



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Determinación de coliformes totales y fecales en 5 cenotes de la ciudad de Tulum, Quintana Roo

TESIS

Para obtener el grado de
Ingeniero Ambiental

PRESENTA

Irving Arcángel Góngora Aguilar

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Víctor Hugo Delgado Blas

ASESORES

M.C. José Luis González Bucio
Dra. Jennifer Denise Ruiz Ramírez
Dra. Norma Angélica Oropeza García
Dr. Adrián Cervantes Martínez



Chetumal, Quintana Roo, México, a 10 marzo de 2021





UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Tesis elaborada bajo la supervisión del Comité de Tesis del programa de licenciatura y aprobada como requisito para obtener el grado de:

INGENIERO AMBIENTAL

COMITÉ DE TESIS

Director:

Dr. Víctor Hugo Delgado Blas.

Asesor:

MC. José Luis González Bucio

Asesor:

Dra. Jennifer Denisse Ruíz Ramírez

Asesor:

Dra. Norma Angélica Oropeza García

Asesor:

Dr. Adrián Cervantes Martínez



Chetumal, Quintana Roo, México, 10 de marzo de 2021



AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a mi familia. El pilar de todo lo que he construido hoy en día y el ejemplo de trabajo constante y esfuerzo que tengo. A mis padres por el apoyo brindado en cada una de las decisiones que he tomado a lo largo de este camino llamado vida y nunca haber desistido en darme su apoyo. A mis hermanos, por estar en todo momento, sobre todo en los malos que es cuando más los he necesitado y aprendido.

Especial agradecimiento a mi asesor de tesis y tutor, el Dr. Víctor Hugo Delgado Blas por la paciencia y por brindarme las facilidades para que pudiera culminar una etapa más. Pero, sobre todo, por haber creído en mi desde el principio y haberme orientado en el transcurso de la carrera profesional, sin su ayuda esto no habría sido posible.

También vale la pena mencionar a esas amistades que estuvieron conmigo en esta etapa de la vida, tesoros que aún llevo conmigo a donde quiera que vaya. Por haber sido parte de este camino y por el apoyo recibido de cada uno de ellos.

Contenido

1. RESUMEN.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
3. MARCO TEÓRICO.....	3
3.1. CALIDAD DEL AGUA.....	3
3.2. EL GRUPO COLIFORME COMO INDICADOR DE CONTAMINACIÓN FECAL.....	3
3.3. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS.....	5
3.3.1. <i>Temperatura</i>	5
3.3.2. <i>pH</i>	5
3.3.3. <i>Oxígeno disuelto</i>	6
3.3.4. <i>Sólidos disueltos totales</i>	6
4. ANTECEDENTES.....	7
5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
5.1. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	9
5.2. OBJETIVOS.....	9
5.2.1. <i>Objetivo general</i>	9
5.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	9
5.3. HIPÓTESIS.....	10
5.4. JUSTIFICACIÓN.....	10
6. ÁREA DE ESTUDIO.....	11
6.1. GEOLOGÍA E HIDROLOGÍA.....	12
6.2. CENOTES.....	14
6.2.1. <i>Cenote Calavera</i>	17
6.2.2. <i>Cenote Cristal</i>	17
6.2.3. <i>Cenote Escondido</i>	17
6.2.4. <i>Cenote Escondido</i>	18
6.2.5. <i>Cenote Clandestino</i>	18
7. MÉTODOS.....	19
7.1. RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS.....	20
7.2. ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO.....	21
8. RESULTADOS.....	23
8.1. COLIFORMES TOTALES.....	23
8.2. COLIFORMES FECALES.....	24
8.2.1. <i>Escherichia coli</i>	25
8.3. COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE COLIFORMES TOTALES, FECALES Y <i>ESCHERICHIA COLI</i>	27
8.4. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS.....	28
8.5. COMPARACIÓN DE COLIFORMES CON LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS.....	30
9. DISCUSIONES.....	32

10.	CONCLUSIONES.	35
11.	RECOMENDACIONES.	36
12.	REFERENCIAS.....	37

Índice de figuras.

Figura 1.	Ubicación espacial de la localidad de Tulum, Quintana Roo. Fuente: elaboración propia.	11
Figura 2.	Exploración de la cueva subterránea Dos ojos de la localidad de Tulum. Fuente: Documental "El gran acuífero maya".	14
Figura 3.	Proceso de formación y desplome de los cenotes karsticos. Tomado de Bedows et al. (2007).....	15
Figura 4.	Ubicación de los principales cenotes en y alrededor de la localidad de tulum. Fuente: Google Earth Pro.	19
Figura 5.	Ubicación de los cenotes muestreados en la localidad de Tulum, Quintana Roo. Fuente: Elaboración propia.....	20
Figura 6.	Comparación de los resultados de coliformes totales.	23
Figura 7.	Comparación de los resultados para coliformes fecales.	25
Figura 8.	Valores obtenidos para E. coli en cada cenote.....	26
Figura 9.	Comparación de los resultados para coliformes totales, fecales y E. coli.	27
Figura 10.	Gráficas de los parámetros fisicoquímicos presentados en la tabla 5.	29
Figura 11.	Comparación entre los parámetros biológicos y los fisicoquímicos.....	30
Figura 12.	Comparación de los parámetros biológicos con los sólidos disueltos totales....	31

Índice de tablas.

Tabla 1.	Límites máximos permisibles de coliformes fecales en aguas según los criterios ecológicos de calidad del agua.	22
Tabla 2.	Valores obtenidos para coliformes totales. El número característico significa los tubos que resultaron positivos para las diluciones de 10, 1 y 0.1 ml.	23

Tabla 3. Valores obtenidos para coliformes fecales. El número característico significa los tubos que resultaron positivos para las diluciones de 10, 1 y 0.1 ml.	24
Tabla 4. Valores obtenidos para E. coli. El número característico significa los tubos que resultaron positivos para las diluciones de 10, 1 y 0.1 ml consecutivamente.	26
Tabla 5. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante el muestreo.	28
Tabla 6. Coeficientes de correlación de Spearman. Fuente: Elaboración propia mediante el programa: SPSS Statistics.	31

1. Resumen

Tulum es una ciudad del estado de Quintana Roo, su sistema geológico le da una importancia tanto turística como natural. Los cenotes son cristalinos y la mayoría se encuentra conectados por venas subterráneas que permiten el flujo de agua. Se realizó un estudio exploratorio en cinco cenotes para determinar si existe contaminación bacteriológica durante la temporada de lluvias (julio 2019). Tres cenotes se encuentran ubicados alrededor de la ciudad y dos se encuentran cercanos a la costa de la zona de playa de Tulum. En este caso se analizaron las muestras en busca de coliformes totales, fecales y *E. coli*, siendo este último, indicador de contaminación fecal. El recuento de bacterias coliformes se llevó a cabo mediante la técnica del número más probable siguiendo los procedimientos establecidos en la norma mexicana NMX-AA-042-SCFI-2015. También se realizaron mediciones in situ de parámetros fisicoquímicos los cuales presentaron muy poca variación entre cenotes, siendo: pH con valores entre 7 - 7.4, temperatura con valores entre 26.02 °C - 29.33, oxígeno disuelto con valores de 2.31 - 3.61 mg/L y sólidos disueltos totales obteniendo valores entre 1913 - 5182 mg/L. Los valores de los parámetros se encuentran dentro de los rangos estipulados en los criterios ecológicos de calidad del agua a excepción del oxígeno disuelto y los sólidos disueltos (4.0 mg/L y 500 mg/L respectivamente). Los resultados para coliformes totales no fueron tan altos como en otros estudios (540 NMP/100 ml), sin embargo, en todos los cenotes se pudieron detectar coliformes fecales (con 240 y 130 NMP/100 ml), mientras que, para *E. coli*, se obtuvieron valores entre 14 - 130 NMP/100 ml, sobrepasando los límites máximos permisibles de los criterios ecológicos de calidad del agua (CE-CCA-001/89).

2. Introducción.

El estado de Quintana Roo forma parte de la península de Yucatán y constituye parte del caribe mexicano. Tulum, es un municipio perteneciente a el estado de Quintana Roo. Se encuentra ubicado en la costa del caribe mexicano y está conformado por una población de 28,264 habitantes (INEGI, 2010). Se caracteriza por tener un sistema de cuevas subterráneas consideradas como una de las más grandes del mundo y con una importante industria turística debido a las ruinas cercanas a la ciudad, sus playas con arenas blancas, la proximidad con la Reserva de la Biosfera de Siaan Ka'an y por los numerosos cenotes que se encuentran dentro y alrededor de la localidad. Sin embargo, el desarrollo tanto antropogénico como turístico, está ocurriendo rápidamente y con pocas consideraciones ambientales (Hausman, 2009). La única fuente de abastecimiento de agua en la región es posible mediante el agua subterránea disponible desde unos pocos metros, hasta los 100 m de profundidad por debajo de la capa de agua salina. Esta agua subterránea es utilizada para consumo humano (para higiene personal, actividades de limpieza del hogar y, en algunos casos, para beber). De igual manera, para actividades de uso recreativo, como es el caso de los cenotes y, en una menor medida, para la agricultura. Un gran problema que se presenta es que este acuífero se encuentra en condiciones de vulnerabilidad debido a la naturaleza kárstica del suelo predominante, ya que este tipo de suelo es muy permeable, permite que cualquier sustancia vertida al suelo se infiltre hasta la zona saturada. Una práctica común en la zona es la inyección de aguas residuales sin tratar o semi-tratar al subsuelo, lo que provoca la contaminación de los mantos acuíferos, considerando que, en la ciudad de Tulum, la conexión a la red municipal de drenaje es variada, algunas casas no están conectadas y el mantenimiento de los sistemas de tratamientos de aguas residuales no son continuos, terminan representando una contribución al problema de la contaminación (Leal-Bautista *et al.*, 2013). Con esta tesis se pretende estudiar la contaminación bacteriológica de cenotes de Tulum enfocándonos en el grupo de bacterias coliformes. Se analizaron Coliformes totales (CT), Coliformes fecales (CF) y *Escherichia coli* (EC). Siendo este último un indicador de contaminación por materia fecal. De igual manera, es importante el estudio de las características fisicoquímicas del agua, ya que estas pueden crear las condiciones necesarias para que los agentes patógenos se desarrollen con mayor o menor facilidad dentro del ecosistema acuático y afectan otros

componentes biológicos. De acuerdo con Orozco *et al.*, (2005) citado por Samboni *et al.*, (2007), los parámetros fisicoquímicos, nos proveen una información extensa de la naturaleza de las características químicas del agua y sus propiedades físicas, sin aportar información de su influencia en la vida acuática; los métodos biológicos aportan esta información, pero no señalan nada del contaminante o los contaminantes responsables, por lo que muchos investigadores recomiendan utilizar ambos en la evaluación del recurso hídrico. Para este estudio se estudiaron cuatro parámetros fisicoquímicos, siendo estos la temperatura (°C), sólidos disueltos totales (mg/L), pH y oxígeno disuelto (mg/L).

3. Marco teórico.

3.1. Calidad del agua.

Los contaminantes de las aguas subterráneas se originan de una gran cantidad de fuentes naturales y antropogénicas exhibiendo diferentes características del área y de temporada. En cuanto al término “calidad del agua”, Barrenechea (2004), menciona que es relativo, dependiendo del uso que se le da a este recurso. Esto quiere decir que una fuente de agua lo suficientemente limpia que permita la vida de los peces puede no ser apta para la natación. Para poder decidir si califica para un propósito particular, su calidad debe especificarse en función del uso que se le va a dar. Para poder tener una correcta interpretación de los datos que fueron obtenidos deben manejarse estadísticamente. El uso de herramientas gráficas ayuda a interpretar las relaciones físicas y químicas entre el agua y las fuentes probables de contaminación.

