

Dispersividad de solutos en el carst de Yucatán, México

Eduardo Graniel-Castro¹, Joel Carrillo-Rivera² y Antonio Cardona Benavides³

RESUMEN

La dispersividad longitudinal (α_L) y la dispersividad transversal (α_T) permiten conocer la distribución de los solutos en el subsuelo. Para determinarlas se utilizó un sistema de columna en el laboratorio y pruebas de inyección de trazadores en el campo. En el laboratorio se trabajó con 17 muestras de roca, correspondiendo éstas a la zona no saturada. Los resultados de la dispersividad longitudinal variaron entre 0.50 y 5.40 cm, y de la dispersividad transversal variaron entre 0.060 y 1.10 cm. Se realizaron cuatro pruebas de inyección de trazador (NaCl) en la zona saturada del subsuelo. Los valores indican que los conductos de disolución y las pequeñas fracturas tienen una influencia en el comportamiento de los solutos, variando en dos ordenes de magnitud los resultados. El movimiento de flujo y el transporte de solutos se presentan principalmente en los conductos de disolución, por lo que las pruebas de trazado son difíciles de realizar; por lo que se sugiere utilizar el Método de Dilución y aplicar el Método Unidimensional, como una alternativa para determinar la dispersividad en el carst de Yucatán, México.

Palabras Clave: Dispersividad, cárst, trazadores, conductos de disolución, solutos, Yucatán.

ABSTRACT

The longitudinal dispersivity (α_L) and the transverse dispersivity (α_T) permit to know the distribution of the solutes in the subsoil. To determine them was used a column system in the laboratory and tests of tracers injection in the field. In the laboratory was worked with 17 core of rock of the unsaturated zone. The results of the longitudinal dispersivity varied between 0.50 and 5.40 cm, and of the transverse dispersivity varied between 0.060 and 1.10 cm. They were accomplished four tests of tracer injection (NaCl) in the saturated zone of the subsoil. The values indicate that the dissolution conduits and the small fractures have an influence on the behavior of the solutes, varying in two order of magnitude the results. The flow movement and transportation of solutes are presented mainly in the dissolution conduits, therefore the tracing tests are difficult to accomplishing; therefore it is suggested to use the Dilution Method and to apply the Unidimensional Method, as an alternative to determine the dispersivities in the carst of Yucatan, Mexico.

Key Words: Dispersivity, carst, tracers, dissolution conduits, solutes, Yucatan.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo se realizó en la ciudad de Mérida, Yucatán, México, la cuál cubre una extensión de 158 km² y encuentra ubicada en la porción noroeste del estado de Yucatán entre los paralelos 21° 00' y 20° 30' de latitud norte, y los meridianos 89° 30' y 89° 45' de longitud oeste (Figura 1).

El clima en la zona de estudio es tropical húmedo, con una precipitación media anual de 1,000 mm y una temperatura promedio de 27 °C.

El área es muy característica por su topografía plana y por su subsuelo de tipo cárstico, el cual permite la infiltración rápida del agua de lluvia, formándose así conductos de disolución, cavernas y cenotes (SARH, 1989 y Velásquez, 1986).

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Apto. Postal 150 Cordemex, Mérida, Yucatán, México

² Instituto de Geografía, UNAM, Circuito Exterior Ciudad Universitaria, México D.F. C.P. 04510

³ *Facultad de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.*

Geológicamente está constituido por rocas calcáreas del Pleistoceno-Holoceno, que incluyen calizas coquinoidales, calizas arcillosas, calizas microcristalinas, areniscas y lutitas (Butterlin y Bonet, 1960; Bonet y Butterlin, 1962 y López-Ramos 1979).

Las calizas coquiníferas alcanzan un espesor máximo de 50 m y sobreyacen a las calizas fosilíferas de la Formación Carrillo Puerto; subyaciendo a esta formación, existen calizas compactas y areniscas del Oligoceno (Aguilar, 1990 y Back, 1975).

El escurrimiento superficial está ausente debido a una extensa carstificación, así mismo existe una carencia de suelo (Lesser y Weidie, 1988).

