de bombas para la extracción constante del agua.

Dado a que gran cantidad de cenotes se han destinado para uso turístico y recreativo, la contaminación antropogénica que implican estas actividades ha sido:

- Vandalismo.
- Modificación o remoción de espeleotemas.
- Dejar basura sólida o líquida.
- Construcción de infraestructura.
- Exceso de gente en su interior.

Por mencionar algunos ejemplos de cenotes alterados están el Cenote Ka' Kutzal, Mérida con un supermercado en las inmediaciones; el cenote Hubikú, Valladolid; Cenote San Ignacio, Chocholá; Sambulá, Motul; Cenote Ik-Kil, entre otros.

El aprovechamiento turístico de los cenotes está en un liberal desarrollo, invirtiendo grandes cantidades monetarias a este rubro, amenazando a los ecosistemas sin medir las consecuencias ecológicas. (Paredes-Pérez, 2003).

El establecimiento de una definición cuantitativa permitirá el abandono de la ambigüedad con la que se hace referencia a los cenotes (Gaona-Vizcayno et al., 1980; Schmitter-Soto et al., 2002; Brinkmann, 2013), puesto que el esclarecer numéricamente los elementos definitivos aumentará la precisión al momento de establecer el contexto topográfico regional de los estudios relacionados a las formaciones geológicas del *karst*.

## Objetivos

### General

- Proponer parámetros geométricos de cenote para analizar la morfología.

### Específico

- Analizar las diferentes definiciones de cenote en la literatura recopilada para observar patrones semánticos.
- Abstraer los componentes unitarios que conforman la estructura del cenote.
- Generar un modelo gráfico que esquematice el término cenote bajo los parámetros geomorfológicos analizados.

## Justificación

Por lo anterior se plantea el siguiente estudio que pretende generar una recopilación de las variadas definiciones de cenote dentro de los contextos literarios para comprender la interpretación geoespacial que se les ha atribuido a estas formaciones cársticas. Es información crucial para fundamentar una definición que sea útil bajo los márgenes de la constante transformación morfológica de los sistemas cársticos para así, proponer de manera asertiva programas de educación, restauración, mantenimiento, explotación turística e histórica de los cenotes de tal manera que consideren las transiciones evolutivas y la vulnerabilidad de la roca caliza.

Al proponer planes de manejo, debido al uso popular que se le da a los cenotes y la particularidad de ser ecosistemas con fases acuáticas y terrestres, se utilizarán algunos principios del manejo de playas, sólo para implementar algunos fundamentos estratégicos, los cuales funcionarán para direccionar los estatutos a objetivos prioritarios.

El manejo de sistemas naturales es descrito por Sauer (1963) como la integración del ambiente físico con el ambiente cultural (antropogénico) para ser referido como una “superestructura”. Una percepción alternativa es que el manejo se trata de la conducción de los humanos y la forma en la interactúan con el medio ambiente, con el fin de evitar,

remediar o mitigar interacciones adversas. Por lo tanto, es importante hacer énfasis en la educación e investigación a largo plazo para alcanzar un uso físico óptimo, así como el desarrollo de los recursos naturales que respete al medio ambiente mientras satisfaga las necesidades sociales básicas con el ambiente. (Micallef y Williams, 2009)

## Metodología

Se recopiló información bibliográfica de la Biblioteca Central Universitaria de la UADY, los repositorios del CICY y del CINVESTAV unidad Mérida, la biblioteca digital de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y de la UNAM. Además de la recopilación de documentos en buscadores académicos tales como EBSCO, Google Scholar, Seek Reef, Elsevier y ResearchGate.

Entre la documentación acaparada se tomaron en cuenta artículos científicos, normas legales, tesis de grado y posgrado, también se tomaron en cuenta capítulos de libros. Los criterios búsqueda fueron las palabras clave “Cenote”, “Sinkhole”, “Yucatán”, “Yucatan”, “Carst”, “Caliza”, “Karst”, “Acuifer” y “Acuífero”, con las claves booleanas “AND” y “OR”. Se aceptaron los documentos en idioma inglés y español.

Los documentos que mencionaran una definición de cenote o de la palabra equivalente en inglés “sinkhole” fueron los utilizados para la comparación de las definiciones con la precaución de no utilizar definiciones citadas de otros autores, en caso de que esto sucediera se tomó en cuenta la definición del autor original.

Se utilizó la aplicación AntConc (Version 4.2.0 (Laurence, 2022) para identificar patrones y palabras coincidentes en las definiciones, esto es denominado análisis de *corpus* (Froehlich, 2018); interesante en el presente trabajo por la naturaleza interdisciplinaria de los textos, teniendo en cuenta que todo texto resume e integra los saberes de su autor, originados por el conocimiento del mundo de las diferentes ciencias y de la cultura en general. (Toledo et al., 2008)

La categorización de los documentos fue hecha en función al área de estudio en el que se integrara el escrito, ya sea que estuviese mencionado en las palabras claves del documento o que fuera el tema focal de la revista a la que perteneciera. Otro dato importante recopilado fue la presencia/ausencia de una esquematización gráfica que acompañara la definición brindada por el o los autores.

Por otro lado, para la esquematización de los cenotes se recurrimos al dibujo analítico; que distingue los rasgos más importantes de los detalles superfluos. En este caso, auxilia a la identificación gráfica de los componentes unitarios considerados en los cenotes permitiendo extrapolar los conceptos clave a una representación gráfica.(Cespedosa, 2009; Mata, 2005). Esto se logró mediante discusiones conceptuales donde por medio de intercambio de los rasgos semánticos resultados del análisis de *corpus*. Se esquematizaron los fundamentos semánticos de los elementos que conforman un cenote encontrado en las representaciones gráficas de este documento.

## Resultados

### Definiciones literarias

Se recopilaron 27 definiciones de cenote. Que fueron organizadas por el año de la publicación, la definición que abarcara sólo el término cenote para el autor(es), el ámbito de estudio descrito anteriormente, así como la presencia de un esquema gráfico que representara el término. (**Tabla 1**)

**Tabla 1** Recopilación de definiciones de cenote.

<b>Año</b>	<b>Definición</b>	<b>Ámbito</b>	<b>Representación gráfica</b>	<b>Autor</b>
1910	Agujeros profundos con paredes verticales, sin pasillos/pasajes laterales que pueden ser consideradas formaciones "maduras". Pueden ser catalogadas en cenotes jóvenes como las cavernas con el techo intacto o maduros como son las aguadas con paredes inclinadas.	Geomorfológico	SI	L.Cole.
1980	Palabra de origen maya( Ts'onno'ot = Caverna con depósito de agua) que se utiliza para designar indiscriminadamente todas las manifestaciones kársticas que alcanzan el nivel freático. Los cenotes son horadaciones en la roca calcárea, cuya forma recuerda a la de los tubos de ensayo.	Geomorfológico	SI	S. Gaona-Vizcayno, T. Gordillo de Anda y M. Villasuso-Pino.
1981	Un término maya usando para indicar una cueva o un pozo natural que contenga agua.	Biológico	NO	J. Redell.
1992	La palabra cenote debe reservarse para las cavidades verticales de dimensiones grandes o pequeñas, de paredes en forma de campana, verticales o ligeramente inclinadas, que desembocan en un acuífero.	Geomorfológico	NO	J. Lugo-Hubp, J. Aceves-Quesada y R. Espinasa-Pereña.
1993	El término "cenote" es derivado de un vocablo maya y denota una cámara, más o menos abierta al exterior, que tiene agua en forma permanente.	Hidrogeológico	NO	T. Iliffe.

1998	Son formaciones generadas a partir de los procesos de dilución de las rocas de carbonato de calcio por la acción pluvial del ácido carbónico y por el paso de las aguas subterráneas	Hidrogeológico	SI	E. Suárez-Morales y E. Rivera-Arriaga.
1998	Toda cavidad natural conectada con el acuífero subterráneo y comunicada directa o indirectamente con el exterior.	Geológico	SI	D. Chnaid-Gamboa
2002	Los sistemas de agua expuestos son llamados localmente con el término de "cenotes" y "aguadas" y son la principal fuente de agua fresca en esta región	Limnológico	SI	A. Cervantes-Martínez, M. Elías-Gutiérrez y E. Suárez-Morales
2003	Tipos peculiares de dolinas son los cenotes, o "dolinas de nivel freático" que son típicos de algunas áreas tropicales.	Geológico	NO	U. Sauro.
2006	Cuevas y dolinas colapsadas, en su mayoría inundadas, conocidas como cenotes	Arqueológico	SI	P. González y S. Rojas.
2007	Cualquier espacio subterráneo con agua, con la única condición de que esté abierto al exterior en algún grado. Incluye toda manifestación kárstica que alcance el nivel freático.	Geológico, Limnológico	SI	P. Beddows, P. Blanchon, E. Escobar y O. Torres
2012	Un geosistema transicional semilacustre	Geológico	NO	L. Wollwage, S. Fedick, S. Sedov y E. Solleiro-Rebolledo.

2013	Vacíos subterráneos creados por la acción del agua en la roza caliza o en formaciones de rocas similares. Según las políticas de seguros en Florida se definen como "característica sutil que causa alguna forma de inestabilidad en el terreno que puede o no tener una expresión superficial."	Legislativo	SI	R. Brinkmann.
2014	Depresiones topográficas subterráneas que se desarrollan por disolución de la piedra caliza o por derrumbe, las cuales pueden o no exponer aguas freáticas o ríos subterráneos	Legislativo	NO	Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente.
2014	Sumideros cubiertos de enredaderas, cenotes, como se les llama localmente, donde los techos de las cavernas subterráneas se han derrumbado	Arqueológico	NO	González, A. H., Terrazas, A., Stinnesbeck, W., Benavente, M. E., Avilés, J., Rojas, C., Padilla, J. M., Velásquez, A., Acevez, E., y Frey, E.
2015	Grandes cavernas, cavidades de disolución y canales que conducen cantidades importantes de agua o sistemas epígeos, conocidos localmente como cenotes o sumideros	Hidrogeológico	NO	Villafañe, V. E., Guendulain-García, S. D., Valadez, F., Rosiles-González, G., Helbling, E. W., & Banaszak, A. T.
2016	El nombre local de las dolinas de colapso que contienen agua, representando esquemáticamente su relación con el acuífero.	Morfométrico, Geológico	NO	Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E. Frausto, O., & Ihl, T.