3.2. El grupo coliforme como indicador de contaminación fecal.

Los controles rutinarios de la totalidad de los microorganismos hídricos, potencialmente riesgosos para la salud, resultan difíciles de llevar a cabo debido a la gran variedad de bacterias patógenas cultivables, a la complejidad de los ensayos de aislamientos y a la presencia en baja concentración de varias especies altamente agresivas, sin que el orden detallado indique prioridad. Por esta razón, los análisis bacteriológicos apuntan a la búsqueda de microorganismos indicadores de contaminación fecal y se centralizan en la cuantificación de coliformes (Apella y Araujo, 2005). De acuerdo con Campos (2003), para que un

microorganismo pueda ser considerado un indicador de contaminación fecal, debe reunir las siguientes características:

- Ser un constituyente normal de la flora intestinal de individuos sanos.
- Estar presente, de forma exclusiva, en las heces de animales homeotérmicos.
- Estar presente cuando los microorganismos patógenos intestinales lo están.
- Presentarse en número elevado, facilitando su aislamiento e identificación.
- Debe ser capaz de reproducirse fuera del intestino de los animales homeotérmicos.
- Su tiempo de supervivencia debe ser igual o un poco superior al de las bacterias patógenas (su resistencia a los factores ambientales debe ser igual o un poco superior al de los patógenos de origen fecal).
- Debe ser fácil de aislar y cuantificar.
- No debe ser patógeno.

También detalla que no existe ningún microorganismo que reúna todos los criterios que se mencionaron anteriormente, siendo apenas algunos grupos que logran satisfacer parcialmente dichos requisitos, así como también menciona que el grupo de microorganismos coliformes es adecuado como indicador de contaminación bacteriana, ya que tienen las siguientes características:

- Son contaminantes comunes del tracto gastrointestinal tanto del hombre como de los animales de sangre caliente.
- Están presentes en el tracto gastrointestinal en grandes cantidades.
- Permanecen por más tiempo en el agua que las bacterias patógenas.
- Se comportan de igual manera que los patógenos en los sistemas de desinfección.

Los coliformes fecales (o termotolerantes, llamadas así por su capacidad de soportar temperaturas más altas que los coliformes totales, particularmente *E. coli*), son consideradas como las que mejor reflejan la presencia de contaminación fecal, ya que se encuentran casi exclusivamente en las heces de animales de sangre caliente (Campos, 2010).

La presencia de bacterias coliformes es un indicio de que el agua puede estar contaminada con aguas negras. Esta contaminación está relacionada con los vertidos de aguas domésticas e industriales a los cuerpos de agua próximos a la fuente en que se generan. Generalmente, las bacterias coliformes se encuentran en mayor abundancia en la capa

superficial del agua o en los sedimentos del fondo (Munn, 2004). Las enterobacterias o *Enterobacteriaceae* son las más importantes dentro de las bacterias anaeróbicas facultativas y su presencia esta asociada a contaminación fecal. Este grupo de bacterias habita naturalmente en el intestino de los animales. Y como ya se mencionó, *E. coli*, es un habitante normal del intestino humano, utilizándose frecuentemente como indicador de contaminación fecal en el agua (Apella y Araujo, 2005).

3.3. Parámetros fisicoquímicos.

3.3.1. Temperatura.

De acuerdo con Barrenechea (2004), la temperatura, es uno de los parámetros físicos más importantes en el agua; ya que, influye en el retardo o aceleración de la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, la desinfección y los procesos de mezcla. De igual manera, su variación es debida a múltiples factores, principalmente ambientales. Lampert y Sommer (2007) mencionan que la temperatura influye en algunos factores como la tolerancia de organismos a ciertas temperaturas. Existen organismos que tiene amplios rangos de tolerancia (euritermos) y organismos que tienen bajos rangos de tolerancia (estenotermos) a los cambios de temperatura. De igual manera, menciona que la presencia o ausencia de organismos, no está limitada necesariamente por la temperatura. Esto puede deberse a factores que están correlacionados con la temperatura, como es el caso del oxígeno.

3.3.2. pH.

El pH indica la cantidad de iones de hidrogeno presentes en distintas soluciones, en este caso, la del agua. Se encuentra asociado a fenómenos que ocurren el agua, como la corrosión e incrustaciones en las redes de distribución. De acuerdo con Acosta (2006), el pH de un cuerpo de agua puede presentar un amplio rango de variaciones dependiendo de factores como la capacidad de amortiguación, estratificación y mezcla, evaporación, procesos biológicos como la fotosíntesis, respiración y descomposición de la materia orgánica, composición de suelos adyacentes, depósitos superficiales y lecho rocoso, presión parcial de CO₂ en la atmósfera, temperatura y por fuentes de contaminación. Este es un factor abiótico que se encarga de regular diferentes procesos biológicos mediados por enzimas; la

disponibilidad de nutrientes necesarios que limitan el crecimiento microbiano en diferentes ecosistemas; la movilidad de metales como ácidos nucleicos, proteínas estructurales y sistemas de pared celular.

3.3.3. Oxígeno disuelto.

De acuerdo con Lampert y Sommer (2007), en los ambientes acuáticos es común encontrar una distribución desigual y que las deficiencias de oxígeno e inclusive las condiciones de anoxia son encontradas en las profundidades de lagos eutróficos tanto como en ríos orgánicamente contaminados. De igual manera, mencionan que el agua subterránea es a menudo baja en oxígeno. La sobresaturación de oxígeno en aguas ricas en nutrientes es causada por una alta actividad fotosintética en el agua durante el día y esto puede ocasionar un problema para los animales acuáticos. Este parámetro es importante en los ambientes acuáticos ya que se relaciona con muchos factores como son las reacciones de reducción-oxidación, el consumo de organismos aeróbicos, etc.

La concentración de oxígeno disuelto es un parámetro importante para evaluar la calidad del agua. Sirve como indicador del efecto producido por los contaminantes oxidables, de la aptitud del agua para mantener vivos peces u otros organismos aerobios y de la capacidad de un cuerpo de agua para auto depurarse. El oxígeno disuelto en el agua afecta, principalmente, las reacciones en las que participan el hierro, manganeso, cobre y los compuestos de que contienen nitrógeno y azufre (Jiménez, 2002).

3.3.4. Sólidos disueltos totales.

En el agua se pueden encontrar sólidos en sus diferentes formas (suspendidos o disueltos). Barrenechea (2004) menciona que las partículas pueden estar:

- Disueltas (hasta un milimicrómetro), en cuyo caso físicamente no influirán en la turbiedad neta del agua.
- Formando sistemas coloidales (1 a 1000 milimicrómetros), que son las causantes de la turbiedad neta del agua.
- En forma de partículas suspendidas (por encima de 1000 milimicrómetros), las cuales caen rápidamente cuando el agua se somete a reposo.

De acuerdo con Jiménez (2002), los sólidos disueltos totales, son los sólidos que atraviesan un filtro con poro de 0.45 μm . Se componen de sólidos coloidales y sólidos disueltos. Los disueltos, son moléculas y iones que se encuentran diluidos en el agua debiéndose a la presencia de minerales, gases, productos de la descomposición de la materia orgánica, metales y compuestos químicos orgánicos que dan color, olor, sabor y eventualmente, toxicidad al agua.

4. Antecedentes.

De la Lanza *et al.* (2005), realizaron un estudio de la calidad del agua de las playas y de algunos cenotes del municipio de Solidaridad, en el cual en ese entonces incluía a la ciudad de Tulum. En este estudio, se detectó que las mayores concentraciones de coliformes totales y fecales correspondieron a Tulum en un muestreo puntual en agosto de 2005 (10,000 NMP/100ml para coliformes totales y 6,500 NMP/100ml para coliformes fecales). Cabe destacar que en dicho muestreo se presentó el huracán “Emlily” incrementando las lluvias y los escurrimientos costeros que provenían de los asentamientos urbanos y turísticos.

Metcalfé *et al.* (2010), realizaron un estudio para determinar contaminantes en el sistema de acuíferos kársticos a lo largo de la costa caribeña de la Península de Yucatán. El cual, menciona que, el desarrollo intensivo de la tierra por el rápido crecimiento de la industria del turismo en la Riviera Maya puede resultar en la contaminación de las fuentes de agua subterránea, que eventualmente se descargan en los ecosistemas costeros del caribe. Provocando de esta manera repercusiones en los acuíferos costeros.

Leal-Bautista *et al.* (2011), realizaron un estudio acerca de la presencia de patógenos y farmacéuticos potenciales en la parte Noreste del acuífero de Quintana Roo en pozos y cenotes de sitios turísticos y no turísticos de la Riviera Maya, específicamente en el área de Puerto Morelos, Quintana Roo. Los resultados de dicho estudio revelaron la presencia de contaminación fecal en el agua subterránea, así como la presencia de cafeína. Estas sustancias, de igual manera, tienen una conexión directa con actividades antrópicas de tipo turístico. También, Leal-Bautista *et al.* (2013) realizaron un estudio en la región de Tulum, Quintana Roo para determinar la ocurrencia, la fuente y el alcance de la contaminación fecal

en el agua subterránea, de un cenote (Tank-ha) y 11 pozos (9 pozos municipales y 2 privados). De acuerdo con este estudio se estableció que la contaminación fecal está muy extendida y de igual manera es debida a actividades antropogénicas. También menciona que la presencia de contaminantes está influenciada por la temporalidad ya que los cenotes durante la temporada “alta” presentaron mayor concentración y diversidad de hidrocarburos que en la temporada “baja”.

Hoogesteijn *et al.* (2015) realizaron un estudio en el centro del estado de Yucatán, donde estudiaron 48 cenotes de interés turístico y recreacional; dispersados espacialmente en el estado para determinar la presencia de coliformes totales y fecales. En este estudio, todos los cenotes presentaron contaminación fecal (más de 1 UFC/100 ml). Sin embargo, en este estudio no se comparan las concentraciones encontradas con las establecidas en la legislación.

En otro estudio, Aceves (2016), evaluó la contaminación por coliformes totales y fecales en balnearios del sur de Quintana Roo en relación con el período vacacional de primavera del 2016 en el cual se determinó que la concentración de coliformes totales fue especialmente alto (200 NMP/100 ml) durante las vacaciones en el Balneario Ejidal y en la Laguna Milagros (920 NMP/100 ml) en el periodo posvacacional. De igual manera, se identificó un aumento de coliformes totales durante la temporada vacacional.

De esta manera, Tulum presenta antecedentes de contaminación por coliformes, pero no hay estudios actuales que describan la situación actual de la calidad del agua de la localidad.

5. Planteamiento del problema.

5.1. Preguntas de investigación.

¿Existe la presencia de coliformes totales y fecales en los cenotes de Tulum?

¿El agua de los cenotes se encuentra dentro de los criterios ecológicos de calidad del agua (CE-CCA-001/89) para uso recreativo con contacto primario en cuanto a coliformes fecales?

¿El agua de los cenotes se encuentra dentro de los criterios ecológicos de calidad del agua (CE-CCA-001/89) para fuente de abastecimiento de agua potable en cuanto a coliformes fecales?

¿Cuáles son los valores de parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, sólidos disueltos y oxígeno) disuelto de cada cenote?

5.2. Objetivos.

5.2.1. Objetivo general.

- Determinar la concentración de coliformes totales y fecales, así como variables físico-químicas en cinco cenotes de Tulum, Quintana Roo durante la temporada de lluvias.

5.2.2. Objetivos específicos.

- Comparar las concentraciones obtenidas de coliformes fecales con los criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89 para fuente de abastecimiento de agua potable.
- Medir los parámetros fisicoquímicos principales en cada cenote: oxígeno disuelto (mg/L), pH, temperatura (°C) y sólidos disueltos totales (mg/L).
- Relacionar las variables físico-químicas con la concentración de coliformes totales y fecales.

5.3. Hipótesis.

- Los cinco cenotes analizados en este trabajo son impactados por las descargas de aguas residuales, por lo tanto, presentarán concentraciones de coliformes totales y fecales; sin embargo, no rebasarán los límites permisibles para abastecimiento humano ni para el contacto primario recreativo.
- La cercanía de los cenotes a la costa influye en la concentración de coliformes así como en sus características físico-químicas.