El agua subterránea se encuentra en una matriz calcárea con intercalaciones de material arcilloso, yeso o anhidrita y está libre; el flujo subterráneo tiene lugar principalmente en los poros, fracturas y cavidades de disolución, su dirección preferencial de flujo es hacia el noroeste, con un gradiente hidráulico del orden de 7-10 mm/km (Marín, 1990). La conductividad hidráulica de la matriz porosa medida en núcleos oscila en un rango de 0.3-1.2 m/d (Buckley *et al.*, 1994).

Las condiciones hidrogeológicas particulares de la zona ocasionan que la carga hidráulica del agua subterránea sea del orden de 1.0-1.2 *msnm*. Por lo que el agua dulce debajo de la ciudad tiene menos de 40 m de espesor, la zona de mezcla salobre comienza casi a los 45 m debajo del nivel de superficie, encontrándose el agua salada a los 60 m (Villasuso *et al.*, 1988).

Por lo tanto, las características típicas de disolución en terrenos cársticos bien desarrollados y la alta porosidad primaria de la mayoría de la matriz caliza, ha producido un acuífero muy productivo con pozos de 40 m de profundidad, los cuales muestran una capacidad específica frecuentemente mayor de 10 l/s/m (Graniel *et al.*, 1999). La poca profundidad al nivel freático (7 u 8 m), la casi ausencia de suelo y la existencia de un acuífero cárstico libre, han ocasionado que los recursos de agua subterránea en Yucatán, sean muy vulnerables a la contaminación.

La calidad antes que el volumen del agua subterránea es una limitante en el aprovechamiento de este recurso en el carst de Yucatán, debido a que no existe drenaje sanitario y pluvial. Por lo que el principal problema que se tiene en las entidades, es el entender el flujo de agua subterránea y el transporte de los solutos en el subsuelo cárstico, debido a la existencia de fisuras, fracturas y conductos de

disolución que permiten el libre paso de los solutos al acuífero.

La dispersividad longitudinal (α_L) y la dispersividad transversal (α_T) permiten conocer la distribución horizontal de los solutos en el medio geológico, para así entender el comportamiento del acuífero. El objetivo de este trabajo es la determinación de la dispersividad longitudinal y la dispersividad transversal en el carst de Mérida, Yucatán, México, para lo cual se utilizó un sistema de columna para las rocas de la zona no saturada y pruebas de inyección de trazador en el campo para la zona saturada.

METODOLOGIA

En el laboratorio se analizaron 17 muestras de roca de la zona no-saturada de tres sitios de Mérida, Yucatán (Santa Gertrudis, MAPSA y TRISAR) (Figura 2). Los núcleos no tuvieron las mismas dimensiones debido a que algunas muestras son un poco deleznable; posteriormente se implementó el modelo de columna de acuerdo a las características reportadas por (Robbins, 1989; Cêncûr *et al.*, 1997 y Bales, 1999) y se utilizó cloruro de sodio como trazador. La interpretación de los datos se realizó por el Método Gráfico Lineal (Jiao, 1993), que esta basado en que primeramente se grafican los valores de C y t, posteriormente se lee el t_m (tiempo máximo) y C_m (concentración máxima) de la curva.

Seguidamente se divide la curva en dos secciones de acuerdo al punto C_m , donde la línea A representa los puntos de la curva a la izquierda de C_m y la línea B representa los puntos a la derecha de C_m ; luego se calcula X e Y usando las ecuaciones:

$$X = (t - t_m)^2 / t \quad (1)$$

$$Y = \ln(C_m t_m / Ct) + (t - t_m) / t \quad (2)$$

ó también se puede utilizar

$$D_L = \alpha_L \mu \quad (3)$$

$$D_T = \alpha_T \mu \quad (4)$$

Después se calcula

$$D_L = \frac{x^2}{4t_m (Kt_m + 1)} \quad (5)$$

$$u = 2(D_L K)^{0.5} \quad (6)$$

donde:

C = concentración del trazador en (x, y) y en el tiempo t (ML⁻³)

