



# Contaminación del agua subterránea en la península de Yucatán, México

Dr. Javier Alcocer Durand<sup>1</sup>, M. en C. Alfonso Lugo Vázquez<sup>1</sup>, Biól. Malinali Sánchez Reyes<sup>2</sup>, Dra. Elva Escobar Briones<sup>2</sup>

## Introducción

La contaminación de las aguas subterráneas es un grave problema ambiental que difícilmente es remediable. Su ubicación en el subsuelo las mantiene protegidas de la contaminación inmediata; sin embargo, una vez que ésta ha ocurrido es muy costoso y laborioso lograr su limpieza debido a la inaccesibilidad de muchos de los acuíferos; además, si el agente contaminante se ha incorporado al flujo subterráneo es complicado conocer su movimiento y evolución, así como detenerlo para que no llegue a los pozos en explotación. En muchos casos es imposible eliminarlo o extraerlo de la formación permeable.

Una gran variedad de contaminantes han sido introducidos al ambiente subterráneo, alterando su calidad. En general, esta transformación puede provocarse por:

1. Introducción de sustancias químicas —orgánicas e inorgánicas—, metales pesados y microorganismos producidos por la actividad humana, y
2. Cambios en los esquemas normales de circulación, ya sea por la sobreexplotación de algún pozo o bien por las características hidrogeológicas propias del acuífero.

<sup>1</sup> Laboratorio de Limnología, Proyecto de Conservación y Mejoramiento del Ambiente, UIICSE, UNAM Campus Iztacala. Av. de los Barrios s/n, Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla 54090, Estado de México, México. Tel. 623.1296 y 92 Fax. 390.5900 correo electrónico: jalcocer@servidor.unam.mx.

<sup>2</sup> Laboratorio de Ecología del Bentos, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Apdo. Postal 70-305, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D.F. México.

Son dos los elementos básicos que afectan el transporte de los contaminantes en el subsuelo: el primero, está constituido por las características del medio hidrogeológico y el segundo, se refiere a la naturaleza de la carga contaminante en cuanto a sus propiedades fisicoquímicas y biológicas, siendo éstas influenciadas de acuerdo a si el contaminante es o no conservativo.

Los conservativos viajan sin modificación a través del subsuelo, en cambio los no conservativos se ven afectados durante su transporte por procesos abióticos y bióticos. Los primeros son los que causan interacción entre el contaminante y el material del subsuelo (p.ej. adsorción e intercambio iónico), o afectando la forma del contaminante (p.ej. hidrólisis y reacciones de óxido-reducción). Los procesos bióticos se refieren a la mineralización de contaminantes orgánicos o bien a la utilización del contaminante en procesos metabólicos (p.ej. nutrimentos y nitratos en condiciones de desnitrificación).

Es ampliamente reconocida la gran importancia que tienen tanto un adecuado suministro de agua potable como un eficiente sistema de disposición de aguas residuales para que una ciudad pueda desarrollarse de manera óptima. Dentro de este contexto, en México la demanda de agua de "buena calidad" se ha satisfecho general-



Ambiente selvático no alterado.

mente a través de la explotación de las aguas subterráneas. Por esta razón, es importante conocer la distribución, flujo y riesgos de contaminación de este recurso, amenazado desde hace algunas décadas por el acelerado proceso de urbanización que sufren varias ciudades de nuestro país.

Este es el caso de la península de Yucatán, cuyo desarrollo se ha incrementado mucho en los últimos 30 años (p.ej. crecimiento del corredor turístico Cancún-Tulum) y con ello los problemas de abastecimiento y contaminación del agua. Son dos las metas que se deben establecer para un manejo adecuado del agua subterránea de la Península:

1. Desarrollar abastecimientos regionales de agua subterránea para la creciente demanda de una población en expansión, así como por el aumento del turismo de la zona, y
2. Controlar la contaminación del agua subterránea en toda la región.

Con base en lo anterior, los objetivos del presente trabajo son identificar los problemas de contaminación del agua subterránea de la península de Yucatán, así como considerar las posibles opciones para un manejo óptimo del recurso.

