

# Aplicación de principios geoquímicos en la hidrología kárstica de la península de Yucatán

Luis Velázquez Aguirre

Dirección General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos, SARH.

*Se aplicaron varios principios geoquímicos con objeto de diferenciar y caracterizar dos sistemas acuíferos, considerados para fines hidrogeológicos, como la asociación de varias provincias geológicas en la península de Yucatán. Las provincias geomórficas del norte y oriente integran un acuífero en los depósitos calcáreos de edad del Mioceno reciente, caracterizados geoquímicamente por la mezcla de agua de infiltración reciente con agua salada más antigua y, hacia las costas, con agua de mar. Las calizas y evaporitas del Paleoceno-Eoceno de la porción sur de la península integran un acuífero que se caracteriza por el proceso de disolución a lo largo de la trayectoria de flujo y por el enriquecimiento salino, producido por la presencia de depósitos altamente solubles. El índice de saturación de dolomita ( $SI_d$ ) presentó una amplia gama de valores que permitió identificar las áreas de recarga y descarga; la concentración iónica ayudó a diferenciar los acuíferos. Se aplicó un modelo esquemático de evolución geoquímica propuesto por Back y Hanshaw (1979) para sistemas kársticos que, junto con las relaciones iónicas, ayudó a identificar las trayectorias de reacción y el carácter geoquímico de los acuíferos.*

## Marco geológico

La península de Yucatán, cubierta casi en su totalidad de sedimentos marinos calcáreos de la edad Terciaria, es una plataforma considerada a menudo tectónicamente estable; sin embargo, durante la era Cenozoica se originaron plegamientos y fallas que provocaron un sinnúmero de estructuras que han influido en el desarrollo de su morfología actual (Isphording, 1975).

Las rocas más antiguas que afloran son las calizas y evaporitas del Paleoceno (Butterlein y Bonet, 1960), ubicadas hacia la porción sur; están rodeadas por depósitos calcáreos más recientes, de edades que oscilan entre el Oligoceno y el Reciente. Los principales ejes estructurales presentan una orientación ONO-ESE y NNE-SSO, y se asocian con la Sierrita de Ticul y el Sistema Bacalar-Río Hondo, respectivamente. En el plano geológico (véase ilustración 1), se presenta la distribución superficial de las rocas aflorantes y la estratigrafía regional generalizada (tomada de Aguayo, *et al*, 1980).

La península se clasifica como una región kárstica húmeda y subtropical (Stringfield *et al*, 1974)

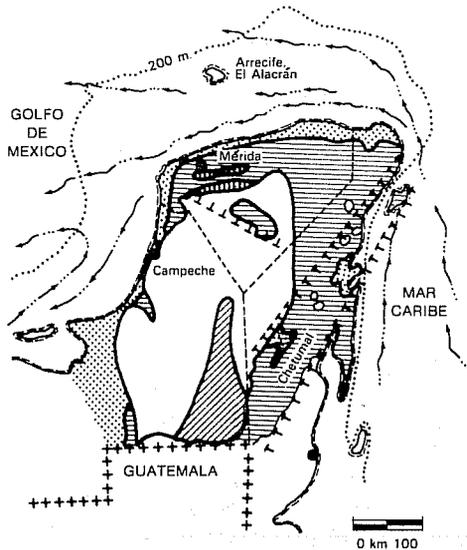
y, como tal, su análisis hidrogeológico debe ser el resultado de la relación entre la morfología o Karst y el ciclo hidrológico.

## Aspectos geomorfológicos

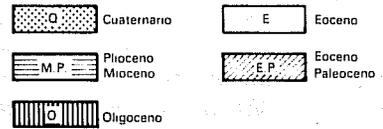
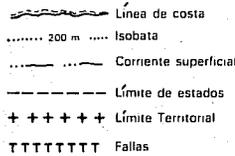
Con base en análisis de imágenes obtenidas del satélite LANDSAT y en observaciones de campo, la península de Yucatán se dividió en cuatro provincias geomórficas: I costera; II planicie interior; III colinas y valles y IV cuencas escalonadas. En el plano geomorfológico (véase ilustración 2) se presenta la ubicación de las provincias y, en el cuadro 1, se proporcionan su descripción y relaciones.

En este último se distingue la diferencia entre las provincias II y IV, marcada por la presencia (en la provincia IV) de discontinuidades geológico estructurales que controlan la aparición de las formas kársticas; sin embargo, el desarrollo de su morfología no presenta diferencias notables, ya que en ambas es de juvenil a ligeramente madura, y se caracteriza por: poco relieve topográfico, nulas corrientes superficiales, escaso y discontinuo desarrollo de suelo, estructuras subterráneas laterales kársticas de poco crecimiento (cavernas pequeñas