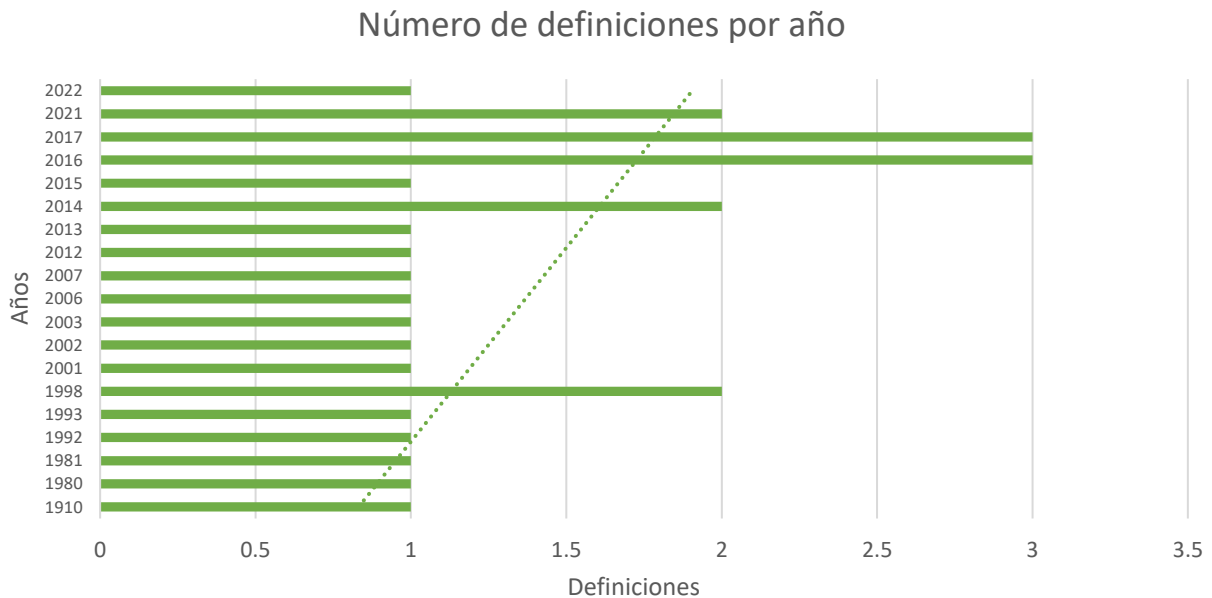
2016	En aquellos casos en los que el agua subterránea ahí contenida, al provocar la disolución de la roca, llega a producir un adelgazamiento tal que se produce el desplome del techo que los cubre, este sistema hidrológico queda expuesto y se manifiesta como cuerpos de agua a cielo abierto, denominados cenotes.	Hidrogeológico, Legislativo	NO	SEMARNAT y CONANP
2016	El término cenote se emplea para designar cualquier espacio subterráneo con agua y que contenga una ventana hacia el exterior	Espeleología	SI	E. Monroy-Ríos
2017	Es el depósito natural de agua, patrimonio natural, caracterizado porque su formación original se debió a los cambios geológicos que ocurrieron hace millones de años, por lo que al emerger la península de Yucatán del mar, las piedras sufrieron cambios dando lugar a la creación de cenotes o depósitos subterráneos	Legislativo	NO	Ayuntamiento de Mérida.
2017	Los cenotes son sumideros a través de los cuales se puede acceder al agua subterránea del Acuífero de la Península de Yucatán. Los cenotes son todo tipo de elementos cársticos, incluidas cuevas y manantiales, pueden variar en tamaño desde los muy pequeños hasta los sistemas de cuevas interconectadas, y pueden encontrarse en tierra firme y en zonas marinas costeras.	Geológico	SI	Lopez-Maldonado, Y., y Berkes, F.

2017	<p>Accidente geológico característico de las formaciones calizas, consistente en un cuerpo de agua de origen subterráneo que ocupa parcial o totalmente el fondo de una caverna de origen kárstico (formada por la disolución de la roca caliza por efecto de las aguas de lluvia), cuya bóveda en su parte superior puede estar directamente expuesta a la superficie del terreno natural de un modo parcial o total, así como en algunos casos puede no estar expuesta directamente.</p>	Legislativo	NO	Ayuntamiento de Solidaridad, Qroo.
2019	<p>Las geoformas kársticas se producen por disolución de carbonato de calcio de las rocas calizas, debido a la infiltración del agua a través del subsuelo y su alta permeabilidad. De acuerdo con lo anterior, ocurren colapsos de los techos de las cavernas, originando dolinas, que cuando carecen de agua se les conoce como re hoyadas y como cenotes cuando dejan al descubierto el agua subterránea</p>	Hidrogeoquímico	NO	K. Pérez Gonzáles.
2021	<p>Los pozos formados por la disolución de la roca cárstica son llamados cenotes. Contienen agua y constituyen las formas de aparición en la superficie de las aguas subterráneas.</p>	Hidrogeoquímico	NO	V. Díaz-Arce, J. A. Herrera-Silveira y F.A. Comín.
2021	<p>El acuífero está en contacto directo con la superficie a través de sumideros formados por el colapso de cuevas en el lecho rocoso kárstico.</p>	Biológico	NO	P. Moreno-Pérez, M. Hernández-Télez, y A. Bautista-Gálvez.
2021	<p>Los cenotes son cuevas inundadas en la península de Yucatán en México.</p>	Biológico	SI	Escobar-Zepeda, A., Rosas-Escobar, P., Marquez Valdelamar

2022	Los sumideros (llamados localmente cenotes) son formas kársticas que exponen el acuífero libre, lo que representa una conexión entre los ecosistemas superficiales y subterráneos; por lo tanto, haciendo que el agua subterránea sea altamente disponible.	Hidrogeoquímico	SI	E. Cejudo, P. Ortega-Almazán, D. Ortega-Camacho y G. Acosta-González.
------	---	-----------------	----	---

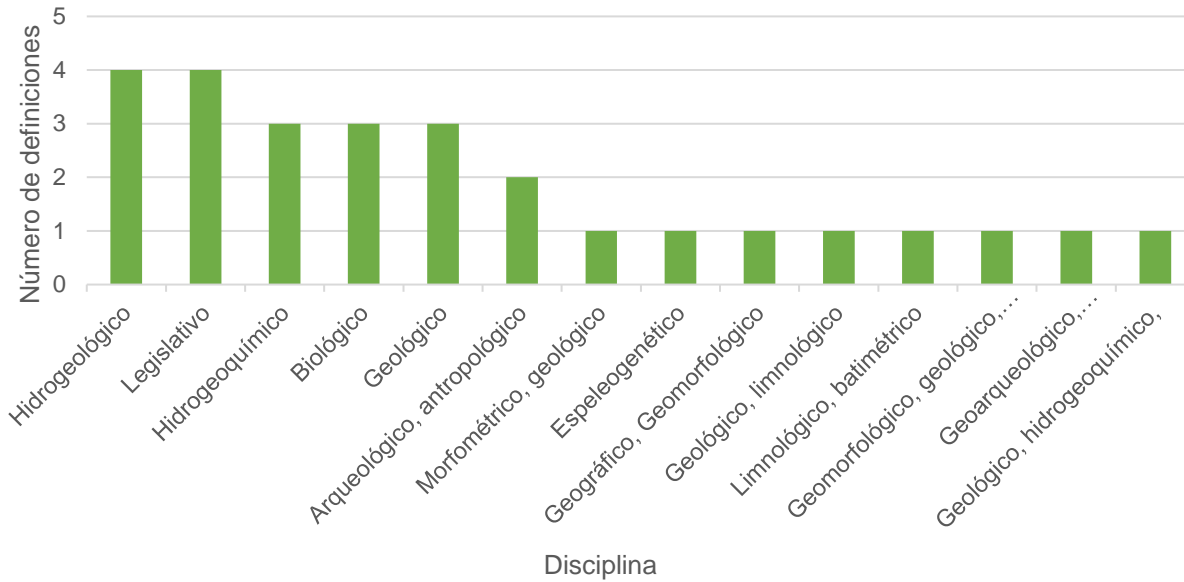
---

Al analizar los patrones respecto al tiempo, obtenemos definiciones que datan de 1910 hasta el 2022; se observa una tendencia positiva en el número de descripciones de cenote; los años 2016 y 2017, son los años con mayor número de definiciones dadas, con tres respectivamente. Los años 2021, 2014 y 1998 son los siguientes más productivos con dos definiciones cada uno. (Fig. 2)



**Fig 2** Número de definiciones por año. La línea punteada representa una tendencia positiva en la cantidad de definiciones publicadas a lo largo del tiempo.

Destacamos que la recopilación de definiciones nos arrojó una variedad de disciplinas asociadas al concepto de cenote. Podemos observar que existieron definiciones con una o más categorías del ámbito de estudio donde se involucrara. Los ámbitos de estudio con mayor variación de definiciones fueron la Hidrogeología y el Legislativo, con cuatro definiciones; los siguientes fueron hidrogeoquímico, biológico y geológico con tres definiciones. (Fig. 3)



**Fig 3** Gráfica de frecuencia de aparición de la definición de cenote en las distintas disciplinas.

### Análisis de *corpus*

La estructura del *corpus* resultante de las 26 definiciones consiste en 307 palabras únicas, que suma una frecuencia total de 736 términos en la totalidad del *corpus*. Respecto a la búsqueda de patrones en las definiciones literarias podemos notar que, al eliminar las palabras funcionales como las preposiciones y las conjunciones, se resume a un total de 267 palabras, de las cuales las siete que tuvieron una mayor presencia dentro del total de las 27 definiciones fueron “agua”, “cenotes”, “acuífero”, “disolución”, “forma”, “natural” y “roca”.

La frecuencia es relativa al número de definiciones, es decir, la palabra “agua” aparece en 17 de las 27 definiciones, por lo tanto, el porcentaje de incidencia es de 62.96% en el análisis del *corpus*. La siguiente palabra clave con mayor incidencia en el *corpus* fue cenote con un 48.15% de presencia. Las cinco palabras restantes tuvieron presencia en el 18.52% del cúmulo de definiciones. (**Tabla 2**)

**Tabla 2** Palabras claves resultantes de análisis de *corpus*, en la tabla sólo mostramos las 7 palabras con mayor presencia en el *corpus*. Esto es importante para observar rasgos semánticos en las definiciones de cenote.

Palabra clave	Freq	%
agua	17	62.96
cenotes	13	48.15
acuífero	5	18.52
disolución	5	18.52
forma	5	18.52
natural	5	18.52
roca	5	18.52

Ahora, en la presencia/ausencia de las representaciones gráficas, de las 27 definiciones el 56% no venía acompañado de algún esquema que representara visualmente la definición de cenote que mencionaba, el 44% sí presentaba algún tipo de esquema visual.

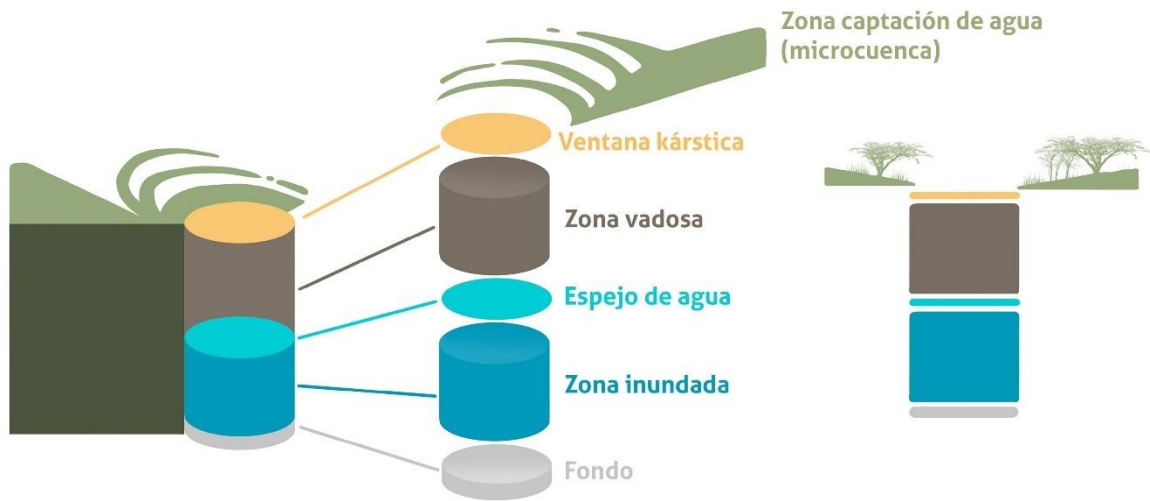
**(Fig. 4)**

#### Componentes unitarios de los cenotes

La simplificación de la estructura nos redujo a seis componentes elementales que representan las fases e interfases de los cenotes que fueron representadas gráficamente en este documento. **(Fig. 5)**: 1) La microcuenca de captación; 2) La ventana kárstica; 3) Zona vadosa; 4) El espejo de agua; 5) La zona inundada; 6) El fondo. La selección de los componentes unitarios fue basada en las palabras claves que compartían las definiciones de cenote analizadas, así como en la geometría de sus elementos.