## Antecedentes

La península de Yucatán, localizada en el sureste de México, se compone por los estados de Yucatán, Quintana Roo y parte de Campeche. Toda la región es una plataforma formada por rocas calcáreas y evaporitas. En el interior, las rocas calcáreas están en un intervalo de edad que abarca desde el Mioceno hasta el Eoceno, mientras que los depósitos cercanos a las costas provienen principalmente del Pleistoceno y Holoceno. La parte norte de la Península es un terreno extremadamente plano, y sólo en la parte sur de Yucatán, se eleva gradualmente, formando una superficie montañosa de unos 130 m de altitud, siendo la elevación más importante la Sierrita de Ticul, que delimita a Yucatán con Campeche.

La mayor parte de la península de Yucatán se caracteriza por ser una superficie cárstica. Este término se refiere a todos aquellos fenómenos que se desarrollan por el paso o percolación de agua rica en  $\text{CO}_2$  a través de rocas solubles, en especial las calizas. Los resultados de la carstificación son la formación escasa de suelos (ya que las calizas al disolverse, prácticamente no dejan residuos) y la ausencia de corrientes superficiales (ya que casi toda el agua que llueve se infiltra debido a la elevada permeabilidad de las calizas). Esto aunado al bajo relieve de la zona da como resultado la formación de un acuífero cárstico regional.

Es conocido el hecho de que muchos problemas que se presentan en las regiones cársticas del mundo están relacionados directamente con la influencia de las rocas carbonatadas en el régimen hidrológico local:



- 1) En algunas zonas la permeabilidad es elevada y permite la acumulación del agua; sin embargo, en otras, por el contrario, hace que el agua viaje muy rápido fuera de la región o bien a grandes profundidades;
- 2) La escasez de corrientes superficiales conduce a que la población utilice el agua subterránea tanto para uso doméstico como para la disposición de sus desechos;
- 3) Filtración del agua de reservorios artificiales (presas) y
- 4) Disposición de desechos en el terreno poco confiable, debido a que pueden infiltrarse contaminando los abastecimientos de agua subterránea.

La ciudad más importante de la Península es Mérida. Actualmente, cuenta con una población de 535,000 habitantes. Por problemas y obstáculos técnicos que no permiten la instalación de cañerías, el subsuelo recibe tanto escurrimientos superficiales como agua residual. La única fuente de agua potable disponible para la ciudad es el acuífero cárstico presente por debajo de la misma, el cual se muestra altamente vulnerable a la contaminación.

El acuífero es costero y presenta elevada permeabilidad, un gradiente hidráulico\* muy bajo y el nivel freático se encuentra ligeramente por arriba del marino. Se compone de un lente delgado de agua dulce que flota sobre una capa salina más densa y

penetra hasta 40 kilómetros tierra adentro de la costa, el cual se ve amenazado por diferentes vías: en la superficie, por los contaminantes que se vierten —todos los desechos de la ciudad de Mérida viajan al acuífero sin tratamiento previo— y por debajo, la intrusión salina que disminuye la calidad del agua. Se ha calculado que el espesor del lente de agua dulce es de 15 m cerca de la costa, de 45 m en Mérida y de 120 m a 90 km de la costa. De este hecho se deduce que la "calidad del agua" en la Península depende en gran medida de su localización espacial.

Los únicos cuerpos acuáticos naturales presentes son los originados por la disolución máxima de la caliza, que determina el hundimiento lento de toda la zona afectada, dando lugar a las llamadas dolinas, que en el lenguaje local son denominadas "cenotes" (del maya tzonotl). La civilización Maya se desarrolló cerca de estas fuentes de agua y de cuevas o aguadas; estas últimas son depresiones del terreno que permiten que el agua se acumule en época de lluvias. Muchas de ellas fueron construidas por los mayas colocando rocas alrededor de las depresiones, cubriendo el fondo con piedras delgadas y obturando los intersticios con arcilla. Estos cuerpos acuáticos, al igual que el agua subterránea, están expuestos a la contaminación; sin embargo, su riesgo llega a ser mayor ya que el contaminante no viaja por el subsuelo sufriendo transformaciones o dilución, sino que es vertido directamente en el cuerpo acuático, afectando a los organismos que ahí se desarrollan y originando problemas de eutrofización.\*\*

\* Diferencia de altura que se presenta entre el nivel del manto freático -agua subterránea- y el nivel medio del mar. Entre mayor sea la diferencia de alturas, mayor será el gradiente hidráulico y, por lo tanto, mayor la velocidad con la que se desplaza el agua subterránea hacia el mar. En la península de Yucatán la diferencia de alturas, en especial cerca de la costa, es de sólo algunos centímetros, por lo que se presenta un gradiente hidráulico y una velocidad de flujo reducida.