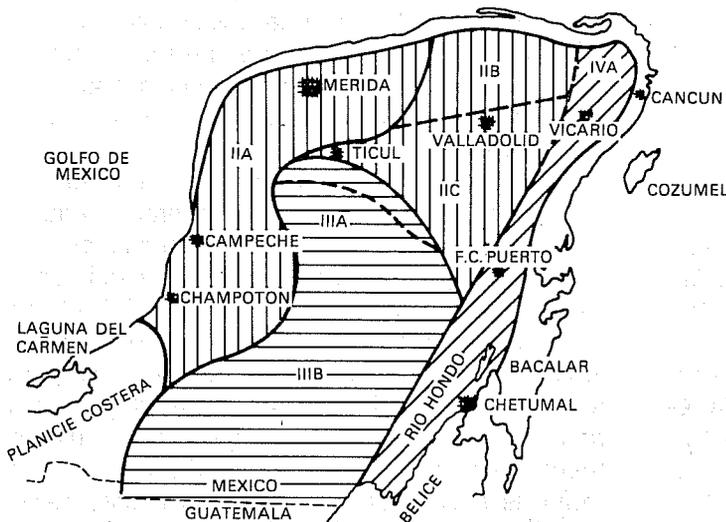
1. Distribución superficial de las rocas aflorantes y estratigrafía regional generalizada



|               | UNIDADES ESTRATIGRAFICAS |                              |                       |
|---------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------|
|               | PORCION NORTE            | PORCION SUR Y CENTRO         | PORCION ORIENTAL      |
| HOLOCENO      | SIN NOMBRE               |                              | SIN NOMBRE            |
| PLEISTOCENO   | (Seds calcáreos)         |                              | (Seds calcáreos)      |
| PLIOCENO      | CARRILLO-PUERTO          | INDIFERENCIADO               | CARRILLO-PUERTO       |
| MIOCENO       | (calizas)                |                              | (Calizas y dolomitas) |
|               |                          |                              | BACALAR               |
|               |                          |                              | (calizas y margas)    |
| OLIGOCENO     | SIN NOMBRE               |                              |                       |
|               | (Lutita, caliza, marga)  |                              |                       |
| EOCENO        | CHUMBEC                  | CHUMBEC                      |                       |
|               | (calizas)                | (calizas)                    |                       |
|               | PISTE                    | PISTE                        |                       |
|               | (calizas)                |                              |                       |
| PALEOCENO     |                          | ICAICHE                      | ICAICHE               |
| CRETACICO SUP | Lutita marga caliza      | (caliza, dolomita evaporita) | PETEN (?)             |
|               |                          | PETEN (?) (calizas)          | (calizas)             |



2. Plano geomorfológico y ubicación de las provincias



- Ⓘ UNIDAD COSTERA
  - A. PLAYAS
  - B. MAREAS
  - C. CARIBE
- Ⓜ PLANICIE INTERIOR
  - A. NOROCCIDENTAL
  - B. CENTRO-NORTE
  - C. CENTRAL-INTERIOR
- Ⓢ COLINAS Y VALLES
  - A. TICUL
  - B. BOLONCHEN
- Ⓢ CUENCAS ESCALONADAS
  - A. NORTE
  - B. SUR

## 1. Síntesis Geomorfológica

| UNIDAD GEOMÓRFICA        | SUBDIVISIONES                     | GEOFORMAS   | UBICACIÓN   | GEOLOGÍA   |
|--------------------------|-----------------------------------|---|---|--|
| Costera (I)              | a) Playas                         | Playas de barrera largas y angostas   | A lo largo de las costas norte y noroccidentales.                                       | Depósitos recientes asociados a la erosión marina.   |
|                          | b) Area de mareas                 | Lagunas de inundación.  | Detrás de las playas separando a éstas del continente.                                  | Depósitos actuales, provocados por la acción de las mareas.                                  |
|                          | c) Costera del Caribe             | Playas rocosas y angostas, costas abruptas y cortadas. Playas semicirculares, caletas y manantiales submarinos asociados.                                     | A lo largo de las costas de la margen oriental.   | Depósitos de alta energía asociada a zonas afalladas y fracturadas.                          |
| Planicie Interior (II)   | a) Noroccidental                  | Pequeños hoyos de disolución "karst" desnudo, poco relieve, suelo delgado y discontinuo. Pequeños cenotes hacia al SE.  | Hacia la porción noroccidental de la Península de Yucatán.                              | De origen kárstico principalmente en un estado de desarrollo juvenil.                        |
|                          | b) Centro-norte                   | Dolinas de gran diámetro, relieve más acentuado (10-15 m) topografía ondulada.  | En la porción central y al norte de la península con centro en la población de Tizimin. | Desarrollo kárstico en una madurez temprana.   |
|                          | c) Central-Interior               | Cenotes de varios tipos, relieve considerable, gruesos suelos residuales, pequeñas dolinas, domos kársticos y cúpulas, cavernas y pasajes poco desarrollados. | En el centro de la península al norte de la Sierrita de Ticul.                          | Desarrollo kárstico maduro y juvenil, al parecer hubo un truncamiento del primero.           |
| Colinas y Valles (III)   | a) Sierrita de Ticul (área Puuc ) | Alineamiento cerril NW-SE Grandes cavernas.   | Desde Maxcanú hasta Oxkutzcab con una dirección NW-SE.                                  | Asociado a un levantamiento diferencial.   |
|                          | b) Colinas de Bolonchen           | Mayor relieve, grandes espesores de suelos. Pojles de regular tamaño. Macrodornos kársticos.  | Toda la porción S-SW de la península.   | Asociado a esfuerzos compresionales y a diapirismo.  |
| Cuencas Escalonadas (IV) | a) Norte                          | Cuerpos de agua, cenotes, cúpulas y microdomos kársticos, gruesos suelos en las cuencas, poco relieve.  | NE de Quintana Roo.   | Desarrollo kárstico juvenil asociado a fallas y fracturas con orientación NESW.              |
|                          | b) Sur                            | Cuerpos de agua, manantiales, domos y amplios cenotes, relieve mayor que en el norte.   | Sur de Quintana Roo al NE del Río Hondo.  | Desarrollo kárstico maduro-temprano, asociado a las mismas estructuras de bloques afallados. |

