



Ingeniería

ISSN: 1665-529X

ingenieria@correo.uday.mx

Universidad Autónoma de Yucatán

México

Sánchez y Pinto, Ismael A.; Cervantes-Martínez, Adrián; González Herrera, Roger A.; Vázquez Campos, Mónica E.; Gutiérrez-Aguirre, Martha A.

Evidencia de flujo preferencial al mar, del Cenote Caletita, en Cozumel, México

Ingeniería, vol. 19, núm. 1, 2015, pp. 1-12

Universidad Autónoma de Yucatán

Mérida, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46750924001>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Evidencia de flujo preferencial al mar, del Cenote Caletita, en Cozumel, México

Ismael A. Sánchez y Pinto¹, Adrián Cervantes-Martínez², Roger A. González Herrera¹
Mónica E. Vázquez Campos² Martha A. Gutiérrez-Aguirre²

Fecha de recepción: junio 2014 – Fecha de aprobación: enero 2015

RESUMEN

El “Cenote Caletita” se localiza en Isla Cozumel, Quintana Roo, México. Al igual que otras islas de origen calcáreo, la recarga del acuífero depende exclusivamente de la precipitación, y la descarga ocurre través de conductos de disolución naturales (conocidos localmente como ojos de agua cuando la descarga sucede por debajo del nivel del agua en esteros o el mar). Este trabajo presenta los resultados de un ensayo de trazado con fluoresceína sódica y el estudio físico-químico del subsistema cárstico subacuático de la isla, comprendiendo al “Cenote Caletita” y dos ojos de agua costeros. Los datos físico-químicos en los ambientes estudiados, fueron similares entre sí: temperatura del agua = 24.7 ± 0.04 ($^{\circ}$ C), oxígeno disuelto = 0.32 ± 0.1 (mg/L), salinidad 15.6 ± 0.09 (ups), conductividad = 25.5 ± 0.13 (mS/cm), indicando una posible interconexión entre ellos. Para corroborar lo anterior, se llevó a cabo la prueba de trazado. Se obtuvo que la velocidad de flujo varía de 11 cm/s en el punto de inyección (Cenote Caletita) y entre 5 y 7 cm/s en los ojos de agua (mediante los cuales ocurre la descarga del acuífero al mar). Los coeficientes de dispersión estimados mediante el análisis e interpretación de las pruebas de trazado variaron entre 0.03 y 0.55 m²/s. El estudio de los flujos subterráneos preferenciales es incipiente en la región; sin embargo, al no haber antecedentes de trabajos similares en la zona, se confirma por vez primera el flujo preferencial del agua subterránea del sistema cárstico de isla Cozumel.

Palabras clave: agua subterránea, sistemas cársticos, trazadores, cenotes, mar Caribe.

Evidence of preferential flow to the sea from the Cenote Caletita, in Cozumel, Mexico

ABSTRACT:

The “Cenote Caletita” is located in Isla Cozumel, Quintana Roo, México. Similar to other islands of calcareous origin, the aquifer recharge depends exclusively on precipitation and discharge occurs through natural dissolution conduits (locally known as “Ojo de agua” or water spring when the discharge occurs below the water level in estuaries or the sea). This paper presents the results of a field test with sodium fluorescein and the physico-chemical study of the island underwater karst subsystem, comprising the “Cenote Caletita” and two coastal springs. The physical and chemical data in the studied systems, were similar to each other, water temperature = 24.7 ± 0.04 ($^{\circ}$ C), dissolved oxygen = 0.32 ± 0.1 (mg/L), salinity 15.6 ± 0.09 (ups), conductivity = 25.5 ± 0.13 (mS/cm), indicating a possible interconnection between them. To corroborate this, a tracer test was carried out. It was found that the flow rate ranges from 11 cm/s at the injection point (Cenote Caletita) and between 5 and 7 cm/s in the springs (whereby discharge occurs to the sea). Dispersion coefficients, estimated by tracer tests, ranged between 0.03 and 0.55 m²/s. The study of preferential groundwater flowpaths is emerging in the area; however, having no history of similar works in the region, it is confirmed for the first time, the preferential groundwater flow in the karstic system of Cozumel Island.

Key words: groundwater, karstic systems, tracers, sinkholes, Caribbean sea.

¹ Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería. Avenida Industrias no Contaminantes por Periférico Norte. Tablaje Catastral 12685. C.P. 97000. Mérida, Yucatán, México. Correo electrónico: sypinto@correo.uady.mx

² Universidad de Quintana Roo. Unidad Cozumel. Avenida Andrés Quintana Roo. Calle 11 con calle 110 sur s/n. C.P. 77642. Cozumel, Quintana Roo.

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1º de mayo de 2015. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 19, No.1, 2015, ISSN 1665-529-X.

INTRODUCCIÓN

Es bien conocido que en regiones donde dominan suelos con alta porosidad, los flujos de agua son mayoritariamente subterráneos (característico de los paisajes cársticos como Cozumel), de ahí la importancia de evaluar la calidad, flujos y escorrentía de este recurso en los ambientes subterráneos y/o afloramientos superficiales (CNA 2002; Medina-Gómez y Herrera-Silveira 2003).

De hecho en las regiones cársticas mexicanas específicamente hablando de la Península de Yucatán (PY), se desconocen en su totalidad los flujos de agua subterránea en los sistemas de cavernas (ver Steinich y Marín, 1997; Schmitter-Soto *et al.* 2002); sólo una pequeña parte del norte de la misma ha sido abordada (Steinich y Marín, 1997). En estos paisajes cársticos es típico encontrar afloramientos de agua, producto de la disolución de la roca calcárea, dichos afloramientos pueden ser útiles para detectar flujos de agua subterráneos. Estudios acerca de la variación de la descarga de estos manantiales submarinos y del efecto sobre la calidad del agua debido al régimen de mareas y corrientes marinas han sido realizados en un ojo de agua en el Golfo de México, al norte y este de la Península de Yucatán (Valle-Levinson *et al.*, 2011; Vera-Manrique *et al.*, 2012; Kimberly, *et al.*, 2014).

Sin embargo, la información generada hacia este respecto en la Isla es incipiente y hasta el momento se desconoce lo siguiente: 1) el número exacto de afloramientos superficiales, ya sea continentales y/o costeros, 2) el comportamiento de las variables físicas y químicas y calidad del agua asociada a los sistemas mencionados y 3) la dirección de los flujos de aguas subterráneas que pudieran existir.