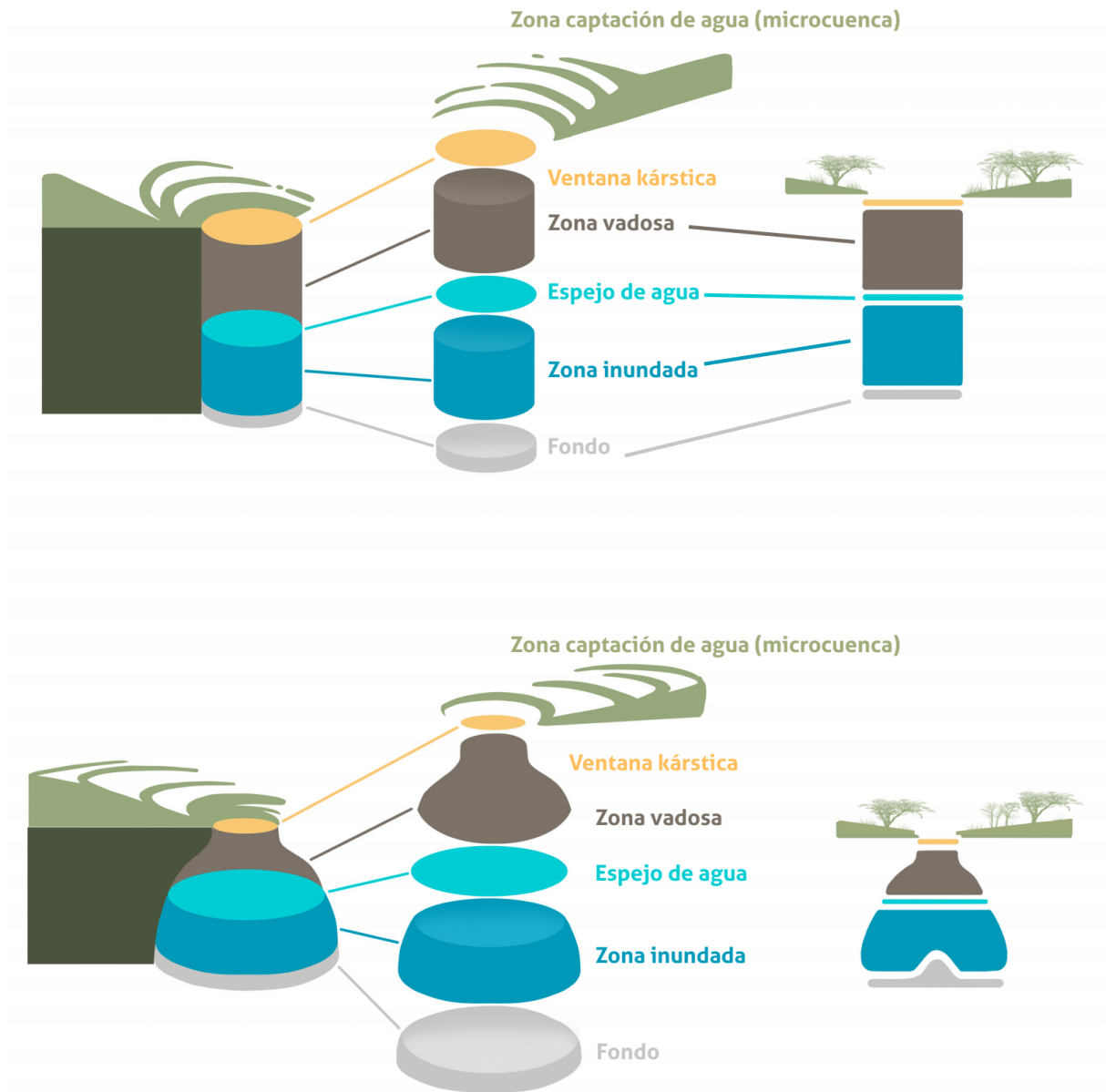
Ya que se obtuvieron los elementos representativos, se les atribuyeron unidades de medida que nos permitirá monitorear numéricamente la estructura geológica. Las

unidades de medida son fundamentales para la caracterización. Las métricas dan el distintivo cuantitativo a esta propuesta y son destinadas de acuerdo con los fundamentos geométricos inherentes de cada elemento simplificado.



**Fig 4** Los componentes que conforman un cenote están diferenciados por colores utilizando un cenote Se identifican desde los componentes epikársticos (i.e Microcuenca y ventana kárstica) hasta los endokársticos (i.e Zona vadosa, Espejo de agua, Zona inundada y fondo).

# Componentes de un cenote



**Fig 5** Representación gráfica comparando cada uno de los seis elementos. Mostrando su aplicación en dos cenotes de diferente estructura: cilíndrico y otro en forma de jarro (Hall, 1936).

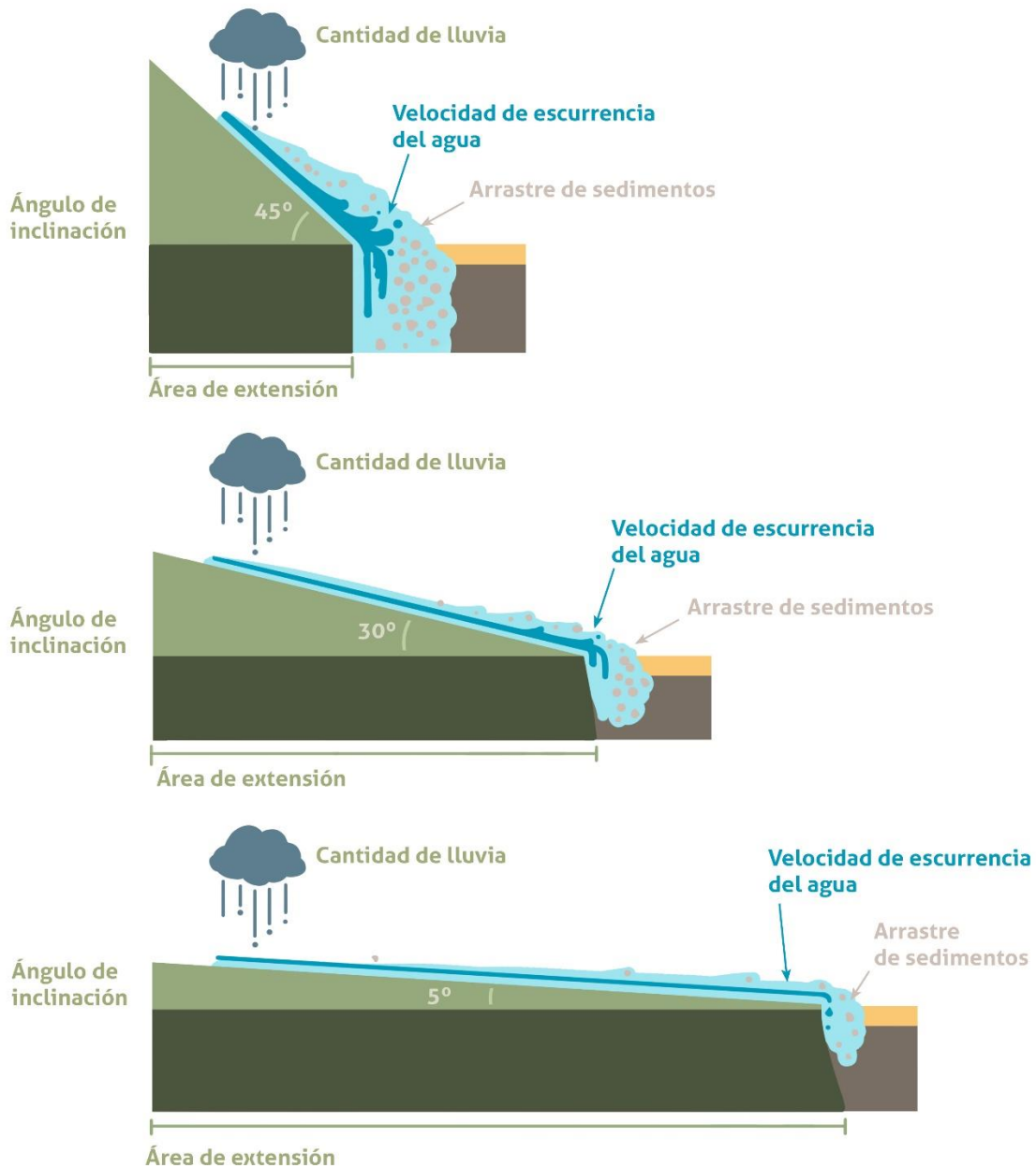
## Microcuenca de captación

La microcuenca de captación es definida como la zona de captura del agua meteórica y la materia orgánica. Al ser el primer elemento del cenote desde la superficie al interior de la matriz rocosa, se considera uno de los componentes fundamentales en la estructura del cenote, puesto que la configuración de este elemento juega un papel importante en la cantidad y velocidad de captura de los elementos alóctonos. **(Fig. 6)**

La microcuenca de captación debe de ser considerada como el área alrededor de la ventana kárstica y suele observarse un declive resultante de la dilución de la roca por acción de los factores ambientales. El ángulo de este declive es importante para el entendimiento del aporte de materia orgánica hacia el cenote, la velocidad y volumen del agua meteórica que se infiltra al cenote y el arrastre de sedimentos que se introducen a través de la ventana kárstica. A demás del ángulo, la longitud del diámetro de la microcuenca de captación también es un indicativo importante, puesto que esto nos indicará la capacidad de captura de este componente. **(Fig. 7)**

Otra variable destacada en la microcuenca de captación es el material de la matriz rocosa circundante, en este caso, modifica el grado de permeabilidad que, a su vez, modifica la infiltración del agua meteórica o elementos líquidos a lo largo de la microcuenca y puede interrumpir el flujo del material en el camino hasta la ventana kárstica. **(Fig. 8)**

## Zona de Captación de agua (Microcuenca)

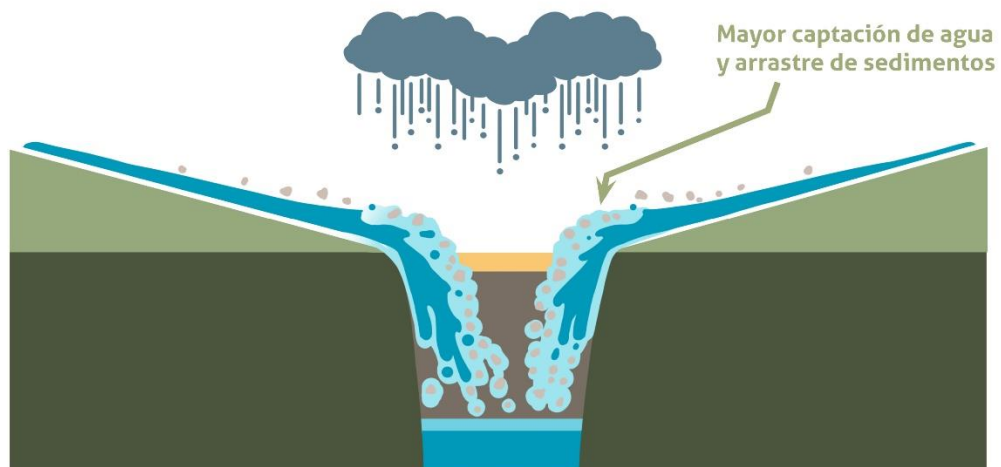


**Fig 6** El papel de la cuenca de captación es fundamental para el arrastre de la materia orgánica y el aporte de agua meteórica. El volumen de estos aportes será modificado por la variación morfológica de la cuenca.