5.4. Justificación.

En los últimos años, Tulum ha presentado un crecimiento poblacional acelerado, debido al auge turístico y a las personas que llegan de otros lugares a vivir a este destino turístico en busca de trabajo. Aunado a esto, también es uno de los principales destinos turísticos en Quintana Roo a nivel nacional e internacional. El desarrollo económico y crecimiento urbano son dos factores que impactan directamente en el ambiente. En los últimos meses, ha surgido la preocupación de una parte de la población por las aguas subterráneas que pasan por Tulum, sobre todo, por los cenotes que son de gran interés turístico después de sus playas. Ya que, los cenotes son afloraciones de dichas aguas que en algunas ocasiones son utilizados como depósitos de aguas negras u otro tipo de residuos. Varios de los asentamientos registrados en Tulum no están conectados al drenaje sanitario (conocidos como asentamientos irregulares) y debido a la naturaleza kárstica del suelo, estos contaminantes son arrastrados por el agua hacia el subsuelo llegando hasta los cenotes. Actualmente, no existe un estudio del estado actual de la calidad bacteriológica de los cenotes de Tulum y el presente trabajo constituiría una línea base para futuros estudios y proponer un monitoreo de la calidad del agua para estos cuerpos acuáticos.

6. Área de estudio.

El municipio de Tulum se encuentra ubicado al extremo sur de México, localizado en la península de Yucatán. Conformándose como uno de los once municipios pertenecientes a el estado de Quintana Roo. Colinda al sur con el municipio de Felipe Carrillo Puerto, al norte con el municipio de Solidaridad y al extremo oeste limita con el estado de Yucatán y tiene una extensión territorial de 2,040.94 km². La localidad de Tulum se ubica a los 20°12'19" N y 87°27'59" O, sobre la costa del mar caribe y presenta una altitud de 10 metros sobre el nivel del mar (Figura 1). De acuerdo con el INEGI en su censo de población del 2010, Tulum cuenta con una población de 18,233 habitantes con un grado de marginación medio.

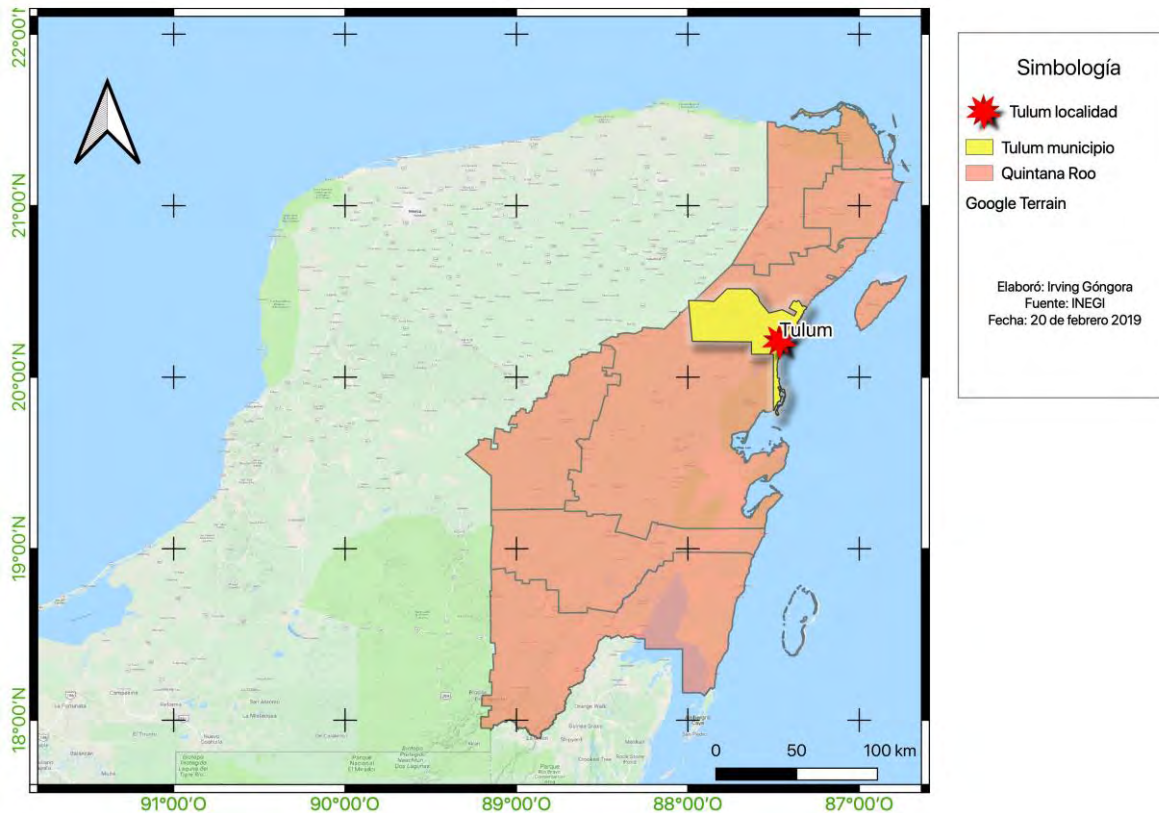


Figura 1. Ubicación espacial de la localidad de Tulum, Quintana Roo. Fuente: elaboración propia.

El clima del estado es cálido subhúmedo con lluvias en verano y con una temperatura media anual de 26°C, caracterizándose por sus elevadas temperaturas y teniendo una precipitación promedio anual superior a los 1,500 mm de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía. La principal actividad económica que se desarrolla en Tulum es

el turismo en virtud del potencial turístico natural y cultural. Ya que ofrece playas, cenotes y una zona arqueológica llamada “Tulum”, siendo esta la zona arqueológica quintanarroense más visitada. En esta localidad se encuentran los cenotes.

6.1. Geología e Hidrología.

La península de Yucatán corresponde a la parte que emerge de la plataforma continental de Yucatán, abarcando una extensión territorial de 300 000 km² y que separa al Mar Caribe del Golfo de México. En la península, no existen elevaciones montañosas, la mayor parte de la superficie no supera los 200 msnm. Cabe mencionar que, de norte a sur, la elevación aumenta ligeramente (Beddows *et al.*, 2007). La costa del Caribe de la península de Yucatán se compone principalmente de depósitos sedimentarios superficiales cuaternarios de origen de piedra caliza carbonatada altamente permeable. Esta enorme losa calcárea alimentada por la sedimentación de los fondos marinos fue ascendiendo con pausas y retrocesos hasta fines del cenozoico (López-Ramos, 1975). El pleistoceno fue un periodo con muchas variaciones en el nivel del mar debido a múltiples edades de hielo. Como resultado, los sedimentos de la piedra caliza se depositaron en diferentes momentos y en diferentes condiciones, dando como resultado una secuencia de capas de roca con diferentes características. La piedra caliza se forma a partir de granos de carbonato de calcio agregados por algas, arena de playa, sedimentos en las lagunas, etc. Los espacios entre los granos (poros) se pueden llenar parcial o completamente con otro material, incluidos los sedimentos más finos, que naturalmente cementan los granos entre sí. El agua de la lluvia puede disolver algo del carbonato de calcio de los granos, y si el clima y otras condiciones son correctas, el agua de la lluvia puede permanecer cerca de la superficie y evaporarse. Cuando esto sucede, el carbonato de calcio disuelto en el agua se deja atrás y se deposita en los poros intergranulares de la roca, llenando eventualmente todo el espacio entre los granos. Si todos los poros están rellenos en este cemento natural, el agua no fluirá fácilmente a través de la roca. Aunque la precipitación anual es de hasta 1500 mm, en la península no existen corrientes superficiales más que el río hondo que hace frontera con Belice, ya que, el agua de la superficie se mueve libremente a través de la piedra caliza llegando al acuífero subterráneo. Por debajo de la superficie, el agua se mueve continuamente a través de las

cavernas subterráneas producto de las disoluciones cársticas. Las cuevas de Quintana Roo están formadas por procesos de mezcla de agua dulce y salina en las zonas costeras a lo largo de diferentes épocas geológicas (Smart *et al.*, 2006). Después de alcanzar la saturación en las calizas, se mueve lateralmente entre rocas cavernosas hacia la costa descargándose cenotes y otras aberturas. Aunque la latitud del nivel del agua en el acuífero de piedra caliza lejos de la costa no es más que unos pocos metros, es suficiente para evitar la invasión de agua de mar en la parte superior del acuífero (Stringfield y Legrand, 1976). El agua de la lluvia se filtra rápidamente a través del sustrato poroso y se puede lavar. A lo largo de la costa caribeña de la Península de Yucatán, los sistemas de cuevas inundadas que se extienden de 8 a 12 km en tierra proporcionan conductos hidrológicos que conectan las áreas de recarga del interior con el manantial que descarga en la zona costera (Smart *et al.*, 2006). Los cenotes son entradas a estos conductos hidrológicos.

De acuerdo con el Programa de Desarrollo Municipal, en su territorio no existen corrientes de agua superficiales, ya que el suelo está compuesto de roca calcárea sumamente permeable, causando que las precipitaciones pluviales no puedan ser retenidas en la superficie y se infiltren, favoreciendo la formación de tres sistemas de ríos subterráneos, el Ox Bel Ha con 172.3 km, el Sac Actun con 156.4 km y el Dos Ojos con 62.2 km (Figura 2). Igualmente, cuenta con cenotes formados al colapsar los techos de los ríos subterráneos. En el municipio de Tulum existen 570 cenotes interconectados que son más del 85 % de las cavernas sumergidas exploradas en Quintana Roo de acuerdo con el Plan Municipal de Desarrollo de Tulum 2018-2021.



Figura 2. Exploración de la cueva subterránea Dos ojos de la localidad de Tulum. Fuente: Documental "El gran acuífero maya".

6.2. Cenotes

Un rasgo para destacar de la topografía de la península de Yucatán es la presencia de cenotes, concentrándose en la parte norte de la península y disminuyendo a medida que se avanza hacia el sur. De acuerdo con Beddows *et al.* (2007), el origen de los cenotes se debe al proceso geomorfológico denominado Karst. Que consiste en la combinación de los mecanismos de disolución, colapso y construcción de la caliza:

1) La disolución consta de tres procesos:

- a) El proceso de disolución del suelo se da por la ligera acidificación de la lluvia con el ácido carbónico debido a la absorción de CO_2 de la atmosfera, a esto se le agrega el ácido carbónico producido en el suelo por la descomposición de la materia orgánica, aumentando la agresividad del agua.
- b) La mezcla del agua dulce con salada aumenta la disolución de la roca, considerándose el proceso más potente de disolución.

c) Este proceso de disolución también puede presentarse dentro del sistema de flujo subterráneo, disolviendo la roca desde la masa de agua debido al ácido sulfhídrico generado por la descomposición microbiana de la materia orgánica.

2) Colapso. El segundo mecanismo está ligado a las fluctuaciones del nivel del mar debido a los periodos glaciario e interglaciario. En los periodos glaciares, con el descenso del nivel del mar, el agua deja unas cavidades que se pueden desplomar el techo y formar dolinas (cenotes).

3) Construcción. Este aspecto abarca la formación de espeleotemos (estalactitas, estalagmitas y columnas). Ya que las cuevas que no están inundadas aún reciben agua de la lluvia acidificada que lleva en solución los minerales de la roca disueltos que al llegar a la cavidad aérea de la cueva libera el CO_2 y los minerales se precipitan creando los espeleotemos. El crecimiento se detiene cuando la cueva se vuelve a inundar.

Navarro-Mendoza (1988) en Schmitter-Soto *et al.* (2002), distinguió los cenotes costeros de los cenotes alejados a la costa. En el caso de los cenotes costeros concluyó que suelen ser menos profundos y oscilan entre 3 y 10 metros, conteniendo paredes de roca cubierta con materia orgánica compactada entre mangle. En cambio, los cenotes que se encuentran alejados de la costa suelen ser más profundos y tienen paredes altas de hasta 20 metros. De igual manera se presentan diferencias fisicoquímicas entre ellos.