En la PY, los estudios que muestran la utilidad de indicadores de calidad del agua en sistemas con influencia continental, se han realizado principalmente en lagunas costeras de Yucatán (Herrera-Silveira 1998; Medina-Gómez y Herrera-Silveira 2003). Estudios recientes han utilizado como indicadores de la contaminación del agua subterránea en la región del caribe mexicano constituyentes farmacéuticos (Leal-Bautista *et al.* 2011), componentes orgánicos derivados del petróleo (Medina-Moreno *et al.* 2014) y coliformes fecales (Leal-Bautista *et al.* 2013).

Una alternativa para evaluar la calidad del agua, particularmente donde existe sospecha de contaminación de aguas por efluentes de desecho, es determinar la concentración de nutrientes. También

los cambios en la concentración de oxígeno disuelto son informativos: un decremento en la concentración indicaría si existen procesos de óxido-reducción cuando hay gran cantidad de materia orgánica (Beddows *et al.* 2001).

La naturaleza cárstica de la Península, promueve la formación de acuíferos que muy probablemente tienen su zona de descarga en el área costera a través de manantiales y ojos de agua. En la región costera de Yucatán se ha probado que las descargas son estacionalmente variables (Álvarez-Góngora y Herrera-Silveira 2006); sin embargo, en Cozumel aún no se ha determinado si estos flujos son variables en el tiempo, cuál es la calidad del agua que descargan y tampoco se sabe si las comunidades acuáticas del área son afectadas por concentraciones elevadas de nutrientes.

Actualmente, no es posible señalar con certeza si las áreas con influencia antrópica tienen impacto sobre la franja costera inmediata al litoral de Cozumel; además, se desconocen en su mayoría los puntos de afloramiento de agua dulce en el ambiente costero en las áreas de influencia urbana.

Aunque algunos ojos de agua han sido topografiados, se desconoce la físico-química de sus aguas y su hidrodinámica. Este trabajo, presenta los resultados de un ensayo de trazado con fluoriceína sódica y avances en el estudio físico-químico de las aguas de un subsistema cárstico subacuático de la isla (“Cenote Caletita” y dos ojos de agua: “SC” y “SE”) conectado al mar mediante una pasaje subterráneo de 186 m de longitud, con el objetivo de generar conocimiento sobre la hidrodinámica y flujo subterráneo de dicho subsistema.

METODOLOGÍA

El sitio de estudio está situado al sur de la zona urbana de la isla de Cozumel, el cual comprende a un cenote denominado “Cenote Caletita o CC” y a una Caletita, en el mar Caribe. La distancia aproximada entre el cenote y la caletita es de 186 m. La ubicación geográfica del sitio de estudio tiene las coordenadas 20°29'39.55"N y 86° 57'48.66"O. El Cenote Caletita no posee bóveda de tal forma que su cuerpo de agua está directamente expuesto a las condiciones atmosféricas. Es de forma ovalada con su eje mayor de aproximadamente 6 m y con dirección SE-NW y un ancho de 3 m y misma profundidad. Se ignora si forma parte de un sistema kárstico que conecte mediante ramales a los demás cenotes existentes en su entorno.

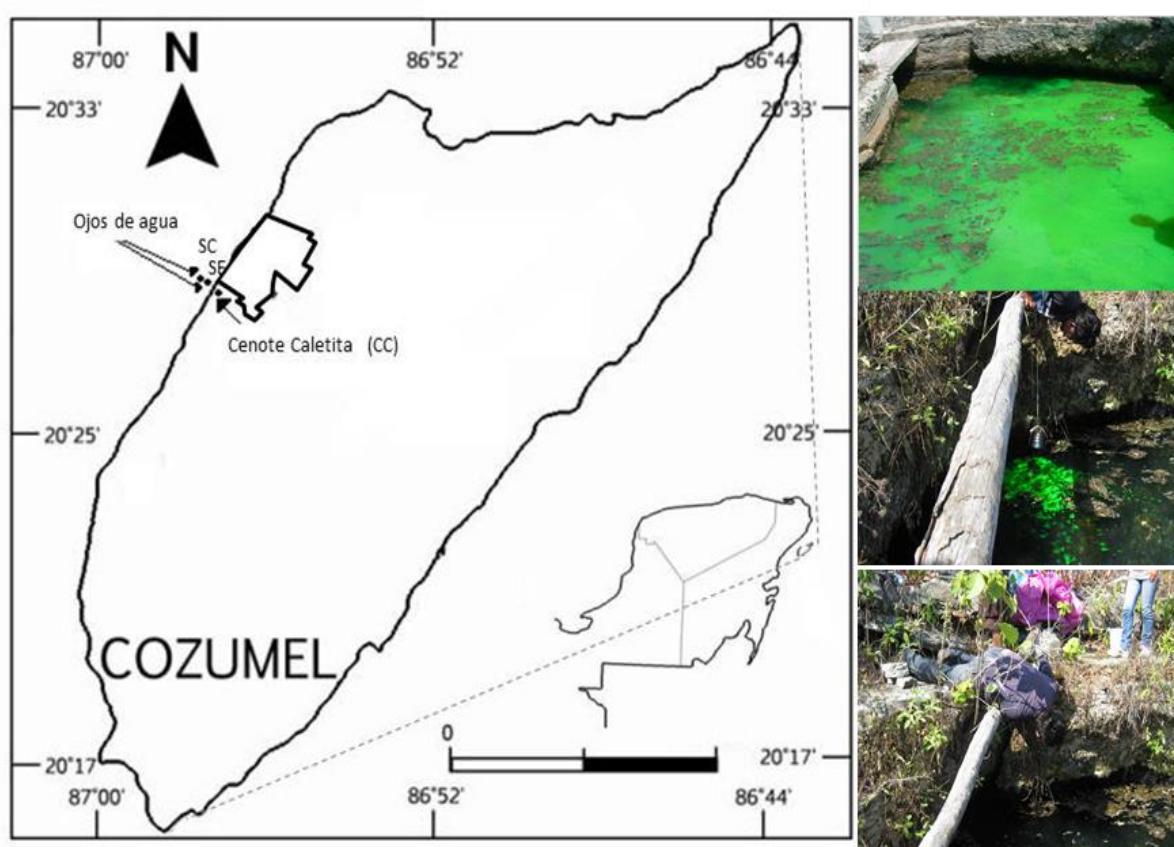


Figura 1. Localización y fotos del Cenote Caletita (CC) y de los ojos de agua estudiados (SC y SE).