de pasajes angostos) y abundantes cenotes y dolinas. De hecho, sólo la densidad de las características enunciadas y la variación en altitud de su microkarst hacen posible subdividirlos. En contraste, la porción sur de la península, comprendida en su mayor parte en la provincia III, presenta un relieve mayor, largas y grandes estructuras kársticas subterráneas y un macrokarst superficial de torres y domos asociado a un buen desarrollo de suelos de textura limo arcillosa ubicados en estructuras kársticas bajas similares a Poljes. Además, se distingue por la ausencia de cenotes y dolinas, es decir, esta región se caracteriza por un mayor desarrollo de su Karst.

Por lo anterior y tomando en cuenta la evolución geológica de la península, puede establecerse el inicio de los procesos kársticos de la provincia III en el Oligoceno (hace más o menos 40 millones de años), época en que la porción sur ya había emergido y estaba expuesta a los procesos geológicos modeladores de intemperismo y erosión, entre otros. Para las zonas norte y oriental, donde se emplazan las provincias II y IV, respectivamente, se propone el origen del Karst a partir del Pleistoceno (hace más o menos dos millones de años) y asociado con los movimientos del nivel medio del mar.

### **Marco conceptual hidrogeológico**

La península carece de corrientes superficiales, principalmente en la porción norte; hacia el sur sólo se manifiesta un drenaje incipiente que desaparece en resumeros o en cuerpos de agua superficial. Así, gran parte de la precipitación pluvial se evapotranspira y el resto se infiltra a través de fracturas, oquedades y conductos kársticos en las calizas. En el subsuelo el agua sigue diferentes trayectorias de flujo, controladas por el desarrollo o evolución del Karst profundo. Es evidente que las regiones de mayor karsticidad se presentan al sur de la península, donde se encuentran los sedimentos más viejos (del Paleoceno-Eoceno). Por consiguiente, deberá existir una diferencia en las características hidráulicas del medio por donde circula el agua.

De esta forma, la ocurrencia del agua subterránea está supeditada a la presencia de dos grandes regiones kársticas: la porción noreste, asociada con las provincias geomórficas II y IV y la porción sur, formada por la provincia geomórfica III. Se plantea así, la existencia de dos acuíferos regionales de carácter kárstico distinto, que se denominaron, en función de la edad de las rocas, miocénico y eocénico.

### **Acuífero miocénico**

La unidad hidrogeológica que integra los depósitos carbonatados del Mioceno al Pleistoceno es de tipo hidrológico permeable y constituye un acuífero kárstico regional, cuya distribución superficial es, como se ha mencionado, la asociación de las provincias II y IV. Esta unidad acuífera está limitada al SSO por la Sierrita de Ticul, al oeste, parcialmente, por el afallamiento Bacalar-Río Hondo y, hacia el N, NO, NE y SE, por las áreas costeras (véase ilustración 3). Al NO integra un acuífero limitado localmente a profundidad por depósitos impermeables del área de Mérida, Yucatán. Al oeste de la provincia geomórfica IV-B se comunica parcialmente con el acuífero eocénico, del que es zona de descarga (Río Hondo, Bacalar).

