I. TEXTOS MONOGRÁFICOS:
2. NATURALEZA

EL RECURSO AGUA EN MÉXICO:

Un análisis geográfico

Laura Elena Maderey Rascón
J. Joel Carrillo Rivera

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
U N A M
GEOGRAFIA

TEMAS SELECTOS DE GEOGRAFÍA DE MÉXICO

EL RECURSO AGUA EN MÉXICO:
un análisis geográfico
I.2.3

Laura Elena Maderey Rascón
J. Joel Carrillo Rivera

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Juan Ramón de la Fuente
Rector

Lic. Enrique del Val Blanco
Secretario General

Dr. Daniel Barrera Pérez
Secretario Administrativo

Dr. Jaime Martuscelli Quintana
Secretario de Servicios a la Comunidad Universitaria

Mtro. Jorge Islas López
Abogado General

Dr. José Narro Robles
Coordinador General de Reforma Universitaria

Dr. René Drucker Colín
Coordinador de la Investigación Científica

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

Dr. Adrián Guillermo Aguilar
Director

Dr. José Omar Moncada Maya
Secretario Académico

Dra. Teresa Reyna Trujillo
Editora Académica

Lic. Raymundo Rodríguez Salgado
Secretario Administrativo

Diseño de portada: Laboratorio de Fotomecánica,
Instituto de Geografía, UNAM

Responsable de edición: Martha Pavón
Primera edición: agosto de 2005

EL RECURSO AGUA EN MÉXICO:
un análisis geográfico I.2.3

© Instituto de Geografía, UNAM

Derechos exclusivos de edición reservados para todos los países de habla española. Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin autorización escrita de los editores.

Instituto de Geografía-UNAM
Ciudad Universitaria
Del. Coyoacán
04510 México, D. F.
www.igeograf.unam.mx

ISBN: UNAM (Obra General): 968-36-8090-9
ISBN: UNAM 970-32-2822-4

HECHO EN MÉXICO

Este libro presenta los resultados de una investigación científica y contó con dictámenes externos, de acuerdo con las normas editoriales del Instituto de Geografía. Se publicó con apoyo financiero de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), UNAM. Proyecto: PAPIIT No. IN306500 siendo las responsables ante la DGAPA la Dra. María Teresa Gutiérrez de MacGregor y la Dra. María Teresa Sánchez Salazar. Por parte del Instituto de Geografía, este libro contó con el apoyo financiero del Convenio DGAJ-SJPI-030804-296 celebrado con la Secretaría de Desarrollo Social, cuyos responsables son el Dr. Alejandro Velázquez Montes y la Dra. María Teresa Sánchez Salazar. Por estos apoyos, el Instituto de Geografía expresa su agradecimiento.

ÍNDICE

Presentación 11
Introducción 13
Reconocimientos 15

I. Factores que determinan el comportamiento hidrológico superficial en el territorio mexicano 17

II. Agua superficial 23
Vertiente del Océano Atlántico 23
Río Bravo 24
Río Pánuco 27
Río Tecolutla 27
Río Papaloapan 28
Río Coatzacoalcos 28
Río Grijalva 28
Río Usumacinta 29
Río Hondo 29
Vertiente del Océano Pacífico 29
Río Tijuana 30
Río Colorado 30
Río Sonora 31
Río Yaqui 31
Río Mayo 31
Río Fuerte 32
Río Sinaloa 32
Río Culiacán 32
Río San Lorenzo 32
Río Lerma 33
Lago Chapala 33

Río Santiago 34
Río Balsas 34
Río Verde 35
Río Tehuantepec 35
Río Suchiate 35
Vertiente Interior 35
Río Casas Grandes 36
Río Santa María 36
Río del Carmen 36
Bolsón de Mapimí 36
Río Nazas 37
Río Aguanaval 37
El Salado 37
Lago de Cuitzeo 38
Lago Pátzcuaro 38
Llanos de San Juan o Región del Seco 38
Lago Tequesquitengo 39
Lagunas de Cempoala 39
Lagunas de Montebello 39
Cuenca de México 39

III. Agua subterránea 43
Importancia del agua subterránea 43
Funcionamiento del agua subterránea 44
Agua subterránea, presencia y uso 47
Elementos de los sistemas de flujo 49
El agua subterránea en el ambiente 52
Alteraciones en el agua subterránea por cambios en el ambiente externo 53
Cambios en el volumen de recarga 53
Reducción de la descarga de agua subterránea a cuerpos de agua continental 54
Reducción de la descarga de agua subterránea a zonas costeras 55
Contaminación del agua subterránea por residuos líquidos 56
Contaminación del agua subterránea por disposición de residuos sólidos 57

Cambios en la calidad del agua subterránea inducidos por bombeo 58
Efectos en el ambiente externo por cambios en el régimen del agua subterránea 60
Aumento en la erosión del suelo 61
Transvase de agua 62
Abatimiento del nivel freático 63
Consolidación del subsuelo 65
Desaparición de freatofitas 68
Regiones hidrogeológicas de México 69
Península de Yucatán 71
Introducción 71
Marco hidrogeológico 71
Calidad del agua 72
Cuencas aluviales centrales 74
Introducción 74
Marco hidrogeológico 75
Características hidrogeológicas 77
Calidad del agua 78
Sierra Madre Oriental 79
Introducción 79
Sierra del Burro 81
Cuenca Ojinaga-Monclova-La Paila 82
Sierra Torreón-Monterrey-Tamazunchale 83
Sierra Madre Occidental 84
Introducción 84
Marco hidrogeológico 85
Calidad del agua 88
Cinturón Volcánico Trans-Mexicano 90
Introducción 90
Marco hidrogeológico 91
Calidad del agua 94
Cuencas aluviales costeras 94
Introducción 94
Marco hidrogeológico 95
Calidad del agua 96

Sierra Madre del Sur 98
Introducción 98
Marco hidrogeológico 99
Calidad del agua 100
Planicie costera del Golfo de México 101
Introducción 101
Marco hidrogeológico 101
Calidad del agua 104

IV. Disponibilidad de agua 105
Red hidrométrica 105
Regiones hidrológicas y población 106

V. Consideraciones finales 115

Glosario 119
Bibliografía 123

PRESENTACIÓN

Cuando los profesores Carrillo y Maderey me pidieron escribir la presentación de este libro, lo primero que me vino a la mente fueron los poemas de Jaime Sabines donde habla sobre el agua, mencionando que la conoció en las montañas, en la finca de un amigo. Y es que tiene razón Sabines, para entender al agua hay que entender a su geografía, las formas de la naturaleza que le permiten correr o acumularse en algunos lados y no en otros, la forma en que permite que surjan a su alrededor la diversidad biológica y las poblaciones humanas. No podemos conocer al río sin conocer la cuenca, no podemos entender al acuífero sin saber del bosque, este libro nos reafirma que, en el caso del agua, hay que ver el todo para conocer las partes.

Tienen en sus manos un libro único que nos lleva por un recorrido desde los filos de las montañas, pasando por los bosques, cultivos y pasturas en sus faldas, hasta las ciudades que están a la orilla de los ríos o donde brotan sus manantiales. La belleza que describen tiene como contrapunto los muchos problemas que se viven en México, la extracción ineficiente del recurso, el desperdicio, la contaminación. El libro de los profesores Maderey y Carrillo les habla a muy diversas personas, cada una con razones diferentes para querer entender mejor el agua. Para quienes quieran entrar a estudiar la economía del agua, les dará una perspectiva sobre su abundancia y escasez física, primer paso para entender la relación entre oferta y demanda. Para quienes están interesados en la biodiversidad, su perspectiva integradora les dará razones claras de interdependencias para buscar la conservación, tanto cuenca arriba como cuenca abajo. A los interesados en problemas sociales, les mostrará las restricciones reales que se enfrentan, y les permitirá armar puentes entre las cuencas y acuíferos y las decisiones públicas e individuales que estén estudiando. A la gente interesada en geografía, le mostrará lo que ésta puede aportar al resto de las disciplinas y al debate público.

Desde el Instituto Nacional de Ecología hay varias cosas que nos preocupan sobre la sustentabilidad en el uso del agua. Por nuestra perspectiva de economistas, vemos que la brecha entre demanda y

oferta es cada vez mayor, producto del natural crecimiento de la población y la economía, pero exacerbada por las políticas de cobrar poco por el agua, y subsidiar la electricidad de bombeo a los agricultores de mayores ingresos. Esto ha tenido y seguirá teniendo consecuencias graves si no solucionamos estas fallas de política. Hemos estado acabándonos el capital natural al extraer en forma ineficiente el agua de los acuíferos y al ampliar la oferta a costa de crecientes impactos ambientales. Podríamos en cambio estar incentivando gradualmente la adopción de tecnologías y prácticas ahorradoras con sólo hacer que los agricultores, ganaderos, industriales y hogares urbanos enfrentaran el costo real que ésta tiene, incluyendo el costo ambiental.

Siempre me ha sorprendido ver cómo la gente en México tiene muy claro que el agua es uno de sus problemas ambientales más importantes. Desde las pláticas anecdóticas hasta los estudios de opinión vemos que hay una ciudadanía preocupada. Mis propios hijos me lo recuerdan cada vez que salimos a caminar cerca de algún arroyo o cañada. Esta conciencia viene en parte porque los problemas se viven cotidianamente, en colonias donde no hay agua todos los días, viendo arroyos urbanos convertirse en canales de aguas negras, en ver gente sufrir con enfermedades asociadas a la contaminación con aguas residuales o a la que proviene de fuentes naturales al usarse ineficientemente los acuíferos. También le debemos la conciencia a los reportajes en medios de comunicación y las campañas para fomentar su ahorro. Lo que sorprende es que la acción pública y privada que vemos no es proporcional a esta preocupación e interés. En parte se debe a lo difícil de hacer políticamente factible políticas sobre el agua que asuman su verdadero costo, pero también se debe a la brecha que hay entre el interés y el conocimiento real sobre el tema. Ustedes, al tener este libro en sus manos, están ayudando a cerrar esta brecha, con un conocimiento geográficamente explícito. Nuestros mejores deseos son que con ello podamos atender el primer problema y unamos el interés con la acción. Es algo a lo que tanto poetas como científicos nos han estado llamando desde hace tiempo, y es tiempo de corresponderles.

Dr. Carlos Muñoz Piña
Dirección General de Investigación en Política y Economía Ambiental
Instituto Nacional de Ecología

INTRODUCCIÓN

El agua, líquido de importancia vital para todos los seres vivos que habitamos en este planeta, se distribuye sobre la superficie terrestre de acuerdo con ciertas características físicas relacionadas entre sí, y que es necesario comprender a fondo para mantener una eficiente conservación de este recurso natural, a pesar de su constante aprovechamiento.

Dentro de los factores que determinan el comportamiento hidrológico destacan la fisiografía, el clima y la vegetación.

En cuanto a la fisiografía, el agua se distribuye de acuerdo con las características orográficas y geológico-estructurales del territorio, es decir, de acuerdo con el relieve.

El relieve, por una parte, influye en gran medida en la distribución de la lluvia y, por la otra, da lugar a la formación de las cuencas hidrológicas indicando así el camino que seguirá el agua al caer a la superficie. También es importante porque, según la forma del terreno el agua tendrá mayor o menor oportunidad de infiltrarse y, además, porque ya infiltrada, seguirá una trayectoria determinada por dicho factor; así, en una región montañosa la pendiente del terreno dará más facilidad al agua para escurrir superficialmente que para infiltrarse y la que llegue a infiltrarse tendrá un movimiento hacia las zonas más bajas, ya sea directamente al mar o a regiones en donde se facilite su descarga.

Por lo que se refiere al clima, dos son los elementos que más interés tienen en la Hidrología: la precipitación y la evaporación; por un lado, es de la precipitación de donde proviene el agua de escurrimiento y la subterránea y, por otro, la evaporación es el elemento por el que se pierde mayor cantidad de agua.

La importancia de la vegetación para la Hidrología estriba en que constituye un indicador de la presencia o ausencia relativa del agua, además de ser un regulador en el comportamiento hidrológico de cualquier región. La vegetación actúa como estabilizadora del flujo superficial del agua y uniformiza el régimen estacional de las corrientes fluviales,

cial del agua y uniformiza el régimen estacional de las corrientes fluviales, debido a que su sistema radicular permite al suelo ser una especie de esponja que, además de ofrecer una mayor facilidad al agua para su infiltración y, por tanto, mayor posibilidad para la realimentación de los mantos de agua subterránea y manantiales, retarda su escurrimiento de manera que ésta fluye regularmente hacia los cauces de las corrientes superficiales.

Cuando la vegetación desaparece, el suelo pierde su estructura original, se compacta y dificulta o impide la infiltración; como consecuencia, la parte que alimenta al agua subterránea disminuye y el agua de escurrimiento aumenta y los fuertes aguaceros producen en los ríos grandes crecidas o avenidas que pueden llegar a causar inundaciones.

El tipo de cubierta vegetal más indicado para la protección de los suelos y del agua en zonas montañosas y de pendiente es el bosque, es decir, la vegetación arbórea, puesto que posee una constitución más firme y el desarrollo de sus raíces alcanza mayores profundidades.

Todos estos factores se encuentran ligados al agua subterránea, como consecuencia de que, por un lado, la lluvia que se infiltra constituye el agua subterránea y ésta usualmente al manifestarse, por ejemplo en manantiales, se incorpora al agua superficial, lo cual se refleja en el agua presente en ríos y lagos.

En este libro se muestran los factores anteriores en el territorio mexicano, y al conjugarlos se explica cómo actúan, en general, sobre la hidrología del país. Además, se tratan los recursos hidrológicos de México y se infiere su disponibilidad (consecuencia de los factores mencionados) a través de la red hidrográfica, la red hidrométrica y la población. En la última parte se hace referencia a la problemática que se genera en torno al recurso agua debido a los factores geográficos antes expuestos.