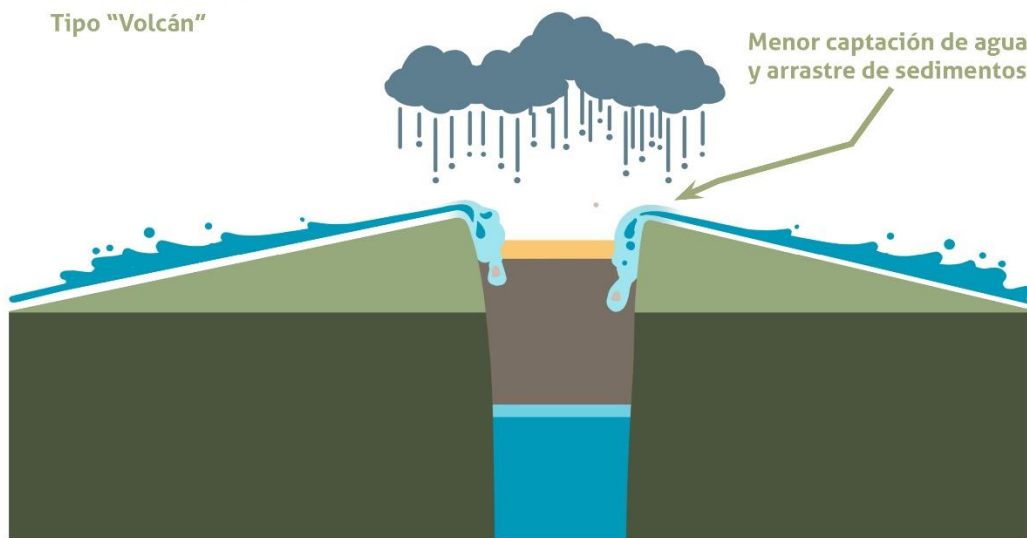
## Zona de Captación de agua (Microcuenca)

---

Forma de la cuenca  
Tipo "Cráter"

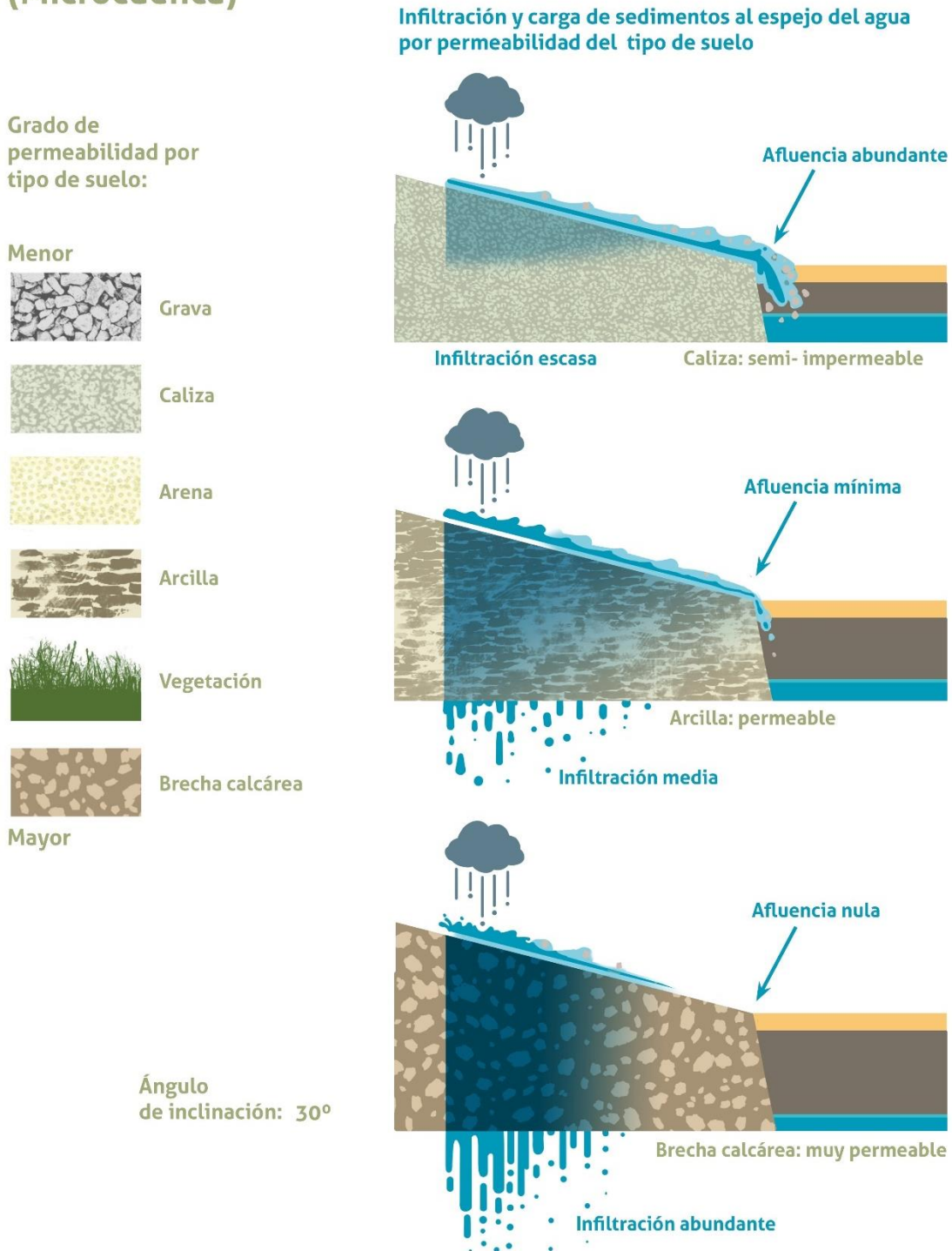


Forma de la cuenca  
Tipo "Volcán"



**Fig 7** La cuenca está estrictamente obligada a variar dependiendo de la topografía del terreno circundante.

## Zona de Captación de agua (Microcuenca)

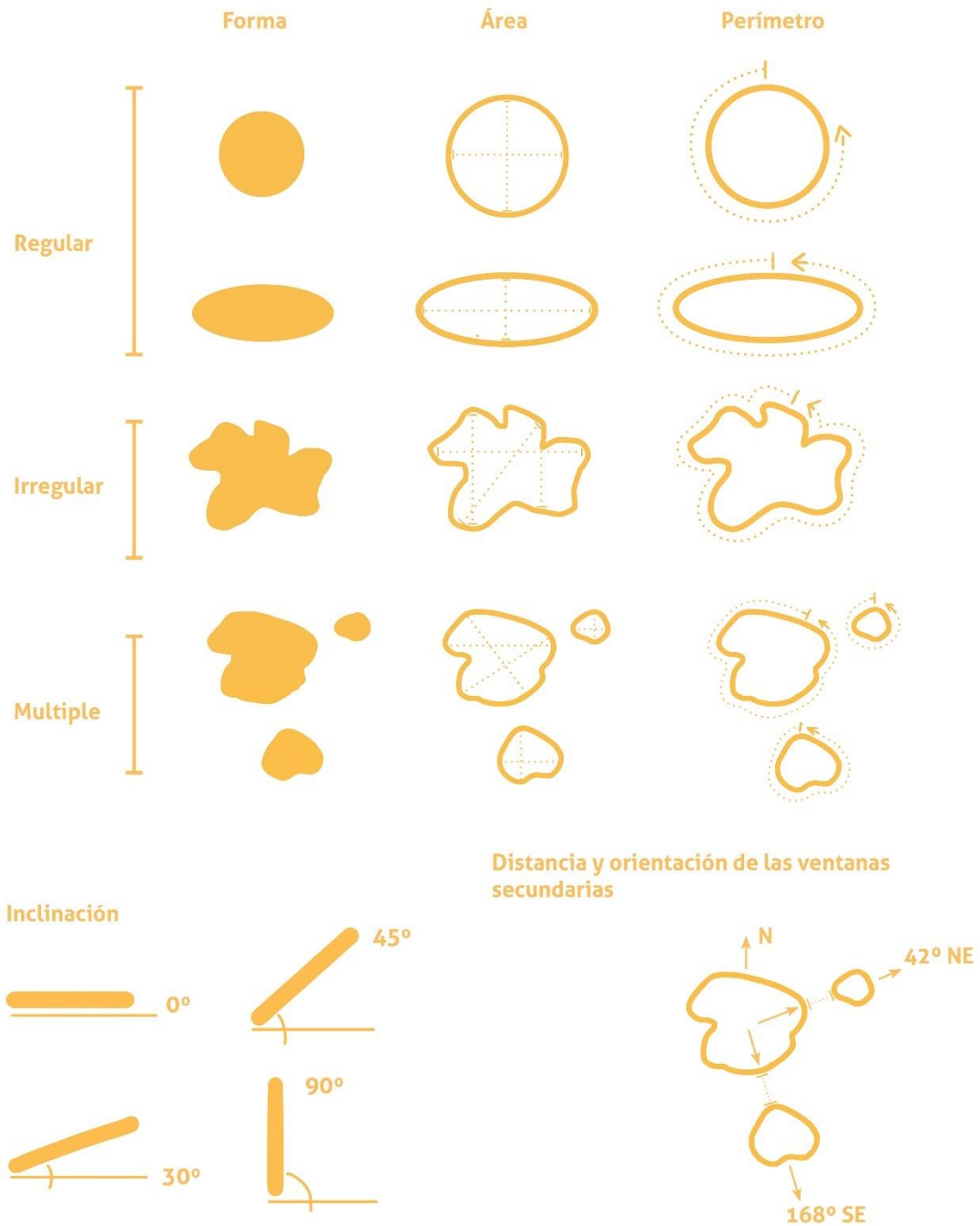


**Fig 8** Los materiales del terreno donde se encuentre este elemento también influirán en el aporte del agua meteórica.

## Ventana kárstica

Los cenotes al ser sistemas abiertos o semi abiertos (Akpınar-Ferrand, 2011; van Hengstum et al., 2011) presentan una conexión al agua subterránea con el exterior por medio de la ventana kárstica. La ventana kárstica se define como la zona de colapso de la bóveda (Ford & Williams, 2007). Puede variar en el perímetro y diámetro que es medido en unidades de longitud; consideramos que también pueden variar en el número de ventanas kársticas que tiene un cenote, que definiremos como los puntos de acceso de la superficie al interior del cenote. Para este caso, se utiliza el conteo simple, las unidades de medida arrojada serán discretas y estos datos vienen acompañados con la orientación de la ventana kárstica respecto al norte de la ventana más grande (principal) que son datadas en grados sexagesimales (**Fig. 9**).

## Ventana kárstica



**Fig 9** La estructura de la ventana kárstica no varía sólo en la geometría que puede adquirir, también en la inclinación de la ventana con respecto al del terreno.