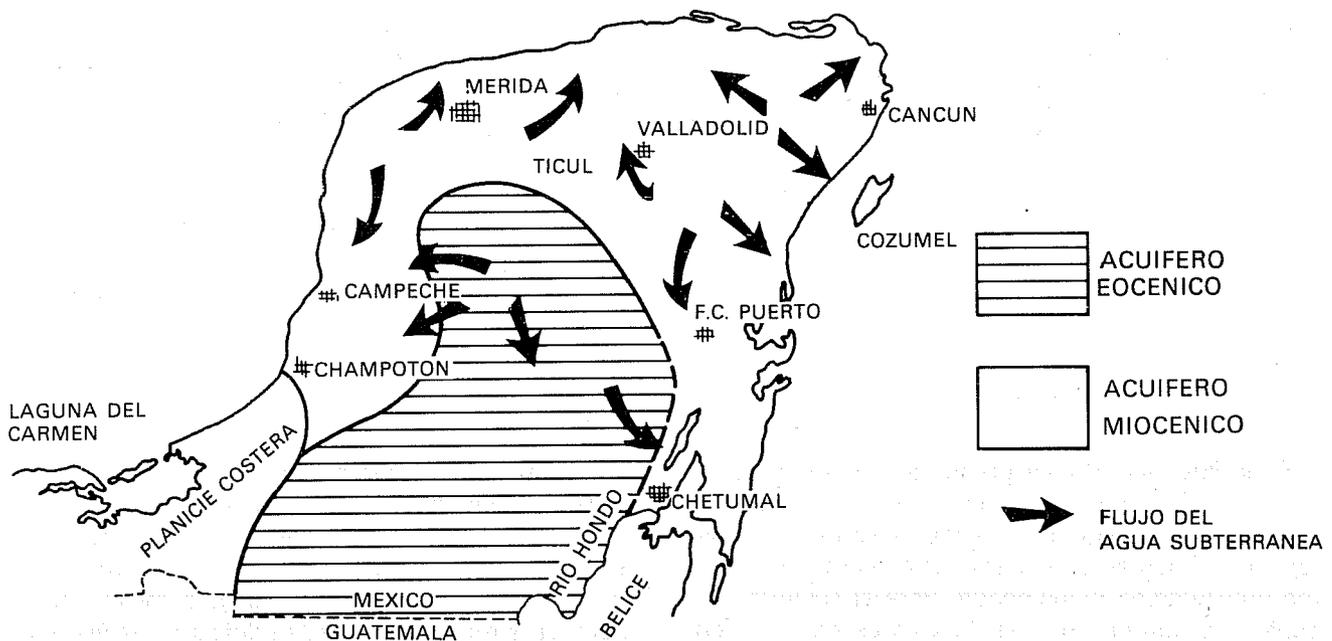
Esta unidad acuífera se caracteriza por: alta permeabilidad y transmisividad, poca carga hidráulica, nivel freático estable y dirección de flujo radial desde el área de recarga hacia las costas. Esta, al parecer, está supeditada a la distribución del patrón de la precipitación pluvial, y, de acuerdo con el análisis de los datos climáticos (CPNH, 1977), una porción de la misma se encuentra al noroeste de la península —áreas de Cobá y Leona Vicario, Quintana Roo— en donde se forma un máximo de precipitación, lo que establece hacia esa región el área de recarga.

### **Acuífero eocénico**

Los depósitos calcáreos y evaporíticos de Eoceno-Paleoceno forman una unidad hidrogeológica con alta permeabilidad y un acuífero kárstico regional cuya distribución superficial la constituye la provincia geomórfica III. Esta unidad acuífera está limitada al O y SO por la planicie costera de la península y al NO, entre la ciudad de Campeche y la población de Maxcanú, por un arco afallado; al norte se encuentra separada por el frente estructural de la Sierrita de Ticul. Al oriente su límite es transicional y lo constituyen los bloques afallados y escalonados del Sistema Bacalar-Río Hondo (véase ilustración 3).

Esta unidad presenta subdivisiones hidrogeológicas, aunque contiene varios acuíferos colgados de carácter local. Su nivel freático es profundo (60 a 100 m) y estable, y en los acuíferos colgados, somero y variable. En ella existen zonas topográficamente bajas de menor permeabilidad que soportan cuerpos de agua superficial. Al oriente tiene comunicación lateral con el acuífero miocénico, constituyendo hacia esta zona su área de descarga (Río Hondo y Laguna Bacalar).

### 3. Acuíferos kársticos regionales



#### Aspectos geohidrológicos

Para delinear el sistema de flujo de los acuíferos identificados en la península es necesario establecer las áreas de recarga y descarga. En la porción norte la descarga se efectúa a través de manantiales, a lo largo de la costa oriental; por manantiales y en forma difusa en la costa norte y, principalmente, hacia la costa occidental. Esta descarga se ha calculado (Back y Hanshaw, 1980) mediante principios de hidrogeoquímica y balance de masas en 8.6 millones de  $m^3/año$  por cada kilómetro de costa, lo que corresponde a 95% de la precipitación recargada para la porción norte (CPNH, 1981).

La incidencia tan alta de la precipitación pluvial y la ausencia notable de escurrimiento superficial indican una alta permeabilidad en toda la península. Esto se corrobora por la estabilidad del nivel freático en cenotes y norias (Back y Hanshaw, 1974, CPNH, 1977 y 1981). Así, la recarga constituye 16% de la precipitación pluvial para la porción norte (CPNH, 1981). Para la parte sur, es de esperar que sea menor, porque depende del carácter litológico, producto del contenido arcilloso de las rocas que integran la provincia III (CPNH, 1977). Esto concuerda con la presencia de los cuerpos perennes de agua superficial antes mencionados, como las lagunas de Silvituc y Chacambacab, así

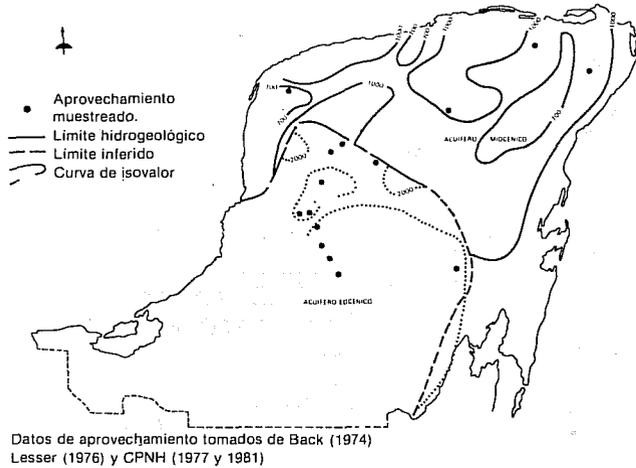
como la de numerosos cuerpos intermitentes de agua superficial en las partes bajas conocidas como *aguadas*.