Existen innumerables manuales de métodos de índole hidrológica e hidráulica que abordan ampliamente la medición y cuantificación de propiedades y procesos para proponer acciones de uso del recurso. El contenido de este libro está dirigido al público interesado en conocer los aspectos básicos de cómo se encuentra el agua en el territorio mexicano, sin que se pretenda establecer un compendio de datos aislados, de relevancia limitada, que impidan conocer de manera más completa el estado del agua en México.

Se agradece a María Elena Cea Herrera la colaboración en el cálculo de la población asentada en cada una de las regiones hidrológicas y el apoyo en la preparación de la versión final del libro y a Cuauhtémoc Torres Ruata en la delimitación de las regiones hidrológicas y el cálculo del volumen medio anual aproximado de agua en cada región, así como la colaboración de ambos y de Álvaro Ramírez Laguna en la construcción del mapa denominado Regiones Hidrológicas y Población.

I. FACTORES QUE DETERMINAN EL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO SUPERFICIAL EN EL TERRITORIO MEXICANO

Como se detallará más adelante, los principales sistemas montañosos de México cruzan longitudinal y transversalmente su territorio (Figura 1). La Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental con una dirección NW-SE, el Eje Volcánico Transmexicano con dirección W-E y la Sierra Madre del Sur orientada también de NW a SE, que es una prolongación de las sierras que atraviesan, con esa misma dirección, la península de Baja California.

En el Istmo de Tehuantepec el relieve se abate para después elevarse nuevamente en terrenos correspondientes al estado de Chiapas, donde la Sierra Madre del Sur se continúa con el nombre de Sierra Madre de Chiapas y la Sierra Madre Oriental como Sierra y Meseta Septentrionales de Chiapas.

Limitada por la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental y por el Eje Volcánico Transmexicano, se extiende la Altiplanicie Mexicana, formada por extensas mesetas y atravesada por numerosas sierras de escasa elevación, que definen las cuencas aluviales centrales.

El relieve de la península de Yucatán está caracterizado por llanuras.

La configuración orográfica y la estructura geológica del territorio mexicano da lugar a una división tal que permite la formación de cuencas hidrológicas con salida al mar (exorreicas) y de cuencas hidrológicas interiores (endorreicas) cuyas aguas desembocan generalmente en un

lago. Además, aunadas a la variación y cantidad de precipitación, permiten inferir la distribución y movimiento de los recursos hidrológicos superficiales y suponer los de los subterráneos.

La precipitación predominante en el país es en forma de lluvia y su distribución en el territorio es muy irregular (Figura 2).

En general, la precipitación aumenta con una dirección norte-sur, sin embargo, el relieve produce un efecto muy importante en el resultado de esta distribución. La altura media anual de la lluvia varía de menos de 50 mm a más de 4 000 mm.

La mayor precipitación se concentra en la parte suroriental del país, la cual además de ser una región elevada, está afectada por vientos húmedos durante todo el año.

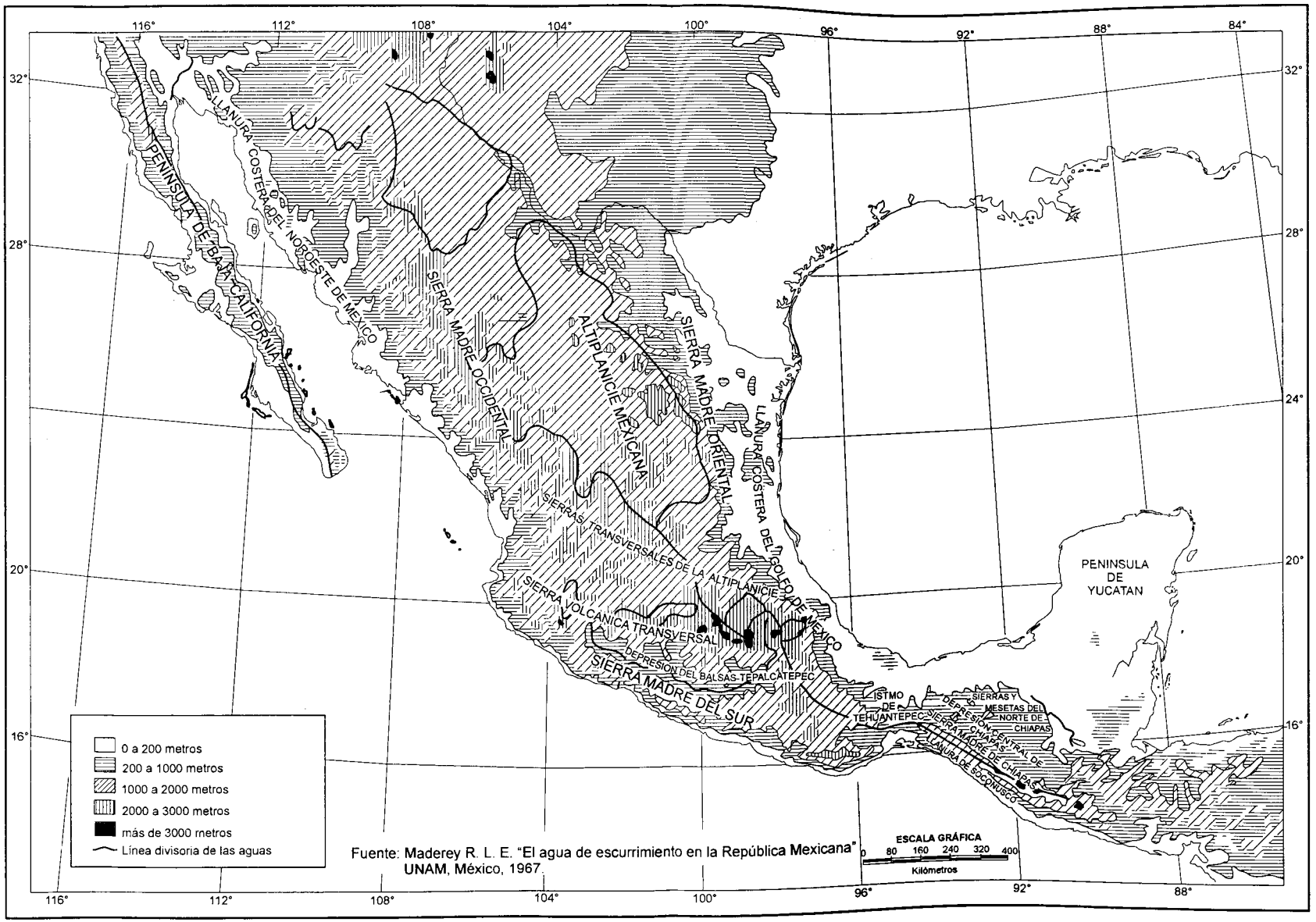
Las zonas elevadas como la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre Occidental, el Eje Volcánico Transmexicano y la Sierra Madre del Sur registran un aumento en la precipitación y constituyen barreras orográficas que impiden el paso de las masas de aire húmedo provenientes del mar, las cuales al ascender por los declives exteriores de estas sierras, dejan en ellas la mayor parte de su contenido de humedad, dando lugar a que las regiones por ellas limitadas y ubicadas al interior reciban escasa precipitación y en algunos casos, por esta razón, sean zonas secas.

La península de Baja California, el norte de las planicies costeras y de la Altiplanicie Mexicana constituyen la parte del territorio mexicano con el valor más bajo de precipitación, debido a su posición geográfica que determina la casi nula influencia de los vientos húmedos.

La península de Yucatán, aunque recibe una precipitación media aproximada superior a los 1 000 mm, no presenta hidrología superficial, por su relieve de llanuras y su constitución geológica.

Otra característica importante de la precipitación es la época en que se presenta; en la mayor parte del territorio mexicano las lluvias se concentran, por lo general, en verano y otoño, con excepción del NW del país en donde la lluvia se concentra en el invierno.

Por lo que se refiere a la evaporación, en cuanto a la capacidad que tiene la atmósfera para absorber humedad (evaporación potencial), los valores más altos se localizan en las regiones donde la humedad es mínima, es decir, en las regiones más secas. Si a eso se agrega que la evaporación real es mayor durante el verano, cuando se registran las máximas precipitaciones, la poca agua que ahí cae resulta grandemente



Fuente: Maderey R. L. E. "El agua de escurrimiento en la República Mexicana" UNAM, México, 1967.

Figura 1. Fisiografía de la República Mexicana.

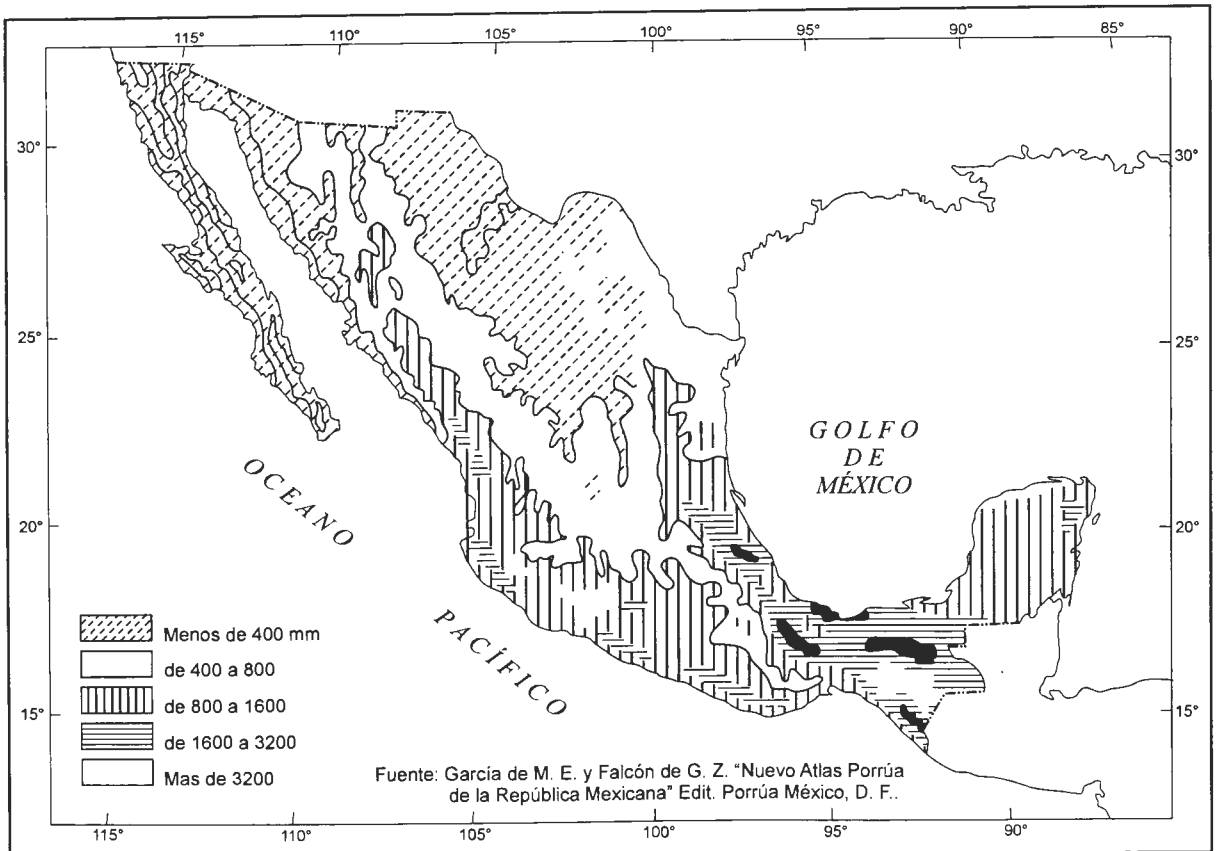


Figura 2. Precipitación media anual en la República Mexicana.

afectada por este fenómeno, de manera que prácticamente toda el agua que se precipita se pierde por evaporación. No sucede así en las zonas húmedas en donde, precisamente por su carácter, la atmósfera contiene mayor humedad y tiene menor capacidad de absorber agua. En las zonas intermedias en la época seca la evaporación real llega a ser igual que la precipitación y en la época de lluvias la evaporación es menor que la precipitación.

En el aspecto vegetación, el país ha sufrido una considerable deforestación, sobre todo en la parte central. Los efectos son difíciles de evaluar, ya que en la mayoría de los casos no se tiene la información necesaria, sin embargo, a nivel local, muchas veces se oye decir que los manantiales desaparecen cuando se talan los bosques, y se puede observar que las crecidas de los ríos aumentan cuando se deforestan sus cuencas.

En consecuencia, se puede establecer que los recursos hidrológicos superficiales del territorio mexicano se distribuyen y se comportan de acuerdo con los factores antes mencionados, así, las regiones del sur y sureste son las que cuentan con ellos en abundancia, ya que son las que reciben mayor precipitación, las del norte son las que tienen menos cantidad de agua superficial dada la escasa precipitación que reciben y la gran evaporación que existe, sin embargo, cuentan con el agua subterránea cuya realimentación proviene desde lejanas sierras en donde se infiltra parte del agua de la lluvia que interceptan y se dirige lentamente por el subsuelo hacia ellos. Los caudales de los ríos y de los manantiales aumentan sensiblemente en la época de lluvias –verano en la generalidad del país, e invierno en el noroeste– lo cual muestra la inevitable dependencia de los recursos hidrológicos superficiales de la precipitación.

II. AGUA SUPERFICIAL*

La red hidrográfica (Figura 3) se desarrolla en función de las características del relieve. Así, se forman tres vertientes, es decir, tres declives generales por donde corre el agua de los ríos. Los nombres de estas vertientes obedecen al sitio en el que desaguan los ríos que corren por cada una de ellas y son:

1. *Vertiente del Océano Atlántico.* Vertiente cuyos ríos terminan o descargan en el Golfo de México y en el Mar de las Antillas, ambos pertenecientes al Océano Atlántico.
2. *Vertiente del Océano Pacífico.* Vertiente cuyas corrientes desembocan en el Océano Pacífico, incluye los ríos de la península de Baja California.
3. *Vertiente Interior.* Está formada por los ríos que no tienen salida al mar y que, como consecuencia, generalmente dan lugar a la formación de lagos.