Se estudió la físico-química de dos afloramientos u ojos de agua costeros (SC y SE) y la del “Cenote Caletita”, identificados en la región suburbana y litoral costero de Cozumel. La selección de estos sitios fue en virtud de los resultados preliminares del proyecto “Análisis hidrológico de ambientes cársticos y su influencia sobre la franja costera de Cozumel, Quintana Roo” el cual fue desarrollado en el 2007. Por lo tanto, se inicia con datos base para seguir evaluando la físico-química del agua entre estos sistemas e inferir en su posible interconexión.

Físico-química de las descargas de agua al mar y del cenote caletita

Para los tres sistemas se analizaron *in situ* variables físicas: temperatura del agua (°C) y químicas: oxígeno disuelto (mg/L), saturación de oxígeno (%), salinidad (ups), conductividad eléctrica (mS/cm), y clorofila a (mg/L) con la ayuda de una sonda multi-paramétrica Hydrolab Data-Sonde 5. El pH se midió con un potenciómetro Oakton 310. Todas las variables que se evaluaron contaron con una muestra y una réplica, y en total se colectaron aproximadamente 400 muestras en los sistemas estudiados.

Pruebas de trazado

Se realizaron dos pruebas de trazado utilizando fluoresceína sódica o uranina, en ambos ensayos la inyección fue instantánea y el trazador fue vertido en un punto del espejo de agua del CC (donde se apreciaba la existencia de un flujo preferencial). La primera prueba, de tipo cualitativo, se realizó en el 2007, con el fin de verificar la interconexión entre el CC y los ojos de agua SC y SE presentes en la Caletita, la segunda prueba se realizó en el 2011 con el objeto de conocer la velocidad del flujo, el coeficiente de dispersión y el caudal de agua subterránea vertido a la caletita a través de los manantiales.

Trazado cualitativo

Los resultados de esta prueba confirmaron la conexión hidráulica entre el CC y los manantiales existentes en la Caletita. Se identificaron al menos dos ojos de agua SC y SE. La fluoresceína que salía de los ojos de agua era dispersada en la caletita esparciéndose por gran parte de la misma y dificultando la identificación de aquellos puntos de descarga de menor magnitud y descargas difusas. El tiempo estimado en salir la fluoresceína por los

manantiales fue de aproximadamente 1.5 h.

Trazado cuantitativo

Antes de proceder a la inyección, se colectaron muestras de agua en los sistemas para determinar su concentración de fluoresceína (concentración de fondo). Posteriormente se inicia la inyección de 4 L de una solución de fluoresceína sódica “uranina” que duró aproximadamente 1 min. En total se injectaron 110.55 g. La concentración de la solución fue de 27,637 mg/L.

Como ya ha sido mencionado, la inyección del trazador fue instantánea y la solución se vertió sobre la superficie del agua del cenote en un sitio donde se apreciaba un flujo preferencial. La superficie del agua en el cenote donde se realizó la inyección contenía una gran cantidad de materia orgánica vegetal y algas.

Muestreo y análisis

El tiempo de llegada del trazador a la Caletita, de 1.5 h, fue tomado en cuenta para definir el protocolo de monitoreo del trazador en los puntos de muestreo seleccionados.

Las muestras de agua fueron colectadas manualmente in situ (en la descarga subterránea al mar) con una botella de vidrio protegida de la radiación solar, mediante cinta aislante, para prevenir cualquier reducción de la fluorescencia debido al decaimiento fotoquímico y se almacenaba hasta su posterior determinación, mismas que se realizaron 9 h después de haber colectado la primera muestra. Las muestras fueron colectadas en tres lugares; en el Cenote Caletita donde se realizó la inyección, y en los dos puntos donde el agua subterránea descargaba en la Caletita, en SC y SE. La primera muestra colectada en los manantiales SC y SE se recogió a los 12 min después de iniciada la inyección, las siguientes 2 muestras fueron colectadas a intervalos de 15 minutos. En cuanto la fluoresceína fue visible la frecuencia del muestreo se incrementó a una muestra cada 5 min por 65 min. Conforme el tiempo transcurría la frecuencia de muestreo fue disminuyendo a una cada 10 min por 50 min, posteriormente a una cada 15 min por 75 min y finalmente una cada 30 min durante 90 min. Casi de manera simultánea al muestreo realizado en los manantiales de agua subterránea se realizó un muestreo en el CC con un esquema de monitoreo similar al de los ojos de agua, solo que el muestreo en el cenote inició 30 min después de la inyección. En total el muestreo duró 5 h 15 min. Para la detección de la fluorescencia se utilizó un fluorómetro marca SEQUOIA-TURNER modelo 450-003 con una

resolución de 0.05% y un rango de concentración de 0-1999 unidades de fluorescencia (UF). Con base a la experiencia preliminar de trazado se prepararon curvas de dilución para la calibración con concentraciones entre 0.001 a 5 mg/L.

RESULTADOS y DISCUSIÓN

pH

Se registraron valores cercanos a la neutralidad (7.1 ± 0.8). Estos registros pueden indicar dos cosas: a) las condiciones naturales de disolución de roca calcárea, con poca actividad fotosintética lo que produce que el pH se mantenga cercano a la neutralidad y b) las condiciones aparentes de un ambiente donde predominan actividades de descomposición (reducción), produce que el pH tienda hacia la neutralidad y no hacia valores más básicos (Socki *et al.* 2002). En sistemas acuáticos de la península de Yucatán, se han reportado valores similares a los encontrados aquí, relacionados con una fuerte actividad bacteriana y procesos de descomposición (Socki *et al.* 2002).

Oxígeno disuelto

Las condiciones de un ambiente en reducción se confirman con las bajas concentraciones de oxígeno registradas (0.9 ± 0.1 mg/L) en los tres sitios de muestreo. Esta concentración indica que en el ambiente, dominan procesos de descomposición de materia orgánica, probablemente realizada por una alta actividad microbiana. Los procesos de descomposición de materia orgánica también se ven evidenciados por el olor a ácido sulfídrico, en el lugar (observación personal).