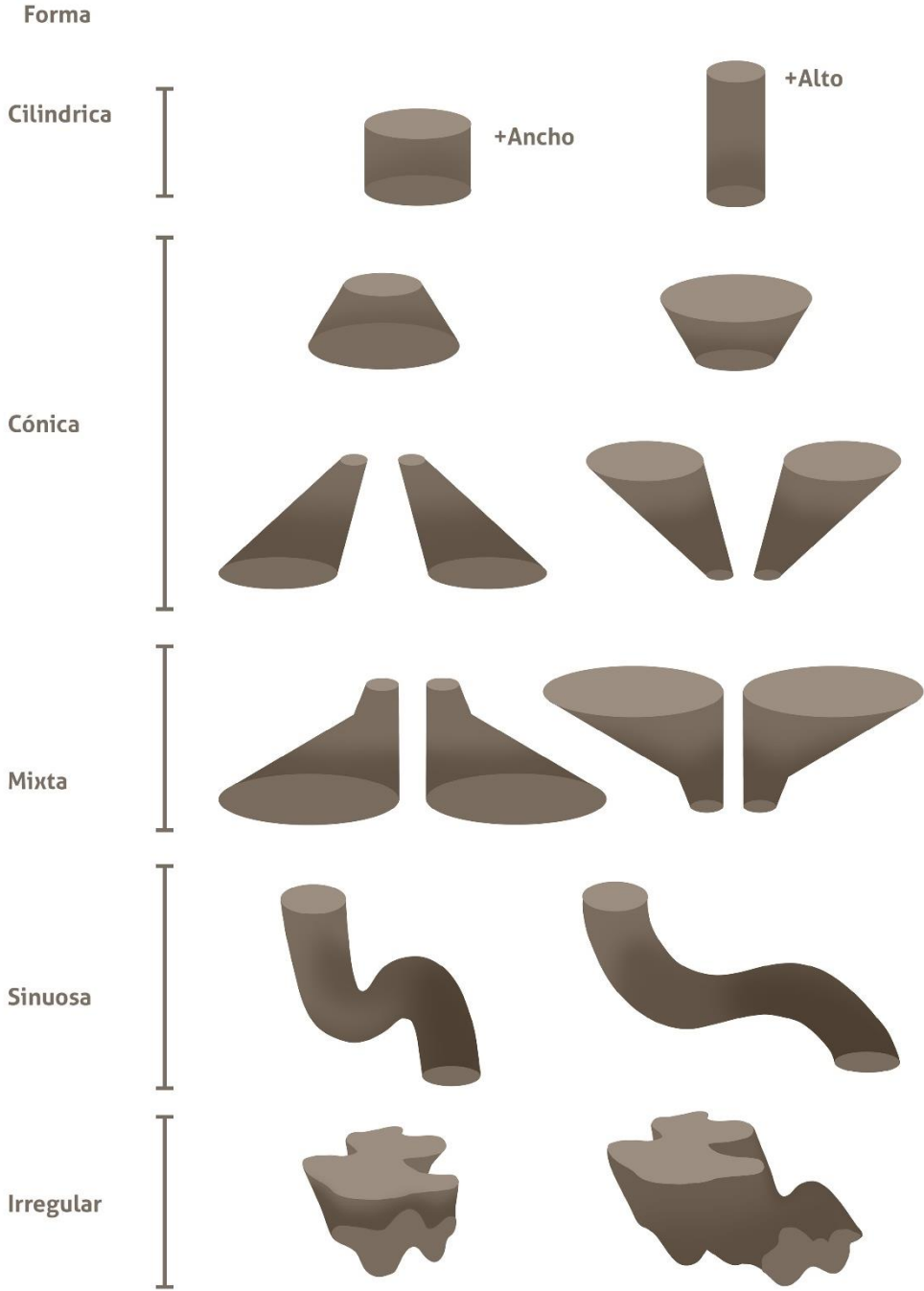
## Zona Vadosa

Poseen un espacio denominado zona vadosa o zona de aireación, que corresponde a aquella porción del suelo entre el nivel freático regional hasta la superficie, la cual no es estática al encontrarse supeditada a la dinámica del nivel del acuífero (Tobón, 2003). Este componente juega un rol fundamental en la filtración del agua meteórica hacia el acuífero. Forma la interfase entre el sistema hidrológico y el acuífero subyacente (Maliva, 2020). Proponemos que sea medido en unidades de longitud y en el caso de este estudio, se le llamara altura de la zona vadosa, comprende el espacio entre la ventana kárstica y el espejo del agua, medida en metros. Debido a que es una estructura subterránea, se propone que la altura sea relativa al nivel del mar. Este componente varía de acuerdo con la cercanía del cenote a la costa, es probable que hacia dentro de la península posea números negativos. Ejemplo: En el cenote Sabak-Há, se registra una profundidad de -147 m.

La zona vadosa no es la excepción en cuanto a variación estructural refiere, por lo que las capturas de las medidas corresponderán a las establecidas en las figuras geométricas próximas a su apariencia. Estos datos son fundamentales para los análisis volumétricos de la bóveda, o porción no inundada del cenote. Ford y Williams (2007) mencionan que la zona vadosa es el elemento que direccionará la forma que adquirirá la estructura, puesto que en esta zona se forman los canales de dilución que transportan el agua de lluvia hacia el manto freático. **(Fig. 10)**

En este componente, debido a la dinámica erosiva presente en la península, también se encontrarán pasajes laterales secos o inundados que tendrán sus respectivas numeraciones y medidas. La numeración es en orden ascendente comenzando desde los más cercanos a la ventana kárstica, así mismo, vendrán acompañados de la profundidad a la que se encuentran y con el área de la entrada del pasaje. **(Fig. 14)**

# Zona vadosa

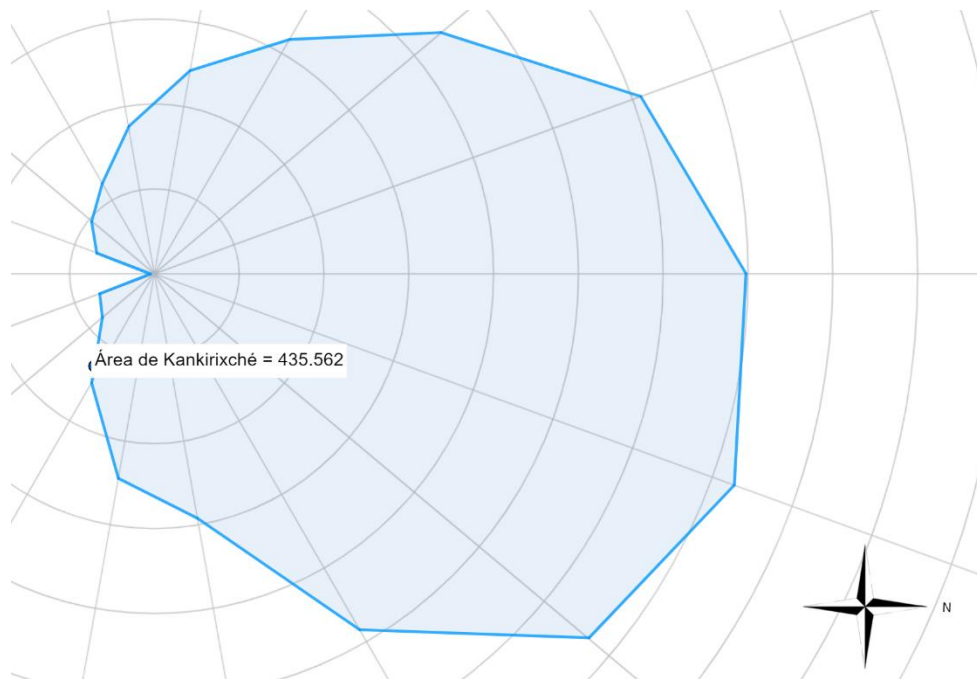


**Fig 10** La zona vadosa es el elemento que conduce los elementos del exterior al interior y es un punto clave que configura la accesibilidad al espejo del agua.

## Espejo de agua

El espejo del agua es definido como la superficie del agua subterránea que marca un límite entre la matriz rocosa no inundada y la zona inundada. El espejo de agua puede usualmente tendrá forma de polígono irregular y, al igual que la ventana kárstica las mediciones que le es atribuida para identificarla es el perímetro del área, que es medida en unidades de longitud. **(Fig.13)**

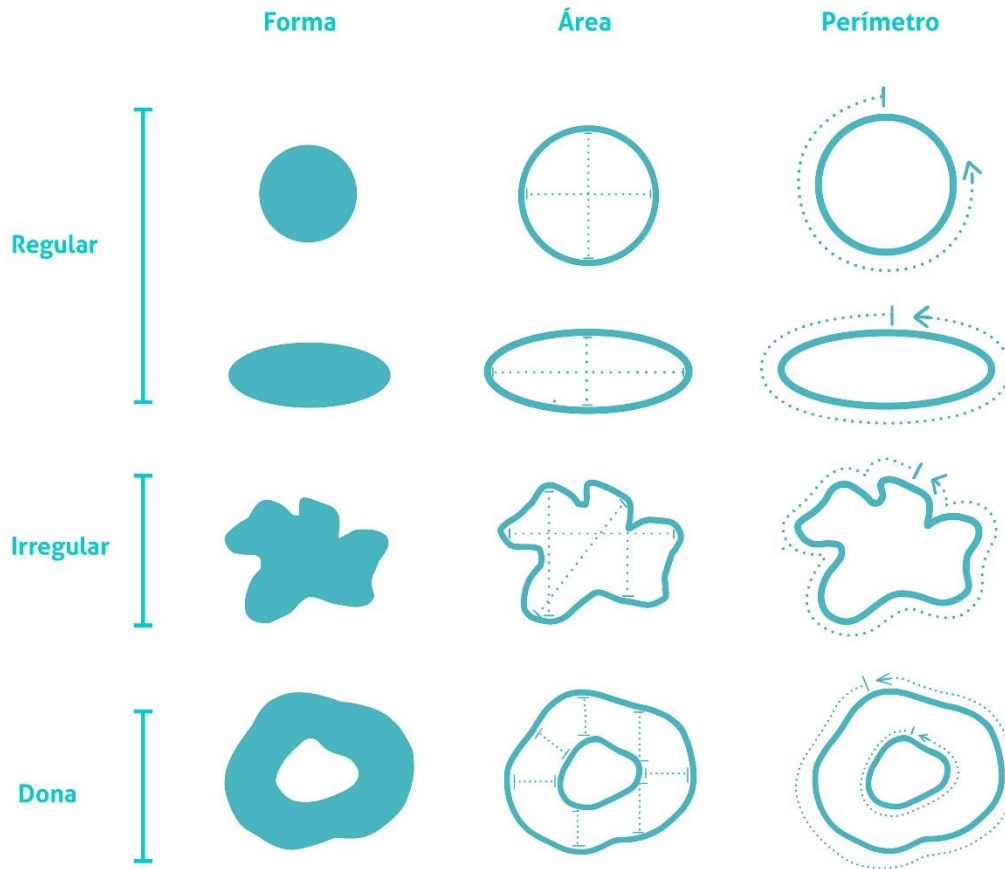
En este caso, la metodología sugerida para la toma de datos de esta estructura consiste en la obtención de las estaciones con un telémetro láser usando el norte magnético como referencia. Es decir, desde la posición del observador se toman las distancias desde el eje del observador hacia el extremo opuesto de la piscina, girando en sentido de las manecillas del reloj, dejando 20° de ángulo de apertura entre estación. El resultado sería una interpretación geométrica del polígono creado mediante estos datos y seremos capaces de no sólo conocer la forma de la estructura, también de conocer el área y el perímetro que abarca este componente en el sistema. **(Fig. 12)**



**Fig 11** Polígono que representa el espejo de agua de Kankirixché. El área del espejo de agua es de 345.562 m<sup>2</sup>. Este es un ejemplo de los resultados de aplicar la metodología descrita. La escala es de 1:100.

## Espejo de agua

---



**Fig 12** La variación del espejo de agua está estrechamente relacionada con la estructura de la zona vadosa. Repare que la forma de dona es dada por el colapso del techo de la bóveda que crea una isla en el medio de la piscina.