Vertiente del Océano Atlántico

Comprende las laderas del declive oriental de la Sierra Madre Oriental y la Planicie Costera del Golfo de México. Las corrientes que desembocan en la parte norte y centro del Golfo de México tienen, en su mayoría, cursos altos de fuertes pendientes y cursos medios y bajos de pendiente suave. Al sur del Golfo de México la Planicie Costera adquiere su máxima extensión, esto determina que los ríos que por ahí fluyen

* Tamayo, J. L. (1962). Cabe aclarar que la información que aparece en este capítulo es de este autor y los datos estadísticos no se actualizaron de acuerdo con la publicación Estadísticas del Agua en México de SEMARNAT y CNA, 2004, debido a que se observó cierta inexactitud en algunos componentes hidrológicos, como el caso del ciclo hidrológico, donde la suma de los valores de las fases del mismo no da el cien por ciento de la precipitación.

tengan cursos bajos suaves, de poca pendiente, que permiten la navegación. En la península de Yucatán, aun cuando se registra una importante cantidad de precipitación, no se forman corrientes superficiales debido a que la mayor parte del agua se infiltra a través del material calizo del que está constituida, de manera que el agua llega al mar por vía subterránea.

El clima de esta vertiente es en general húmedo, de manera que las corrientes fluviales son más bien de carácter permanente, es decir, llevan agua durante todo el año.

Entre las principales corrientes de esta vertiente están las que a continuación se caracterizan.

Río Bravo

Constituye el límite internacional entre México y Estados Unidos en la parte media e inferior de su curso. Nace en las Montañas Rocallosas a 4 000 m de altitud, en el centro de Estados Unidos y sigue una dirección general hacia el sureste hasta su desembocadura en el Golfo de México. La cuenca de este río tiene una superficie de 472 000 km^2, de los cuales 241 509 km^2 corresponden a México. Descarga un volumen medio anual de 12 135 millones de m^3, de los cuales México aporta 5 810 millones. Entre sus afluentes en territorio mexicano más importantes están los ríos Conchos, Salado, Álamo y San Juan. A lo largo del río Bravo se han establecido varias poblaciones, entre ellas sobresalen Ciudad Juárez, Piedras Negras, Nuevo Laredo, Camargo, Reynosa y Matamoros en territorio mexicano, y El Paso, Laredo, Río Grande y Brownsville en territorio de los Estados Unidos. La sección estadounidense de esta cuenca se ha aprovechado ampliamente con vasos de almacenamiento, por lo cual el río ha quedado controlado y sólo en temporada de lluvias el cauce se llena y transporta volúmenes de importancia. Debido a ello, la corriente principal del río Bravo está alimentada esencialmente por los afluentes mexicanos. En el tramo internacional se han construido obras de aprovechamiento como la presa de La Amistad y la presa Falcón, con el fin de controlar los azolves y las avenidas, así como para utilizar para el riego el agua embalsada. Sobre el río San Juan, afluente mexicano del Bravo, se construyó la presa El Cuchillo, con objeto de abastecer de agua a la ciudad de Monterrey, y para riego.

Figura 3. Red hidrografica de la República Mexicana.

Río Pánuco

La cuenca de este río comprende varias entidades: Distrito Federal, Hidalgo, México, Querétaro, San Luis Potosí, Veracruz y Tamaulipas. El sistema fluvial va de oeste a este y comprende una extensión de 66 300 km^2. El río Pánuco nace artificialmente en la cuenca de México, en el Gran Canal del Desagüe de la Ciudad de México que sale de la cuenca por el túnel de Tequixquiac (obra artificial) y descarga en el río Salado. El río Cuautitlán, que nace también en la cuenca de México, en su parte oeste, es otro de los formadores del río Pánuco, ya que al salir de ella por el Tajo de Nochistongo (obra artificial) se une al río Salado originando al río Tula, que posteriormente recibe el nombre de río Moctezuma y finalmente el de río Pánuco. Entre sus principales afluentes están los ríos San Juan del Río, Victoria o Extorax, Amajac, Tempoal, Tamuín y Guayalejo o Tamesí. En la cuenca del río Tamuín se encontraba la cascada El Salto, la cual desapareció para su aprovechamiento hidroeléctrico, y también se encuentra la cascada de Micos que representa una reserva hidroeléctrica. Se estima que el río Pánuco tiene un escurrimiento medio anual de 17 300 millones de m^3. Su curso inferior, hasta su confluencia con el río Tamuín, es navegable. A través de él llegan embarcaciones de gran calado al puerto de Tampico, situado a 12 km de la desembocadura. En la cuenca del río Pánuco se han construido varias obras de aprovechamiento, entre ellas las presas de Endó en el río Tula, Guadalupe en el río Cuautitlán, Zimapán en el río Moctezuma y varias más de menor capacidad de almacenamiento; todas con fines de riego y control de avenidas, y en el caso de la de Zimapán, para generación de energía eléctrica. También existen varios distritos de riego, entre los más importantes destacan. El Mante en Tamaulipas, San Juan del Río en Querétaro y Tula en Hidalgo. El Pánuco es uno de los ríos cuyas aguas se encuentran altamente contaminadas.

Río Tecolutla

Nace en la sierra de Puebla. Entre sus principales afluentes están los ríos Necaxa, Tenango, Laxaxalpan, Tecuantepec o Zempoala, Joloapan y Chichicatzapa. Tiene una aportación media anual de 7 529 millones de m^3 y un área de 8 080 km^2. En su cuenca se encuentra el importante sistema hidroeléctrico de Necaxa. El río Tecolutla llega al mar en un

curso tranquilo y descarga en la barra de Tecolutla que se encuentra casi cerrada, sólo se comunica con el mar por medio de un canal. El río es navegable por pequeñas embarcaciones.

Río Papaloapan

La cuenca de este río ocupa parte de los estados de Puebla, Oaxaca y Veracruz. Tiene un escurrimiento medio anual de 39 175 millones de m^3 y una superficie de 39 189 km^2. La corriente principal desemboca en la laguna de Alvarado. Se forma por la unión de los ríos Salado y Tomellín, conociéndosele como río Quiotepec al principio, Santo Domingo después y por último como río Papaloapan. El río principal tiene varios afluentes de importancia: río Usila, río Valle Nacional, río Tonto, río Tesechoacán y río San Juan. De sus afluentes son navegables el río San Juan en sus últimos 60 km, el río Tesechoacán los últimos 49 km y el río Tonto más de 120 km aguas arriba, a partir de su confluencia con el Papaloapan, éste es navegable desde su unión con el río Valle Nacional. El sistema fluvial, en conjunto, representa uno de los más grandes recursos potenciales de México. Se ha construido la presa Miguel Alemán o Temascal en el río Tonto, con una gran capacidad de almacenamiento; sus objetivos principales son los de control de avenidas, generación de energía eléctrica, riego y navegación. También se tiene la presa Cerro de Oro sobre el río Santo Domingo, para control de avenidas y riego.

Río Coatzacoalcos

Tiene una cuenca de 21 120 km^2 de extensión, se encuentra situada en el Istmo de Tehuantepec y abarca parte de los estados de Oaxaca y Veracruz. Su escurrimiento medio anual es de 22 394 millones de m^3; el río es navegable. Su afluente más importante es el río Uxpanapa. En su desembocadura, sobre la margen izquierda, se localiza la ciudad de Coatzacoalcos y sobre la margen derecha, el puerto petrolero de Pajaritos, así como varios complejos petroquímicos de PEMEX y de capital privado. Por lo anterior, las aguas de este río, especialmente en su curso bajo, se encuentran contaminadas.

Río Grijalva

Pertenece al sistema fluvial Grijalva-Usumacinta, que abarca gran parte

de los estados de Chiapas y Tabasco. El río Grijalva nace en Guatemala y continúa por México hasta su desembocadura en el Golfo de México; durante su recorrido recibe varios nombres: en su parte alta el de río Chiapa, en su curso medio río Mezcalapa, y a partir de su paso por la ciudad de Villahermosa se denomina río Grijalva. Entre sus principales afluentes se cuentan el río San Miguel, río de La Venta, río Blanco, río Pichucalco, río de la Sierra y río Chilapa. Ya en la Llanura Tabasqueña, dado que las lluvias son abundantes y el terreno plano, se observa que las corrientes pierden individualidad y se conectan entre sí, así se tiene que el río Usumacinta desemboca en la margen derecha del río Grijalva, poco antes de que éste llegue al Golfo de México; por tal motivo, el escurrimiento medio anual estimado en esta zona pertenece a lo que se conoce como Sistema Fluvial Tabasqueño-Chiapaneco y es de 105 200 millones de m^3. A través del curso del río Grijalva se han hecho algunos aprovechamientos entre los que destacan la presa Netzahualcóyotl, la presa de La Angostura y la de Chicoasén, con fines de control de avenidas, generación de energía hidroeléctrica, riego y navegación.

Río Usumacinta

Forma parte del sistema fluvial tabasqueño-chiapaneco, que comprende una superficie de 121 930 km^2. Nace en Guatemala con el nombre de río Salinas, que más adelante cambia por el de río Chixoy y posteriormente por el de Usumacinta. Entre sus afluentes están el río de La Pasión, el río Lacantún y el San Pedro. Desemboca en unión con el río Grijalva en el Golfo de México. Aproximadamente 350 km antes de su desembocadura presenta una anchura del orden de 150 m.

Río Hondo

Constituye el límite internacional entre México y Belice, al sur de la península de Yucatán. Es una de las pocas corrientes superficiales de la península de Yucatán, de hecho su cauce corre a lo largo de una profunda falla geológica; desemboca en la Bahía de Chetumal, su área es de 10 800 km^2 y su escurrimiento medio anual de 2 800 millones de m^3.

Vertiente del Océano Pacífico

Está constituida por las sierras de la península de Baja California, las

laderas occidentales de la Sierra Madre Occidental, gran parte del Eje Volcánico Transmexicano, la Sierra Madre del Sur, el declive sur de la Sierra Madre de Chiapas y las cuencas aluviales costeras.

Debido a que en la mayoría de los casos las sierras se aproximan bastante al mar, los ríos que se originan en esta vertiente son de curso corto y de tipo torrencial, con excepción de los de la parte norte, en donde la llanura costera alcanza cierta extensión, y de algunos ríos que tienen su origen bastante adentro del continente, como el río Santiago y el río Balsas.

El carácter de los ríos depende del clima de las regiones por donde fluyen, así, el curso bajo de la parte norte de la costa del Océano Pacífico y los de la península de Baja California son *intermitentes,* es decir, sólo llevan agua cuando llueve; en cambio los de la parte central y sur de esta vertiente en general son *permanentes,* es decir, llevan agua durante todo el año.

De los ríos que drenan la vertiente del Océano Pacífico destacan los siguientes:

Río Tijuana

Se localiza en el noroeste de la península de Baja California, pasa por la ciudad de Tijuana. Su cuenca tiene una superficie de 4 424 km^2 de los cuales 1 221 pertenecen al territorio estadounidense y 3 203 a territorio mexicano. Aunque el régimen pluviométrico es de invierno, es muy irregular debido a la eventualidad de las lluvias. En su curso se encuentra la presa Rodríguez que tiene como finalidad el control de avenidas y el abastecimiento de agua potable. Tiene una aportación media anual de 90 millones de m^3 y un área de 3 200 km^2.

Río Colorado

La mayor parte de su cuenca está situada en territorio de Estados Unidos. La parte mexicana de la cuenca corresponde prácticamente al delta del río, es decir, a su desembocadura. Su cauce sirve tanto de límite internacional como entre los estados de Sonora y Baja California Norte. En el siglo pasado el río era navegable, pero al ir construyendo obras de aprovechamiento en la parte estadounidense, el agua de escurrimiento fue disminuyendo. La utilización del agua del río en el vecino país ha creado problemas en territorio mexicano: el agua, al ser derivada para

regar los terrenos agrícolas regresa al río con un alto grado de salinidad, de manera que al llegar a México estas aguas no pueden ser aprovechadas. Esta situación ha generado conflictos entre los dos países, por los cuales se trató de llegar a un acuerdo que consiste en dejar llegar a México mayor volumen de agua virgen (que no haya sido usada con anterioridad). Finalmente, la situación se resolvió con la construcción de un canal paralelo al río, para verter las aguas saladas.

Río Sonora

Se localiza en el estado de Sonora y pasa por la ciudad de Hermosillo. Tiene una superficie de 28 950 km^2 y su escurrimiento medio anual es de 171 millones de m^3. Su afluente más importante es el río San Miguel. La corriente sólo llega al mar en avenidas extraordinarias, porque su curso se pierde por infiltración en la llanura costera. Entre las obras de aprovechamiento de esta cuenca están la presa Abelardo Rodríguez con fines de riego y el distrito de riego Costa de Hermosillo.

Río Yaqui

Su cuenca, con 72 630 km^2 de extensión, ocupa parte de los estados de Chihuahua y Sonora y una pequeña porción de Estados Unidos. Nace en la Sierra Madre Occidental con el nombre de río Papigóchic y baja de la sierra por cañones muy estrechos. Después se le conoce con el nombre de río Aros y finalmente con el de Yaqui. Recibe entre sus afluentes a los ríos Tutuaca, Mulatos, Zahuaripa, Bacanora, Bonito, Nácori, Bavispe y Moctezuma. La corriente principal tiene un escurrimiento medio anual de 2 790 millones de m^3. Entre las obras de aprovechamiento realizadas en esta cuenca están las presas Plutarco Elías Calles, Álvaro Obregón y La Angostura, todas con propósitos de riego y generación de energía eléctrica, así como los distritos de riego del río Yaqui.