Clorofila a

Los valores de clorofila “a” (0.22 ± 0.15 mg/L), indican condiciones de oligotrofia. Dicho comportamiento es típico de aguas subterráneas dulces de la región debido básicamente a la ausencia de luz lo cual limita la productividad en los sistemas acuáticos subterráneos (Pech-Domínguez, 2009).

Conductividad eléctrica

Se encontraron valores iguales de conductividad en los tres sitios analizados (25.5 ± 0.13 mS/cm), lo cual puede indicar que se trata de una misma masa de agua; es decir, la parte continental está alimentando a la costera y viceversa. El valor encontrado, indica que el agua es de tipo salobre, con influencia de agua marina.

Temperatura del agua

Los valores de temperatura del agua encontrados (24.7 ± 0.04 °C) en los tres sitios de muestreo son similares entre sí, confirmando la interconexión entre

ellos. Estos valores, junto con el oxígeno, indica el típico comportamiento de aguas subterráneas (Matthes, 2008).

Los resultados aquí presentados, muestran, que la parte terrestre está contribuyendo al aporte de materia orgánica y nutrientes hacia la zona costera, habiendo fuertes procesos de descomposición de materia orgánica, lo cual explica el olor a ácido sulfídrico que se percibe en la zona de estudio, y además queda confirmado con los resultados de las variables ambientales aquí medidas.

Los resultados indican: 1) la conexión subterránea de los sistemas bajo estudio, 2), la parte terrestre contribuye al aporte de materia orgánica y nutrientes hacia la zona costera, habiendo fuertes procesos de descomposición de materia orgánica, confirmados con los resultados de las variables ambientales aquí evaluadas y 3) algunos valores están dentro de las normas oficiales de calidad del agua (pH, temperatura del agua etc), sin embargo, variables como el oxígeno disuelto, no cumple con los criterios ecológicos para la protección de la vida acuática marina.

Análisis cuantitativo del trazador

La curva del trazador en el Cenote Caletita, 30 minutos después de la inyección, se ve altamente diluida presentando una concentración de poco más de 8 mg/L, en tanto que la concentración en la solución inyectada fue de 27,637 mg/L, Figura 2. Está

fuerte dilución de la uranina se debe a que el trazador se integró rápidamente al flujo preferencial observado en la superficie del CC donde se realizó la inyección y a la difusión que ésta experimentó a todo lo ancho y profundo del cuerpo de agua del cenote, después de haber sido inyectada. La incorporación del trazador al flujo subterráneo se cree que haya sido bastante rápido, ya que a los 39 minutos después de la inyección empezó a aparecer en los ojos de agua SC y SE localizados a aproximadamente 186 m del punto de inyección, Figura 3.

La concentración al inicio del muestreo y al final del mismo fue de aproximadamente cero. Es posible que concentraciones del orden de $\mu\text{g/L}$ pudieran aún estar saliendo al final del muestreo. Sin embargo, éstas no pudieron detectarse dado que las curvas de dilución preparadas para el análisis fueron para detectar concentraciones del orden de mg/L . La concentración máxima de 0.8 mg/L fue detectada en la curva de paso del trazador del manantial SE, también es de notarse que esta curva presenta una cola de dilución ligeramente más extendida que la curva de paso del ojo de agua SC. Estas características en ambas curvas muestran que la dilución fue más eficiente en el manantial SC. El tiempo de paso de todo el frente del trazador para ambas curvas fue de 2.75 y 3.58 h para SC y SE respectivamente. Hecho que confirma lo anterior y que sugiere un mayor flujo subterráneo y mejor mezcla del trazador en la SC.

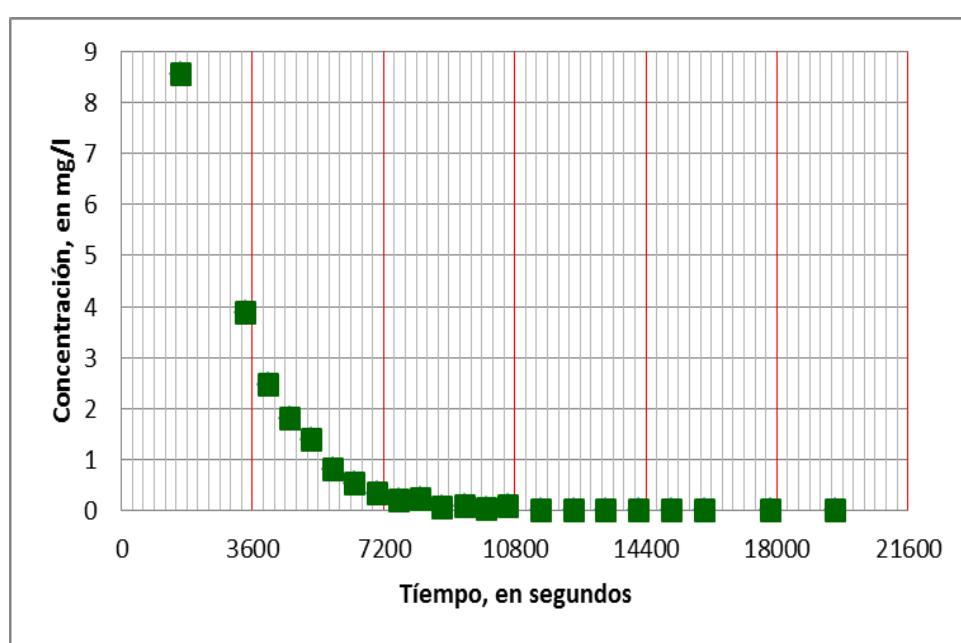


Figura 2. Curva de disminución del trazador en el punto de inyección. Cenote Caletita (CC).