D_L y D_T = coeficientes dispersivo longitudinal y transversal (L²/T) respectivamente

u = velocidad de flujo (L/T)

t = tiempo (T)

K = pendiente de la recta

En el campo se realizaron tres pruebas de inyección de trazador (Acuaparque, Las Margaritas y Juan Pablo II) (Figura 2); en las que se utilizó como trazador el cloruro de sodio (NaCl, sal común), por ser una substancia conservativa, no daña el ambiente, fácil determinación (conductividad eléctrica) y bajo costo; en cada prueba se mezcló 450 lts de agua con 5 kgs de sal, inyectándose la solución en forma instantánea seguida de una homogeneización manual en los pozos; antes y después de la inyección de la solución se realizaron registros de conductividad eléctrica con una sonda Hydrolab a tiempos establecidos en el pozo de inyección y en el pozo de observación.

Con los datos de la conductividad eléctrica del pozo de inyección, se aplicó el método de punto de dilución (Drost *et al.*, 1968) para calcular la velocidad de flujo, el cual fue aplicado en la costa noroeste de la Península de Yucatán por Moore *et al.*, (1992):

Donde “r” representa el radio del pozo de observación, “f” es una corrección empírica de la influencia del pozo al flujo de agua subterránea, “c” es la conductividad a un tiempo “t”, c^o es la conductividad a “t” igual a cero después de la inyección y “c*” es el nivel de fondo del agua antes de la inyección.

$$v = -(\pi r f / 2t) \ln[(c - c^*) / c^o - c^*] \quad (7)$$

La dispersividad longitudinal se determinó basándose en el método de Huang (1991), en el cual solo se cambia el signo de la ecuación original de la velocidad, debido a que el cálculo se realiza originalmente de mayor a menor concentración (parte derecha de la gráfica). A cada prueba se le realizó el mismo procedimiento para obtener los parámetros

planteados en este trabajo; a continuación se presentan las ecuaciones utilizadas en este trabajo.

$$U2 = \frac{t1t2}{t1 - t2} \ln \frac{(C1 - Co)\sqrt{t1}}{(C2 - Co)\sqrt{t2}} \quad (8)$$

$$U3 = \frac{t1t3}{t1 - t3} \ln \frac{(C1 - Co)\sqrt{t1}}{(C3 - Co)\sqrt{t3}} \quad (9)$$

$$D = \frac{x^2 - t1t2V^2}{4U2} \quad (10)$$

$$V = -\sqrt{\frac{U2 - U3}{t1(U2t3 - U3t2)}} \cdot x \quad (11)$$

$$\alpha_L = D / V \quad (12)$$

En los lugares donde se recuperó el trazador y se realizó la curva de recuperación, se utilizó el método desarrollado por Zou y Parr en 1994, para calcular la dispersividad y así comprobar los resultados obtenidos por el método de Huang (1991).

RESULTADOS

En la Tabla 1 se presenta un ejemplo del procedimiento realizado para obtener la dispersividad de acuerdo al método de Jiao (1993).

La dispersividad longitudinal obtenida en el laboratorio varió entre 0.50 y 5.40 cm, y la dispersividad transversal entre 0.060 y 1.10 cm (Tabla 2), obteniéndose que la dispersividad transversal no depende de la variación de los valores de la dispersividad longitudinal. Resultando que la migración de los solutos es muy lenta en algunas zonas, propiciando así que se dispersen en un área mayor; aunque en otras zonas los valores encontrados suponen que el soluto no presenta una gran dispersión, por lo que llegan casi de manera directa al acuífero.