Río Mayo

Nace en la Sierra Madre Occidental y ocupa territorio de los estados de Chihuahua y Sonora. Se origina en la unión de los ríos Moris y Candemeña. Entre sus afluentes están los ríos Rábanos, Guajaray y Chico. En su curso bajo se construyó la presa Mocúzari con objeto de controlar las avenidas, riego y generación de energía eléctrica. Su escurrimiento

medio anual se estima en 937 millones de m^3 y su área de escurrimiento es de 13 750 km^2.

Río Fuerte

Nace en la Sierra Madre Occidental y su cuenca se ubica en los estados de Chihuahua, Sinaloa, Sonora y Durango. Tiene una extensión de 36 275 km^2 y un escurrimiento medio anual de 5 933 millones de m^3. Se origina en la unión de los arroyos Chinatú y Verde. En su nacimiento se llama río San Miguel. Recibe como afluentes a los ríos Choix, Oteros, Septentrión y Álamos. En la parte baja de la cuenca el río se aprovecha para riego por medio de la presa Miguel Hidalgo, y aguas arriba de ésta se encuentra la presa Huites, con fines de riego y generación eléctrica.

Río Sinaloa

Tiene su origen en la parte más alta de la Sierra Madre Occidental, en el estado de Chihuahua, por la unión de los ríos Besonapa y Nohinora. La cuenca tiene una superficie de 13 300 km^2. Se estima que en su desembocadura descarga aproximadamente 2 176 millones de m^3. Tiene un recorrido total de 500 km, de los cuales casi la mitad se localizan en Sinaloa. Entre las principales obras para el aprovechamiento de sus aguas está la presa Bacurato, con una capacidad de 1 460 millones de m^3, terminada de construir en 1987, con fines de irrigación, control de avenidas y generación de energía eléctrica.

Río Culiacán

Nace en la Sierra Madre Occidental y su cuenca, con 17 700 km^2 de superficie, ocupa parte de los estados de Durango y Sinaloa. Se forma de la unión de los ríos Humaya y Tamazula, en la ciudad de Culiacán. Entre sus afluentes están el río Valle de Topia, el río San Fernando, el arroyo Banopa y el río Badirahuato. Su escurrimiento medio anual se estima en 3 500 millones de m^3. Entre las obras de aprovechamiento está la presa Sanalona, situada sobre el río Tamazula, destinada al desarrollo del valle de Culiacán en el centro de Sonora.

Río San Lorenzo

Se origina en la Sierra Madre Occidental, dentro del estado de Durango

y atraviesa el estado de Sinaloa en su parte media. El área de la cuenca es de 10 500 km^2. El río se aprovecha para riego y energía eléctrica, a través de la presa Comedero (1991).

Río Lerma

Forma parte del Sistema Hidrográfico Lerma-Chapala-Santiago, que abarca 125 370 km^2 de extensión. Nace en la parte central de México, en la Sierra Volcánica Transversal. Abarca parte de los estados de México, Querétaro, Michoacán, Guanajuato y Jalisco. Entre sus afluentes más importantes están los ríos de La Laja, Silao, Turbio, Angulo y Duero, este último desembocaba en el Lago Chapala, pero por obras agrícolas en las que se le ha ganado tierra al lago, actualmente desagua en el río Lerma.

El río Lerma desemboca en el Lago Chapala y su aportación media anual es de 2 150 millones de m^3. Dentro de esta cuenca se localiza la importante zona agrícola de El Bajío. En su curso se han construido obras para generación de energía eléctrica que favorecen a las poblaciones situadas dentro de la cuenca. El nacimiento del río Lerma tiene gran importancia para la Ciudad de México, ya que, con objeto de abastecer de agua potable a esta ciudad, el agua subterránea de la cuenca alta del río se ha captado, ocasionando la desaparición de los lagos donde éste se originaba, de manera que ahora prácticamente nace de las corrientes que bajan del Nevado de Toluca y de la Sierra de las Cruces.

Lago Chapala

Es el más importante del país. Se trata de una fosa tectónica originada por un hundimiento geológico estructural. Tiene una profundidad media de 10 m. Dentro del lago se levantan dos islas: Mezcala y Los Alacranes. Recibe aportaciones de los ríos Zula, Lerma y Duero. Por lo que respecta a estos dos últimos ríos, la desecación artificial con fines de uso agrícola de la parte oriental del lago, la convirtió en lo que se denomina la Ciénega de Chapala; esta obra obligó a la desviación del río Duero hacia el Lerma y a la utilización de los caudales de ambos en el riego de las tierras que se ganaron al lago para dedicarlas a la agricultura. Esto disminuyó la aportación vertida por esos ríos al lago Chapala. El desagüe del lago se efectúa naturalmente a través del río Santiago.

En el lago se practica la pesca para el consumo local, y gran parte de las tierras de su alrededor se dedican a las labores agrícolas. Es también un importante centro de atracción turística. En la actualidad está seriamente afectado por obras humanas (en especial de tipo agrícola), por el establecimiento de poblaciones, por la extracción de agua subterránea, por la invasión del lirio acuático y por azolvamiento, debido a lo cual el nivel de agua del lago ha descendido considerablemente, sumándose a la desecación natural que está teniendo lugar.

Las intensas lluvias ocurridas durante 2003 propiciaron una recuperación de la capacidad del lago de Chapala, del 19% que tenía en 2000 al 37%. En junio de 2003 se registró un almacenamiento aproximado de 200 millones de m^3 y en noviembre del mismo año fue de cerca de los 3 100 millones de m^3. Es decir, su volumen aumentó alrededor de 2 900 millones de m^3 en un período de cinco meses (*Día Siete,* 2 de noviembre de 2003).

Río Santiago

Se origina por los derrames del Lago Chapala, controlados por la presa Poncitlán. Entre sus afluentes principales están los ríos Verde, Juchipila, Bolaños, Apozolco y Huaynamota. Su cuenca ocupa territorio de los estados de Nayarit, Jalisco, Zacatecas y Aguascalientes. El escurrimiento medio anual del río Santiago, en conjunto con el río Lerma y el Lago Chapala es de 11 457 millones de m^3. El río Santiago es navegable por pequeñas embarcaciones, dentro del estado de Nayarit. Entre las obras de aprovechamiento están la presa Santa Rosa con fines hidroeléctricos, la presa Calles con fines de riego, las presas Chique y Aguamilpa con fines de riego e hidroeléctricos y los distritos de riego Unidad río Santiago, Unidad Tlaltenango y Pabellón. En la actualidad se construye la presa El Cajón, río arriba de la presa Aguamilpa, con el propósito de generar energía hidroeléctrica.

Río Balsas

Su cuenca, de 112 320 km^2 de extensión, comprende importantes áreas de los estados de Oaxaca, Puebla, México, Morelos, Michoacán y Guerrero. Nace en el estado de Puebla por la unión de los ríos San Martín y Zahuapan. En su principio se le conoce como río Atoyac, posteriormente como río Mezcalapa, después como Balsas y final-

renciados, las que tienen un drenaje establecido y descargan en un lago, denominadas *cuencas endorreicas*, y aquéllas carentes de ríos definidos en las cuales no hay cauces labrados y que, cuando llueve, el agua escurre por gravedad sobre el terreno, denominadas *cuencas arreicas*.

Entre los ríos de la vertiente interior se encuentran los siguientes:

Río Casas Grandes

Se localiza en el estado de Chihuahua, ocupa 16 600 km^2 de superficie. Se forma en el declive oriental de la Sierra Madre Occidental y termina en la laguna Guzmán* que se encuentra en proceso de desecación natural. El río tiene una longitud de 350 km y la cuenca tiene un escurrimiento general aproximado de 294 millones de m^3 que se utilizan parcialmente para riego en el Distrito Casas Grandes.

Río Santa María

Se localiza también en el estado de Chihuahua. Desemboca en la laguna Santa María. La cuenca aporta un volumen medio anual de 175 millones de m^3 de agua y tiene 10 680 km^2 de extensión. Debido a los aprovechamientos de los poblados por donde pasa el río, las cantidades de agua que recibe la laguna son cada vez más reducidas.

Río del Carmen

Localizado igualmente en el estado de Chihuahua, con su desagüe da lugar, a la laguna de Patos. Recorre 250 km^2 antes de llegar a la laguna. La cuenca, con una superficie de 11 800 km^2, aporta un escurrimiento medio anual de 271 millones de m^3.

Bolsón de Mapimí

Es una cuenca arreica, es decir, carece de ríos bien definidos. Se extiende en los estados de Chihuahua y Coahuila, y se caracteriza por su aridez y por su topografía de casi absoluta horizontalidad.

---

* Lago: cuerpo de agua en el continente.
Laguna: cuerpo de agua costero comunicado con el mar.
Los términos lago y laguna, a pesar de que cada uno tiene su propio concepto, por lo general se usan indistintamente.

renciados, las que tienen un drenaje establecido y descargan en un lago, denominadas *cuencas endorreicas*, y aquéllas carentes de ríos definidos en las cuales no hay cauces labrados y que, cuando llueve, el agua escurre por gravedad sobre el terreno, denominadas *cuencas arreicas.*

Entre los ríos de la vertiente interior se encuentran los siguientes:

Río Casas Grandes

Se localiza en el estado de Chihuahua, ocupa 16 600 km^2 de superficie. Se forma en el declive oriental de la Sierra Madre Occidental y termina en la laguna Guzmán* que se encuentra en proceso de desecación natural. El río tiene una longitud de 350 km y la cuenca tiene un escurrimiento general aproximado de 294 millones de m^3 que se utilizan parcialmente para riego en el Distrito Casas Grandes.

Río Santa María

Se localiza también en el estado de Chihuahua. Desemboca en la laguna Santa María. La cuenca aporta un volumen medio anual de 175 millones de m^3 de agua y tiene 10 680 km^2 de extensión. Debido a los aprovechamientos de los poblados por donde pasa el río, las cantidades de agua que recibe la laguna son cada vez más reducidas.

Río del Carmen

Localizado igualmente en el estado de Chihuahua, con su desagüe da lugar, a la laguna de Patos. Recorre 250 km^2 antes de llegar a la laguna. La cuenca, con una superficie de 11 800 km^2, aporta un escurrimiento medio anual de 271 millones de m^3.

Bolsón de Mapimí

Es una cuenca arreica, es decir, carece de ríos bien definidos. Se extiende en los estados de Chihuahua y Coahuila, y se caracteriza por su aridez y por su topografía de casi absoluta horizontalidad.

---

* Lago: cuerpo de agua en el continente.
Laguna: cuerpo de agua costero comunicado con el mar.
Los términos lago y laguna, a pesar de que cada uno tiene su propio concepto, por lo general se usan indistintamente.

Río Nazas

La cuenca, de 34 580 km^2, ocupa en su mayor parte territorio del estado de Durango y una pequeña porción del de Coahuila. Nace de la unión de los ríos Oro y Ramos, en el declive oriental de la Sierra Madre Occidental. La corriente principal va por el cañón Fernández y después penetra en la región conocida como la Comarca Lagunera, caracterizada por ser una zona árida; finalmente desemboca en la laguna Mayrán. Atraviesa ciudades importantes como Gómez Palacio, Ciudad Lerdo y Torreón. Aporta un escurrimiento medio anual de 1 127 millones de m^3. Por encontrarse en una zona seca, sus aprovechamientos han sido exhaustivos. Entre las obras de aprovechamiento se cuentan las presas Lázaro Cárdenas, Las Tórtolas y Calabazas, todas con fines de riego, las cuales han provocado que la laguna Mayrán ya no reciba las aportaciones del río.

Río Aguanaval

Esta corriente también descarga en la Comarca Lagunera, en la laguna de Viesca. Nace en el estado de Zacatecas y en su recorrido sirve de límite entre los estados de Zacatecas y Durango, penetra en el estado de Coahuila y descarga en la laguna mencionada. La parte montañosa está cubierta de bosque y el resto de la cuenca tiene un paisaje árido en el que la vegetación es arbustiva o de cactus. El río principal tiene una longitud de 500 km. El escurrimiento medio anual de la cuenca es de 143 millones de m^3 aproximadamente y su área es de 20 800 km^2. El aprovechamiento que se hace de las aguas de este río es, principalmente, con fines de riego.

El Salado

En la parte norte y noreste del país se encuentra esta región arreica que comprende la mayor parte del estado de San Luis Potosí y porciones de Aguascalientes, Zacatecas, Coahuila y Tamaulipas. Es una zona plana en la que no se observan cauces importantes. Las poblaciones más sobresalientes son centros mineros en donde la necesidad de obtener agua ha hecho imprescindibles los estudios de agua subterránea.

Lago de Cuitzeo

Se localiza en el Eje Volcánico Transmexicano ocupando, en su mayor parte, territorio del estado de Michoacán. Está alimentado por los ríos Grande de Morelia y Queréndaro, sin embargo, debido a los aprovechamientos que se hacen de ellos, han disminuido los volúmenes de agua que llevan al lago. Asimismo, los manantiales que aportaban caudales importantes de agua, se han ido extinguiendo. El río Grande de Morelia pasa por la orilla la ciudad de Morelia, capital del estado de Michoacán. En su curso, cerca de esa ciudad, se construyó la presa Cointzio con objeto de almacenar agua para riego, generar energía, regularizar el río y evitar inundaciones. El río Queréndaro transporta gran cantidad de material sólido debido a que la serranía Mil Cumbres, donde nace, ha sido intensamente deforestada. El escurrimiento medio anual que aporta la cuenca del lago de Cuitzeo es de 332 millones de m^3 y su extensión de 4 100 km^2.

Lago Pátzcuaro

Se localiza también en el Eje Volcánico Transmexicano y en territorio michoacano. En su seno se levanta la isla de Janitzio y los islotes La Pacanda, Yunuán, Tecuén, Jarácuaro, Urandén y Carián. Posee una importante riqueza pesquera (pescado blanco) que beneficia a las poblaciones ribereñas entre las cuales destacan Pátzcuaro, Tzintzuntzan y Quiroga. Su alimentación depende de manantiales y de pequeños escurrimientos superficiales, principalmente los arroyos Guaní y Chapultepec. Por su escenario de notable belleza natural, constituye un atractivo centro turístico, pero sus aguas están siendo alteradas por la maleza acuática que cubre un 40% de su superficie, por la constante afluencia de azolve provocado por la continua deforestación de sus alrededores y por el desagüe de aguas negras. El escurrimiento medio anual que aporta la cuenca del lago es de 81 millones de m^3 y su área es de 880 km^2.