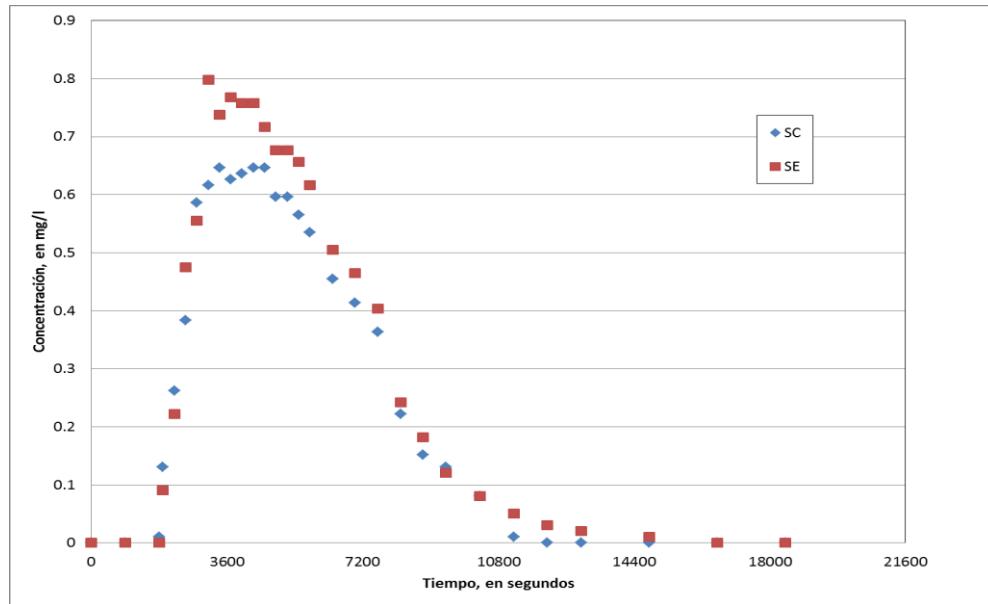


Figura 3. Curva de trazado del frente de fluoresceína en los ojos de agua SC y SE.

Métodos de análisis cuantitativos

Para el análisis de los resultados se utilizó una solución analítica unidimensional de tipo gaussiano de la ecuación de transporte advectivo-dispersivo con inyección súbita, que describe la expansión del trazador en la dirección principal del flujo subterráneo, (Bedient et al, 1999).

$$C(x,t) = \frac{M}{(4\pi D_x t)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x-v_x t)^2}{4D_x t}\right] \quad (1)$$

Donde:

$C(x,t)$ = Concentración del trazador a cierta distancia del punto de inyección, y en cualquier instante después de la inyección.

M = Masa del trazador injectada por unidad de superficie.

D_x = Dispersión en la dirección principal del flujo subterráneo.

v_x = Velocidad media del flujo subterráneo

t = Tiempo

y el método de Huang (1991). Los parámetros estimados fueron la velocidad (media y máxima del flujo), el tiempo medio del paso del frente del trazador, cantidad de masa del trazador recuperado y se estimó el caudal de agua subterránea que se descarga por los ojos de agua en la caletita.

Mediante el ajuste del modelo de la ecuación (1) a las curvas de concentración del frente de trazador medido

en los ojos de agua SC y SE, se obtuvo la dispersión y la velocidad media de flujo, Figura 4. El ajuste se realizó, usando la técnica de ensayo-error, haciendo variar la dispersión y la velocidad media del flujo hasta obtener el mejor ajuste, el cual se alcanzó mediante la minimización del error cuadrático medio de las diferencias de los valores medidos de la concentración y los estimados con el modelo (RMS, por sus siglas en inglés).

Con el modelo ajustado de la ecuación (1) a las curvas del trazador en SC y SE se obtuvo una primera aproximación de la velocidad media del frente en cada ojo de agua. Con ese valor de medio de la velocidad (Ecuación 1) se calculó el caudal utilizando $Q = VA$, Tabla 1a. El área de la sección transversal en cada ojo de agua fue medida utilizando un flexómetro y una cinta métrica, la profundidad del agua se midió a intervalos de 20 cm hasta cubrir la amplitud total de la oquedad por donde surgía el agua, obteniéndose 0.1579 m^2 y 0.065 m^2 para los ojos de agua SC y SE, respectivamente. Además, la velocidad del flujo a la salida del ojo de agua fue calculada utilizando un flotador (botella de plástico de $\frac{1}{2}$ litro llena de agua destilada), y midiéndose el tiempo empleado por éste en recorrer la distancia de 1 m. Para fijar la distancia, se consideró el punto donde brota el agua como el origen, a partir del cual se instaló a un metro de distancia un hilo que atravesaba el canal por donde salía el agua subterránea que manaba del manantial.

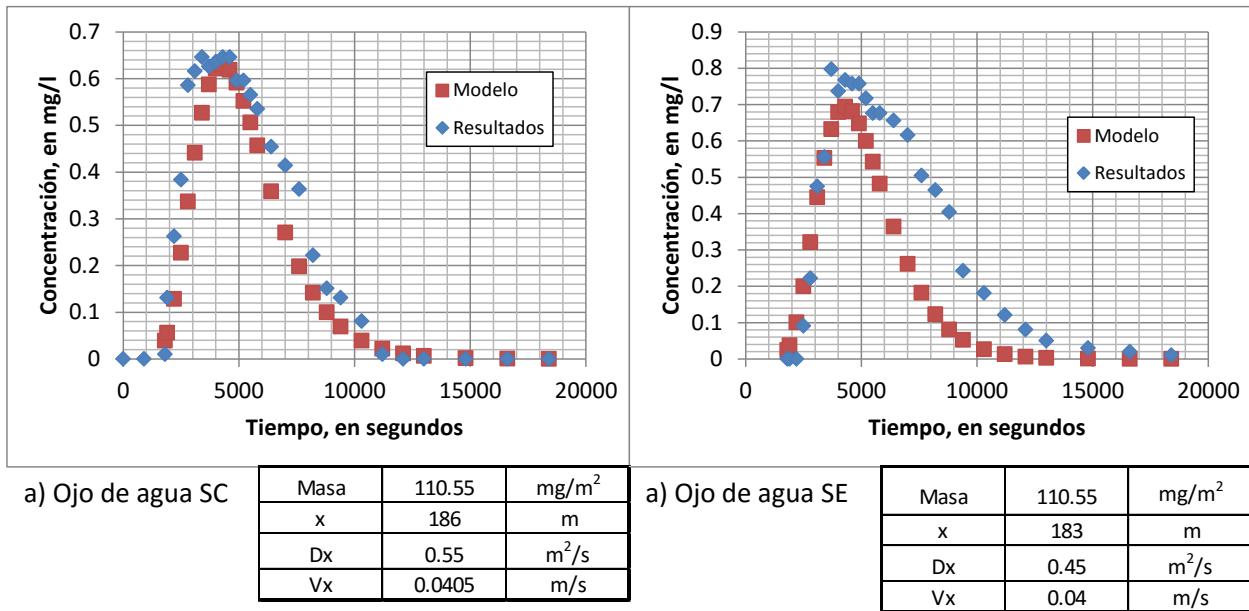


Figura 4. Ajuste de la ecuación (1) a las curvas de trazado del frente de fluoriceña en los puntos de descarga, en la Caletita; a) Ojo de agua SC y b) Ojo de agua SE.