A consecuencia de lo anterior la recarga se produce de manera bastante uniforme a través de toda el área siguiente al patrón de distribución de la precipitación. Por carecer de información piezométrica y para establecer con más detalle las zonas de recarga y sentido del flujo, se analizó el carácter hidrogeoquímico de los acuíferos de acuerdo con el principio geoquímico de la distribución superficial de la concentración salina; por tratarse de un acuífero kárstico, se aplicó un criterio que se usa con frecuencia, el del equilibrio químico del agua con respecto a cada uno de los minerales del medio hidrogeológico, conocido como índice de saturación (SI).

#### Hidrogeoquímica regional

Para el análisis de la distribución superficial de la concentración iónica se utilizaron principalmente los valores de la conductividad eléctrica y los de los iones sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) y cloruro ( $Cl^-$ ), ya que éstos no forman parte primordial de las calizas y sus variaciones provienen de la evolución del flujo subterráneo en el acuífero.

4. Curvas de isovalores de conductividad eléctrica



En la ilustración 4 se presenta la configuración de la conductividad eléctrica (CE) donde se observa que la porción de valores mínimos del acuífero miocénico se concentra hacia el área de máxima precipitación mencionada. Para el acuífero eocénico es notoria un área de valores mínimos en concentración iónica, al sur de la Sierrita de Ticul, que puede asociarse a un área de recarga. De esta manera, el sentido de flujo se establecería hacia donde se incrementen los valores anteriores con lo que se definen las principales áreas de recarga y descarga (véase ilustración 3).

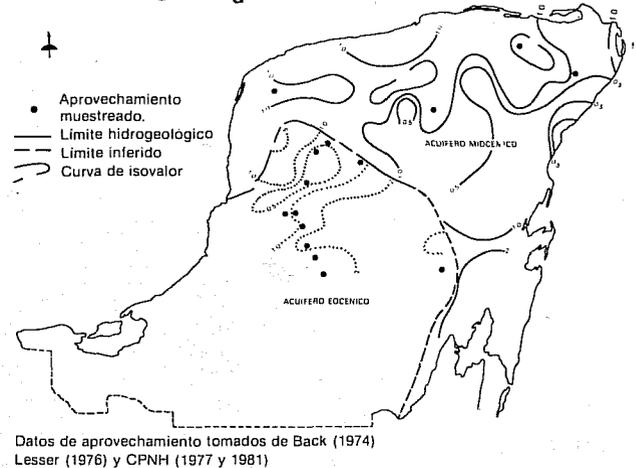
Para analizar el criterio del índice de saturación (SI) se procesaron los datos hidrogeoquímicos en un programa que modela el funcionamiento termodinámico de los iones contenidos en una solución: el WATEQ-F (Truesdall y Jones, 1978).

Los resultados con respecto a la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) indican valores muy homogéneos, ligeramente sobresaturados para las muestras representativas de ambos acuíferos, y una gama más amplia de valores, desde bajo saturados a sobresaturados, con respecto a la dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). Esto se debe a que el agua se satura primero de calcita.

Teniendo en cuenta lo anterior, se analizaron los valores del índice de saturación con respecto a la dolomita ( $\text{SI}_d$ ) en dos etapas diferentes: el estiaje y la temporada de lluvias. Esto se fundamenta en el hecho de que como hacia las áreas de recarga se presenta un alto contenido en  $\text{CO}_2$  y relativamente bajo de sólidos totales disueltos, es de esperar, que en éstos haya una baja saturación con respecto a la dolomita, y que se incremente hacia donde se presente la dirección del flujo.

Como puede observarse en el plano de la configuración del  $\text{SI}_d$  para el periodo de estiaje (véase ilustración 5), hacia las porciones de la península definidas anteriormente como áreas de recarga se

5. Curvas de igual  $\text{SI}_d$  en el estiaje



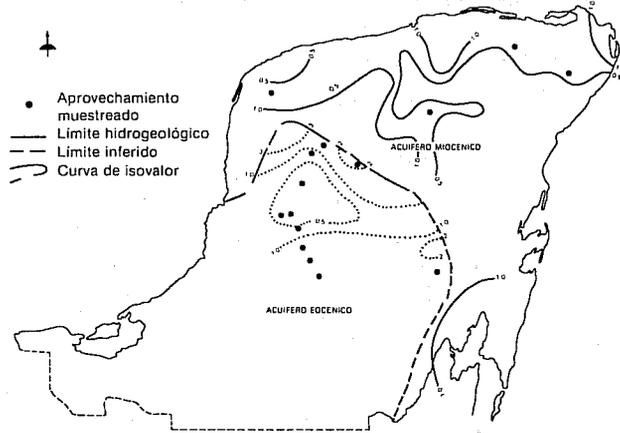
presentan los valores mínimos o bajosaturados y en la configuración de  $\text{SI}_d$  para el periodo de lluvias (véase ilustración 6) es notorio el incremento en las áreas de influencia de los valores bajosaturados; sin embargo, éstos parten de una misma zona. Con estos resultados pueden definirse las áreas de recarga de los acuíferos miocénico y eocénico, que quedan localizadas —como se había establecido— hacia donde se presentan los máximos valores en la precipitación pluvial.