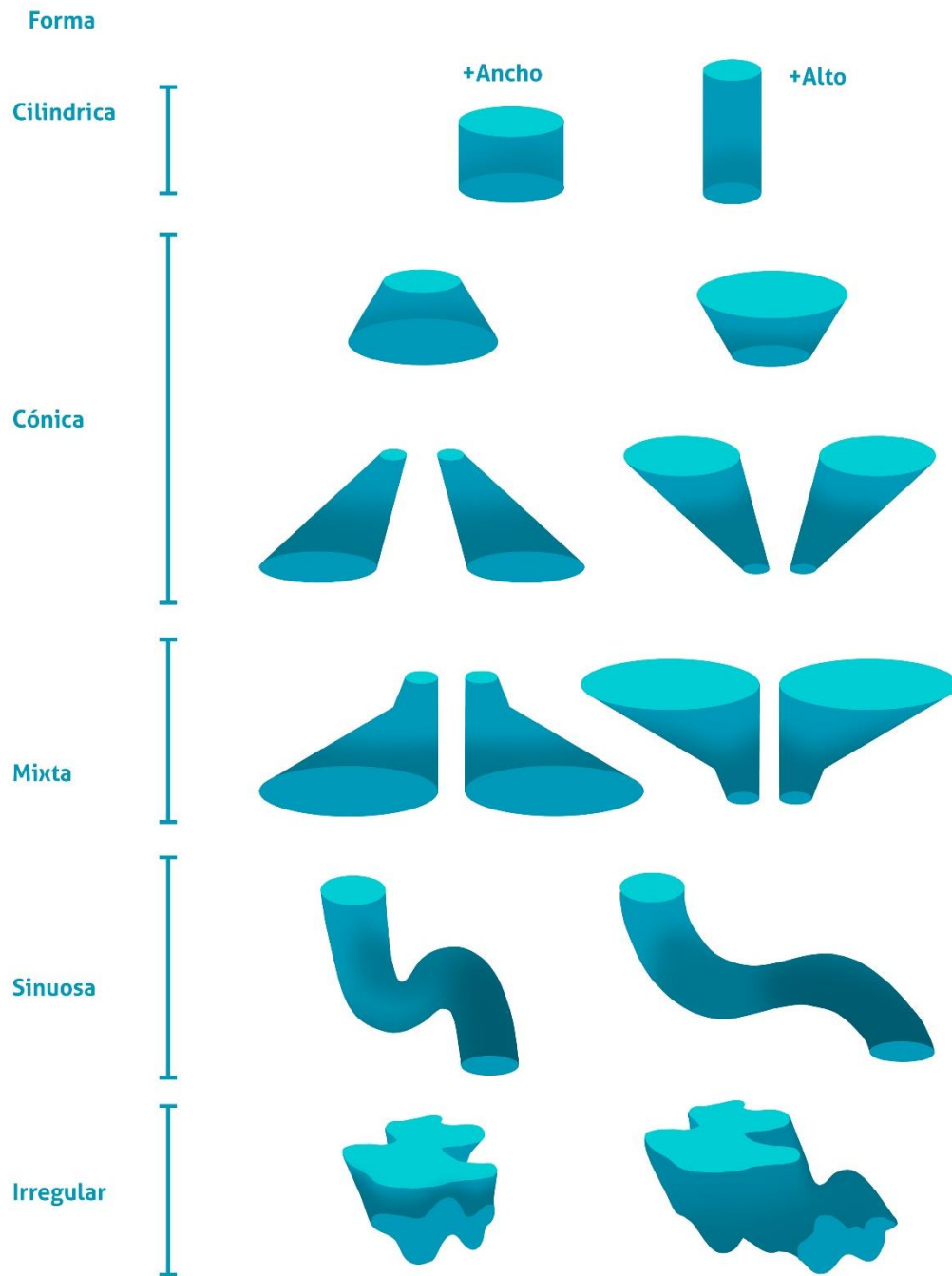
## Zona inundada o zona saturada

El siguiente componente será denominado zona inundada o acuífero, donde a diferencia de la zona vadosa, aquí la matriz rocosa se encuentra inundada por agua subterránea proveniente del acuífero asentado. En este caso, el nivel del agua puede fluctuar y está supeditada a la dinámica de las costas, así como a las fluctuaciones temporales del nivel del agua durante la época de lluvias y de secas de acuerdo con la hidrología de la península, debido a esto la zona saturada también cambiará en la proporción de sus dimensiones, como en la altura o el ancho. **(Fig. 14)**

Es importante recalcar que, dentro de este componente, se observarán cenotes con pasajes y grutas que configurarán la extensión horizontal de la zona inundada, esto estará muy relacionado con las vertientes de posibles fracturas, la erosión mecánica de la quimioclina y la cercanía a las costas. Los pasajes laterales también son numerados siguiendo un orden ascendente comenzando con los más cercanos al espejo de agua, las medidas que se obtienen de los pasajes laterales son semejantes a la entrada del cenote, que son área y perímetro. **(Fig. 15)**

## Zona inundada

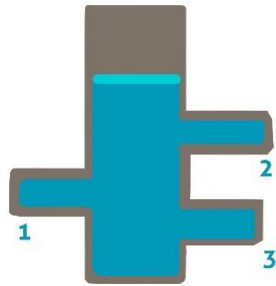
---



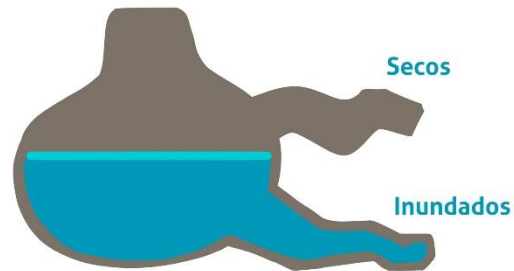
**Fig 13** Variación estructural y potencial clasificación de la zona inundada.

## Zona inundada

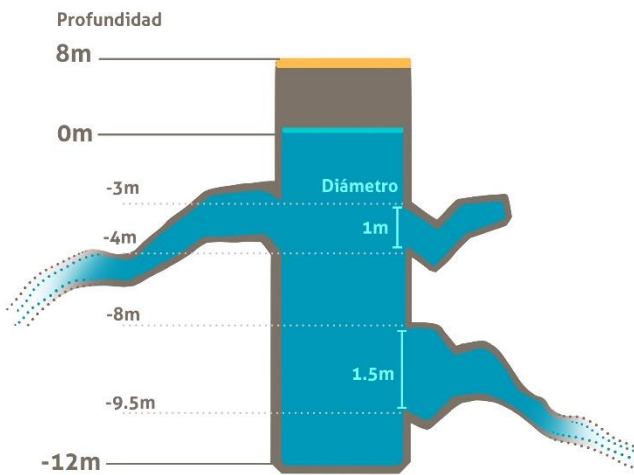
Número de conductos laterales



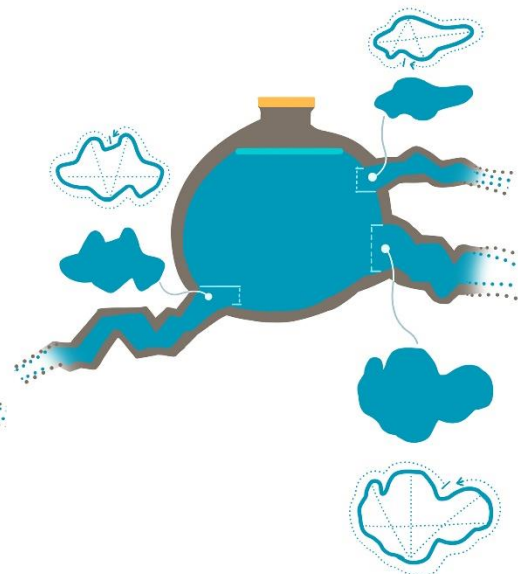
Tipo de conductos laterales:



Diámetro y profundidad de los conductos laterales



Área / perímetro / forma de la entrada de los conductos laterales



**Fig 14** Los pasajes laterales son un resultado de la dinámica de erosión en la matriz rocosa. Se pueden encontrar en la zona vadosa como en la zona inundada y cada uno de estos elementos contendrá medidas únicas que configurará la interconectividad.

## Fondo del cenote

El último componente que se considera en la estructura general del cenote es el fondo de este. Como podemos observar, hay distintos mecanismos que configuran la estructura general de los cenotes. El decaimiento de la materia orgánica, el colapso de las bóvedas, la erosión de la roca, entre otros, son factores que de una u otra forma depositan materiales al fondo del cenote el cual se irá reestructurando continuamente (**Fig. 16**). No obstante, mantiene una configuración general que coadyuva a que las poblaciones bentónicas de los cenotes mantengan el nicho distintivo que poseen.

Por lo tanto, se considera un componente fundamental en los cenotes y la forma propuesta para medirla y analizarla es con la batimetría. Al obtener los contornos de profundidad se generarán las cartas batimétricas correspondientes a cada cenote, con lo cual tendremos una representación visual de la heterogeneidad del fondo. Con esta metodología también se obtienen los valores de la zona inundada que serán dados en unidades de longitud (m), y también, será posible describir cualitativamente las particularidades de los fondos, como si es un fondo arenoso, rocoso, en declive, heterogéneo, homogéneo, etc.

## Tipos de fondo

Vegetación / algas



Balsetas de carbonato



Fango / arcilla



Rocas



Estalactitas/  
Estalagmitas



**Fig 15** Diversidad de materiales que pueden depositarse en el fondo de cenote y que configurará las características de este componente.

## Discusión y conclusión

La definición conceptual de cenote no ha sido consistente entre los autores. Esto es entendible por el interés propio del área de estudio al que refiere y también por la falta de indicadores que nos ayuden a interpretar los límites de las estructuras que se desarrollan en la Península de Yucatán. No obstante, observamos que existen palabras clave que describen a los cenotes y nos permite extrapolar estas coincidencias semánticas a los componentes unitarios que conforman estas estructuras kársticas siguen manteniéndose a lo largo de la región y, en la mayoría de los casos, en el mismo orden. Utilizar el análisis de *corpus* fue una técnica literaria útil para aproximarnos a los fundamentos que describen al objeto cenote. En este apartado sería interesante hacer el ejercicio de simplificar las categorías del área de investigación para evitar la redundancia causada por especialización en el área de conocimiento. Además, el uso del dibujo conceptual es benéfico para interpretar lo que estos rasgos semánticos infieren. Es imperante mencionar que debe de ser manejado con cautela puesto que, la subjetividad a la hora de discutir un tema puede sesgar los resultados. Es por esto por lo que decidimos observar las incidencias de representaciones gráficas que acompañen a la definición analizada pues la comparativa con las diferentes esquematizaciones reduce la subjetividad presente.

Una de las bondades operacionales de la morfometría es que el escrutinio del paisaje nos arroja observaciones inesperadas y estimula nuevas hipótesis. Por lo tanto, consideramos que se puede obtener una definición íntegra de cenote al sistematizar la toma de datos de la estructura. El análisis morfoestructural es una técnica que permite delimitar áreas de recarga, las zonas limítrofes donde se generan las subdivisiones de un sistema, la predisposición de las formas de disolución, las preferencias en la dirección del flujo hídrico y de materia orgánica, la ubicación de las zonas de captación, así como la delimitación de las zonas de protección y mapas de vulnerabilidad (Pulido, 2001). Debido a la transversalidad del análisis morfoestructural se ha aplicado al mapeo de las redes de cuevas y cavernas inundadas del sistema kárstico (Chirol et al., 2022; Collon et al., 2021; Kambesis & Coke, 2013; Vuilleumiaer et al., 2012), para el reconocimiento