\*\* Fenómeno de enriquecimiento del agua con nutrimentos (principalmente nitrógeno y fósforo) con sus correspondientes efectos, como son: crecimiento explosivo de plantas acuáticas microscópicas (algas o fitoplancton) o macroscópicas (lirio acuático). Toda esta materia orgánica generada, al morir y descomponerse, agota el oxígeno disuelto del agua trayendo consigo efectos nocivos: mortandades por asfixia de otros organismos como peces; mal olor; criaderos de mosquitos; degradación de la calidad del agua; asolvamiento acelerado de los cuerpos acuáticos; dificultad para la navegación; elevación de los costos de potabilización del agua y pérdida acelerada por evapotranspiración del agua.



De manera general, se sabe que el flujo del agua subterránea es hacia las costas. En el caso de la ciudad de Mérida se asume que es del sureste al noroeste, lo que hace que los contaminantes se disuelvan o floten en el agua en su camino a la costa norte de la Península. Sin embargo, estudios realizados por Steinich y Marín indican que, al menos en alguna época del año, el flujo del agua subterránea se revierte hacia el sureste regresando los contaminantes a esta zona. La región más afectada por este cambio de dirección es la ciudad de Mérida, la cual presenta un problema adicional pues la zona industrial de la ciudad está ubicada al sur de la misma; por lo que, si el flujo se revierte, los desechos industriales llegarían a ella.

A continuación se mencionan por apartados los principales problemas de contaminación de agua subterránea detectados en la península de Yucatán.

### Contaminación por sólidos disueltos

La calidad del agua se ve disminuida tanto para consumo humano como para uso industrial si presenta una salinidad elevada y su uso para prácticas agrícolas se ve completamente limitado si los sólidos totales disueltos exceden las 500 ppm. En la península de Yucatán, éste es un problema importante. La única fuente de agua dulce es, como se mencionó, un sistema donde el agua dulce flota sobre una capa de agua salada que se ha infiltrado al interior del continente.

Si hay una sobreexplotación de los pozos de abastecimiento para obtención de agua dulce, el nivel de la capa del agua salada se eleva, mezclándose con la dulce disminuyendo, por ende, su calidad. Este problema empeora durante la época de estío

cuando la escasa agua dulce sigue fluyendo hacia el mar, por lo que su grosor disminuye incrementándose la mezcla.

En la Península, los valores de salinidad en el agua subterránea "dulce" son elevados (desde 200 hasta 4000 mg/l); las concentraciones más elevadas se presentan en áreas donde hay una sobreexplotación de los pozos, o bien, en los pozos cercanos a las costas, donde la intrusión salina es más importante. En la ciudad de Mérida, la infiltración de cloruros desde los sistemas de saneamiento *in situ* constituye también un aporte importante de sólidos disueltos, registrándose valores de cloruros en el agua subterránea de 100-170 mg/l. Otra fuente de contaminación por cloruros la constituyen los químicos industriales, en este caso solventes clorinados detectados en bajas concentraciones en el acuífero somero. A pesar de su baja concentración, el agua somera\* debajo de la ciudad de Mérida es considerada por la Organización Mundial de la Salud como no apropiada como fuente de abastecimiento de agua potable.

\* Porción más aparente del agua subterránea que se encuentra a escasos centímetros de la superficie del terreno.



Destrucción de la selva (tala y quema).