Estas configuraciones confirman las trayectorias de flujo y zonas de descarga mencionadas en el marco conceptual hidrogeológico (véase ilustración 3) y además proporcionan una evidencia notable para sostener el planteamiento de la existencia de acuíferos regionales, ya que la variación del índice de saturación ( $\text{SI}_d$ ) para ambos acuíferos es diferente. Si se observa el plano que muestra el periodo de estiaje (véase ilustración 5), se detecta que en el acuífero miocénico la variación del índice  $\text{SI}_d$  es menor (máximo de 5) que en el acuífero eocénico (hasta 8); además, en este último el área de influencia de valores sobreexplotados es mayor.

Esta diferencia en el equilibrio químico del agua que circula en los acuíferos se debe, entre otras causas, a la fuerza iónica de las soluciones, ya que a una mayor fuerza iónica corresponde una mayor capacidad de transportar iones en solución, lo que proporciona valores de sobresaturación elevados. Así, se espera que en el acuífero eocénico las concentraciones iónicas sean mayores, como se observa en las configuraciones de conductividad eléctrica (véase ilustración 4), sulfatos ( $\text{SO}_4$ ) (véase ilustración 7) y cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), (véase ilustración 8).

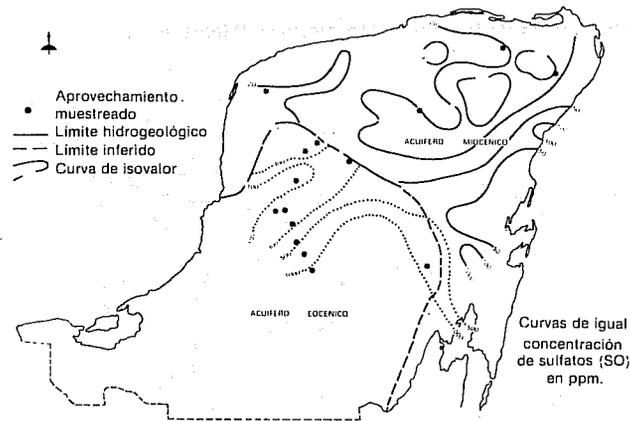
Una vez diferenciados los acuíferos, se procedió a caracterizarlos en función de la evolución geoquímica del agua que contienen. Este principio pro-

6. Curvas de igual  $Si_D$  durante lluvias



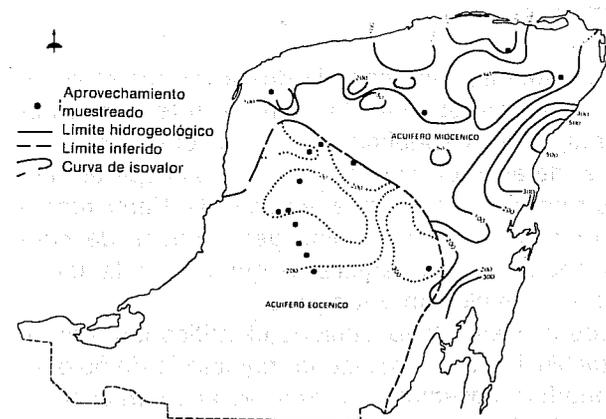
Datos de aprovechamiento tomados de Back (1974) Lesser (1976) y CPNH (1977 y 1981)

7. Curvas de igual concentración de sulfatos



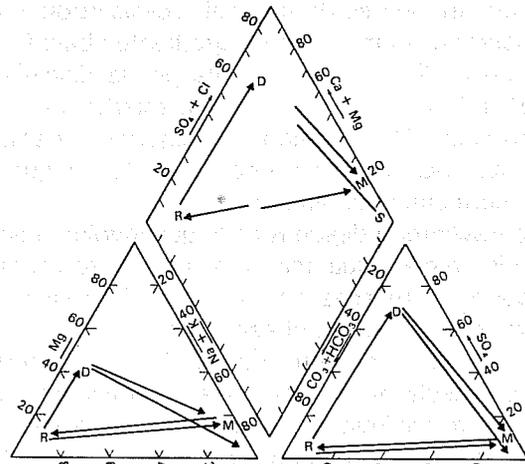
Datos de aprovechamiento tomados de Back (1974) Lesser (1976) y CPNH (1977 y 1981)

8. Curvas de igual concentración de cloruros



Datos de aprovechamiento tomados de Back (1974) Lesser (1976) y CPNH (1977 y 1981)