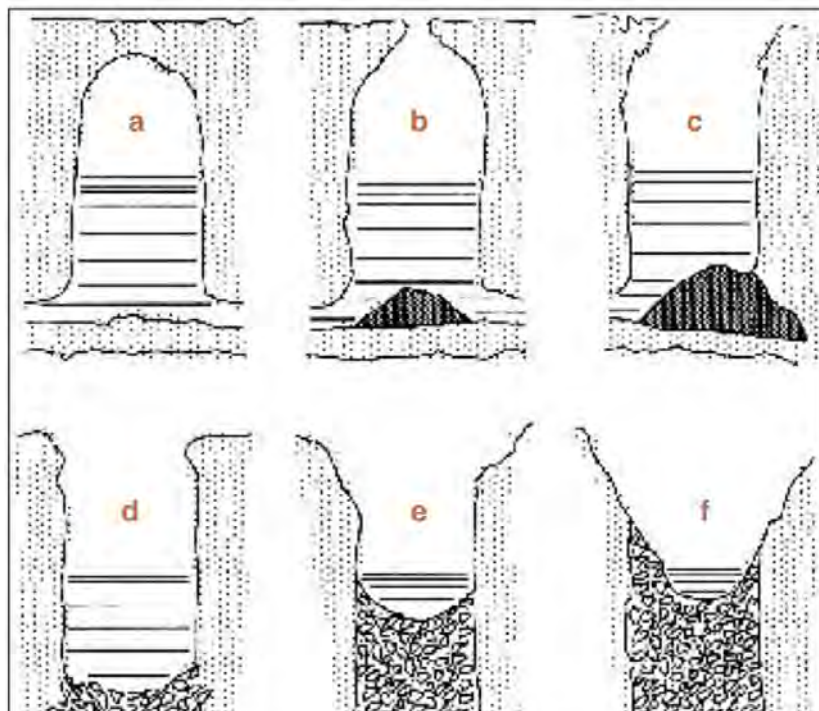


Figura 3. Proceso de formación y desplome de los cenotes karsticos. Tomado de Bedows *et al.* (2007).

Como se puede apreciar en la figura 3, el origen de los cenotes se da por etapas, en el inciso a, la caverna aún está abovedada con el techo completamente cerrado, en esta etapa el cenote no presenta desplome.

En el inciso b, el techo del cenote se ha comenzado a desplomar conocidos como de tipo cántaro que son cenotes loticos ya que presentan un flujo continuo por la parte de abajo. En el inciso c, se ha creado un cenote con paredes verticales debido a la caída del techo del cenote. En esta etapa, el cenote comienza a presentar modificaciones en el fondo por el desplome del techo. En el inciso d, ya se presenta un cenote lentic, ya que no presenta un flujo continuo o conexión con el agua subterránea lo que conlleva a que sus procesos de renovación sean más lentos. En el inciso e y f, se puede ver la erosión de las paredes del cenote y por último la disminución de su profundidad (Beddows *et al.*, 2007).

Los cenotes con una pobre conexión hidráulica con el acuífero son caracterizados por aguas turbias y una baja luz de transparencia, en este tipo de cenotes presenta una alta concentración de clorofila (mayormente debido a cianobacterias, dinoflagelados), el hipolimnion y el sedimento son ricos en materia orgánica y en este caso predominan los procesos biogeoquímicos realizados por bacterias anaerobias (Schmitter-Soto *et al.*, 2002). Al contrario, los cenotes con una alta conexión al acuífero tienden a presentar aguas menos turbias.

De acuerdo con Medina (2014), quien menciona que la posibilidad de desarrollo de organismos fotosintetizadores y el establecimiento de una comunidad acuática se encuentra progresivamente limitada a los cenotes cerrados. La flora predominante en este tipo de cuerpos de agua es el fitoplancton pasando por la vegetación flotante, emergente y/o sumergida si las condiciones lo permiten. Estos dos representan el nivel productor, siendo los organismos que fijan la energía solar y la hacen disponible para los organismos consumidores (heterótrofos). De acuerdo con Flores y Espejel (1994) en: Medina (2014), mencionan que entre la vegetación emergente es posible encontrar *Typha angustifolia* y *Phragmites australis*; las especies flotantes más comunes son: *Lemna minor*, *Eichornia crassipes*, *Pistia stratioides* y *Nymphaea ampla*. De igual manera, Medina (2014), menciona que los cenotes exhiben una gran variedad de flora microscópica, variando estacionalmente. De igual manera, se puede encontrar fauna que no habita permanentemente en el cuerpo de agua pero que viven asociados a él como insectos, anfibios, aves y mamíferos. Asimismo,

los murciélagos que viven en el interior de las cavernas constituyen en muchos casos, la principal fuente de energía en los cenotes semicerrados y cerrados, mediante su aporte de materia orgánica a través de sus excretas.

Schmitter-Soto y Gamboa-Pérez (1996) en Medina (2014), mencionan que las características de la costa caribeña propician que en los cenotes de esta región la fauna de peces sea más diversa, pudiéndose encontrar ejemplares juveniles de peces marinos como pargos y mojarras.

6.2.1. Cenote Calavera.

Se encuentra ubicado en el paralelo 20°10'43.9" norte y en el meridiano 87°27'21.6" longitud oeste, a 1 km del poblado de Tulum, Quintana Roo y a 60 metros de la carretera a Coba. Es un cenote circular (8 m), abierto, con cavernas alrededor y con una profundidad de 6 m. El color del agua de este cenote es azul-verde esmeralda y en el fondo del cenote es pedregoso. Se encuentra rodeado por vegetación arbórea del tipo mediana subperenifolia. Este cenote es frecuentado por el turismo a pesar de no tener la infraestructura adecuada, ya que solo cuenta con una escalera improvisada por la que se desciende para lograr ingresar al cenote.

6.2.2. Cenote Cristal.

El cenote cristal se encuentra localizado en la carretera Tulum-Carrillo Puerto, Quintana Roo, a escasos 3 km del poblado de Tulum, a aproximadamente 30 m de la carretera. Su posición geográfica se encuentra en el paralelo 20°12'3.9" N y 87°30'3.4" O. Es de forma circular con aproximadamente 20 m de diámetro y 5 m de profundidad. Es turístico, por lo que parte de su cuenca se ha modificado, sobre todo por la vegetación que lo rodea ya que esta ha sido removida. Al ser su agua muy transparente, permite el asentamiento de macroalgas; también se observan antiguos troncos sumergidos y algunos peces pequeños.

6.2.3. Cenote Escondido.

Este cenote se encuentra enfrente del cenote Cristal, ubicado en las coordenadas 20.196750° latitud norte y -87.501048° longitud oeste a escasos 3 km del poblado de Tulum. A unos 200 metros de la carretera a Tulum-Carrillo Puerto. Tiene aproximadamente 95 m de

diámetro desde la distancia más larga y un perímetro de 271.64 m², su forma no es circular ya que presenta una forma alargada. Se encuentra rodeado de vegetación de selva baja y se encuentra conectado con el cenote cristal de manera subterránea. Sus aguas son transparentes y en el fondo de igual manera se alcanzan a apreciar restos de troncos y hojas que caen de la vegetación circundante.

6.2.4. Cenote Escondido.

Se encuentra ubicado sobre la carretera Tulum-Chemuyil a 10 km del centro del poblado, sobre la carretera de la zona hotelera. Es un cenote abierto, la parte mas larga mide 162 metros siendo de los más grandes en cuanto a cenotes abiertos. Está a 114 mts de la carretera y actualmente la orilla se comparte entre diferentes terrenos, por lo que en algunos casos los dueños ofrecen hospedaje en cabañas. Este cenote es frecuentado por turistas y también extraen agua para las actividades diarias como el aseo y la limpieza.

6.2.5. Cenote Clandestino.

Este cenote se encuentra ubicado 20.153681° latitud norte y -87.457906° de longitud oeste. Este cenote es poco profundo, teniendo máximo 4 m de profundidad. Existe poca información acerca de este cenote. Sin embargo, este cuenta con un restaurante alrededor y es utilizado para las personas que llegan a comer y para el público en general que entra al bar. Sus aguas son completamente cristalinas y en el fondo se puede observar arena que se ha depositado debido a los turistas que llegan al lugar con arena en su cuerpo. También existen algunos peces.

7. Métodos.

El presente estudio se realizó en la época de lluvias, que está comprendida entre junio-octubre, ya que en esta época existe una mayor cantidad de infiltración y arrastre de contaminantes al subsuelo. Logrando con esto poder determinar la presencia de coliformes fecales, cuantificarlos y compararlos con los límites establecidos, así como con estudios previos.

El muestreo se llevó a cabo el día 16 de julio de 2019, siendo muestreos puntuales en cada cenote y se tomó una muestra de 100 ml de agua de cada cenote. Asimismo, se midieron parámetros fisicoquímicos con una sonda multiparamétrica Hanna HI9829 en el sitio. Para la selección de los cenotes muestreados, primero se realizó un mapeo identificando los cenotes que se encuentran dentro y fuera de la localidad de Tulum. Los criterios para seleccionar los cenotes fueron: La afluencia turística, y que estuvieran espacialmente distantes para abarcar una mayor área de la localidad, por lo que se decidió tomar dos cenotes dentro de la localidad y uno en las afueras colindando con la zona turística (Figura 4).



Figura 4. Ubicación de los principales cenotes en y alrededor de la localidad de tulum. Fuente: Google Earth Pro.

De esta manera se seleccionaron cinco cenotes considerados los más representativos de Tulum y los más visitados por los turistas. En este caso fueron el cenote Calavera, cenote

Cristal, cenote Escondido, cenote Clandestino y el cenote Encantado. Los tres primeros se encuentran cercanos al poblado de Tulum y los dos últimos se encuentran cercanos a la costa y a la industria hotelera (Figura 5).

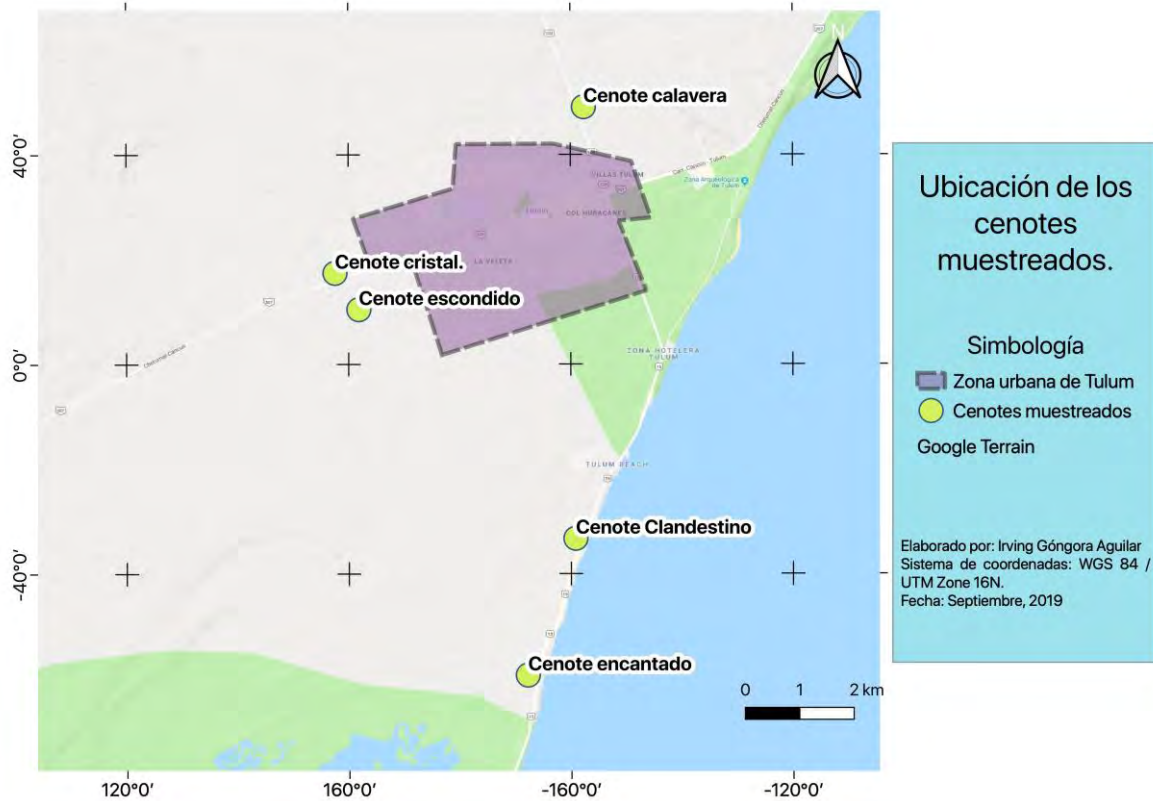


Figura 5. Ubicación de los cenotes muestreados en la localidad de Tulum, Quintana Roo. Fuente: Elaboración propia.