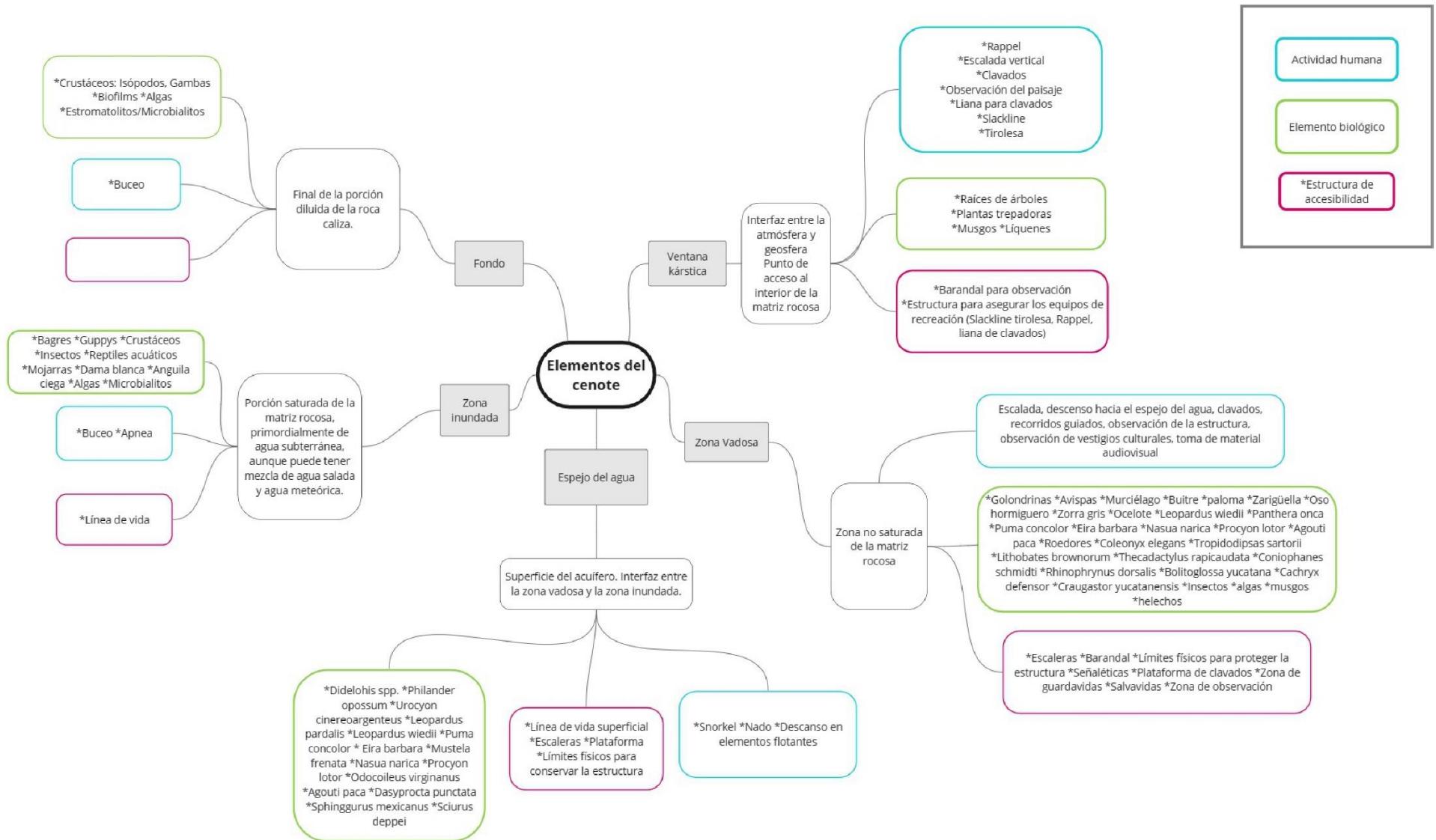
semiautomático de las depresiones kársticas haciendo uso de SIGs (Moreno et al., 2019; Pardo-Igúzquiza et al., 2017; Paredes et al., 2019) o para el registro de la fluctuación del nivel del agua y batimetría con vehículos aéreos de control remoto (Bandini et al., 2018). Estos estudios demuestran las bondades de la morfometría aplicada a los sistemas kársticos, sin embargo, es evidente que no se ha realizado el mismo esfuerzo para los cenotes más allá que el de la toma de la profundidad o de la ventana kárstica. Rodríguez & Crespo (2010) realizaron una diferenciación semejante en cenotes de Quintana Roo donde utilizaron la morfología para identificar que el tamaño de las rocas tiene una relación con el número y tipo de discontinuidades presentes en la formación geológica, así como que la forma de la ventana kárstica (ellos lo llaman boca del cenote) tiene relación con el mecanismo de formación del cenote.

Estos trabajos nos indican que la descripción cuantitativa es un buen esfuerzo para caracterizar a los cenotes, entender la variación estructural y sus implicaciones.

Es necesario hacer un esclarecimiento estructural de lo que es un cenote para entablar dentro de los márgenes de la legislación vigente que regula la construcción de obras en cenotes las fronteras físicas y cuantificar los límites de cambio aceptable (Manning & Anderson, 2012; Paredes-Pérez, 2003). Esto es útil para diversas organizaciones, desde las instituciones de administración de agua locales hasta gobiernos estatales al asistir en planeaciones medioambientales (Brinkmann, 2013). En el sentido turístico, las aproximaciones numéricas de los espacios donde se ofrecen oportunidades recreación nos indicarán la capacidad de carga que puede sostener el sistema, los que es relevante para la zonificación de actividades que pueden realizarse acorde a las condiciones del terreno, así como de marcar el límite de cambio aceptable para que el turismo sea sostenible (Manning & Anderson, 2012).

Al seccionar en partes el objeto podremos responder a las necesidades de cada una de las cualidades que conforman a los cenotes de manera direccionada. Al coincidir los componentes unitarios que los conforman, los análisis estructurales serán informativos y auxiliará en las observaciones de los cambios que han presentado los cenotes ya sea

por factores bióticos, abióticos o, directamente, factores antropogénicos; por lo tanto, la caracterización física de los cenotes se considera un esfuerzo relevante para el entendimiento objetivo de la formación kárstica cenote. El trabajo se concluye con la descripción de los elementos de cenote, su relevancia y la aplicación de las métricas en el sector turístico. **(Fig. 17)**



**Fig 16** Aplicabilidad de la segmentación de los cenotes como indicadores del tipo de actividad, fauna y estructuras de accesibilidad que se permiten de acuerdo a las características físicas del elemento.

## Reconocimientos

Este trabajo de investigación fue desarrollado bajo el apoyo de los proyectos PAPIIT de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), UNAM IN228319. Así mismo, agradecemos a el proyecto Ts'onot de Kalanbio A.C. por facilitar el trabajo de campo para comprender mejor la estructura de los cenotes. Es importante reconocer a The Explorer's Club por el financiamiento "*Rising Explorer*" brindado para la exitosa culminación del proyecto y el inicio del camino para estudiar la morfometría de los cenotes. A el equipo de Cenoteando por aceptar mi trabajo en el grupo y apoyarme logística e intelectualmente.

Quiero reconocer el esfuerzo del Dr. Efraín Chávez Solís, no sólo sus comentarios me ayudaron a hilar el entramado de la investigación también el trabajo en campo fue enriquecedor y divertido. A la Dra. Angélica de la Cruz y la M.C. Ivonne Trejo, observar su trabajo en campo me permitió darme cuenta de la abundante vida que habita en los cenotes. Agradezco al M.C. Isaac Chacón quien me ayudó grandemente con la logística de las salidas a campo y por facilitar el intercambio de conocimiento con los administradores de los cenotes. A Raúl Castillo por la compañía a campo y por ayudarme a recopilar, ordenar y sistematizar gran parte de los datos colectados en campo. A el M.C. Ricardo Merlos por sus comentarios, el intercambio de ideas y las sugerencias que me permitieron cimentar los fundamentos del trabajo. Al Dr. Fernando Enseñat Soberanis quien con sus comentarios me permitió cohesionar el trabajo con del turismo sustentable. Sin duda, la participación de Alberto Guerra de Naturae Art fue de gran importancia para la creación de los esquemas y durante las discusiones proporcionó claridad a las características de los elementos de cenote.

Al Dr. Eduardo Cejudo, quien auxilió en la comprensión del acuífero de Yucatán y la vulnerabilidad del sistema, así como en entender la participación de los cenotes. Al Dr. Antonio Almazán, quien también me ayudó a esclarecer la ecología de los cenotes y la interconectividad del sistema. Al Dr. Oscar Escolero<sup>†</sup> quien me ayudó a entender la

importancia de delimitar los cenotes en el sentido legal y también a la factibilidad de la metodología para entender las preferencias de fracturas del sistema kárstico.

## Referencias

- Aguilar, T., Bautista, F., Mendoza, M. E., Frausto, O., & Ihl, T. J. (2016). Density of karst depressions in Yucatán state, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 78(2), 51–60. <https://doi.org/10.4311/2015ES0124>
- Akpınar-Ferrand, E. (2011). Aguadas: a significant aspect of the southern maya lowlands water management systems [University of Cincinnati]. In University of Cincinnati. [https://etd.ohiolink.edu/!etd.send\\_file?accession=ucin1307320694&disposition=inline](https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=ucin1307320694&disposition=inline)
- Arroyo-Cabrales, J., Luna, P., Chatters, J. C., Rissolo, D., Chávez Arce, R., Nava Blanck, A., & Barba, H. (2015). Underwater archaeology and prehistory: the case of the cenotes in Mexico. In *World Heritage. Papers 42. Human Origin Sites and the World Heritage Convention in the Americas (Vol. I. Ca, pp. 54–60)*. UNESCO/ Gob. Puebla.
- Bakalowicz, M. (2005). Karst groundwater: A challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*, 13(1), 148–160. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0402-9>
- Bandini, F., Lopez-Tamayo, A., Merediz-Alonso, G., Olesen, D., Jakobsen, J., Wang, S., Garcia, M., & Bauer-Gottwein, P. (2018). Unmanned aerial vehicle observations of water surface elevation and bathymetry in the cenotes and lagoons of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 26(7), 2213–2228. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1755-9>
- Bautista, F., Palacio-aponte, G., Quintana, P., & Alfred, J. (2011). Geomorphology Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology*, 135(3–4), 308–321. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.02.014>
- Beddows, P. A., Blanchon, P., Escobar Briones, E., & Torres-Talamante, O. (2002). Los cenotes de la Península de Yucatán. *Arqueología Mexicana*, 83, 32–35.
- Brinkmann, R. (2013). *Florida Sinkholes*. University Press of Florida. <https://doi.org/10.2307/j.ctvx06wt8>
- Callaghan-Capetillo, M. A., Huchim-Lara, I. G., Hernández-Cuevas, F. I., Rodríguez-López, B., Cantón-Duarte, M. G., & García-Burgos, A. (2020a). Valoración económica de las amenidades de un cenote en Pebá, Yucatán, México. *Revista Estudios Ambientales - Environmental Studies Journal*, 8(1), 43–58. <https://doi.org/10.47069/estudios-ambientales.v8i1.672>
- Cervantes-Martínez, A., Elías-Gutiérrez, M., & Suárez-Morales, E. (2002). Limnological And Morphometrical Data Of Eight karstic Systems “Cenotes” Of The Yucatan Peninsula, Mexico, During the Dry Season (February-May, 2001). *Hydrobiologia*, 482, 167–177.
- Cespedosa, A. (2009). “El Dibujo Científico. Ilustración De Una Publicación Científica.”

Chirol, C., Haigh, I. D., Pontee, N., Thompson, C. E. L., & Gallop, S. L. (2022). Morphological evolution of creek networks in 10 restored coastal wetlands in the UK. 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01199-4>

Chnaid-Gamboa, D. (1998). Cavernas y Cenotes de la reserva ecológica Cuxtal (D. de D. U. Ayuntamiento de Mérida (ed.); 1st ed.).

Cole, L. J. (1910). The Caverns and People of Northern Yucatan. Bulletin of the American Geographical Society, 42(5), 321. <https://doi.org/10.2307/199038>

Collon, P., Bernasconi, D., Vuilleumier, C., Renard, P., Collon, P., Bernasconi, D., Vuilleumier, C., Renard, P., Collon, P., Bernasconi, D., Vuilleumier, C., & Renard, P. (2021). Statistical metrics for the characterization of karst network geometry and topology.