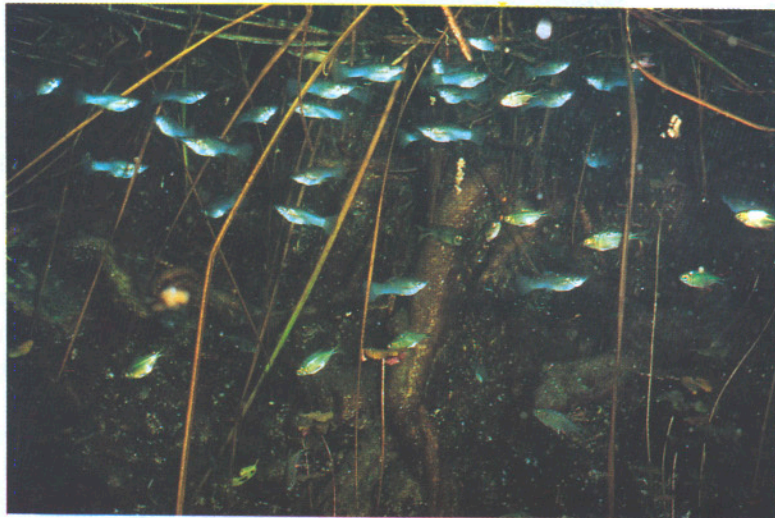
## Contaminación por patógenos

Características de la región yucateca: rápida infiltración del agua y de desechos hasta alcanzar los mantos de agua subterránea, ausencia de suelos y clima cálido, hacen muy favorable la supervivencia y el desarrollo de diversos microorganismos patógenos. Las principales fuentes de contaminación por estos agentes las constituyen desechos sólidos y líquidos provenientes de animales domésticos, así como por el fecalismo al aire libre.

La porcicultura es una actividad que se ha



Taninos lixiviados "colorean" de rojo vino los cenotes.



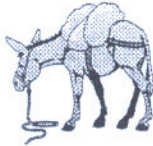
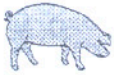
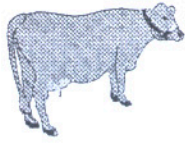
Ambiente no alterado con agua cristalina

incrementado altamente en los últimos años, sobre todo en la zona noreste del estado de Yucatán, por lo que han surgido focos de contaminación originados por el manejo inadecuado de los desechos de las granjas porcícolas. La ca-

lidad bacteriológica del agua subterránea está deteriorada representando un riesgo para la población humana que la consume. Es común encontrar cuentas de coliformes fecales de varios miles por 100 ml e incluso, se han llegado a registrar también en algunos pozos profundos, aunque a concentraciones más bajas. La zona rural de Yucatán no cuenta con un adecuado abastecimiento de agua potable, ni con servicios de saneamiento eficientes. En la mayor parte de las granjas porcícolas, el agua utilizada en las casas tanto para consumo humano como para regar cultivos y otros usos domésti-



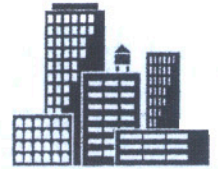
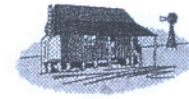
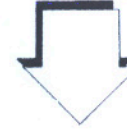
Ambiente no alterado con agua cristalina