7.1. Recolección de las muestras.

La recolección de las muestras de agua en cada cenote se realizó con envases estériles comerciales de 100 ml de capacidad para su posterior análisis de coliformes totales y fecales; la muestra fue recolectada a 30 cm de profundidad y a 2 mts. de la orilla. Una vez recolectadas las muestras se depositaron en una nevera con hielo para preservarlas para prolongar el tiempo de vida de las bacterias hasta su análisis en el laboratorio en un tiempo menor a 24 horas. De igual manera en cada cenote se midieron los parámetros in situ de oxígeno disuelto, pH, temperatura y sólidos disueltos totales con una sonda multiparamétrica. Para esto se recolectó una muestra de agua en un vaso de precipitado de 1 litro para tomar los parámetros correspondientes. Estos parámetros fueron medidos de una muestra de agua tomada a la

misma profundidad y en el mismo sitio en que fue tomada la muestra para el análisis de coliformes.

7.2. Análisis bacteriológico.

Para determinar la presencia de coliformes, se utilizó el procedimiento establecido en la NMX-AA-042-SCFI-2015 la cual consiste en el método del número más probable de coliformes totales y fecales basándose en la capacidad de este grupo microbiano de fermentar la lactosa con producción de ácido y gas al incubarlos a 35 o 37°C durante 48 horas. Para realizar los cultivos se utilizaron tubos con tres concentraciones diferentes de la muestra, 10, 1 y 0.1 ml, cada concentración se cultivó por quintuplicado para aumentar los niveles de confianza en los resultados. La prueba presuntiva se realizó en caldo lauril sulfato de sodio y para la prueba confirmativa se utilizó el caldo bilis verde brillante.

Los tubos se examinaron a las 24 y 48 horas de incubación para el caso de la prueba presuntiva y a las 24 horas para la prueba confirmativa. Cada uno de los tubos que presentaron turbidez con producción de gas se resembró en un medio confirmativo más selectivo (Norma Mexicana, 2015). De igual manera, se hicieron cultivos para detectar *E. coli*, esto es considerado como evidencia satisfactoria de contaminación fecal. Para el cultivo se utilizó agua peptonada, resembrando los tubos que dieron positivo a la prueba confirmativa de coliformes fecales en agua peptonada. Después de las 24 horas de incubación se le agregó el reactivo kovac y los tubos que presentaron una coloración roja en la parte superior se consideraron positivos ya que denotan la producción de indol característico de la *E. coli*. El material que se utilizó fue previamente lavado, desinfectado y esterilizado en una autoclave a 121°C y 1kg/cm² de presión durante 15 minutos. De igual manera, se determinó la relación de coliformes totales entre coliformes fecales (CT/CF) para identificar si las fuentes son de origen bacterial o fuentes fecales (Goyal *et al.*, 1977). Al final, se compararon los resultados con los criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89 para uso recreativo con contacto primario y así poder determinar aquellos que rebasen la norma (Tabla 1).

Tabla 1. Límites máximos permisibles de coliformes fecales en aguas según los criterios ecológicos de calidad del agua.

Criterios ecológicos de calidad del agua.	
Tipo de uso.	Nivel máximo (NMP/100ml).
Fuente de abastecimiento de agua potable.	1,000
Recreativo con contacto primario.	200

7.3. Correlación de las variables.

Con el fin de determinar si variables físico-químicas tienen una relación con la concentración de Coliformes fecales, se utilizó el método de correlación de Spearman para datos no paramétricos mediante el software de análisis estadístico SPSS Statistics. El método de Spearman es aplicable cuando las muestras no presentan una distribución estándar, pero también se puede aplicar en variables cuantitativas cuando el tamaño de los datos es menor a 30. En el cual se determinó la distribución de los datos y el coeficiente de correlación. En este caso, se realizó el estudio con un nivel de significancia del 0.05.

8. Resultados.

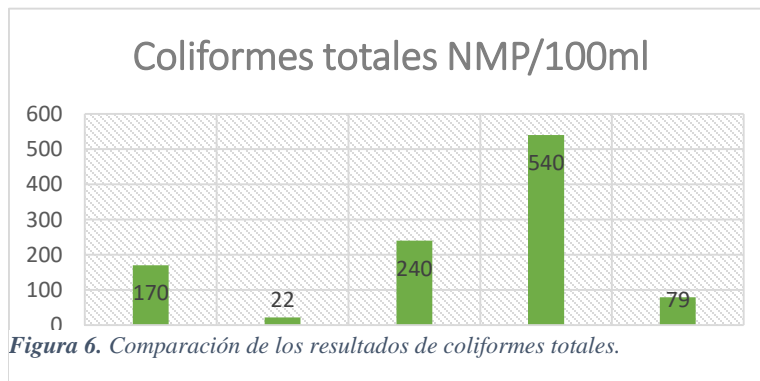
8.1. Coliformes totales.

Los valores obtenidos de los coliformes totales se presentan a continuación (Tabla 2). En ningún cenote se alcanzó el máximo de coliformes. De manera general, los coliformes totales oscilaron entre los 22 y 540 NMP/100ml (Tabla 2).

Tabla 2. Valores obtenidos para coliformes totales. El número característico significa los tubos que resultaron positivos para las diluciones de 10, 1 y 0.1 ml.

Cenote	Número característico (10, 1, 0.1 ml)	Coliformes totales (NMP/100ml)
Clandestino	5, 4, 1	170
Encantado	4, 2, 0	22
Calavera	5, 5, 0	240
Cristal	5, 5, 2	540
Escondido	5, 3, 0	79

El cenote que presentó la menor concentración de coliformes totales de los cinco muestreados fue el cenote encantado (22 NMP/100ml). El cenote Calavera se encuentra en los valores intermedios (240 NMP/100ml) y el cenote Cristal fue el que presentó los valores más altos (540 NMP/100ml). La diferencia entre los valores de los cinco cenotes se puede observar en la figura 6.



8.2. Coliformes fecales.

Con respecto a los valores de coliformes fecales, estuvieron en un rango de 22 a 240 NMP/100ml (Tabla 3). Los coliformes fecales si están contemplados dentro de los criterios ecológicos de calidad del agua y el límite máximo permisible es de 200 NMP/100ml para actividades recreativas con contacto primario que fue el límite superado.

Los valores de coliformes fecales mas altos se obtuvieron en el cenote el cenote cristal (220 NMP/100ml) y el cenote calavera (240 NMP/100ml), los cuales exceden los límites establecidos para uso recreativo con contacto primario. Los valores más bajos se presentaron en los cenotes Encantado (22 NMP/100ml) y el cenote Escondido (23 NMP/100ml) (Tabla 3).

Tabla 3. Valores obtenidos para coliformes fecales. El número caractístico significa los tubos que resultaron positivos para las dilusiones de 10, 1 y 0.1 ml.

Cenote	Número caractístico	Coliformes fecales (NMP/100ml)
Clandestino	5, 4, 0	130
Encantado	4, 2, 0	22
Calavera	5, 5, 0	240
Cristal	5, 4, 2	220
Escondido	5, 0, 0	23

De igual manera, en la figura 7, se puede apreciar la comparación de los valores por cada cenote. Así como la línea que marca el límite máximo permisible.

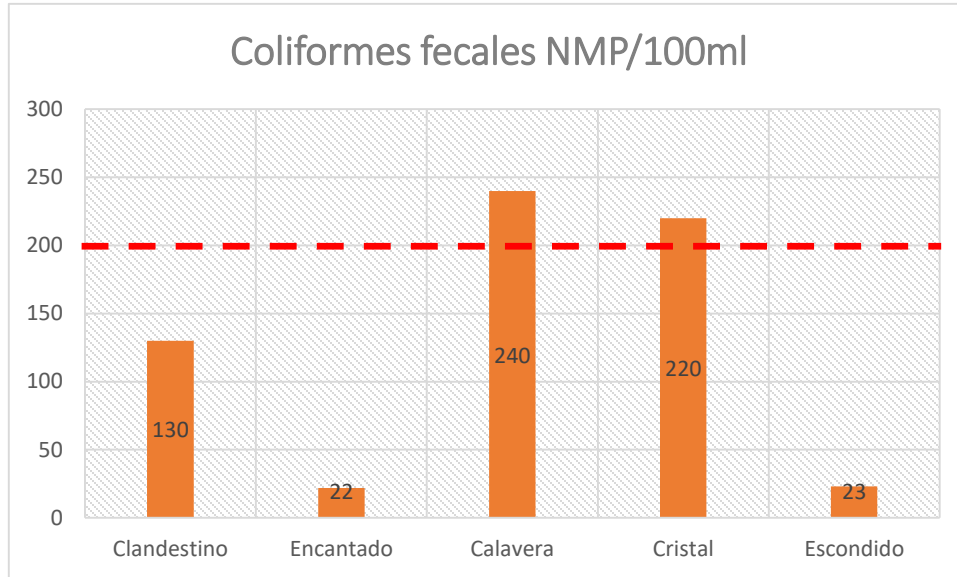


Figura 7. Comparación de los resultados para coliformes fecales.

En este caso, son dos los cenotes que rebasan los límites establecidos en los criterios ecológicos de calidad del agua para uso recreativo con contacto primario (el cenote cristal con 220 NMP/100ml y el cenote calavera con 240 NMP/100ml), sin embargo, ningún cenote rebasa los límites establecidos para fuente de abastecimiento de agua potable que es de 1000 NMP/100ml según los criterios ecológicos. Para el caso de coliformes fecales, el valor promedio obtenido como resultado es de 127 NMP/100ml.

8.2.1. *Escherichia coli*.

Para el caso de la *Escherichia coli*, todos los cenotes dieron valores positivos a la prueba. El cenote Encantado presentó el valor más bajo (14 NMP/100ml) y el cenote Calavera registró los valores más altos (130 NMP/100ml) (Tabla 4). En este caso, la mayoría de los cenotes obtuvieron valores bajos, sin embargo, la norma (NMX-AA-042-SCFI-2015) establece que la detección de *E. coli* en cuerpos de agua es considerada como una evidencia satisfactoria de contaminación fecal.

Tabla 4. Valores obtenidos para *E. coli*. El número característico significa los tubos que resultaron positivos para las diluciones de 10, 1 y 0.1 ml consecutivamente.

Cenote	Número característico	<i>E. coli</i> (NMP/100ml)
Clandestino	4, 4, 0	34
Encantado	3, 2, 0	14
Calavera	5, 4, 0	130
Cristal	5, 2, 1	70
Escondido	5, 0, 0	23

Los valores más altos de *E. coli* se registraron en los cenotes Calavera y Cristal (Figura 8), sin embargo, los cenotes Escondido y encantado presentan los valores más bajos del muestreo.