Llanos de San Juan o Región del Seco

Es una zona ubicada en su mayor parte en el estado de Puebla, limitada al oriente por la Sierra Madre Oriental, la cual impide que lleguen a ella los vientos húmedos procedentes del Golfo de México, por lo que

es una región más bien seca. Se localizan en ella varios lagos que ocupan los cráteres de edificios volcánicos como la laguna de Alchichica. Las aguas de lluvia forman lagunas como las de Quecholac, Tecuitlapa y Aljojuca. La aportación media anual es de 80 millones de m^3.

Lago Tequesquitengo

Se encuentra en el centro del estado de Morelos. Aunque recibe corrientes superficiales, las alimentaciones subterráneas manifiestan su mayor aporte en la temporada seca.

Lagunas de Cempoala

Se localizan en el norte del estado de Morelos, en la Sierra del Ajusco, a 2 900 m de altitud. Ocupan áreas muy reducidas cuya cuenca se encuentra provista de bosques. Los nombres de las lagunas son Cempoala, Compila, Tonatihua, Seca, Ocoyotongo, Quila y Huayapan. Ya empiezan a ser afectadas por azolves generados por la deforestación aledaña.

Lagunas de Montebello

Se localizan en la meseta de Chiapas, en la zona fronteriza con Guatemala. Constituyen un paisaje muy bello, sus aguas son de colores variados, resultantes del reflejo de la vegetación y la atmósfera y de la constitución geológica del terreno (rocas calizas). Tal parece que son 25 lagunas y 16 de ellas están en territorio mexicano. Las más accesibles son Lago de Colores, San José del Arco y Montebello.

Cuenca de México (Tamayo, 1962; Maderey, 2004)

Se conoce comúnmente con el nombre de Valle de México. Tiene gran importancia por el hecho de estar situada en ella la Ciudad de México. La cuenca tiene una superficie total de 9 600 km^2, aunque cabe aclarar que el extremo noreste constituye una zona incorporada artificialmente a los límites originales de la cuenca, de esta forma, a partir de 1960, se amplió la superficie original que era de 8 153 km^2. En realidad la importancia de esta región radica en la enorme transformación que ha sufrido en el lapso de más de 650 años debido al nacimiento de lo que fue la gran Tenochtitlán primero, y la gran Ciudad de México después, lo cual la ha convertido en una cuenca muy peculiar.

fue la gran Tenochtitlán primero, y la gran Ciudad de México después, lo cual la ha convertido en una cuenca muy peculiar.

La Cuenca de México constituyó una cuenca cerrada ocupada por un gran lago cuyo volumen fue descendiendo por causas naturales, de tal manera que en el siglo XV se encontraba fraccionado en seis lagos, de los cuales el más bajo y con agua salada era el de Texcoco, los otros, de agua dulce y más altos que el anterior, eran: Chalco, Xochimilco, Xaltocan, San Cristóbal y Zumpango. Es probable que en época de lluvias estos lagos se convirtieran en uno solo. Actualmente se encuentran vestigios de los lagos de Zumpango y de Texcoco –en los últimos años se han realizado obras para la regeneración de este último y los de Xochimilco y Chalco que han disminuido considerablemente su nivel y volumen. En 1325 los mexicas fundaron la ciudad de Tenochtitlán en la parte occidental del lago de Texcoco, cercana a la tierra firme; la ciudad era prácticamente una isla y presentaba como desventajas las inundaciones y la dificultad para el abastecimiento de agua dulce, ya que la del lago era salada. Las inundaciones se producían debido al desnivel de los lagos, problema que se resolvió con la construcción de puentes y diques que, al fragmentar el lago, permitieron regular las aguas y en su parte occidental transformaron el agua salobre en agua dulce. El dique más famoso fue el albarradón de Nezahualcóyotl, construido al oriente de la ciudad; dividió el lago de Texcoco en dos porciones, la occidental recibió el nombre de lago de México. Al mismo tiempo, se construyeron acueductos para conducir agua potable desde tierra firme, entre ellos destaca el de Chapultepec. Los mexicas poseían un sistema hidráulico muy eficiente para regular los lagos y acueductos. En realidad, Tenochtitlán únicamente sufrió dos graves inundaciones, una en 1449 a raíz de la cual se construyó el albarradón de Nezahualcóyotl y otra en 1500 cuando, al conducir el agua del manantial Acuecuéxcatl, ésta brotó con tal fuerza que anegó a la ciudad.

Poco tiempo después de la Conquista se observó que el agua de los lagos disminuía; en realidad lo que sucedió es que los nuevos pobladores empezaron a deforestar la cuenca para dar paso a las actividades agropecuarias, lo cual inició una erosión acelerada y, por la depositación del material erosionado, se levantó el nivel del fondo del vaso lacustre. Además, la perturbación del medio natural alteró el régimen

de escurrimiento y se observaba que en época de lluvias el caudal de los ríos hacía subir rápidamente el nivel del agua del lago.

La Ciudad de México sufrió varias inundaciones durante la época colonial. El albarradón de Nezahualcóyotl había sido destruido por los españoles, de manera que se construyó otro, el de San Lázaro, formando un semicírculo que rodeaba a la ciudad por el lado oriente; más tarde se iniciaron las obras de desagüe de la cuenca por el lugar denominado Nochistongo, situado al norte de la misma, en Zumpango-Huehuetoca. El proyecto se inició en 1607, pero el canal abierto se empezó a derrumbar y a azolvar y la obra no se prosiguió. El 21 de septiembre de 1629 se registró la mayor inundación padecida por la ciudad, la tormenta duró 36 horas y la inundación seis años. Ante tal desastre se reiniciaron los trabajos de desagüe por Nochistongo que se dieron por terminados en 1788. Para entonces se había presentado un nuevo proyecto de desagüe general por Tequixquiac, lugar ubicado también al norte de la cuenca, al oriente de Nochistongo. Entre 1810 y 1867 se hicieron pocos avances con respecto al desagüe de la cuenca, pero entre 1876 y 1911 se terminó el Gran Canal del Desagüe, mismo que parte desde la Ciudad de México y termina en el túnel de Tequixquiac. Así, en 1915 desapareció el último resto del lago de México. Actualmente las aguas de la cuenca salen por su lado norte, parte de ellas por el túnel de Tequixquiac, descargando en el río Salado, y el resto por el Tajo de Nochistongo hacia el río del Salto, ambos ríos formadores del Pánuco.

En 1925 se empezaron a sentir los primeros efectos de la desecación de la cuenca y se hicieron más notorios a partir de 1940, cuando la población empezó a crecer de una manera desorbitada. El abastecimiento de agua a la ciudad se efectuaba mediante manantiales y pozos dentro de la misma cuenca, pero la explotación sin control del agua subterránea provocó el hundimiento del suelo con la consiguiente dislocación de la infraestructura como el drenaje urbano, por lo cual fue necesario controlar el bombeo para evitar problemas más graves. En la década de 1950 se produjeron las inundaciones más serias de lo que va de este siglo. Al mismo tiempo que la ciudad crecía, se incrementaba el desequilibrio del medio natural de la cuenca. Los caudales que las corrientes aportaban a la ciudad en época de lluvias eran ya realmente peligrosos. Ante esta situación se construyó una serie de estructuras

hidráulicas sobre los ríos que llegaban a la ciudad por su lado oeste, con el fin de desviarlos hacia el lago de Texcoco. Se instalaron plantas de bombeo para hacer llegar el agua de la ciudad hasta el nivel del Gran Canal del Desagüe que, por el hundimiento, perdió pendiente y capacidad de desagüe. Se construyó un segundo túnel en Tequixquiac debido a que el primero ya resultaba insuficiente. La ciudad siguió creciendo y al cabo de los años las obras fueron otra vez insuficientes. Se procedió a sacar de la cuenca los aportes de las corrientes del este, se amplió el drenaje urbano y el número de plantas de bombeo, pero ante el irrefrenable crecimiento de la ciudad se llevó a cabo el proyecto del Drenaje Profundo, que empezó a funcionar en 1975. Se calcula que en esta obra, complemento del Gran Canal del Desagüe, no se presentarán dislocaciones y que la consolidación se da sólo en los primeros metros del subsuelo.

Otro problema de la Cuenca de México es el abastecimiento de agua potable, pues las aguas extraídas de la cuenca, frente al rápido crecimiento de la población, pronto resultaron insuficientes. Al respecto se buscó una solución magna y sorprendente: desde 1937 se hicieron estudios de la cabecera del río Lerma y en 1951 ya se conducían las aguas de una cuenca a otra; en la actualidad se trae agua del río Cutzamala, afluente del Balsas y, de seguir la tendencia creciente de la población, en el futuro tendrá que optarse por una solución complementaria, como ampliar la recirculación del agua en las industrias y el aprovechamiento máximo de las aguas negras previamente tratadas.

Entre las principales corrientes de la cuenca están los ríos de las Avenidas de Pachuca, San Juan Teotihuacán, Cuautitlán, Churubusco, de los Remedios, Hondo y Magdalena. El caudal medio aproximado que sale de la cuenca es de 482 millones de m^3.

Como se puede observar, es en la vertiente interior donde adquieren mayor importancia los cuerpos de agua, ya que las corrientes fluviales, al no tener una salida hacia el mar, forman este tipo de depósitos lacustres.

III. AGUA SUBTERRÁNEA

IMPORTANCIA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El comportamiento del agua subterránea ha sido poco comprendido por los tomadores de decisión así como por muchos miembros del público en general. Dicho comportamiento tiene que ver con que el agua se infiltra en un sitio específico, una vez en el subsuelo recorre una distancia antes de salir formando un sistema de flujo; en general se forman sistemas de diferente jerarquía dependiendo de su distancia y profundidad de recorrido. La falta de entendimiento se debe a una insuficiencia educativa en el tema, así como a la naturaleza oculta del recurso y al limitado número de profesionales que conocen sobre las diversas manifestaciones que marcan su funcionamiento. Manifestaciones que pertenecen a diferentes ramas del conocimiento de las Ciencias de la Tierra, la biología, la geología, la química, la física, la hidrología y la hidráulica.

En forma general, el agua subterránea es aquella que se encuentra debajo de la superficie del suelo, e incluye al agua que está de tránsito del suelo hacia el nivel de saturación (nivel freático) y aquélla que se encuentra por debajo de este nivel; estas zonas se conocen como vadosa (o no saturada) y saturada, respectivamente.

Se puede comentar que existen dos visiones respecto al agua subterránea: una pesimista y la otra optimista; la primera sugiere que su aprovechamiento está irremediablemente ligado a impactos negativos al resto del ambiente, y la segunda que la considera como un recurso de extensión infinita e inagotable.

En el sentido estricto, la visión que hace énfasis en los problemas que se generan como resultado de un uso indiscriminado del recurso

involucra básicamente el incremento de la profundidad del nivel del agua en los pozos, el deterioro en la calidad del agua extraída, la subsidencia del terreno y la desaparición de manantiales. Estas respuestas, si bien están lejos de representar todos los impactos producidos, han sido usadas como elementos de decisión que, en muchas ocasiones, han limitado el desarrollo económico de una zona en cuestión, ya que se considera que la extracción de agua subterránea no constituye una fuente confiable a mediano o largo plazos. Rara vez se toma en cuenta que la respuesta no deseada de cambio en el medio físico o de cantidad o calidad del agua a consecuencia de la extracción, es producida en forma estricta por la falta del conocimiento y entendimiento de la relación directa que existe entre el agua subterránea, el agua superficial y el resto de las componentes del ambiente como la morfología, la vegetación, y en un sentido más amplio, los ecosistemas.

La otra visión considera que el agua subterránea constituye más del 95% del agua dulce asequible en el continente, por lo que es un recurso que, para fines prácticos, puede calificarse como ilimitado en cantidad para ser usado en cualquier actividad productiva, lo que también representa una capacidad importante para diluir los contaminantes que pudieran incorporarse a ella, lo que conduce a su uso sin restricción alguna.

Independientemente de estos dos enfoques por la estrecha interacción que existe entre agua subterránea y superficial, los cambios menores que se registren en la primera pueden provocar modificaciones importantes en el volumen y calidad asequible de la segunda. Se puede considerar que el agua es una parte indivisible del ambiente, y por tanto, es parte dinámica de dicho sistema, la cual se manifiesta con procesos claros como los que se indican más adelante y que, en muchas ocasiones, ya han sido definidos en el ámbito mundial. Esto es, se hace imprescindible entender la dinámica que incluye el funcionamiento del agua subterránea y que debe ser comprendida cabalmente para lograr hacer un uso racional del recurso.

Funcionamiento del agua subterránea

Un programa de desarrollo sustentable en regiones de cualquier tipo de clima (*i.e.*, árido, semi-árido, tropical, templado) requiere del conocimiento de cómo funciona el agua subterránea. Ya que siempre es nece-

sario tener respuestas claras sobre cómo es el movimiento del agua en el subsuelo, este funcionamiento lo aplica la teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea (Tóth, 2000). Para concebir el funcionamiento del agua subterránea es necesario entender:

i) al agua subterránea como asequible en términos de calidad y cantidad, y
ii) la dependencia que existe entre el agua subterránea y los otros componentes del ambiente.

En efecto, el agua subterránea presenta expresiones que son comunes a diversas ciencias como la biología, edafología, química, física, geología, hidrología, entre otras, y la interpretación de cada manifestación en particular debe visualizarse como complementaria de otras. Así, una definición acertada de todos y cada elemento involucrado, que sea resultado de la interpretación acertada de los rasgos medidos en campo, permite despejar el funcionamiento del agua subterránea en el espacio de la estructura geológica que la contiene.