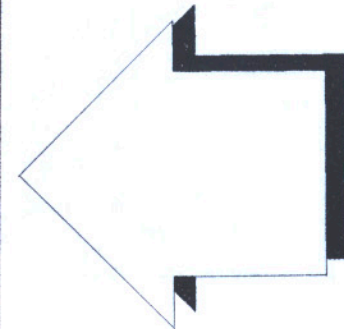
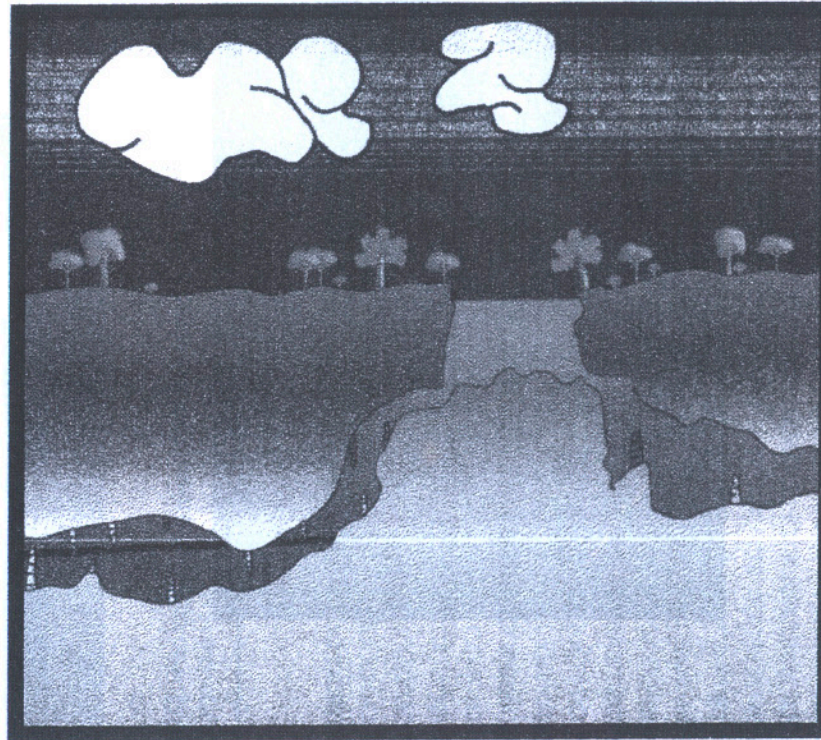
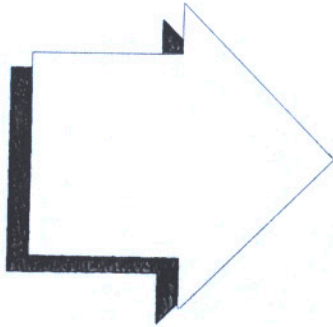
DESECHOS ORGÁNICOS  
 ANIMALES DOMÉSTICOS  
 GANADERÍA  
 PATÓGENOS  
 NO<sub>3</sub>



SOBRE-EXTRACCIÓN  
 INTRUSIÓN SALINA  
 NaCl



NO<sub>3</sub>  
 PATÓGENOS  
 CRECIMIENTO URBANO  
 DESECHOS ORGÁNICOS



NO<sub>3</sub>  
 DESECHOS ORGÁNICOS  
 FERTILIZANTES  
 TÓXICOS  
 QUÍMICOS



CONTAMINACIÓN  
 DEL AGUA  
 SUBTERRÁNEA



NO<sub>3</sub>

PLAGUICIDAS  
 FERTILIZANTES  
 AGRICULTURA  
 DESECHOS ORGÁNICOS





cos, proviene de pozos cercanos y, muchas veces, se consume sin tratamiento previo. Por lo anterior, el riesgo de adquirir enfermedades gastrointestinales es importante.

En el año de 1971 se detectó que las principales causas de muerte en el estado de Quintana Roo fueron la enteritis y otras enfermedades diarreicas. Más del 40 por ciento de las defunciones se asociaron con patógenos que pudieron haberse transmitido por el agua subterránea. Asimismo, en 1960, se detectó en la ciudad de Mérida que más del 40 por ciento de la mortalidad en niños menores de seis años se debió a patógenos transmitidos por el agua. Cabe señalar que estos valores han disminuido desde que la ciudad tiene sistemas más eficientes para la obtención del agua potable.

Tanto en estudios realizados en varios pozos de abastecimiento de Yucatán, así como en pozos cercanos a granjas porcícolas, los valores de bacterias coliformes fecales son elevados y, en muchos casos, se exceden los valores máximos permisibles.

### Contaminación por plaguicidas

La naturaleza cárstica de la península de Yucatán la hace vulnerable a que cualquier sustancia química se percole rápidamente y alcance los acuíferos, aunque hay que tomar en cuenta ciertas características fisicoquímicas del suelo, —como el pH, la cantidad de materia orgánica y el potencial redox, entre otros— que pueden alterar a la sustancia durante su transporte. Sin embargo, hay ciertos insecticidas organofosforados, como el diazinón, de vida media larga, muy soluble en agua y que no se deposita en el sedimento, por lo que es posible que se encuentre acumulado en el agua subterránea.