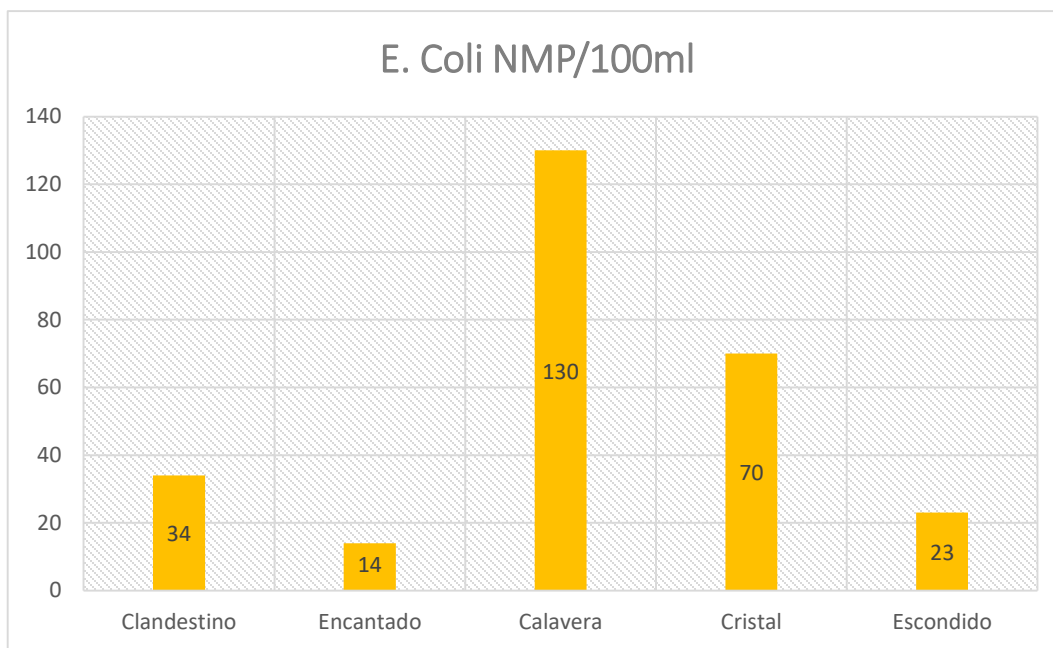


Figura 8. Valores obtenidos para *E. coli* en cada cenote.

8.3. Comparación entre los valores de Coliformes totales, fecales y *Escherichia coli*.

La comparación de los valores en los cinco cenotes muestra que hubo una variación considerable entre cenotes y entre parámetros por cenote. El cenote Cristal fue el que presentó una variación entre los valores encontrados en coliformes totales (540 NMP/100 ml), fecales (220 NMP/100 ml) y *E. coli* (70 NMP/100 ml). El cenote encantado presentó la menor variación entre coliformes, dado que el de valor que se encontró para coliformes totales (22 NMP/100ml) fue el mismo valor encontrado para coliformes fecales (22 NMP/100ml) lo que significa que de todas las bacterias coliformes que se encontraban en el cenote en ese momento, todas eran coliformes fecales. La misma situación se presentó en el cenote Calavera con 240 NMP/100ml para coliformes totales y fecales.

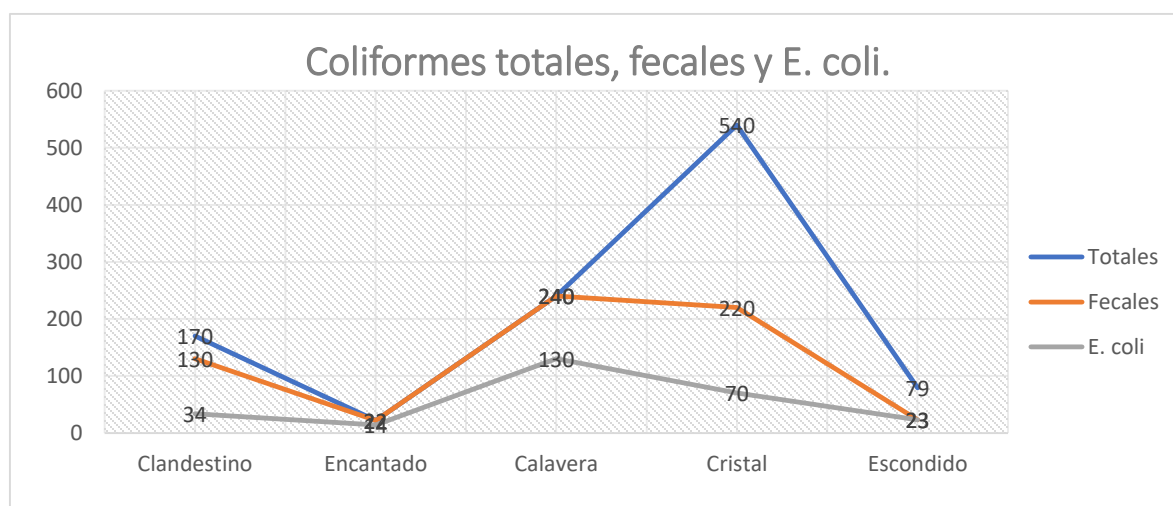


Figura 9. Comparación de los resultados para coliformes totales, fecales y *E. coli*.

Como se puede apreciar en la figura 9, los valores de coliformes totales fueron mayores a los fecales en tres de los casos. El cenote calavera fue el que presentó el valor mayor de *E. coli*. El cenote encantado y el clandestino fueron los que obtuvieron las concentraciones de coliformes mas bajas.

8.4. Parámetros fisicoquímicos.

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos se presentan en la tabla 5. De igual manera se presenta la descripción gráfica de los parámetros fisicoquímicos en la figura 10.

Tabla 5. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos durante el muestreo.

Cenote	Oxígeno Disuelto		Temperatura (°C)	SDT (mg/L)	pH
	Porcentaje	mg/L			
Clandestino	32.40%	2.31	26.02	4600	7.23
Encantado	48%	3.61	26.1	5182	7.4
Calavera	35%	2.78	29.33	2673	7.1
Cristal	34.60%	2.81	27.01	1913	7.2
Escondido	33%	2.68	26.25	2440	7

En cuanto a la temperatura no se presentaron variaciones importantes, el cenote calavera registró la mayor temperatura (29.3 °C) y el cenote Clandestino fue el de menor temperatura (26.02 °C). Para el caso del oxígeno disuelto, los cinco cenotes registraron concentraciones moderadas, el cenote encantado presentó el mayor valor (3.61 mg/L) y el cenote clandestino el de las concentraciones menores (2.31 mg/L). El promedio correspondiente para oxígeno disuelto en este muestreo fue de 2.83 mg/L. Para los sólidos disueltos totales en los cenotes que están más cercanos al mar presentaron la mayor concentración, siendo el cenote Clandestino (4600 mg/L) y el cenote Encantado (5182mg/L) (Figura 10).

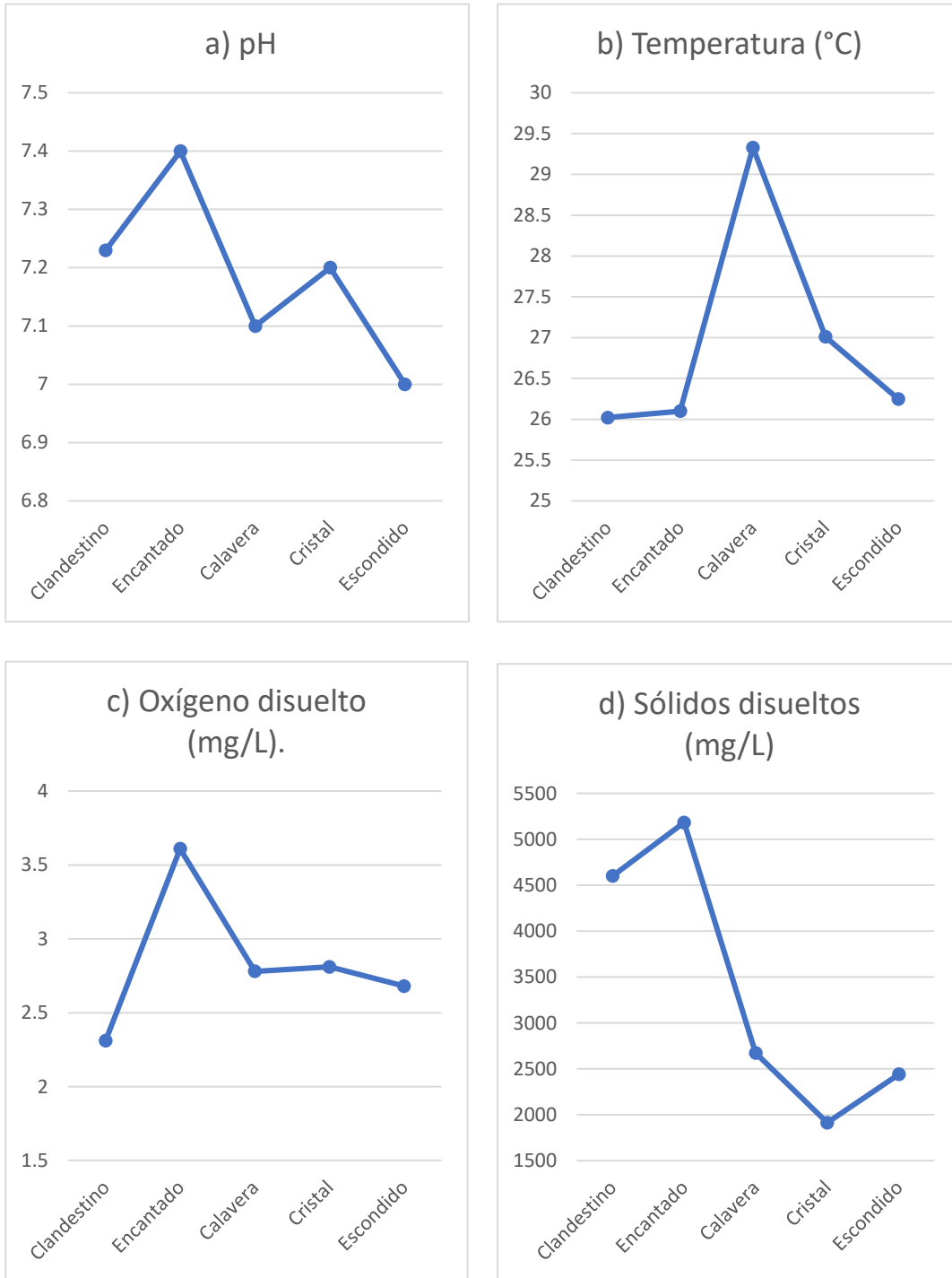


Figura 10. Gráficas de los parámetros fisicoquímicos presentados en la tabla 5.

8.5. Comparación de coliformes con los parámetros fisicoquímicos.

El grupo de los coliformes fueron los parámetros que presentaron una mayor variación de valores, mientras que los parámetros fisicoquímicos presentan un comportamiento lineal sin variaciones significantes (Figura 11).