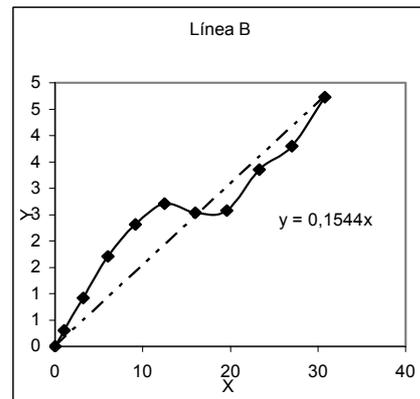
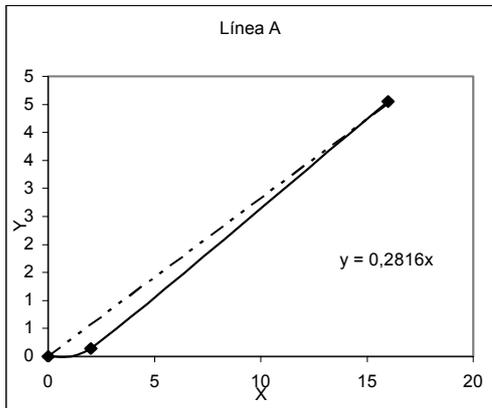
Se observa de los datos que la roca cercana al nivel freático presenta una mayor disolución, originando así que el valor de la dispersividad sea más grande en esa zona que la del material situado sobre ella. Determinándose así que las dispersividades de la zona no saturada están influenciadas por la presencia de conductos de disolución y pequeñas fracturas presentes en el núcleo, lo que en ocasiones facilita el movimiento del agua a través de ella pero

que no asegura que la dispersividad sea pequeña, ya que de manera general se ha manejado que a mayor conductividad menor dispersividad. Existen en las rocas poros o conductos de disolución sin salida que permiten que el trazador se disperse aún cuando la muestra reporte conductividad alta.

Con los datos obtenidos en los pozos de observación se realizó la curva de recuperación del trazador (Figura 3).

Tabla 1.- Resultados de los coeficientes de dispersividad para la muestra SGC2

Tiempo(mir	Conc.(□S/cm	X= (t -tm)^2	A = Ln(Cm tm/C	B = (t -tm)/	Y= A + B	Constantes
4	3,2	16,0	6,558	-2,000	4,6	tm= 12
8	590,8	2,0	0,646	-0,500	0,1	Cm= 751,8
12	751,8	0,0	0,000	0,000	0,0	Ka= 0,282
16	536,8	1,0	0,049	0,250	0,3	Kb= 0,154
20	268,8	3,2	0,518	0,400	0,9	Lc(cm)8,1
24	112,8	6,0	1,204	0,500	1,7	x' (cm)3
28	56,6	9,1	1,739	0,571	2,3	y' (cm) 3,4
32	35,3	12,5	2,078	0,625	2,7	
36	38,6	16,0	1,871	0,667	2,5	
40	34,5	19,6	1,878	0,700	2,6	
44	14,9	23,3	2,622	0,727	3,3	
48	8,9	27,0	3,050	0,750	3,8	
52	3,3	30,8	3,962	0,769	4,7	



Cálculo de la dispersividad longitudinal y la dispersividad transversal:

	Línea A	Línea B	Promedios
DL =	0,3121 cm ² /min	0,4791 cm ² /min	0,3956 cm ² /min
DT=			0,0809 cm ² /min
U =	0,5929 cm/min	0,5440 cm/min	0,5685 cm/min

□L=	0,69597 cm
□T=	0,14234 cm

Tabla 2.- Valores de dispersividad en los núcleos de roca

Profundidad (mts)	Sitio SGC		Sitio TRISAR		Sitio MAPSA	
	α_L (cm)	α_T (cm)	α_L (cm)	α_T (cm)	α_L (cm)	α_T (cm)
1.8	2.0536	0.1696	0.5338	0.0946	0.5790	0.1644
2-3	0.6960	0.1423	1.3945	0.1429	2.0261	0.4291
3-4	1.1693	0.2624	1.1005	0.1401	4.9012	0.1825
4-5	0.7958	0.0650	3.4746	0.2567	1.4153	0.2796
5-6	1.1632	0.2983	5.3884	1.0938	2.3486	0.3611
6-7			1.6361	0.4741	1.0973	0.2112