Entre los plaguicidas más empleados en las zonas hortícolas del estado, están los insecticidas organofosforados y carbamatos. Al-

gunos de los más utilizados son el diazinón y diversos piretroides que pueden llegar a los acuíferos. En el caso de los cenotes, el riesgo es mayor porque el agua del lavado de bombeo es vertida directamente en ellos, o bien, se contaminan por comunicación con el agua subterránea cercana que ha sufrido percolación de los plaguicidas.

Estudios realizados en 19 pozos de consumo humano del estado de Yucatán muestran la presencia de residuos de plaguicidas organofosforados, carbámicos y organoclorados.

### Contaminación por nitratos

Más del 95 por ciento del nitrógeno presente en el agua subterránea está en forma de nitratos. Principalmente en la ciudad de Mérida, en los últimos años, se ha impulsado el establecimiento de granjas porcícolas, a causa del decaimiento en la industria henequenera, lo cual ha traído diversos problemas, ya que la mayor parte de los desechos orgánicos, que contienen elevadas cantidades de materia nitrogenada, son depositados en el suelo o en cavernas, de donde contaminan en forma eventual los cuerpos de agua.

En estudios realizados en estas zonas henequeneras, los resultados de los análisis de agua tomadas directamente de pozos de consumo ubicados en casas particulares y en granjas porcícolas, varían de 24 a 162 mg  $\text{NO}_3/\text{l}$ , sobrepasando el límite permisible para las normas mexicanas, y en más de un 95 por ciento a las internacionales. Estos valores representan un riesgo para la salud por el posible desarrollo de enfermedades graves tanto en niños como en adultos (metahemoglobinemia y cáncer, entre otras).

En el agua subterránea, las fuentes de contaminación por nitratos son los sistemas de saneamiento *in situ* utilizados, por ejemplo,



en la ciudad de Mérida; se estima que todo el nitrógeno orgánico depositado en estos sistemas se oxida y alcanza el acuífero. Muchas veces estas concentraciones de nitratos no son tan elevadas debido a que éstos, al viajar por el acuífero, sufren dilución; sin embargo, si la densidad poblacional se incrementa, las concentraciones podrían llegar a ser elevadas. En las zonas rurales, el acuífero puede ser contaminado por diversos desechos domésticos ricos en materia orgánica.

Un problema adicional que se presenta es el riesgo de eutrofización de los cenotes y aguadas debido a que la superficie de la Península es rica en carbonato de calcio y retiene fuertemente el fósforo, siendo común encontrar en los cuerpos de agua concentraciones de nitratos elevadas. Por esta razón, incluso un enriquecimiento pequeño del agua subterránea con desechos, ya sean industriales, agrícolas o domésticos pueden desencadenar procesos de eutrofización.

### Flujo y recarga de las aguas subterráneas

El aumento de la población en Mérida y otras ciudades ha traído como consecuencia un aumento en la explotación de los pozos de abastecimiento, así como un incremento en la recarga urbana estimado del 600 por ciento, en comparación con la recarga no urbana, lo cual puede provocar serios problemas de contaminación. Las fuentes de recarga incluyen fugas de la red de agua potable (recarga de buena calidad), percolación de aguas residuales y domésticas del sistema sanitario *in situ* (recarga de mala calidad) y por áreas no pavimentadas (recarga contaminada por químicos industriales de gasolineras, entre otros).

Con base en esta grave problemática ambiental y el elevado riesgo de polución de

las aguas subterráneas de la Península, surge la necesidad de hacer sugerencias que eviten, o por lo menos disminuyan, el deterioro de la calidad del agua subterránea, fuente única de aprovisionamiento de agua potable para el desarrollo sustentable de la zona. Las recomendaciones son:

1. Localización espaciada de los pozos de explotación y evitar, en lo posible, la sobreexplotación de alguno de ellos, sobre todo de los cercanos a las costas.
2. Utilización del composteo para el tratamiento de los residuos sólidos municipales y evitar así que lleguen al agua subterránea sin haber llevado tratamiento previo.
3. Supervisión técnica en la aplicación de los herbicidas, para evitar —en lo posible— el exceso en su aplicación y que contaminen el agua subterránea, protegiendo además la salud de los trabajadores.
4. Tratamiento adicional del agua subterránea empleada para consumo humano conjuntamente a la cloración que ya se practica;
5. Creación de sistemas de drenaje profundo que permitan al agua residual llegar a la capa salina. Sin embargo, este sistema es muy costoso. Deberá tenerse cuidado de no permitir la mezcla de la capa de agua dulce con la salina subyacente.
6. El agua extraída de zonas urbanas, en especial de Mérida, debe ser empleada solamente para fines de riego de parques o para torres de enfriamiento.
7. Realización de más estudios acerca de la hidrogeología de la zona para un mejor manejo del recurso y prevenir la contaminación.
8. En cuanto a la contaminación generada por las explotaciones porcícolas, en realidad no hay forma de evitarla, principalmente la derivada de los nitratos debido a que el espesor del suelo en Yucatán varía desde cero





hasta varios centímetros. El segundo problema es que el nivel freático en el área de Mérida se encuentra de 8 a 12 m de profundidad. Es decir, la zona no saturada es muy pequeña. Un tercer problema es que existen muchas fracturas y conductos, por lo tanto, muchos de estos contaminantes llegan muy rápido al nivel freático. La época de lluvias es también conocida como la época de diarrea, ya que se multiplican los casos de enfermedades gastrointestinales.

La única opción viable es reubicar las granjas porcícolas. De preferencia, se deben poner fuera del "anillo de cenotes", el cual ofrece una barrera natural. Como esto realmente no es posible, la otra alternativa es reubicar estas granjas para localizarlas al norte de Mérida. De esta forma sólo se afecta a poblaciones pequeñas, pero protegería a la mayor concentración de gente de la península.

### Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al financiamiento proporcionado por la DGAPA a través del proyecto PAPIIT IN203894 "Ecología y Biodiversidad de un Sistema Anquihalino Basado en la Producción Quimioautotrófica". Los autores desean agradecer los comentarios y sugerencias aportados por el Dr. Luis E. Marín, así como Geogr. Patricia A. Beddows.

### Literatura recomendada

Back W, Hanshaw BB. Comparison of chemical hydrogeology of the carbonate Peninsulas of Florida and Yucatan. *J. Hydrol.* 1970;10: 330-368.

Back W, Lesser JM. Chemical constraints of groundwater management in the Yucatan Peninsula, Mexico. In: L.R. Beard editors. *Water for Survival. J Hydrol.* 1981;51:119-130.

Back W, Hanshaw BB, Herman JS, Van Driel JN. Differential dissolution of a Pleistocene reef in the groundwater mixing zone of coastal Yucatan, Mexico. *Geology.* 1986;14: 137-140.

Doehring DO, Butler JH. Hydrogeologic constraints on Yucatan's development. *Science.* 1974;186 (4164): 591-595.

Herrera-Silveira J. Nutrients from underground water discharges in a coastal lagoon (Celestun, Yucatan, Mexico). *Verh Internat Verein Limnol.* 1994;25:1398-1401.

Hall FG. Physical and chemical survey of cenotes of Yucatan. *Carnegie Inst Wash Publ.* 1936;457:5-16.

Knox RC, Sabatini DA. Transport and remediation of subsurface contaminants. In: Sabatini DA y RC Knox editors. *Transport and remediation of subsurface contaminants. Colloidal, Interfacial and Surfactant Phenomena.* 1992; p.252.

LeGrand HE. Hydrological and ecological problems of karst regions. *Science.* 1973;179(4076):859-864.

Llopis N. Fundamentos de hidrogeología cástica (introducción a la geoespeleología). Madrid: Blume, 1970.

Marín LE, Perry EC. The hydrogeology and contamination potential of northwestern Yucatan, Mexico. *Geofísica Internacional.* 1994;33(4):619-623.

Pacheco JG, Cabrera A. Variabilidad espacial de la calidad del agua subterránea del estado de Yucatán. *Boletín Académico FIUDAY.* 1995;28:11-21.

Steinich B, Marín LE. Determination of flow characteristics in the aquifer of the northwestern Peninsula of Yucatan, Mexico. *J Hydrol.* en prensa.