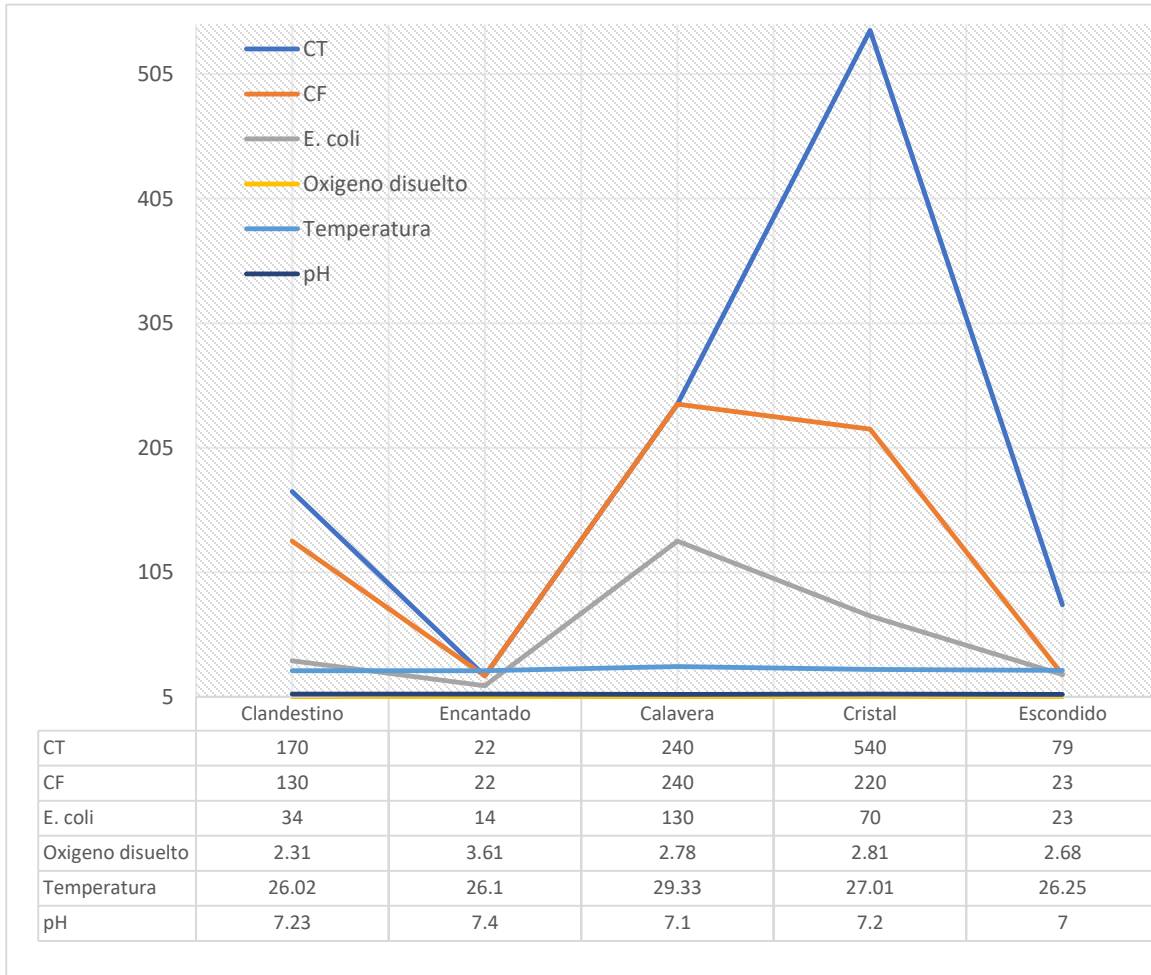


Figura 11. Comparación entre los parámetros biológicos y los fisicoquímicos.

Para el caso de los sólidos disueltos totales, aparentemente se presentó un comportamiento relacionado con la concentración de coliformes (Figura 12), sin embargo, al

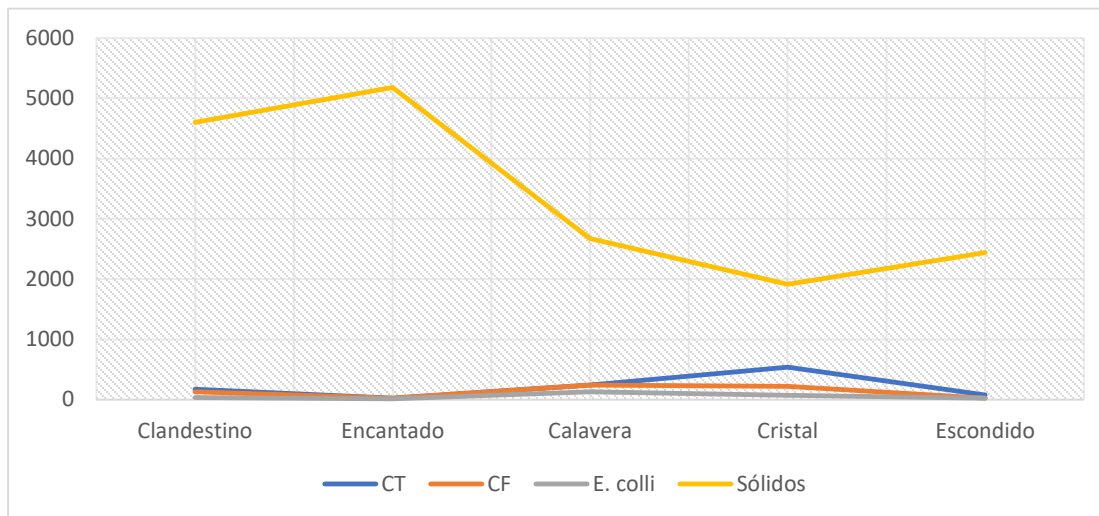


Figura 12. Comparación de los parámetros biológicos con los sólidos disueltos totales.

realizar el análisis estadístico, se comprobó que los coliformes fecales no presentan una correlación significativa con los parámetros fisicoquímicos como lo son el pH, temperatura, y oxígeno disuelto. Al realizar el análisis estadístico, se detectó una correlación significativa entre el pH y la cantidad de sólidos disueltos totales con un coeficiente positivo de $\rho = 0.900$, indicando una correlación proporcional entre variables (Tabla 6).

Tabla 6. Coeficientes de correlación de Spearman. Fuente: Elaboración propia mediante el programa: SPSS Statistics.

Correlaciones			Coliformes Fecales	Sólidos totales disueltos	Oxígeno Disuelto	pH	Temperatura
Rho de Spearman	Coliformes Fecales	Coefficiente de correlación	1,000	-,300	-,200	-,400	,700
		Sig. (bilateral)	.	,624	,747	,505	,188
		N	5	5	5	5	5
Sólidos totales disueltos	Sólidos totales disueltos	Coefficiente de correlación	-,300	1,000	,300	,900*	-,500
		Sig. (bilateral)	,624	.	,624	,037	,391
		N	5	5	5	5	5
Oxígeno Disuelto	Oxígeno Disuelto	Coefficiente de correlación	-,200	,300	1,000	,400	,300
		Sig. (bilateral)	,747	,624	.	,505	,624
		N	5	5	5	5	5
pH	pH	Coefficiente de correlación	-,400	,900*	,400	1,000	-,600
		Sig. (bilateral)	,505	,037	,505	.	,285
		N	5	5	5	5	5
Temperatura	Temperatura	Coefficiente de correlación	,700	-,500	,300	-,600	1,000
		Sig. (bilateral)	,188	,391	,624	,285	.
		N	5	5	5	5	5

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

9. Discusiones.

La detección de Coliformes totales en los 5 cenotes fue el indicio para proseguir con el estudio. Sin embargo, no se encuentran normados en los criterios ecológicos de calidad. Ya que los CT no indican una contaminación directa por materia fecal (Acosta, 2016). Los valores de coliformes totales encontrados en los cenotes de Tulum fueron más bajos (540 NMP/100 ml) que los que han encontrado en otras partes del estado de Quintana Roo; Aceves (2018) reportó valores promedio de 640 NMP/100 ml para los balnearios del sur de Quintana Roo. Esto puede estar debido a que los resultados de Aceves son del balneario ejidal de la laguna de Bacalar durante el periodo vacacional donde existe una menor dilución del agua a comparación de los cenotes que están en flujo constante por las conexiones subterráneas y los estudios realizados por De la Lanza *et al.*, (2006) en Tulum (10000 NMP/100 ml) fueron influenciados por los arrastres y las lluvias del huracán Emily favoreciendo las infiltraciones y aumentando considerablemente las concentraciones de coliformes.

En cuanto a los coliformes fecales, dos cenotes fueron los que rebasaron los límites establecidos por los criterios ecológicos de calidad del agua para uso recreativo (200 NMP/100 ml). El cenote Calavera rebasó los límites establecidos con una concentración de 240 NMP/100 ml, por lo que se rechaza la hipótesis inicial, donde se menciona que no se rebasan los límites establecidos en los criterios ecológicos, aunque en este caso no se rebasa por mucho. De igual manera, el cenote cristal rebasó el límite con un total de 220 NMP/100 ml. Los valores para coliformes fecales obtenidos en Tulum (240-22 NMP/100 ml), son similares a los obtenidos por Aceves (2016) en su segundo muestreo (240-13 NMP/100 ml) el cual corresponde a la fecha de muestreo en Tulum (la temporada vacacional de julio).

Aunque los resultados obtenidos en este estudio fueron menores (210 NMP/100 ml, en promedio) en comparación a las registradas por De la Lanza *et al.* (2006) con valores de 6,000 NMP/100 ml en agosto después del huracán Emily, demostrando así la influencia de la infiltración y la escorrentía a las aguas superficiales.

De acuerdo con Obiri-Danso y Jones (2000) citado por Barrera-Escorcía *et al.* (2013), la presencia de coliformes en los cuerpos de agua se interpreta como contaminación reciente, debido a que el tiempo de sobrevivencia de las bacterias es menor, esto indica que los cuerpos de agua están recibiendo aportes continuos de contaminantes.

Durante el muestreo del presente estudio, se pudo apreciar en dos cenotes que cuentan con sistemas rústicos de tratamiento para sus aguas residuales, dicho sistema cuenta principalmente con biodigestores que ayudan a minimizar la carga de materia orgánica en el agua y en el cenote Encantado, a parte del biodigestor, también cuentan con un humedal artificial como parte del sistema. Aunque, en todos los cenotes se lograron determinar *E. coli*, de acuerdo con la NMX-AA-042-2015 “La detección de *E. coli* es considerada como evidencia satisfactoria de contaminación fecal”. Aunque en cantidades pequeñas, el muestreo fue puntual por lo que no se descarta que las concentraciones aumenten en temporadas de alta demanda turística y en temporadas de alta precipitación. Los valores obtenidos de *E. coli* no fueron muy altos, sin embargo, el cenote calavera es el que presentó los valores más altos (130 NMP/100ml).

En cuanto a la temperatura, el rango se mantuvo entre 26 y 29.3 °C. No se identificó un patrón de variación con el pasar de las horas, ya que el primer cenote muestreado presentó una temperatura de 26.02 °C y el último presentó una temperatura de 26.25 °C, por lo que las horas transcurridas durante el muestreo no afectaron en la temperatura del agua como en el caso de Acosta (2016) en el cual la temperatura siguió un patrón ascendente explicado por las diferencias en las horas de muestreo, esto podría ser explicado por la intrusión de agua subterránea que alimenta continuamente a los cenotes, ya que el las aguas subterráneas son frías evitando así el calentamiento.

Los rangos de oxígeno disuelto entre cenotes oscilan entre 3.61 y 2.31 mg/L caso similar encontrado en el estudio realizado por Herrera *et al.* (2002), donde algunos cenotes muestreados alrededor de Tulum presentaron valores bajos de oxígeno disuelto en la superficie durante la época de lluvias, como es el caso del cenote cristal que durante la época de lluvias tuvo una concentración de 2.45 mg/l en la superficie y el cenote calavera presentó una concentración de 3.6 mg/l, esto podría ser explicado por la descomposición de materia orgánica que emplea oxígeno. Cardona & Carrillo-Rivera (1999), mencionan que las bajas concentraciones de oxígeno son el resultado de la oxidación de Fe^{+2} , el cual se encuentra en las aguas subterráneas junto con el magnesio y el estroncio, debido a la disolución incongruente de carbonatos. Mencionando de igual manera que las condiciones hidrogeológicas (acuífero libre y cárstico) favorecen la presencia de cantidades variables de oxígeno en el agua subterránea. Sin embargo, Cervantes-Martinez *et al.* (2002), en un estudio

realizado a 8 cenotes del estado de Quintana Roo, detectaron niveles de oxígeno disuelto altos (rangos que van de 3.2 a 9.7 mg/L) en comparación de los encontrados en este estudio. De igual manera, Herrera-Silveira *et al.* (2002) mencionan que durante el periodo de lluvias los diversos materiales adyacentes a estos cuerpos de agua son acarreados a través de sus conexiones hasta alcanzar su destino final que es el litoral. En el caso de los sólidos disueltos totales (SST) se observó un patrón espacial, ya que las concentraciones de sólidos disueltos fueron mayores en los cenotes que se encuentran cercanos a las costas y disminuyeron conforme se alejaban de ella, debido a la intrusión salina que se da en las costas. Este patrón también se demostró en el estudio realizado por Sánchez *et al.* (2016), quienes obtuvieron valores de sólidos disueltos totales entre 500 y 1000 mg/L y que fue incrementándose gradualmente hacia las costas hasta 7400 mg/L.