Una vez estimado el caudal, el resultado se empleó para re-estimar el valor de la velocidad media y calcular el tiempo medio de residencia del centroide del trazador. El tiempo medio de residencia del trazador (\bar{t}), es el tiempo requerido para que el centroide de la masa del trazador atravesé la distancia entre el punto de inyección y el de muestreo, y puede ser estimado de acuerdo a la siguiente ecuación, (Field, 1999):

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t C(t) Q(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) Q(t) dt} \quad (2)$$

Donde:

\bar{t} es el tiempo medio del frente de masa del trazador
 $C(t)$ la concentración del trazador en el instante "t"
 $Q(t)$ el caudal en el tiempo "t", el cual se supuso

constante.

La velocidad media con la que se mueve el frente del trazador puede ser estimada de la siguiente forma, (Field, 1999):

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty} \frac{x_s}{t} C(t) Q(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) Q(t) dt} \quad (3)$$

Donde:

\bar{v} es la velocidad media del frente de masa del trazador
 $C(t)$ es la concentración del trazador en el instante t,
 $Q(t)$ el caudal en el instante t.

Tabla 1. Resultados de la velocidad media, velocidad de aforo y el caudal

Lugar	A, m ²	vmed*, m/s	Q,I/s
SC	0.1579	0.0405	6.39495
SE	0.065	0.04	2.6

a)

Lugar	\bar{v} Ogata,m/s	\bar{v} Field,m/s	v Aforo,m/s
SC	0.0405	0.0409	0.58
SE	0.04	0.0394	

b)

El método de Huang (1991), fue empleado para estimar las velocidades máximas en cada una de los manantiales y la dispersión, empleando las siguientes ecuaciones:

MÉTODO DE HUANG, 1991
$U_2 = \frac{t_1 t_2}{t_1 - t_2} \ln \frac{(C_1 - C_o) \sqrt{t_1}}{(C_2 - C_o) \sqrt{t_2}}$
$U_3 = \frac{t_1 t_3}{t_1 - t_3} \ln \frac{(C_1 - C_o) \sqrt{t_1}}{(C_3 - C_o) \sqrt{t_3}}$
$V = \sqrt{\frac{U_2 - U_3}{t_1(U_2 t_3 - U_3 t_2)}} \bullet x$
$D = \frac{x^2 - t_1 t_2 V^2}{4U_2}$

Donde: t_1 , t_2 , t_3 , C_1 , C_2 y C_3 son respectivamente el tiempo en el instante 1, 2 y 3 y la concentración en los respectivos tiempos, V es la velocidad, x la distancia al punto de inyección y D la dispersión.

Las velocidades calculadas de acuerdo a la curva de trazado son presentadas en la Tabla 2. Las velocidades máximas, media y pico se calcularon basados en la llegada del trazador, en el tiempo medio de residencia del trazador y el tiempo pico de concentración, respectivamente.

Tabla 2

Lugar	Dist. Al punto de inyección, m	Tiempo de llegada del trazador (h)	Tiempo pico de concentración (h)	Tiempo medio de residencia del trazador (h)	Velocidad máxima, m/s	Velocidad pico, m/s	Velocidad media del trazador, m/s. (Field, 1999)	Dispersión, según Huang, en m ² /s
SC	186	0.7	1.28	1.48	0.073	0.04	0.041	0.207
SE	183	0.86	1.2	1.514	0.059	0.042	0.0394	0.035

La masa total recuperada fue estimada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$M_o = \int_0^{\infty} C(t)Q(t)dt \quad (4)$$

Donde: $C(t)$ y $Q(t)$ representan la concentración del trazador y el flujo subterráneo en cierto instante.

De esta manera la masa total recuperada representó el 28.46 % del total que se inyectó. El mejor ajuste del modelo de la ecuación 1 a las curvas de trazado en SC y SE se logró para valores en la dispersión diferentes pero similares en la velocidad media en ambos manantiales, ver tabla de la Figura 4. En la Tabla 1b, se presentan las magnitudes de la velocidad media del frente de trazado estimado mediante la ecuación 1, y calculado con las ecuaciones de Field (1999). Los resultados son muy similares para ambos manantiales. Este procedimiento fue empleado para dar certidumbre a las estimaciones del caudal y de la velocidad, usando diferentes métodos para el cálculo,

en el cual uno es dependiente del otro. Es decir, el cálculo de la velocidad media utilizando la ecuación de Field (1999), requiere como dato de entrada del caudal estimado mediante la ecuación 1. Por otro lado, las dispersiones fueron estimadas también por el método de Huang para ambos manantiales. Existe notable diferencia en éste parámetro al comparar las dispersiones estimadas mediante Huang (1991) y la ecuación 1. Esta diferencia en los valores se debe a que la estimación de la dispersión por el método de Huang (1991) emplea la velocidad máxima y no la velocidad media, tal como se determina en la ecuación 1.

Las velocidades máximas fueron de 0.073 m/s y 0.059 m/s para SC y SE, respectivamente Tabla 2. El orden de estas velocidades máximas concuerdan con las determinadas por Moore et al. (1993) en fracturas, en la Riviera Maya, Q, Roo. Sus resultados indican que la velocidad incrementa de 1 a 12 cm/s conforme se aproxima la descarga al mar. Tales resultados fueron estimados mediante pruebas de trazado empleando el método de punto de dilución en fracturas. Beddows (2009), reportó velocidades máximas de descarga del

acuífero al mar de 20 cm/s medidas mediante una red de medidores de velocidad instalados en una sección transversal en un red cavernosa localizada en las inmediaciones de Tulum, Q.Roo (se desconoce a que distancia de la costa).

Con excepción del tiempo pico de la SC, el tiempo de llegada, el tiempo medio de residencia y el tiempo de paso (2.75 y 3.58 h para SC y SE, respectivamente) del frente fueron inferiores a los tiempos de la SE, lo que revela la importancia del flujo que circula por sistema kárstico hasta salir por SC, y confirma las magnitudes de los caudales estimados mediante la ecuación 1, ver tablas en la Figura 4.