Del Río, O. (2022). Una visión general de las investigaciones arqueológicas subacuáticas llevadas a cabo en los cenotes de la Riviera Maya; resultados y riesgos por el paso del Tren Maya.. <https://doi.org/https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19644189.v3>

Díaz-Arce, V., Herrera-Silveira, J. A., & Comín, F. A. (2000). Limnological characteristics of two types of cenotes of Yucatán. Verhandlungen Internationale Vereinigung Fur Theoretische Und Angewandte Limnologie, 27, 3579– 3582. [https://www.researchgate.net/profile/Jorge\\_Silveira/publication/287647020\\_Limnological\\_characteristics\\_of\\_two\\_types\\_of\\_cenotes\\_of\\_Yucatan/links/56815bb608ae1e63f1edcb42.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Jorge_Silveira/publication/287647020_Limnological_characteristics_of_two_types_of_cenotes_of_Yucatan/links/56815bb608ae1e63f1edcb42.pdf?origin=publication_detail)

Domínguez Ángeles, A. (2015). Los rituales guerreros y los sacrificios agrarios en el Cenote Sagrado de Chichén Itzá. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Escobar-Zepeda, A., Rosas-Escobar, P., Marquez Valdelamar, L., de la Torre, P., Partida-Martinez, L. P., Remegaldo, R., Sanchez-Flores, A., & Vergara, F. (2021). Distinctive prokaryotic microbiomes in sympatric plant roots from a Yucatan cenote. BMC Research Notes, 14(1), 1–6. <https://doi.org/10.1186/S13104-021-05746-X/TABLES/1>

Escolero, O. A., Marin, L. E., Steinich, B., Pacheco, A. J., Cabrera, S. A., & Alcocer, J. (2002). Development of a Protection Strategy of Karst Limestone Aquifers: The Merida Yucatan, Mexico Case Study. Water Resources Management, 16(5), 351–367. <https://doi.org/10.1023/A:1021967909293>

Ford, D., & Williams, P. (2007). Karst Hydrogeology and Geomorphology. In John Wiley & Sons, Ltd. John Wiley & Sons Ltd,. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>

Froehlich, H. (2018). Análisis de *corpus* con AntConc. Programming Historian En Español, 2. <https://doi.org/10.46430/phes0032>

Gaona-Vizcaíno, S., Gordillo-de-Anda, T., & Villasuso, M. (1980). Cenotes, karst característico: mecanismos de formación. Revista Del Instituto de Geología de La Universidad Nacional Autónoma de México, 4(1), 32–36.

Gaona-Vizcayno, S., Gordillo-de-Anda, T., & Villasuso-Pino, M. (1980). Cenotes, Karst característico: mecanismo de formación. *Revista Instituto Geología de La Universidad Nacional Autónoma de México*, 4(1), 32–36.

González, A. H., Terrazas, A., Stinnesbeck, W., Benavente, M. E., Avilés, J., Rojas, C., Padilla, J. M., Velásquez, A., Aceves Nuñez, E., & Frey, E. (2014). The first human settlers on the Yucatan Peninsula: Evidence from drowned caves in the State of Quintana Roo (South Mexico). *Paleoamerican Odyssey*, 323–337.

Hart, J. F. (1964). Land and Life-Selected Writings of Carl Sauer. *Annals of the Association of American Geographers*, 54(4), 612–614.  
<https://doi.bibliotecabuap.elogim.com/10.1111/j.1467-8306.1964.tb01788.x>

Houck Jr., C. W. (2006). Cenotes, Wetlands, and Hinterland Settlement. In J. P. Mathews & B. A. Morrison (Eds.), *Lifeways in the Northern Maya Lowlands: New Approaches to Archaeology in the Yucatán Peninsula* (pp. 56–76). University of Arizona Press.

Kambesis, P. N., & Coke, J. G. (2013). Overview of the controls on eogenetic cave and Karst development in Quintana Roo, Mexico. *Coastal Research Library*, 5(2002), 347–373.  
[https://doi.org/10.1007/978-94-007-5016-6\\_16](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5016-6_16)

Laurence, A. (2022). *AntConc* (Version 4.2.0).

Lopez-Maldonado, Y., & Berkes, F. (2017). Restoring the environment, revitalizing the culture: Cenote conservation in yucatan, Mexico. *Ecology and Society*, 22(4).  
<https://doi.org/10.5751/ES-09648-220407>

López-Martínez, R., Solleiro-Rebolledo, E., Chávez-Vergara, B., Díaz-Ortega, J., Merino, A., Trabanino García, F. A., Velázquez Morlet, A., del Río-Lara, O., Martos López, L. A., & Terrazas Mata, A. (2020). Early Holocene charcoal accumulations in the Aktun Ha cenote: Evidence of fire used by the first settlers of the Yucatán Peninsula, Mexico. *Geoarchaeology*, 35(6), 819–833. <https://doi.org/10.1002/gea.21797>

Lugo-Hubp, J., Aceves-Quesada y Espinasa-Pereña, R. (1992). Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatan. In *Revista del Instituto de Geología , UNAM* (Vol. 10, Issue 2, pp. 143–150).

Manning, R. E., & Anderson, L. E. (2012). *Case Studies in the National Parks*.

Marinović, V., & Stevanović, Z. (2019). Karst groundwater quantity assessment and sustainability: the approach appropriate for river basin management plans. *Environmental Earth Sciences*, 78(12), 362. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8364-3>

Martos López, L. A. (2008). Underwater archaeological exploration of the Mayan cenotes. *Museum International*, 60(4), 100–110.  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1468-0033.2008.00670.x/full>

Mata, E. (2005). *Comentarios sobre dibujo analítico*. Instituto Juan de Herrera.  
<https://books.google.com.mx/books?id=7D2BAAAACAAJ>

Micallef, A., & Williams, A. (Eds.). (2009). *Beach Management: Principles and Practice* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849770033>

Monroy-Ríos, E. (2016). ¿Cómo se formaron cuevas y cenotes? Espeleogénesis. *Environmental Biogeochemistry - Blog Personal*. <http://sites.northwestern.edu/monroyrios/2016/05/20/espeleogenesis/>

Moreno-g, M., Liedl, R., & Stefan, C. (2019). A New GIS-Based Model for Karst Dolines Mapping Using LiDAR ; Application of a Multidepth Threshold Approach in the Yucatan Karst , Mexico.

Moreno-Pérez, P. A., Hernández-Téllez, M., & Bautista-Gálvez, A. (2021). In Danger One of the Largest Aquifers in the World, the Great Mayan Aquifer, Based on Monitoring the Cenotes of the Yucatan Peninsula. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 81(2), 189–198. <https://doi.org/10.1007/s00244-021-00869-5>

Palacios-Vargas, J. G. (1993). Nuevos datos sobre la fauna cavernícola de Yucatán, México. *Mundos Subterráneos*, 4, 5–17.

Pardo-Igúzquiza, E., Durán, J. J., Luque-Espinar, J. A., & Robledo-Ardila, P. (2017). Geomorphometric Analysis of Karst Terrains. 21–26. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45465-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45465-8_2)

Paredes, C., Matos, H., de la Vega, R., & Pardo, E. (2019). Reconocimiento semiautomático de depresiones kársticas mediante análisis clúster de las distribuciones morfométricas y su aplicación al karst del Estado de Yucatán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 36(2), 270–288. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2019.2.1017>

Paredes-Pérez, M. E. (2003). Analisis de la legislación ambiental de México que interviene en la protección de ecosistemas subterráneos (cuevas y cenotes) de Yucatán, comparada con las leyes ambientales de Estados Unidos de Norteamérica y Brasil. Universidad Autónoma de Yucatán.

Pearse, A.S., E. . C. and F. G. H. (1936). *The Cenotes of Yucatan*. Carnegie Institute Washington Publication, 457, 1–304.

Pérez Flores, A. (2012). Percepción, uso y manejo de los cenotes en El Puerto, Yucatán. Centro de investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida.

Perramón Ligorred, Josep; Ventura Dzib, M. (2008). Manual de buenas prácticas en cenotes y pozos comunitarios de Mérida. In Ayuntamiento de Mérida (Vol. 1).

Perry, E. C., Velazquez-Oliman, G., & Marin, L. E. (2002). The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, Mexico. *International Geology Review*, 44(3), 191–221. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.44.3.191>

Pulido, A. (2001). Investigation and exploration of karstic aquifers. *Boletín Geológico y Minero*, 112(SPECIAL EDITION).

Ramos, E. L. (1975). Geological Summary of the Yucatan Peninsula. The Gulf of Mexico and the Caribbean, 1, 257–282. [https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8535-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8535-6_7)

Reddell, J. R. (1981). A review of the cavernicole fauna of México, Guatemala y Belize. THE TEXAS MEMORIAL MUSEUM, 27, 327.

Rodríguez, M. G., & Crespo, I. O. (2010). Formas kársticas comunes de los cenotes del Estado de Quintana Roo (México). M+A. Revista Electrónica de Medioambiente, 9, 15–35. <https://doi.org/10.5209/MARE.15875>

Sauro, U. G. O. (2003). DOLINES AND SINKHOLES : ASPECTS OF EVOLUTION AND PROBLEMS OF CLASSIFICATION » DOLINE « IN » SINKHOLE « Z VIDIKA RAZVOJA IN TE Ž AVE S KLASIFIKACIJO. 41–52.

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., & Steinich, B. (2002). Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula ( SE Mexico ). Hydrobiologia, 467, 215–228.

SEMARNAT, & CONANP. (2016). Programa de Manejo Parque Nacional Dzibilchantún.

Socki, R. A., Gaona-Vizcayno, S., Perry, E., and Villasuso-Pino, M. (1984). A chemical drill: Sulfur isotope evidence for the mechanism of formation of deep sinkholes in tropical karst, Yucatan, Mexico. Geological Society of America Abstracts with Programs, 16(6), 662.

Socki, R. A., Perry, E. C., & Romanek, C. S. (2002). Stable isotope systematics of two cenotes from the northern Yucatan Peninsula, Mexico. Limnology and Oceanography, 47(6), 1808–1818. <https://doi.org/10.4319/lo.2002.47.6.1808>

Steinich, B., Olimán, G. V., Marín, L. E., & Perry, E. C. (1996). Determination of the ground water divide in the karst aquifer of Yucatan, Mexico, combining geochemical and hydrogeological data. Geofísica Internacional, 35(2). <https://doi.org/10.22201/igf.00167169p.1996.2.857>

Suárez-Morales, E., & Rivera-Arriaga, E. (1998). Hidrología y Fauna Acuática de los Cenotes de la Península de Yucatán \*. Rev. Soc. Mex. Hist.Nat, 47, 48–37.

Toledo, A., Godoy, M., & Suárez, Z. (2008). El análisis semántico, sintáctico y pragmático en la enseñanza de los contenidos gramaticales. Varona, 46, 60–65. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=3606/360635566010>

van Hengstum, P. J., Scott, D. B., Gröcke, D. R., & Charette, M. A. (2011). Sea level controls sedimentation and environments in coastal caves and sinkholes. Marine Geology, 286(1–4), 35–50. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.05.004>

Villafañe, V. E., Guendulain-García, S. D., Valadez, F., Rosiles-González, G., Helbling, E. W., & Banaszak, A. T. (2015). Antagonistic and synergistic responses to solar ultraviolet radiation and increased temperature of phytoplankton from cenotes (sink holes) of the Yucatán Peninsula, México. Freshwater Science, 34(4), 1282–1292. <https://doi.org/10.1086/682051>

Vuilleumiaer, C., Borghi, A., Renard, P., Ottowitz, D., Schiller, A., Supper, R., & Cornaton, F. (2012). A method for the stochastic modeling of karstic systems accounting for geophysical data: an example of application in the region of Tulum, Yucatan Peninsula (Mexico). *Hydrogeology Journal*, 21(3), 529–544. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0944-1>

Wollwage, L., Fedick, S., Sedov, S., & Solleiro-Rebolledo, E. (2012). The deposition and chronology of cenote t'isil: A multiproxy study of human/environment interaction in the northern maya lowlands of southeast Mexico. *Geoarchaeology*, 27(5), 441–456. <https://doi.org/10.1002/gea.21418>

Zamora-Luria, J. C., Perera-Burgos, J. A., González-Calderón, A., Marin, L. E., & Leal Bautista, R. M. (2020). Control of fracture networks on a coastal karstic aquifer: a case study from northeastern Yucatán Peninsula (Mexico). *Hydrogeology Journal*, 28(8), 2765–2777. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02237-4>