El pH se encontró entre 7 y 7.4 dentro de los rangos encontrados por Acosta (2016) y Aceves (2018). Se mantuvo, ya que la variación de este parámetro entre los cenotes fue mínima. Sin embargo, presentan diferencia en cuanto Cervantes-Martínez *et al.* (2002), ya que en el estudio realizado en el centro del estado de Quintana Roo, se encontraron rangos de pH de 8.3 a 10.2.

De igual manera, no se encontró una correlación significativa entre la concentración de coliformes fecales con los parámetros físico-químicos analizados, por lo que la aparente correlación entre los coliformes fecales con los sólidos disueltos totales se descarta ya que no es significativa y queda en términos de casualidad. Sin embargo, se encontró una correlación significativa entre los sólidos disueltos y las concentraciones de pH.

10. Conclusiones.

Los cinco cenotes muestreados presentan una contaminación fecal, sin embargo, solo el cenote Cristal (220 NMP/100 ml) y el cenote Calavera (240 NMP/100 ml) son los que rebasan los límites establecidos por los criterios ecológicos. Siendo estos, los cenotes cercanos a la zona urbana. Las concentraciones no superan por mucho los límites, un 10% por encima del límite en el caso del cenote cristal y un 20% más en el caso del cenote por lo que no representa un problema grave. Sin embargo, se tendría que llevar a cabo un estudio temporal para determinar el comportamiento de estos organismos, debido a sus tasas de sobrevivencia y períodos de vida cortos.

La detección de *E. coli* en los cinco cenotes es una evidencia de contaminación fecal, de acuerdo con la NMX-AA-042-SCFI-2015.

Las mediciones in situ de los parámetros fisicoquímicos presentaron muy poca variación entre cenotes, siendo: pH con valores entre 7 - 7.4, temperatura con valores entre 26.02 °C - 29.33, oxígeno disuelto con valores de 2.31 - 3.61 mg/L y sólidos disueltos totales obteniendo valores entre 1913 - 5182 mg/L. Los valores de los parámetros se encuentran dentro de los rangos estipulados en los criterios ecológicos de calidad del agua a excepción del oxígeno disuelto y los sólidos disueltos (4.0 mg/L y 500 mg/L respectivamente). Esto es debido a la característica del agua de la península de Yucatán, ya que son conocidas por ser aguas duras. Los parámetros fisicoquímicos no son muy diferentes entre cenotes, sin embargo, los cenotes que se encuentran más cercanos a la costa presentan un aumento de sólidos totales disueltos (registrando un aumento de 3,269 mg/L en los cenotes cercanos a la costa, debido a su cercanía con el mar). Aunque como se demostró en el análisis estadístico, este parámetro no tiene relación alguna con los coliformes, si no, con el pH.

Así mismo, el análisis estadístico demostró que los parámetros fisicoquímicos no tuvieron una relación directa con las concentraciones de coliformes fecales, descartando la relación aparente que tenía la concentración de coliformes fecales con los sólidos disueltos totales. a excepción de los sólidos disueltos totales que presenta un patrón de relación inversa con los coliformes ya que cuando uno aumenta el otro disminuye.

11. Recomendaciones.

- Realizar un monitoreo de los cenotes durante la temporada de alta afluencia turística y durante la temporada de mayor precipitación para determinar el impacto de estos factores.
- Realizar un monitoreo del agua de los pozos de Tulum para comparar con la calidad del agua de los cenotes y poder tener un criterio más amplio del problema.

12. Referencias.

- Aceves, D. (2018). Evaluación de la contaminación por coliformes totales y fecales en balnearios del sur de Quintana Roo en relación al periodo vacacional de primavera del 2016. Tesis para obtener el título de Licenciada en Ingeniería Ambiental, Universidad de Quintana Roo.
- Barrera-Escorcía, Guadalupe, Fernández-Rendón, Carlos Leopoldo, Wong-Chang, Irma, & Ramírez Romero, Patricia. (2013). La sensibilidad del grupo coliforme como indicador de la presencia de enterobacterias patógenas en cuatro cuerpos acuáticos de México. *Hidrobiológica*, 23(1), 87-96. Recuperado en 08 de marzo de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972013000100009&lng=es&tlng=es.
- Batllori-Sampedro, Eduardo, González-Piedra, Julio Iván, Díaz-Sosa, Julio, & Febles-Patrón, José Luis. (2006). Hydrological characterization of the Yucatán's northwest coastal region, Mexico. *Investigaciones geográficas*, (59), 74-92.
- Beddows, P., Blanchon, P., Escobar, E y Torres, O. (2007). Los cenotes de la Península de Yucatán'. *Revista de Arqueología Mexicana*. Vol. 14, No. 83. Pags. 32-35.
- Barrenechea, A. (2004). Capítulo 1. Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. En *Tratamiento de agua para consumo humano*. (pp. 1-54). Lima, Perú. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2004.
- Cardona, A. & Carrillo-Rivera, J., (1999). Hidrogeoquímica en el acuífero calcáreo de Mérida, Yucatán: elementos traza. *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*. Col. XIV, Núm 3. 19-28.
- Cervantes-Martínez, A., Elías-Gutiérrez, m. y Suárez-Morales, E., (2002). Limnological and morphometrical data of eight karstic system "cenotes" of the Yucatan Peninsula, Mexico, during the dry season (February-May, 2001). *Revista de Hydrobiologia* 482: pg. 167-177.
- Chacón, C. y García H., (2012). Calidad sanitaria de las aguas superficiales y subterráneas, de la subcuenca del Río viejo. *Revista Universidad y Ciencia*. Vol 6.
- De la Lanza Espino, G., S. Hernández Pulido, I. Penie Rodríguez y J.C. Gómez, 2006. Calidad del agua de la playas del municipio de Solidaridad Quintana Roo. *Revista del Medio Ambiente, Turismo y Sustentabilidad, Universidad del Caribe* 2(1): 25-44.

Glynn Henry, J. y W. Heinke, G. (1999). *Ingeniería Ambiental* (Segunda ed.). México: Pearson Educación. 273 - 275.

Goyal, S. M., Gerba, C. P., & Melnick, J. L. (1977). Occurrence and Distribution of Bacterial Indicators and Pathogens in Canal Communities Along Texas Coast. *Applied and Environmental Microbiology*, 34 (2), 139 - 149.

Hausman, Heidi (2009). *Responsible Development in Tulum, Mexico: Considering Water Quality and Subaqueous Cave Locations*. Master's project, Duke University. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/10161/1030>.

Herrera-Silveira, J. A., Comin Sebastian, F., Hamilton, P., Zandoval Jiménez, A. Medina Gómez, I., Alvarez Gongora, C., Merino, F., Díaz Arce, V., Aranda Cirecol, N. y J. Trejo Peña. 2002. Biodiversidad fitoplanctónica de cenotes: Patrones espaciales y temporales. Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados- Mérida. **Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. S004**. México, D.F.

Hoogsteijn, R., Febles-Patrón, J. & Nava-Galindo V. (2015). La contaminación fecal en cenotes de interés turístico y recreacional del estado de Yucatán. *Revista académica de la facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, Vol. 19, No.4, 2015. Recuperado de: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiNpJvxxfzhAhVQIKwKHatLADkQFjABegQIBBAC&url=http%3A%2F%2Fwww.revista.ingenieria.uady.mx%2Fojs%2Findex.php%2Fingenieria%2Farticle%2Fdownload%2F42%2F48%2F&usq=AOvVaw0QMKXIIIg7Vntaiz-nfOnY>

INEGI, (2010). *Censo de población y vivienda 2010*. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/sistemas/scitel/consultas/index#>

Jimenez, B. (2001). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México: Colegio de ingenieros ambientales de México. Editorial Limusa S.A. de C.V.. Vol. 1 Recuperado de: https://books.google.com.ec/books?id=8MVxlyJGokIC&pg=PA126&lpg=PA126&dq=tamaños+de+sólidos+suspendidos&source=bl&ots=ISyB_OHvzC&sig=8JkA0G32MhE6hA4mUrh0DMM0cal&hl=es&sa=X&ei=iIRwT7mC42TtwfXPXoDA&ved=0CDgQ6AEwBDgU#v=onepage&q=tamaños%20de%20sólidos%20suspendidos&f=false

Lampert, W. & Sommer, U. (2007). *Limnoecology: The ecology of lakes and streams*. Oxford Press, New York, New York. 336 p. DOI: 10.1093/ plankt/fbn013

- Leal-Bautista, R., Hernandez, G., Jaime, N., Cuevas, G., & Velazquez, G. (2011). PATHOGENS AND PHARMACEUTICALS POLLUTANTS AS INDICATORS OF CONTAMINATION AT THE NORTHEASTERN AQUIFER OF QUINTANA ROO. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(2), 211-219.
- Leal-Bautista, R., Lenczewski, M., Morgan, C., Gahala, A. and McLain, J. (2013). "Assessing Fecal Contamination in Groundwater from the Tulum Region, Quintana Roo, Mexico," *Journal of Environmental Protection*, Vol. 4 No. 11, 2013, pp. 1272-1279. doi: [10.4236/jep.2013.411148](https://doi.org/10.4236/jep.2013.411148).
- Medina-Gonzalez R. (s.f.). Aspectos biológicos de los cenotes de Yucatán. Secretaría de Desarrollo Sustentable de Yucatán. Recuperado de: <http://sds.yucatan.gob.mx/cenotes-grutas/documentos/BiologiaCenotes.pdf>
- Medina-Moreno, S.A., Jiménez-González, A., Gutiérrez-Rojas, M., & Lizardi-Jiménez, M.A. (2014). Hydrocarbon pollution studies of underwater sinkholes along Quintana Roo as a function of tourism development in the Mexican Caribbean. *Revista mexicana de ingeniería química*, 13(2), 509-516.
- Metcalfe, C., Beddows, P., Gold, G., Metcalfe T., Li, H. & Van, H. (2010). Contaminants in the coastal karst aquifer system along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Environmental Pollution*, Vol. 159, Issue 4, pages 991-997. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.11.031>
- Munn, C. (2004). *Marine Microbiology: ecology and applications*. New York: BIOS Scientific Publisher.
- Ramos E.L. (1975) Geological Summary of the Yucatan Peninsula. In: Nairn A.E.M., Stehli F.G. (eds) *The Gulf of Mexico and the Caribbean*. Springer, Boston, MA. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8535-6_7
- Sánchez, J. A., Álvarez, T., Pacheco, J. G., Carrillo, L., y González, R. Amílcar. (2016). Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(4), 75-96. Recuperado en 08 de marzo de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000400075&lng=es&tlng=es.
- Schmitter-Soto J.J., E. Escobar-Briones, J. Alcocer, E. Suárez-Morales, M. Elías-Gutiérrez, L.E. Marín, (2002). "Los cenotes de la península de Yucatán", en G. de La Lanza y J.L. García Calderón (comps.), *Lagos y presas de México*, agt, México. Recuperado

de:

https://www.researchgate.net/publication/228984086_Los_cenotes_de_la_Peninsula_de_Yucatan

Schmitter-Soto, J., Comín, F., Escobar-Briones. (2002). Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula. *Hydrobiologia Journal* 467: 215. <https://doi.org/10.1023/A:1014923217206>.

Smart, P. L., Beddows, P. A., Coke, J., Doerr, S., Smith, S., & Whitaker, F. F. (2006). Cave development on the caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Quintana Roo, Mexico. *Special Paper of the Geological Society of America*, 404, 105-128. [https://doi.org/10.1130/2006.2404\(10\)](https://doi.org/10.1130/2006.2404(10))

Stringfield, V. & LeGrand, H. (1976). Karst hydrology of Northern Yucatan Peninsula, Mexico. *Carbonate Rocks and Hydrogeology of the Yucatan Peninsula, Mexico*, May 24-26, 1976

Pages 192-210.

Recuperado

de:

<http://archives.datapages.com/data/nogs/data/006/006029/0192.html>