El entender cómo fluye el agua subterránea (en términos de dirección y velocidad) y las respuestas a cambios en su régimen por fuerzas exteriores debidas a la mano del hombre, es un requisito en estudios de ingeniería civil, ecología, agricultura, entre otros. Por esto, una respuesta de solución a un problema relativo al agua subterránea sin la definición apropiada de los sistemas de flujo que la gobiernan imposibilita tener un marco de referencia completo para la pregunta a la que se busca respuesta.

En las últimas décadas se han hecho muchos intentos para definir y medir las diferentes componentes del sistema hidrológico, el cual se considera como una unidad amplia y dinámica con límites y controles bien definidos. Sin embargo, la mayor parte de la metodología de evaluación de información sobre las componentes de dicho sistema han sido definidas normalmente para áreas húmedas y templadas, y se basa, en mucho, en métodos que consideran como preponderante la componente superficial del agua.

A través de los años se ha considerado que esa metodología es aplicable bajo condiciones áridas y semiáridas. Sin embargo, aunque en principio éstas sean equivalentes, el régimen hidrológico de zonas áridas y semiáridas es muy diferente del presente en zonas húmedas

sario tener respuestas claras sobre cómo es el movimiento del agua en el subsuelo, este funcionamiento lo aplica la teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea (Tóth, 2000). Para concebir el funcionamiento del agua subterránea es necesario entender:

i) al agua subterránea como asequible en términos de calidad y cantidad, y
ii) la dependencia que existe entre el agua subterránea y los otros componentes del ambiente.

En efecto, el agua subterránea presenta expresiones que son comunes a diversas ciencias como la biología, edafología, química, física, geología, hidrología, entre otras, y la interpretación de cada manifestación en particular debe visualizarse como complementaria de otras. Así, una definición acertada de todos y cada elemento involucrado, que sea resultado de la interpretación acertada de los rasgos medidos en campo, permite despejar el funcionamiento del agua subterránea en el espacio de la estructura geológica que la contiene.

El entender cómo fluye el agua subterránea (en términos de dirección y velocidad) y las respuestas a cambios en su régimen por fuerzas exteriores debidas a la mano del hombre, es un requisito en estudios de ingeniería civil, ecología, agricultura, entre otros. Por esto, una respuesta de solución a un problema relativo al agua subterránea sin la definición apropiada de los sistemas de flujo que la gobiernan imposibilita tener un marco de referencia completo para la pregunta a la que se busca respuesta.

En las últimas décadas se han hecho muchos intentos para definir y medir las diferentes componentes del sistema hidrológico, el cual se considera como una unidad amplia y dinámica con límites y controles bien definidos. Sin embargo, la mayor parte de la metodología de evaluación de información sobre las componentes de dicho sistema han sido definidas normalmente para áreas húmedas y templadas, y se basa, en mucho, en métodos que consideran como preponderante la componente superficial del agua.

A través de los años se ha considerado que esa metodología es aplicable bajo condiciones áridas y semiáridas. Sin embargo, aunque en principio éstas sean equivalentes, el régimen hidrológico de zonas áridas y semiáridas es muy diferente del presente en zonas húmedas

(Van Lanen y Carrillo-Rivera, 1998). Las necesidades de agua de los seres vivos que allí habitan, así como el agua asequible para otros usos de los ecosistemas y las condiciones climáticas, difieren considerablemente. Por ejemplo, comúnmente en zonas semiáridas el 90% de la lluvia promedio anual se precipita durante menos del 10% del tiempo que dura la estación de lluvias y su distribución espacial no es uniforme; esto contrasta en las zonas templadas donde la lluvia es bastante uniforme en el tiempo de lluvia, y tiende a ser más uniforme en la zona donde llueve.

La mayor parte de los estudios de agua subterránea que se realizan en América Latina consideran que el agua fluye en forma horizontal; y normalmente la información hidrológica se usa para describir un sistema estático en un medio geológico que se considera equivalente a un medio granular con propiedades (porosidad y conductividad hidráulica) que son iguales en todas direcciones, equivalencia que rara vez se presenta en el medio natural. El análisis así desarrollado sólo considera aspectos hidráulicos en bloque sin incorporar ninguna respuesta del ambiente, como por ejemplo el riesgo de consolidación del suelo o de un cambio de la calidad del agua, además de que evita ver al agua subterránea como parte del sistema natural.

En cambio, el análisis del sistema hidrológico subterráneo de manera dinámica representa con más realidad su presencia hidráulica, las respuestas químicas del agua y suelo, y la presencia (o ausencia) de vegetación en la región geomorfológica y paisaje particular. Un análisis de este tipo permite definir las componentes del flujo subterráneo (zonas de recarga, tránsito y descarga), así como su posición relativa en la dimensión vertical (flujos locales, intermedios y regionales). Los flujos se reconocen en su ambiente hidrogeológico particular (fracturado, granular o doble porosidad) e implican un sistema dinámico que incorpora el movimiento vertical del agua subterránea. En regiones como las que existen en México, Argentina, Brasil, Paraguay, Bolivia, Uruguay donde el agua subterránea fluye en unidades geológicas con espesores de más de 1 000 m, la componente vertical controla su movimiento, control que tiene efectos particulares en las zonas donde se tiene una extracción de agua subterránea por medio de pozos.

En esta parte del libro se exponen brevemente aspectos relacionados con el movimiento (vertical) del agua subterránea así como algunas

De acuerdo con la misma fuente, el caudal total de agua subterránea usado es de 951 m^3/s, el cual se distribuye en la forma siguiente:

63% para uso agrícola,
24% para uso urbano y
3% para uso industrial.

Es importante comparar el caudal involucrado para los diferentes usos y en particular el agrícola, que es el mayoritario. A este respecto se debe indicar que las pérdidas de los sistemas de riego han sido estimadas en México por la Comisión Nacional del Agua (CNA) en más de 40%, esto implica que al reducir las pérdidas en un 10% (a un 30%) se tendrían volúmenes adicionales del orden de los actualmente usados en los aspectos urbano e industrial. Es importante referir que una hectárea de maíz transpira alrededor de 3 748 m^3 de agua, esto es equivalente a una lámina de agua de 0.374 m de altura/m^2 de superficie cultivada, que regresa a la atmósfera.

Desde un punto de vista estadístico, existe un indicador que marca que la extracción total (en m^3) de agua dividida entre el número de habitantes muestra lo siguiente:

Reino Unido	180 m^3/habitante
Comunidad Europea	580 m^3/habitante
Japón	720 m^3/habitante
México	780 m^3/habitante
Canadá	1 600 m^3/habitante

Fuente: EODC, Análisis del Desempeño Ambiental, México 1998.

En este sentido, estos valores parecieran mostrar que en México se tiene un caudal importante de agua por habitante, mas es necesario indicar que este indicador carece de consideración sobre cómo se usa el agua de acuerdo con el desarrollo económico que existe en cada país, así mismo, faltaría incluir la necesidad básica del recurso respecto de las condiciones climáticas prevalecientes en cada país (entre más cálido el clima se requiere de más agua) o el grado y tipo de desarrollo económico asociado (por ejemplo, los municipios industrializados requieren tres veces más de agua que aquéllos que no lo están). No menos importante es el aspecto cultural que en muchas formas se refleja en el uso cotidiano del agua, como por ejemplo las veces que se visita la ducha.

Es importante tener en cuenta que esa relación tampoco indica cuál es la eficiencia de los que ponen el agua a la disposición del usuario, como lo es el manejo de las fugas en el sistema de distribución, y tampoco incorpora el manejo del recurso desde la obra de toma hasta la de tratamiento ni el tipo de visión o método con que se define la calidad y cuantía del recurso.

Desde el punto de vista de los volúmenes de agua concesionados por la CNA para la industria autoabastecida en el ámbito nacional, se encuentran listados de acuerdo con las regiones administrativas en las que el país fue dividido por la misma CNA; las cifras acumuladas a diciembre de 2002 se presentan en el cuadro siguiente:

REGIÓN ADMINISTRATIVA	hm^3 anuales	
	Agua superficial	Agua Subterránea
Península de Baja California	67	214
Noroeste	0	31
Pacífico Norte	45	19
Balsas	3 260	143
Pacífico Sur	5	8
Río Bravo	61	221
Cuencas Centrales del Norte	1	105
Lerma-Santiago-Pacífico	74	270
Golfo Norte	174	47
Golfo Centro	1 593	80
Frontera Sur	11	69
Península de Yucatán	0	157
Valle de México y Cutzamala	44	241

Fuente: Gerencia del Registro Público de Derechos de Agua. SGAA. CNA.

ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS DE FLUJO

Si se considera detenido por un instante el flujo de agua subterránea se podrá estimar la forma de su movimiento en el plano horizontal y vertical, lo que resultará en la definición de áreas de recarga, tránsito y descarga (Figura 4). En forma general, existen tres sistemas principales de flujo de agua subterránea que se establecen con la topografía

y el modelo geológico existente: local, intermedio y regional (Tóth, 1962). Una topografía abrupta (Figura 4) producirá varios sistemas locales, en cada bajo topográfico hay agua que entra y sale en el mismo valle. En otros casos, parte del agua de recarga podrá descargar en otro valle localizado a un nivel topográfico menor, esto definirá un sistema intermedio. Los sistemas regionales circulan a la mayor profundidad y van desde las partes topográficamente más altas hasta la zona de descarga más baja de la cuenca. En un ambiente natural, todos estos flujos mantienen un recorrido separado debido a su diferencia de temperatura y sales, al igual que las corrientes marinas o cuando las aguas de dos ríos se unen, como el caso del Limón y Negro al formar el río Amazonas en Manaos, Brasil. Las zonas de recarga y descarga están bajo un control estricto de flujo vertical con una componente de movimiento del agua hacia abajo y hacia arriba, respectivamente. El despreciar estas componentes verticales de flujo del agua subterránea ha resultado en impactos ambientales serios y algunas veces irreversibles. Esto es, los estudios comúnmente realizados en México incluyen sólo un análisis horizontal del flujo subterráneo.

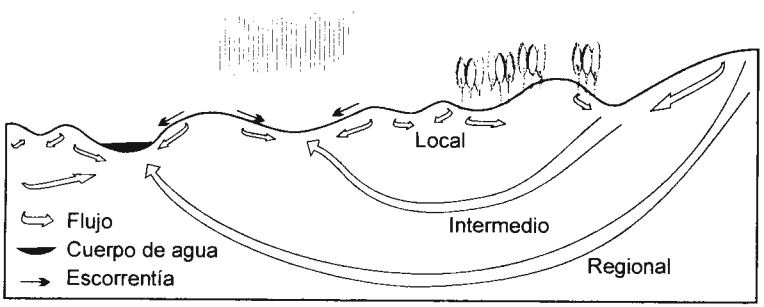


Figura 4. Definición de sistemas de flujo subterráneo de jerarquía local, intermedia y regional mostrando sus componentes de recarga, tránsito y descarga. Notar que la escala del tipo de geología (adaptado de Tóth, 2000).

En el sentido estricto, los sistemas de flujo aportan una serie de elementos que al ser analizados, pueden definir el funcionamiento del agua subterránea para así, con base en ese entendimiento, poder plantear el problema ambiental particular y con esto definir una solución más viable. Estos elementos se basan en leyes de la física y la química que se interpretan apoyados conjuntamente en el marco geológico y biológico. La ventaja de usar este tipo de enfoque de toma y manejo de información es que se sustenta en un análisis multidisciplinario, por lo que se tienen varios controles metodológicos que deben reconocer e identificar para la zona de estudio los principios básicos de cada una de las disciplinas involucradas.

De acuerdo con la Figura 4, el agua de lluvia ingresa al flujo subterráneo en las partes más altas y circula por el subsuelo a diferente profundidad hasta llegar a su descarga en las zonas bajas. El análisis de la información (química, isotópica, hidrológica) que el agua puede aportar, es necesario hacerlo con una perspectiva comparativa entre las características físicas, químicas e hidráulicas que le induce una zona de recarga con aquéllas que se desarrollan para llegar a una de descarga. Otro aspecto que se incorpora en el análisis comparativo del recorrido del agua en el subsuelo y que tiene que ver con su potencialidad como recurso, es su tiempo de residencia –no necesariamente el tiempo estricto de permanencia– y profundidad de circulación. Esto último enmarca, por ejemplo, la diferencia entre un flujo de tipo local (recorrido corto en tiempo y distancia y somero) y otro de tipo regional (con mayor tiempo, distancia, extensión y profundidad de recorrido). En términos prácticos, el primero es de muy escasa potencialidad al compararlo con el segundo, ya que un flujo de agua local (joven) es más vulnerable a una sequía que el regional, debido a que el primero, por su poco almacenamiento, necesita de lluvia continua para fluir, y en el segundo prevalecerá su flujo independientemente de años de sequía.

Es necesario puntualizar que entre los aspectos de estudio del agua subterránea, su característica química es la única que tiene memoria sobre los procesos a los cuales el agua estuvo expuesta. El agua de lluvia que se infiltra en una zona de recarga tiene una composición característica: un pH ácido, elevado contenido de oxígeno disuelto, Eh (potencial oxido-reducción) positivo, su temperatura es fría, los sólidos totales disueltos son bajos, el contenido de HCO_3^- es mayor que el de SO_4^- y

éste es mayor que el de Cl. En cambio, en una zona de descarga el agua tiene características muy contrastantes con aquéllas de una zona de recarga, tiene un pH básico, bajo contenido de oxígeno disuelto, un Eh más negativo, la temperatura es caliente, el contenido de sólidos totales disueltos es alto y el contenido de Cl es mayor que el de SO_4^- y éste es mayor que el de HCO_3^- (Tóth, 2000). Los elementos menores y traza que el agua contenga serán resultado del tipo de minerales que compongan a las unidades geológicas por donde el agua circuló y de las condiciones físicas y químicas particulares del medio. La distribución del agua subterránea en el subsuelo dependerá del tipo de unidad hidrogeológica presente (material granular sin compactar, material sedimentario compacto, roca fracturada, doble porosidad –bloques fracturados de roca porosa–) y de su extensión superficial (algunos a miles de kilómetros cuadrados), estructuras asociadas (fallas, fracturas, pliegues) y su longitud (algunos a cientos de kilómetros), así como el espesor de las unidades geológicas (de algunas docenas de metros a varios kilómetros). El espesor y extensión de las unidades geológicas presentes en el subsuelo constituyen un aspecto de gran relevancia en el funcionamiento del agua subterránea y de las características de los sistemas de flujo formados, ya que entre mayor sea el espesor, la importancia de los flujos regionales será preponderante. La extensión junto con el espesor de las unidades geológicas será fundamental en la presencia de flujos subterráneos intra-cuenca (Carrillo-Rivera, 2000 y Edmunds *et al.*, 2002).