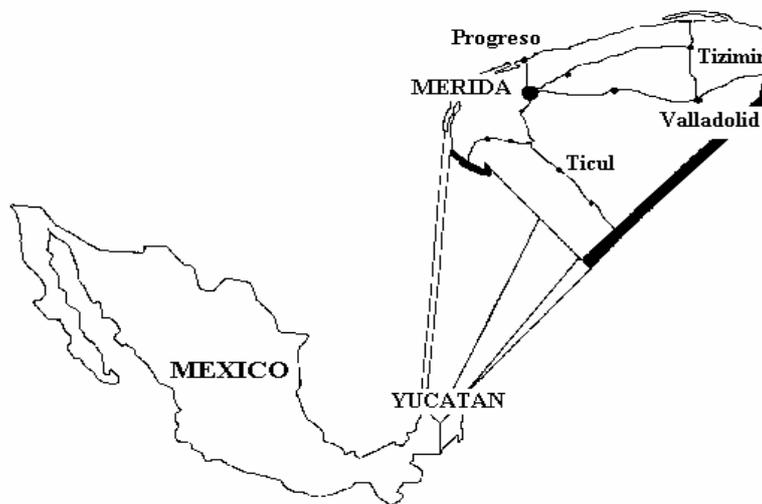


Figura 1.- Localización de Mérida, Yucatán

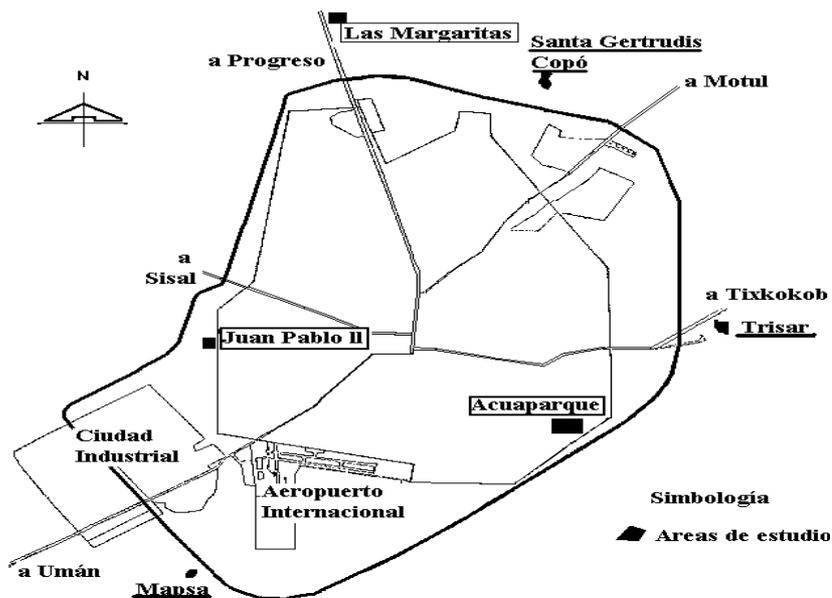


Figura 2.- Localización zonas de estudios

Tabla 3.- Resultados de las pruebas de inyección de trazador en Mérida, Yucatán, México

Lugar	Velocidad (cm/s)	Dispersión (cm ² /s)	Dispersividad (cm)
Acuaparque (Inyección)	0.004	0.01	3.5
Las Margaritas (Observación) (3.5 m)	0.097	2.88	29.75
Las Margaritas (Inyección) (20.32 cm)	0.017	0.03	1.87
Juan Pablo II (Observación) (8.20 m)	0.239	35.57	149.09
Juan Pablo II (Inyección) (30.48 cm)	0.02	0.1088	5.25