El acuífero de Cozumel presenta un gradiente medio del 0.01%, en otros acuíferos cársticos donde los gradientes son del 5% o menores pueden presentarse curvas descendentes muy extendidas y planas con concentraciones constantes y prolongadas en el tiempo debido a fenómenos de difusión, indicando con ello que el flujo es lento y que ocurre principalmente en forma difusa a través de la matriz y que no está conectado al sistema kárstico (Mohammadi *et al.* 2007; Milanovic 1981; Stevanovic y Dragisic 1992). Sin duda, las curvas obtenidas en este caso de estudio no muestran colas muy extendidas sino que tienen una apariencia, semejante a las Gaussianas y que son típicas respuestas de las inyecciones súbitas del trazador a los sistemas con excelente mezcla, y que no tienen relación alguna a la existencia de gradientes hidráulicos tan pequeños. En contraste a lo que ocurre en otros sistemas cársticos, la naturaleza del bajo gradiente hidráulico es consecuencia de la alta transmisibilidad que confiere a este acuífero la intensa karstificación que se ha dado. Con base a las curvas de trazado se infiere que el trazador inyectado se incorporó de manera eficiente al sistema kárstico estudiado.

Otros mecanismos que pueden dar lugar a éste tipo de curvas son la mezcla del trazador con lagunas subterráneas (Zhengxing, 1988), intercambio por difusión del trazador con zonas de flujos nulos (Seiler and Behrens, 1992), transporte del trazador hacia materiales geológicos altamente heterogéneos (Iqbal, 2000) y la existencia de componentes principales de transporte e hidráulico incluyendo un componente rápido y turbulento y otro componente lento debido a las fuerzas de fricción en un conducto simple (Massei *et al.* 2006).

Estos mecanismos por los cuales pueden ocurrir importantes transferencias de masa fuera de los flujos preferenciales en sistemas cársticos, pueden explicar

el hecho de que la masa total recuperada en los manantiales fue del 28.46% de la masa inyectada al sistema cenote-caletita. Del punto donde se realizó la inyección, CC, hasta los manantiales, SC y SE en la caletita, es posible que existan otros ramales del sistema cavernoso por los cuales el trazador haya seguido diferentes caminos. Estos ramales pudieran o no estar conectados al mar, almacenándose en ellos o descargando al mar fuera de la caleta donde descargaban los manantiales estudiados. Por otro lado, Beddows (2009), realizó en una sección transversal de un sistema cavernoso inundado, localizado en el litoral este de la Península de Yucatán y cerca de Tulum, Q. Roo, el monitoreo de la velocidad del flujo mediante la instalación de medidores de velocidad. Sus resultados, aportan significativas consideraciones que hay que tomar en cuenta en la realización de pruebas de trazado de carácter cuantitativo. Como por ejemplo, ¿Dónde se debe realizar la inyección y en qué instante? Pues las velocidades máximas se registraron hacia el centro de la sección y las mínimas se presentaron en las márgenes, superficie y fondo de la misma. Por otro lado, también reporta que dependiendo de la hora, hay instantes en que existen importantes de flujos de agua de mar hacia el sistema y en otros momentos flujos de agua subterránea se vierten al mar. De lo anterior, se infiere que los efectos de las mareas, dependiendo del régimen de éstas, tendrán una importancia significativa en la hidrodinámica de los sistemas cársticos conectados al mar (Valle Levinson *et al.* 2011). Estudios posteriores permitirán corroborar dicha aseveración. El estudio de los flujos subterráneos preferenciales es incipiente en la región; sin embargo, al no haber antecedentes de trabajos similares en la zona, se confirma por vez primera el flujo preferencial del agua subterránea de un sistema acuático cárstico de isla Cozumel.

CONCLUSIONES

Los resultados de la físico-química indican: 1) la conexión subterránea de los sistemas bajo estudio, 2) la parte terrestre contribuye al aporte de materia orgánica y nutrientes hacia la zona costera, habiendo fuertes procesos de descomposición de materia orgánica, confirmados con los resultados de las variables ambientales evaluadas y 3) algunos valores están dentro de las normas oficiales de calidad del agua (pH, temperatura del agua etc), sin embargo, variables como el oxígeno disuelto, no cumple con los criterios ecológicos para la protección de la vida acuática marina.

El empleo de trazadores puede ser un importante recurso para identificar el origen, dentro del territorio insular, de las aguas contaminadas que descargan los

ojos de agua al mar.

Las velocidades medias del flujo fueron de 0.04 m/s, las dispersiones variaron entre 0.035 y 0.55 m²/s y el caudal estimado en los manantiales SC y SE fueron de 6.39 L/s y 2.6 L/s, respectivamente.

No obstante el bajo porcentaje de masa total de trazador recuperado, las curvas de trazado indican que la fracción de masa que se incorporó al sistema Cenote Caletita-Manantiales, revelan una buena mezcla de la masa transportada.

Sin duda las pruebas de trazado del tipo cuantitativo en sistemas cársticos conectados al mar incorporan mayores retos (además de los mecanismos que

influyen en estas pruebas y que fueron citados en el documento) pues la hidrodinámica de los flujos preferenciales del agua subterránea están fuertemente influidos por el régimen de mareas que prevalecen en las zonas costeras, tal como han demostrado estudios previos (Valle-Levinson et al, 2011; Vera-Manrique et al, 2012; Beddows, 2009). El conocimiento del comportamiento de estos flujos tienen gran relevancia en el momento de decidir en qué lugar se debe realizar la inyección y en qué instante.

La prueba de trazado es un importante recurso para identificar fuentes de contaminación en la isla, o en la PY, que descargan al mar a través de ojos de agua o manantiales.

AGRADECIMIENTOS

A la Red Temática del Agua del CONACYT (RETAC), a la División de Desarrollo Sustentable y al Departamento de Ciencias y Humanidades de la Universidad de Quintana Roo, por el apoyo brindado.