EL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL AMBIENTE

La relación existente entre el agua superficial con los otros componentes del ambiente ha sido claramente definida en la literatura especializada debido a lo relativamente rápido, y en ocasión devastador, de los efectos (como las inundaciones) y la naturaleza visible del recurso. Sin embargo, la característica de que el movimiento del agua subterránea no sea visible y que sea extremadamente lento (de unos centímetros a decenas de metros por año) hace que se necesite un tiempo relativamente largo para algunos cambios notables en el ambiente desde el punto de vista de calidad y cantidad de agua, así como de otros impactos asociados que se tratan en las siguientes páginas. A menudo, cualquier alteración en el régimen subterráneo es difícil de establecerla, así

como diferenciar el componente natural o antrópico responsable del impacto observado. Lo difícil de identificar esa alternativa hace poco factible que una recomendación correctiva pueda ser viable, en especial si se carece de un apoyo del entendimiento del flujo subterráneo basado en establecer el funcionamiento de los sistemas de flujo correspondientes.

Los efectos ambientales que se pueden identificar dentro de la interacción entre el agua subterránea con otros componentes del ambiente se pueden marcar en dos clases:

i) alteraciones al agua subterránea por cambios en el ambiente externo,
ii) efectos al ambiente externo por cambio en el régimen de agua subterránea.

Debido a que uno de los objetivos de esta obra es discutir brevemente aspectos relacionados con el movimiento (vertical) del agua subterránea, a continuación sólo se presenta la identificación de diversas interacciones del agua subterránea como parte del ambiente donde la actividad del hombre influye de una manera preponderante en los cambios observados, cambios referidos a las condiciones originales (naturales).

Alteraciones en el agua subterránea por cambios en el ambiente externo

Se considera que el impacto en el agua subterránea es usualmente resultado de la acción del hombre, esto se ve reflejado en cambios en la cantidad de agua involucrada en las zonas de recarga y descarga del agua subterránea, así como en el tipo y la concentración de sales que ingresan con el agua en el subsuelo. Esto es, se afecta al agua subterránea desde el punto de vista de cantidad y calidad.

Cambios en el volumen de recarga

La recarga al agua subterránea se produce cuando la lluvia que se infiltra a través del suelo llega al nivel freático. Cualquier cambio en el uso del suelo producirá una alteración en la cantidad de agua que se infiltra directamente a través de éste. Por ejemplo, en las zonas semiáridas la vegetación nativa está en equilibrio con el tipo de sistema hidrológico

ahí existente, si se introducen árboles de especies que requieren una mayor cantidad de agua que las especies nativas, como lo es el *Eucalyptus sp.*, éste puede reducir la entrada de agua al nivel freático en cantidades del orden de 1 mm/día (Salama *et al.*, 1995 y Jayasuriya *et al.*, 1995). Por otro lado, el follaje de los árboles puede interceptar hasta un 20% de la lluvia que en otra forma llegaría al suelo (Gash *et al.*, 1995). Ambos aspectos reducen la cantidad de agua que puede ser aprovechada para la recarga.

Muchas áreas urbanas se localizan en sitios considerados de recarga al agua subterránea. La Cuenca de México es un buen ejemplo; cerca de dos millones de personas viven en la Sierra Chichinautzin y prominencias topográficas asociadas que son zonas consideradas como de recarga de parte del agua que se usa para abastecer a la ciudad (AIC, 1995). Casas, calles y demás construcciones forman una capa impermeable que cubre el suelo natural, dejando jardines y camellones como únicas áreas de recarga; el efecto producido es una disminución en el área de recarga. Como la cantidad de precipitación pluvial sigue siendo, en términos prácticos, la misma que antes de la construcción de esa área urbana, esto usualmente produce inundaciones sobre las áreas cubiertas por concreto, así como en las descubiertas. Esto incrementa el tirante de agua de recarga en las últimas, por lo que la recarga estará en función de sí las inundaciones se localizan en áreas con material que permita el paso del agua a través de un suelo muy permeable (con alta conductividad hidráulica –vertical–). El agua aprovechable para recarga en las ciudades (o para su uso directo) es drásticamente reducida por los sistemas de drenaje, a través de los cuales se desaloja el agua de lluvia de la cuenca, usándose para limpiar el azolve sin darle mayor uso. En el caso de la Ciudad de México esta exportación de agua, como más adelante se comenta, altera el equilibrio hidrológico de la cuenca a donde se envía ese desalojo.

Reducción de la descarga de agua subterránea a cuerpos de agua continental

En zonas áridas y semiáridas los cuerpos de agua superficial (lagos y lagunas) y corrientes perennes están siempre alimentadas por la descarga natural del agua subterránea. Su recarga principal, en especial en terrenos volcánicos fracturados, se debe principalmente a lluvia torren-

cial y su infiltración es a lo largo de canales de los arroyos usualmente asociados a zonas de fracturas y fallas geológicas. El almacenamiento del agua de lluvia en presas reduce la cantidad de agua que se puede aprovechar para procesos de recarga a lo largo del cauce del río; estos procesos usualmente se llevaban a cabo aguas abajo del sitio controlado por la cortina. Así, cuando se construye una presa que controla el escurrimiento de un río, se produce una reducción al flujo subterráneo.

Existe un caso en la parte central del país donde la extracción inmoderada de agua subterránea en la zona vecina al humedal de Xochimilco ha causado la desaparición de los manantiales antaño existentes y que nutrían los canales, debido a que el nivel freático se encuentra a una profundidad del orden de 50 m por debajo del suelo. Es de anotar que si bien los canales tienen agua, ésta es resultado del vertido de unos 1 220 l/s de agua semi-tratada. Otro ejemplo es el cambio en el régimen hidrológico anterior a los años ochenta (incluyendo extracción del agua subterránea y reducción de la recarga) en el área de influencia subterránea del Lago de Cuitzeo en el estado de Michoacán, el cual ha causado una reducción sustancial de la descarga de flujos regionales e intermedios al lago. En ese lapso el nivel del agua bajó dos metros aproximadamente, lo que repercutió en la reducción del 80% del lago (Contreras y Cuesta, 1990). Este tipo de impacto no sucede sólo en México, en España la extracción de agua subterránea para riego provocó el abatimiento de sus niveles entre 0.9 a 1.2 m/año; este abatimiento secó notablemente y provocó la desaparición de aproximadamente el 60% de los humedales en la Cuenca del Douro; la causa fue la extracción de agua subterránea de sistemas de flujo regional e intermedio de 1970 a 1987 (Bernáldez, 1993).

Reducción de descarga de agua subterránea a zonas costeras

Los pantanos, humedales y lagunas en zonas costeras contienen ecosistemas muy sensibles a cambios en la salinidad y temperatura del agua, por lo que la estabilidad dinámica de flora y fauna depende fuertemente de la descarga de agua dulce del continente. La extracción de agua subterránea *tierra adentro*, o la reducción de la recarga, puede alterar la cantidad de flujo de agua dulce hacia cuerpos costeros. Por ejemplo, en el norte de la costa de Yucatán, un sistema lagunar pantanoso con agua salobre recibe agua dulce del continente a través de

conductos de disolución en la roca caliza (Perry *et al.*, 1989); ahí un cenote en la vecindad aporta un flujo de agua subterránea dulce hacia el mar del orden de 7 m^3/s. Esto implica que la cantidad de agua dulce subterránea que se necesita fluya hacia la línea de costa es de gran importancia, por lo que su disminución afecta directa e irreversiblemente a ecosistemas costeros. Si bien en zonas continentales el efecto de la reducción del flujo se hace evidente por la desecación del humedal, en las zonas costeras pasa más inadvertido al ciudadano común, ya que en esas zonas antaño de mezcla con agua de mar, ahora siguen mostrándose bajo el nivel del agua, sólo que ésta es únicamente salada. Desde el punto de vista de su calidad, el agua subterránea posee más sales disueltas que la superficial, en especial contiene nitrógeno y fósforo, por lo que a dichas sales se les ha encontrado de valía para los ecosistemas, ya que entran positivamente dentro de su dinámica alimenticia.

Contaminación del agua subterránea por residuos líquidos

Una de las circunstancias que presentan un riesgo potencial de contaminación del agua subterránea se lleva a cabo debido a la falta de sistemas adecuados de drenaje en áreas pobladas que se han desarrollado sobre las zonas de recarga. Aguas residuales, domésticas, industriales, conjuntamente con la escorrentía de lluvia, se infiltran de forma directa al subsuelo en lo que conceptualmente se ha definido como las zonas de recarga de la Ciudad de México (AIC, 1995). Más aún, en la ciudad de Mérida, Yucatán, estimaciones de la cantidad de agua que entra en forma artificial hechas con técnicas químicas indican que el aporte del drenaje (así como de pérdidas de los sistemas de distribución de agua potable) es aproximadamente tres veces más que la cantidad estimada como recarga natural, siendo de 500 mm/año el primero y de 140-275 mm/año, la segunda. Esta recarga adicional al agua subterránea en la zona de Mérida diluye la carga contaminante, interpretada como NO_3-N, de una concentración esperada de 100 mg/l se tienen sólo 15 a 25 mg/l. Este aporte de contaminante es de efluentes líquidos domésticos e industriales que se desechan directamente en el agua subterránea subyacente, la cual es usada simultáneamente como fuente de abastecimiento de agua para la ciudad (Graniel *et al.*, 1999).

Contaminación del agua subterránea por disposición de residuos sólidos

Los procesos de recarga que se presentan a través del suelo natural continúan también cuando el suelo está cubierto por desperdicios domésticos, agrícolas o industriales. La lluvia es una parte importante en la reacción con los desperdicios, lo que deriva en un lixiviado que se infiltra hasta el nivel freático. El movimiento de este líquido ocurre a través de material granular permeable, o a través de fracturas. A menudo, canteras o minas de arena abandonadas y localizadas en zonas de recarga, son usadas como sitios para disposición de residuos, sin la garantía de que los lixiviados, así producidos, no estarán en comunicación con el agua subterránea. Esto es, normalmente se carece de estudios que determinen cómo es la continuidad hidráulica entre el sitio y el agua subterránea subyacente. Se necesita de estudios que garanticen que no exista tal comunicación, o si ésta existe, que permitan conocer la dirección que los lixiviados tomarán y las reacciones de control (entre lixiviado, unidad acuífera y agua subterránea existente) a efecto de establecer medidas correctivas necesarias. Esos sitios deberían tener como respaldo una construcción cuyo diseño elimine el riesgo de contaminación al agua subterránea, en especial se debe intentar reducir el riesgo de la entrada al agua subterránea y a la matriz acuífera, de elementos orgánicos e inorgánicos que presenten un riesgo a la salud humana (Cherry, 1983).

La extracción sin control del agua subterránea en muchas áreas del país reduce el volumen de agua de buena calidad; los volúmenes que ahí permanecen se ven adicionalmente disminuidos por la contaminación proveniente de la disposición final inadecuada de residuos. Por ejemplo, el tiradero de Santa Catarina, en la Ciudad de México, que almacena residuos domésticos, algunos autores consideran que se encuentra en parte de una zona de recarga del agua subterránea del área de Chalco. La extracción de agua subterránea de esta región se usa para abastecer la parte sur de la Ciudad de México y se considera que está contaminada por los lixiviados provenientes de este tiradero (Paz-Becerril, 1991).

Cambios en la calidad del agua subterránea inducidos por bombeo

Los cambios en la calidad química del agua debido a una política particular de extracción, se han presentado en muchas partes del mundo. Algunos ejemplos incluyen la perturbación a los sistemas naturales de flujo del agua subterránea:

i) salinización como resultado del avance del agua salada hacia los continentes (Bear *et al.*, 1968) y
ii) flujo termal ascendente (Carrillo-Rivera *et al.*, 1996).

La teoría sobre la intrusión de agua salina en zonas costeras está bien documentada; sin embargo, Cardona *et al.* (2004) marcan que en el Distrito de Riego de Santo Domingo en Baja California el proceso de salinización en el agua subterránea está relacionado con:

i) agua salada que permanece saturando (desde que se formó) a la unidad geológica de baja conductividad hidráulica que subyace a la unidad productora de agua dulce, y
ii) efluentes derivados de las prácticas agrícolas.

En términos prácticos, la entrada de agua salada sugerida por *i* y *ii*, es vertical ascendente y descendente, respectivamente. El efecto de salinización del agua subterránea por avance horizontal del agua de mar hacia los pozos de extracción es mínimo.

Existe otro proceso del flujo que es causa de la entrada de agua de calidad no deseable, la entrada vertical ascendente proveniente de sistemas regionales. Ésta ha sido discutida para medios volcánicos fracturados de gran espesor de la parte centro y noroeste de México y ha sido también identificada al sureste de la Ciudad de México con la entrada de agua con mayor salinidad y temperatura (Huizar *et al.*, 2004). La extracción de agua subterránea a través de pozos que sólo penetran una profundidad equivalente a un quinto del espesor total del material productor de agua, induce el ascenso de agua termal de baja salinidad que, sin embargo, presenta un riesgo a la salud de seres humanos y a las actividades agrícolas debido a la presencia de fluoruro y sodio, respectivamente. En la cuenca de San Luis Potosí se está extrayendo agua con una concentración de fluoruro que excede en ocasiones los 3.5 mg/l y se ha encontrado que aumenta con el tiempo de extracción de agua en los pozos (Carrillo-Rivera *et al.*, 1996).