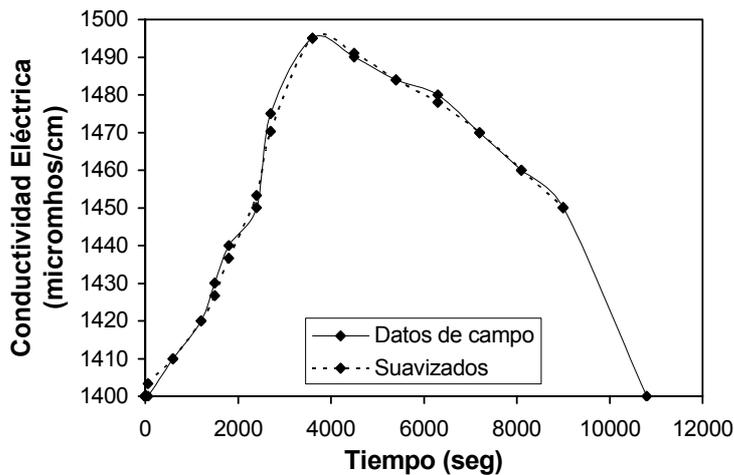


Figura 3.- Curva de recuperación en Las Margaritas

En la Tabla 3 se presentan los valores obtenidos en las tres pruebas de inyección. Los resultados de las pruebas indican que estos parámetros están influenciados por la presencia de conductos de disolución y pequeñas fracturas presentes en el subsuelo, y que la variación entre las zonas que no tienen conductos y las que sí presentan es de un orden de magnitud

Las dispersividades obtenidas en los pozos de inyección por el método de unidimensional, se les aplica una regla de tres y se obtienen valores aproximados a los valores obtenidos por el método de Zou y Parr.

Los valores determinados en campo para la dispersividad longitudinal variaron de 2 a 150 cm, los valores más pequeños se obtuvieron cuando la distancia entre el pozo de inyección y el pozo de observación es más pequeña y los valores se incrementaron de acuerdo al incremento en la distancia de separación entre los pozos. Dicho comportamiento puede ser debido a los cambios de

material y a que el flujo se realiza principalmente por los conductos, los cuales aunque favorecen el desplazamiento del contaminante no significa que este sea un flujo rápido; por tal motivo, la propagación del trazador en estas zonas es de comportamiento de tipo de flujo pistón (Seiler *et al.*, 1989).

CONCLUSIONES

El carst de Yucatán se ha desarrollado principalmente en la zona saturada, donde existen conductos de disolución, por efecto del agua sobre la caliza. El mecanismo de transporte de solutos denominado dispersión longitudinal ocurre rápidamente en aquellas zonas donde existen conductos de disolución, oquedades o fracturas; por ello resulta necesario y primordial entender dicho proceso, para evitar que las fuentes de abastecimiento se contaminen.

La dispersividad longitudinal depende en alto grado de la velocidad del flujo en los conductos de disolución o cavidades y de la apertura de los poros.

La roca localizada cerca del nivel freático presenta una mayor disolución, originando así que el valor de la dispersividad sea más grande en esa zona que la del material situado sobre ella.

La dispersividad longitudinal determinada en las pruebas de columna son en menor grado un índice de los valores que se puede encontrar *in situ* en los materiales geológico. La diferencia entre los valores encontrados en el laboratorio y los determinados en campo, son de dos ordenes de magnitud y se debe a la heterogeneidad del medio cárstico, el cuál produce un flujo macroscópico heterogéneo.

Las pruebas de inyección de trazador en Mérida, Yucatán, resultan muy difícil, debido al gradiente hidráulico muy pequeño y a los esfuerzos hidráulicos a la que se ve sometido por estar de bajo de la ciudad.

La dispersividad es baja en terrenos calcáreos de acuerdo a la dirección horizontal de flujo en comparación con terrenos porosos, observando que cuando la velocidad de flujo es menor, la dispersividad resulta de mayor magnitud. El incremento de la dispersividad con respecto a la distancia resulta grande y en periodos de tiempo

cortos puede ser dominado por flujo en fracturas, aún con periodos de largos el flujo puede tender a comportarse como si este fuera un medio poroso uniforme.

El carst de Yucatán tiene un comportamiento espacial y temporal de acuerdo a las características que prevalecen en el ambiente en el momento de determinarlos y deben ser considerados de acuerdo a las características y condiciones existentes para la fecha de determinación.

Este trabajo es una alternativa ante la situación que se presentan en los terrenos calcáreos debido a la falta de recuperación de trazador en las pruebas de inyección; mediante la aplicación del Método de Dilución desarrollado por Drost en 1968 y aplicando el Método Unidimensional propuesto por Huang, en 1991.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) el apoyo para realizar este trabajo (proyecto 3078-PT) y a cada una de las personas que de una u otra manera contribuyeron.