9. Modelo esquemático de la evolución del carácter geoquímico del agua en acuíferos carbonatados

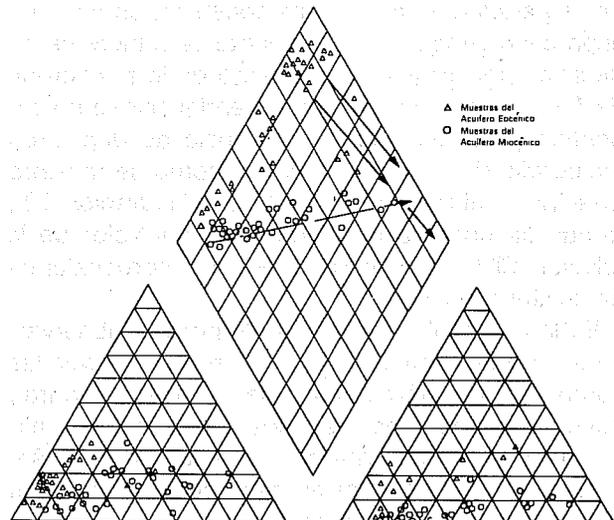


Trayectorias de reacción

- R-M ENRIQUECIMIENTO-MEZCLA-DISOLUCION EN ZONA DE DISPERSION
- R-D DISOLUCION DE CALCITA DOLOMITA Y YESO EVOLUCIONANDO EN LA DIRECCION DEL FLUJO
- D-M DOLOMITIZACION
- D-S DISOLUCION DE HALITA (NaCl)
- R RECARGA
- D DESCARGA
- M MAR
- S SALMUERA

MODIFICADO DE BACK Y HANSHAW (1979)

10. Evolución del carácter geoquímico del agua subterránea



puesto por Back y Hanshaw (1979) a través de un modelo esquemático (véase ilustración 9) que muestra las trayectorias de reacción del agua en un acuífero, indica que en las áreas de recarga (R) el agua subterránea es de tipo cálcico-bicarbonatada y que durante su movimiento gradiente abajo (R→D) el magnesio (Mg) se incrementa por la disolución de dolomita y calcita rica en Mg, mientras que el Ca permanece relativamente constante. Además, el sulfato ( $\text{SO}_4^{=}$ ) se incrementa en tanto que el  $\text{HCO}_3$  permanece constante.

Otra trayectoria desde R es la que involucra enriquecimiento con agua oceánica en acuíferos costeros, donde la recarga ocurre cerca del mar y se muestra como R-M en el esquema.

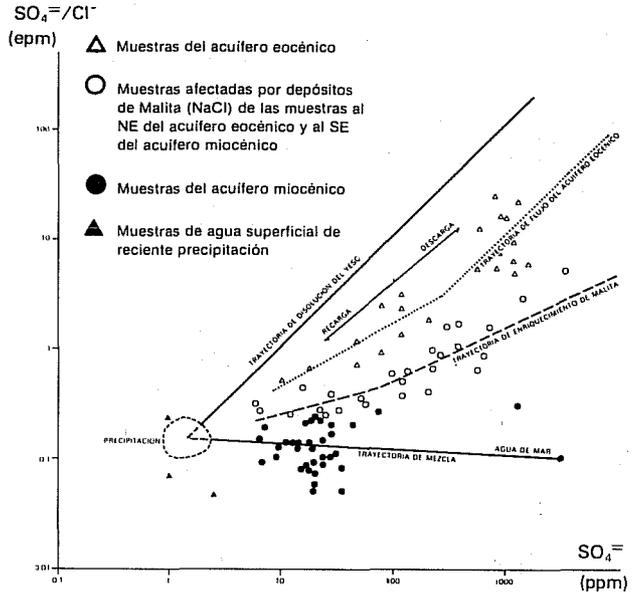
Este modelo conceptual se aplicó a los acuíferos de la península de Yucatán y se identificaron los procesos geoquímicos que ocurren: disolución y mezcla, que corresponden, respectivamente, a las trayectorias R→D en el acuífero eocénico y R→M en el miocénico (véase ilustración 10).

Otro principio utilizado para la caracterización geoquímica es la relación iónica (Rightmire *et al*, 1974, en Back y Zoetl, 1975) que se muestra en la ilustración 11, donde se maneja el contenido de  $\text{SO}_4^{=}$  y  $\text{Cl}^-$  y se indica, en forma análoga, la evolución geoquímica de los acuíferos e identifica los procesos descritos, lo que confirma la diferenciación de los acuíferos en la península de Yucatán.

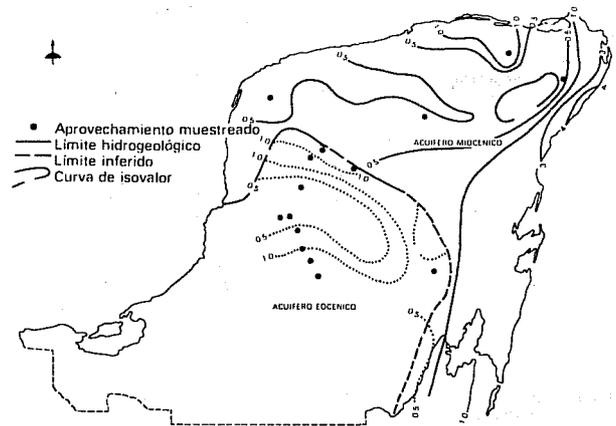
En conformidad con lo anterior se desprende que existe una diferenciación hidrogeológica e hidrogeoquímica de los acuíferos detectados y clasificados geoquímicamente como regionales; esto es, mientras que en el acuífero miocénico el proceso geoquímico prevaleciente es la mezcla de agua de reciente infiltración con agua subterránea salada más antigua, que produce una amplia zona de dispersión, en el acuífero eocénico, en cambio, el proceso geoquímico dominante es el incremento de sales por disolución a lo largo de la trayectoria de flujo, enmascarado por un enriquecimiento repentino producido por la presencia de depósitos evaporíticos altamente solubles, como se muestra en el plano hidrogeoquímico (véase ilustración 12), donde se observa un incremento del valor de la relación  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  hacia la porción noroccidental del acuífero eocénico.