REFERENCIAS

- Álvarez-Góngora C., Herrera-Silveira J. A. (2006). Variations of phytoplankton community structure related to water quality trends in a tropical karstic coastal zone. "Marine Pollution Bulletin", 52: 48-60.
- Beddows P. (2009). Hidrogeología e hidroquímica de los sistemas de cueva sumergidas. " Foro Estatal de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico "El sistema hidrológico de Quintana Roo"
- Beddows P., Smart P., Whitaker F., Smith S. (2001). ¿A dónde van las aguas residuales? El acuífero cárstico del municipio de Solidaridad Quintana Roo, México. En: "A la salvaguarda de los ecosistemas frágiles en solidaridad", Huerta Illescas J. A., Pérez de la Fuente G., Llorens Cruset C., Dzay Granel A. (eds), 168-178. H. Ayuntamiento de Solidaridad, Dirección general de administración urbana y Dirección de Medio Ambiente. Playa del Carmen, Quintana Roo.
- Bedient P.B., Rifai H.S., Newell C. J. (1999). Groundwater Contamination: Transport and Remediation, Second Edition. Edited by Upper Saddle River, NJ 07458, USA: Prentice Hall PTR, 604 pp.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2002. Región XII, Península de Yucatán, México. 16 p.
- Field MS (1999). Quantitative analysis of tracer breakthrough curves from tracing tests in karst aquifers, In: Palmer AN, Palmer MV, Sasowsky ID (eds) Karst modeling. Special publication 5. Karst Water Institute, West Virginia, pp 163–171.
- Herrera-Silveira J. A. (1998). Nutrient-phytoplankton production relationship in groundwater influenced tropical coastal lagoon. "Aquatic Ecosystem Health & Management", 1:373-385.
- Huang H. (1991). On a One-Dimensional Tracer Model. Ground water. 29(1), 22-36.
- Iqbal M. Z. (2000) Effects of layered heterogeneity in subsurface geologic materials on solute transport under field conditions: a case study from north-eastern Iowa, USA. Hydrogeology, 8:257–270
- Kimberly A. N., Knee K.L., Crook E. D., de Sieyes N. R., Rebodello-Vieyra M., Hernández-Torres L., Paytan A. (2014). Composition and fluxes of submarine groundwater along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula. "Continental Shelf Research", 77: 38-50

Leal-Bautista R.M., Hernández G., Jaime N., Cuevas G., Velázquez G. (2011). Pathogens and pharmaceuticals pollutants as indicators of contamination at the Northesatern aquifer of Quintana Roo. Tropical and Subtropical Agroecosystems. Vo. 13, No. 2: 211-219.

Leal-Bautista R.M., Lenczewski M., Morgan C., Gahala A., Maclain J.E. (2013). Assessing Fecal Contamination in groundwater from the Tulum region, Quintana Roo. Journal of Environmental Protection. Vol. 4: 1272-1279.

Massei N., Wang H. Q., Field M. S., Dupont J. P., Bakalowicz M., Rodet J. (2006). Interpreting tracer breakthrough tailing in a conduit-dominated karstic aquifer. "Hydrogeology Journal", 14: 849-858.

Matthes L. (2008). Analysis and evaluation of groundwater and surface water quality and groundwater flow in the northern aquifer of Quintana Roo. En "Estudio geohidrológico del norte de Quintana Roo, México", Gutiérrez-Aguirre, M., Cervantes-Martínez A. (eds). 67-107. Universidad de Quintana Roo. México.

Medina-Gómez I. J., Herrera-Silveira J. A. (2003). Spatial characterization of water quality in a karstic coastal lagoon without anthropogenic disturbance: a multivariate approach. "Estuarine Coastal and Shelf Science", 58: 455-465.

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. Vol. 13, No. 2: 509-516.

Milanovic P.T. (1981) "Karst hydrogeology", Water Resources Publishing, Fort Collins, Colorado USA.

Mohammadi Z., Raeisi E., Zare M. 2007. A dye-tracing test as an aid to studying karst development at an artesian limestone sub-aquifer: Zagros Zone, Iran. "Environmental Geology", 52:587-594.

Moore Y. H., Stoessell, R. K., Easley D. H. (1993). Reply to discussion of "Fresh-Water/Sea-Water Relationship Within a Ground-Water Flow System, Northeastern Coast of the Yucatan Peninsula, "Ground Water", 3(31), 321-322.

Pech-Domínguez C. J. (2009). "Análisis de la clorofila a durante un ciclo anual en sistemas acuáticos de Cozumel como un indicador del estado trófico del agua (2007-2008)". Tesis de licenciatura, Universidad de Quintana Roo, México.

Schmitter-Soto J. J., Comín F. A., Escobar-Briones E. Herrera-Silveira J., Alcocer J., Suárez-Morales E., Elías-Gutiérrez E., 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.

Seiler K. P., Behrens H. (1992) Groundwater in carbonate rocks of the upper Jurassic in the Frankonian Alb and its susceptibility to contaminants. En "Tracer hydrology" Hotzl, Werner (eds), 259-266 Balkema, Rotterdam, Holanda.

Steinich B., Marín L. E. (1997). Determination of flow characteristics in the aquifer of the Northwestern Peninsula of Yucatan, Mexico. "Journal of Hydrobiology" 191: 315-331.

Stevanovic Z. P., Dragisic V.S. (1992) The directions of circulation of karst groundwaters in the Carpatho-Balkanides, Serbia. En: "Tracer hydrology", Hotzl, Werner (eds), 291-294. Balkema, Rotterdam, Holanda.

Socki R. A., Perry Jr., E. C., Romanek C. S. (2002). Stable isotope systematics of two cenotes from the northern Yucatan Peninsula, Mexico. "Limnology and Oceanography", 47: 1808-1818.

Valle-Levinson A., Mariño-Tapia I., Enriquez C., Waterhouse A.F. (2011). Tidal variability of salinity and velocity fields related to intense point source submarine groundwater discharges into the coastal ocean. "Limnology and Oceanography", 56(4): 1213-1224.

Vera-Manrique I., Mariño-Tapia I., Enriquez C. (2012). Effects of drought and subtidal sea-level variability on salt intrusion in a coastal karst aquifer. "Marine and Freshwater Research", 63(6) 485-493.

Zhengxing M. (1988) An outline of the underground water tracing in karst regions of China. En: Proc IAH Congr Karst Hydrol Karst Environ Protection, Guilin, 894–901. China.

Este documento debe citarse como: Sánchez y Pinto I., Cervantes-Martínez A., González Herrera R. A., Vázquez Campos M. E., Gutiérrez-Aguirre M. A. (2015). **Evidencia de flujo preferencial al mar del cenote Caletita, Cozumel, México.** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 19-1, pp 1-12, ISSN 1665-529-X.