REFERENCIAS

- Aguilar L. (1990). Hidrogeology of the Yucatán Península. *Groundwater. Resource Development. Earth* 654, 50.
- Back W. (1975). Hydrogeology of the Yucatan, in: *Geology and hydrogeology of the Yucatan and Quaternary geology of northeastern Yucatan Peninsula*, (eds.) *New Orleans Geological Society*, New Orleans, 99-123.
- Bales R. (1999). Transport of hydrophobics organic contaminants in the vadose zone. http://www.pharm.arizona.edu/centers/fox_center/superfund/people/bales.html.
- Bonet F. y Butterlin J. (1962). Stratigraphy of the northern part of the Yucatan Peninsula. *New Orleans Geological Society*, New Orleans, 52-57.
- Buckley D.K., D.M.J. Macdonald, M. Villaso, E. Grael, J. Vasquez y M. Jiménez. (1994). Geophysical logging of a karstic limestone aquifer for hydrogeological purposes at Merida Yucatan. México, *Reporte Técnico. British Geological Survey*, 40 p.
- Butterlin J. y Bonet F., (1960). Información básica para la interpretación geohidrológica de la Península de Yucatán, *Secretaría de Recursos Hidráulicos*, México D.F 28 p.
- Cêncûr C.B., Obal M., Veselic M. y Kogovsek J. (1997). Laboratory tracer experiments in carbonate porous media from Slovenia, *Tracer Hydrology*. Kranjc A. Balkema/Rotterdam, Netherlands, 19-25.
- Drost W.D., Klotz A. Koch Moser, F. Neumaier y W. Ranert. (1968). Point dilution methods of investigating ground water flow by means of radioisotopes. *Resources Research*, Vol. 4, 125-146.

- Jiao J.J. (1993). Data-analyses methods for determining two-dimensional dispersive parameters. *Ground Water*, 31(1), 57-62.
- Graniel C.E., Morris. L.B. y Carrillo-Rivera. J.J. (1999), Effects of urbanization on groundwater resources of Merida, Yucatan, Mexico, *Environmental Geology*, 37 (4); 303-312.
- Huang Heqing. (1991). On a One-Dimensional Tracer Model. *Ground Water*, 29 (1), 18-20.
- Lesser J.M. y Weide A.E. (1988). Region 25, Yucatan Peninsula. *The Geology of North America*, v.0-2, *Hydrogeology*. Geological Society of America, 237-241.
- López-Ramos E. (1979). Geología de México, Tomo III. Edición escolar, México, 263-265.
- Marín L.E. (1990). Field investigations and numerical simulation of groundwater flow in the karstic aquifer of Northwestern Yucatan, Mexico. PhD. Dissert., Northern Illinois University, EEUU.
- Robbins A.G. (1989). Methods for determining transverse dispersion coefficients of porous media in laboratory column experiments. *Water Resources Research*, 25(6), 1249-1258.
- SARH (1989). Sinopsis Geohidrológicas del Estado de Yucatán. Subsecretaria de Infraestructura Hidráulica. Dirección General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos. México. D.F., pp 50.
- Seiler KP., P. Maloszeewski y H. Behrens. (1989). Hydrodydamy Dispersion in Karstified Limestones and Dolomites in the Upper Jurassic of the Franconian Alb, F.R.G. *Journal of Hydrology*. Printed in the Nertherlands. Vol. 1008, 235-247.
- Velázquez A.L. (1986). Aplicación de Principios Geoquímicos en la Hidrología Kárstica de la Península de Yucatán. *Ingeniería Hidráulica en México*, 21-29.
- Villasuso M., González R., Sánchez I. y Frías J., (1988). Alteración de la interfase salina por pruebas de inyección en Yucatán, *Revista de Agua Potable*, México DF, México. 16-21.
- Zou S. y Parr A. (1994). Two Dimensional Dispersivity Estimation Using Tracer Experiment Data. *Ground Water*, 32(3), 367-373.