En la misma ilustración 12 es posible observar, para el acuífero miocénico, un incremento hacia las costas en las porciones norte y noroccidental, donde estos valores máximos representan la acción incipiente de la mezcla con agua de mar. Así mismo, se confirman las áreas de recarga hacia las zonas donde la relación es menor.

### 11. Principales trayectorias de flujo hidrogeoquímico



### 12. Curvas de igual relación cloruros/bicarbonatos



Datos de aprovechamiento tomados de Back (1974) Lesser (1976) y CPNH (1977).

### Conclusiones

Se plantea la existencia de dos acuíferos regionales en la península de Yucatán, caracterizados por la respuesta geoquímica del agua que circula en ellos, de acuerdo con los resultados al aplicar nuevas metodologías para el estudio del Karst fundamentadas en los principios geoquímicos de concentración iónica, equilibrio químico, relaciones iónicas y evolución geoquímica.

Los procesos geoquímicos identificados fueron: a) disolución a lo largo de la trayectoria de flujo en el acuífero eocénico; b) mezcla de agua en el acuífero miocénico y c) enriquecimiento salino por presencia de depósitos muy solubles y por mezcla con agua de mar.

Las acciones antropogénicas, en particular las realizadas cerca de los núcleos de población, pueden llegar a modificar los procesos geoquímicos prevalentes, ya que por no haber forma superficial de deshacerse de las aguas residuales, éstas se infiltran al subsuelo. Se recomienda, por tanto, realizar muestreos y análisis sistemáticos para vigilar el comportamiento geoquímico y la calidad del agua en la península.

El índice de saturación de dolomita ( $SI_d$ ), utilizado para identificar las áreas de recarga y descarga de los acuíferos, presentó una amplia gama de valores que permitió analizarlos.

Así mismo, la distribución de la concentración iónica del agua de la península hizo posible diferenciarlas; las relaciones iónicas confirmaron el modelo conceptual de evolución geoquímica para acuíferos kársticos de Back y Hanshaw (1979), que se aplicó para caracterizarlos mediante la interpretación de las trayectorias de reacción como procesos geoquímicos prevalentes.

Dada la condición de los acuíferos en la península, urge aplicar técnicas geohidrológicas que confirmen las trayectorias de flujo, con objeto de localizar tanto fuentes alternas para el suministro de agua potable a las poblaciones como áreas de desecho adecuadas, ya que, como se ha visto, la calidad del acuífero eocénico es inadecuada para consumo humano. De modo que la única opción es explotar el acuífero miocénico, fuente de abastecimiento de la mayoría de la población que se asienta en la península por lo que se recomienda nivelar topográficamente las zonas de mayor explotación.

## Referencias

Aguayo, J. E., Bello, C. R., Vecchio del, M. A., y Basa-

ñez, M. A. Estudio sedimentológico en el área de Tulum-Cancún, Isla Mujeres, estado de Quintana Roo, México, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, tomo XLI, núms. 1 y 2, 1980.

Back, W. y Hanshaw, B. "Hydrogeochemistry of the Northern Yucatán Península, México", en Weidie, A. E., ed., Field Seminar on Water and Carbonate Rocks of the Yucatán Península, México: New Orleans Geological Society Guide Book, Field Trip 2, of America, 1974.

Back, W. y Hanshaw, B. "Chemical Mass-Wastings of the Northern Yucatán Península by Groundwater Dissolution", en Geology, vol. 8, Reston Virginia, USA, US Geological Survey, 1980.

Back, W. y Hanshaw, B. "Major Geochemical Processes in the Evolution of Carbonate-Aquifer Systems", en Journal of Hydrology, vol. 43, Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing, Co. 1979.

Back, W. y Zoetl, J. "Application of Geochemical Principles, Isotopic Methodology, and Artificial Tracers to Karst Hidrolog. Hidrogeology of Karstic Terrains. International Union of Geological Sciences. Series B, núm. 3, IAH, París, 1975.

Butterlin, J y Bonet, F. Mapas geológicos de la Península de Yucatán, en Ingeniería Hidráulica en México, vol. 7, México, SRH, 1960.

Comisión del Plan Nacional Hidráulico (CPNH). "Estudio de las características geohidrológicas del acuífero en el área de Mérida, Yuc. y diagnóstico de la contaminación del agua y propuestas de solución para su manejo adecuado (Primera etapa). Dirección de inventarios de agua y suelo, SARH. Documento interno. México, 1981.

Comisión del Plan Nacional Hidráulico (CPNH) "Hidrogeoquímica de Yucatán", Dirección de la zona Golfo y Sureste, SARH. Documento interno, México, 1977.

Isphording, W.C. "The Physical Geology of Yucatán". Trans. Gulf Coast. Assn. Geol. Soc. vol. 25, USA, 1975.