En efecto, el fluoruro excede los límites permisibles de 0.7 a 1.2 mg/l en 61% de las muestras colectadas en tomas domiciliarias. Fluorosis dental, de moderada a severa, ha sido observada en 82.8% de niños expuestos a tomas con más de 2 mg/l de fluoruro (Grimaldo *et al.*, 1995). En el estado de Aguascalientes, los niveles de fluoruro han llegado hasta 7 mg/l en pozos que abastecen la red de agua potable, esto es resultado del manejo ineficiente del recurso de agua subterránea en el área (Molina, 1996). Las políticas actuales de extracción de agua subterránea han inducido agua termal hacia las zonas de extracción con un incremento correspondiente en la salinidad y temperatura del agua obtenida. La comparación de las Figuras 5 y 6 muestran áreas con incrementos de más de 10° C; debido a que generalmente existe relación directa entre la temperatura y la concentración de fluoruro, esto indica un incremento en fluoruro; así mismo, esta respuesta considera también un aumento en el contenido de sodio debido a un efecto de disolución por aumento de la temperatura identificada por el gradiente geotérmico, a medida que el agua viaja a más profundidad.

En el caso del sodio, que es un elemento limitativo para actividades agrícolas, en la zona de San Luis Potosí el agua fría (flujo intermedio) tiene una concentración promedio de 15 mg/l y comparativamente el flujo termal tiene 55 mg/l de este elemento. En el caso de Aguascalientes, el agua de flujos regionales llega a tener más de 110 mg/l de sodio y los flujos intermedios del orden de 40 mg/l.

Un aspecto importante a comentar sobre elementos químicos que se inducen a áreas de extracción son los riesgos por agroquímicos que se descargan a las aguas superficial y subterránea. Al considerar los volúmenes de agua usados para acciones agrícolas, esto implica una carga poco despreciable de contaminantes potenciales introducidos al sistema hídrico, a los cuales, en el mejor de los casos, se les ha encontrado como precursores de cáncer y de enfermedades asociadas con efectos a la secreción de glándulas del crecimiento. Estos contaminantes han sido objeto de nulo interés en el ámbito nacional mexicano, desconociéndose el efecto y destino final de los 380 m^3/s de agua con pesticidas, fungicidas, plaguicidas y fertilizantes que se descargan al ambiente (Programa Hidráulico 1995-2000:23).

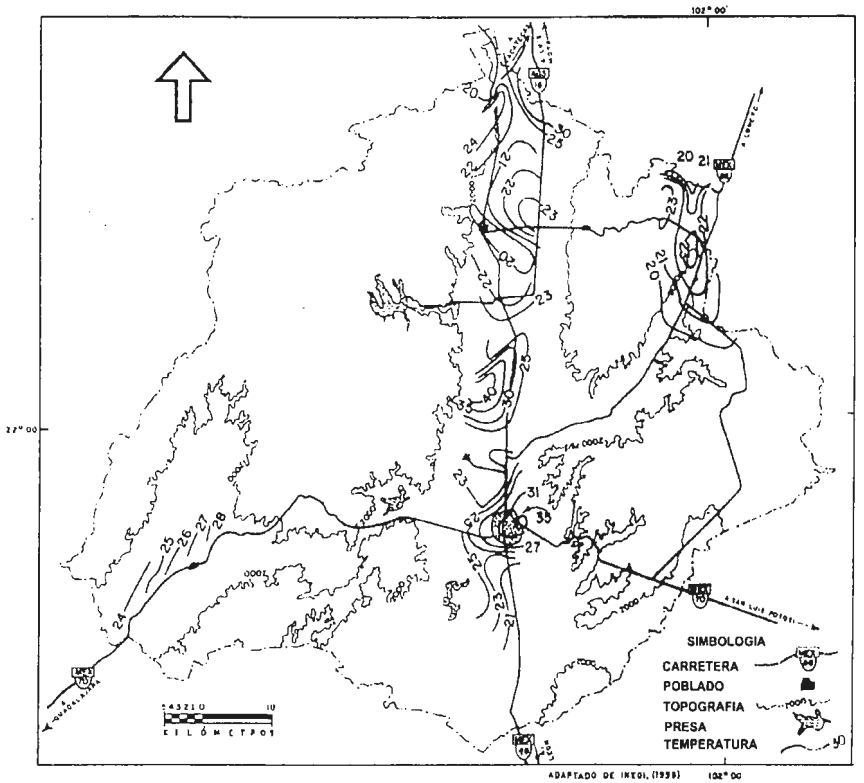


Figura 5. Distribución de la temperatura de agua subterránea en el estado de Aguascalientes observada para 1971 a la descarga de pozos (adaptado de Carrillo *et al.*, 1988).

Efectos en el ambiente externo por cambios en el régimen del agua subterránea

Los impactos en el ambiente por alteraciones en el agua subterránea han sido resultado de acciones del hombre que se han visto reflejadas en cambios en la estructura del suelo y en alteraciones en el paisaje, cabe comentar que la separación de cada apartado se hace para enfatizar los efectos ambientales particulares que pueden ser identificados.

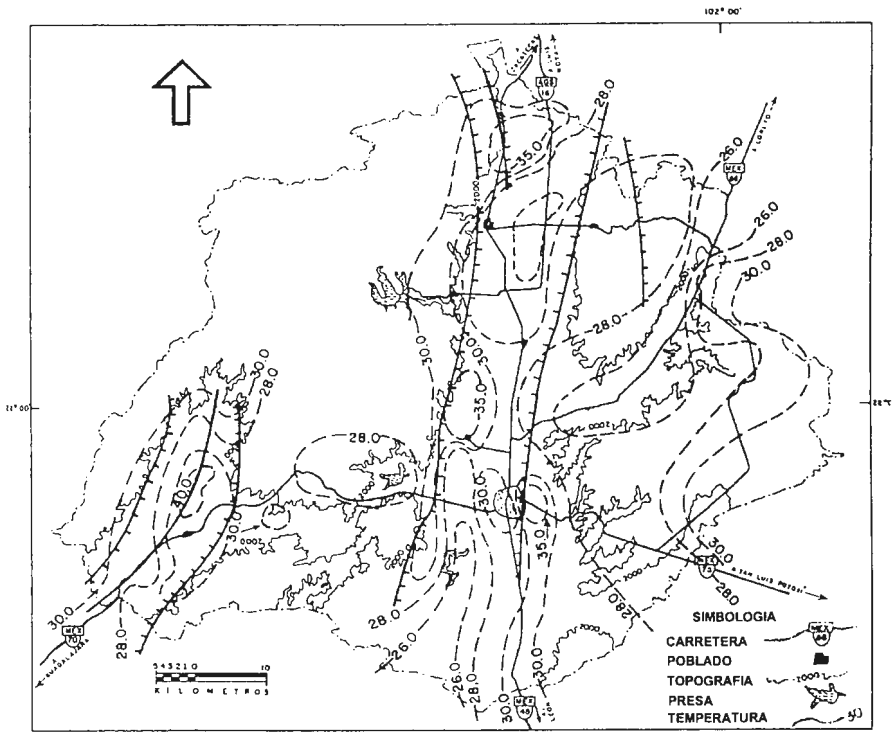


Figura 6. Distribución de la temperatura del agua subterránea en el estado de Aguascalientes observada a la descarga de pozos para 1995 (adaptado de Carrillo *et al.*, 1988).

Aumento en la erosión del suelo

La vegetación natural se encuentra en equilibrio con la humedad asequible en el ambiente. Comúnmente sucede que los nutrientes que suben a la planta por sus raíces se ven disminuidos cuando se reduce la cantidad de agua que la planta necesita. La falta de este recurso puede darse debido a un abatimiento excesivo y permanente del nivel freático local, como resultado de ello, la vegetación sufre un deterioro en su salud y puede terminar por desaparecer. Un buen ejemplo lo es el histórico Árbol del Tule (*Taxodium mucronatum*) localizado cerca de la ciudad de Oaxaca, que se encontró en grave peligro de desaparecer

cuando por una extracción de agua subterránea sin control el nivel freático en su vecindad se abatió lo suficiente como para quedar fuera del alcance de las raíces. El árbol fue salvado debido a la construcción de un sistema de riego (Jiménez, 1990). La vegetación circundante más allá del área de influencia del sistema de riego desapareció. Un abatimiento permanente que se produzca en el nivel del agua subterránea por debajo de la profundidad de las raíces puede causar la desaparición de la cubierta vegetal, lo que finalmente se manifiesta como un incremento en los procesos de erosión, procesos que afectan áreas extensas de la República Mexicana. La pérdida forestal en México, ha sido estimada que se realiza a una velocidad de 1% debido a la desaparición de vegetación (SEDESOL-INE, 1994). Evidentemente que no toda la desaparición de vegetación tiene que ver con el abatimiento del nivel freático, sin embargo, en muchos sitios es una causa de la desaparición de la vegetación arbórea, cuyas raíces toman agua directamente del nivel freático (plantas freatofitas) como la población de encinos de nogal en General Cepeda, Coahuila. Así, el cambio de uso de suelo sin control alguno y la extracción indisciplinada del agua subterránea son aspectos, entre otros más allá de los objetivos aquí planteados (aspectos sociales, políticos, de la economía), que se encuentran ligados al deterioro del suelo y de los procesos de erosión. Otros aspectos ligados directamente al abatimiento del nivel freático se tratan más adelante.

Transvase de agua

Un balance hídrico estable en una cuenca implica que las entradas (precipitación más entrada de agua subterránea) son iguales a las salidas (descarga superficial más evaporación más transpiración más flujo de agua subterránea; Freeze y Cherry, 1979). Un desequilibrio a ese balance se establece cuando el volumen de agua asequible como entrada, o como salida, cambia significativamente, tanto en tiempo como en espacio dentro de la cuenca de interés. Así, cuando en una cuenca árida existan volúmenes de entrada de agua adicionales (a los que en forma natural ésta maneja) se verán incrementados, entre otros, el régimen de escorrentía y el flujo subterráneo; este incremento se manifiesta como una elevación del nivel freático. De acuerdo con esta condición, la presencia de áreas con humedales y zonas inundadas aparecen en escena. El denominado Valle del Mezquital (Distrito de Riego 03) es un

ejemplo notorio donde se observa el impacto ambiental en la infraestructura existente, así como a la vegetación y ecosistemas relacionados (BGS, 1996). Esta zona ha tenido desde 1789 el aporte de agua negra y de lluvia de la Ciudad de México. Al presente se derivan unos 52 m^3/s que consisten de aproximadamente 40 m^3/s de agua negra resultado de uso doméstico, industrial y comercial, el resto es agua de lluvia. El uso del caudal derivado en acciones de riego, es de unas 45 000 ha. (Jiménez *et al.*, 1998). El exceso del agua usada en el riego produjo una infiltración de volúmenes de importancia, los cuales ampliaron el flujo subterráneo. Es patente que aún en la época de los años cincuenta el nivel freático se encontraba a unos 50 m de profundidad; sin embargo, para la última década del siglo XX, el nacimiento de gran cantidad de manantiales ha hecho cambiar las acciones agrícolas ahí desarrolladas por aquellas de la piscicultura, en especial en las zonas topográficamente bajas de la cuenca donde se ha observado la presencia de manantiales con caudal de 50 a 600 l/s. Al efecto de ascenso del nivel freático se le suma el causado por los cambios en la calidad del agua infiltrada. Trabajos desarrollados sugieren que el cambio potencial de la calidad del agua en el subsuelo está referido a que la filtración remueve una porción importante de su contenido microbiológico y de componentes orgánicos disueltos en el agua (<biblio>). Sin embargo, el poder filtrante del suelo no es infinito, por lo que se deben hacer las investigaciones y consideraciones necesarias para definir los controles que permiten la limpieza del agua por el suelo. Se torna deseable conocer el comportamiento integral (químico orgánico e inorgánico, biológico, físico) entre el agua residual y el suelo, para establecer el comportamiento y controles correspondientes, así como para marcar qué conceptos deben tomarse en cuenta al pretender hacer uso de esa agua subterránea para otros fines, ya que incluso se deberá considerar a la sociedad por afectar al extraer el recurso como lo sería el efecto a la nueva fuente de trabajo que ahora representa, así como para los nuevos ecosistemas que se han establecido con el nuevo marco hidrológico presente.

Abatimiento del nivel freático

El impacto ambiental de un nivel freático que se abate se puede ver reflejado en:

i) un gasto de energía adicional para bombeo,
ii) consolidación de la matriz de la unidad geológica productora de agua, y
iii) desaparición de manantiales y, en consecuencia, de corrientes y cuerpos de agua, y freatofítas.

Los dos últimos casos se discuten en forma separada. Cualquier extracción artificial de agua subterránea produce un abatimiento del nivel freático independientemente de que dicha extracción ponga en peligro lo asequible de la presencia de agua o no. Un programa apropiado de extracción debe considerar lo más posible, todas las variables involucradas, entre las cuales destacan como más importantes:

i) la profundidad al nivel freático,
ii) la necesidad de agua,
iii) la distancia entre pozos presentes,
iv) la distancia al área de servicio,
v) la presencia de ecosistemas,
vi) la respuesta del material productor de agua en relación con el sistema de flujo.

Debido a que en México el área de estudio del agua subterránea se delimita en forma arbitraria (no incluye límites reales, como por ejemplo los límites establecidos por los sistemas de flujo regional) y a que el interés sólo incluye establecer un balance hídrico sin considerar los procesos relacionados, las variables arriba indicadas usualmente no se incluyen en las consideraciones. En el área de Aguascalientes, México, como en muchas otras partes del país, el elevar el agua del nivel estático a la superficie se considera el factor limitativo para desalentar la extracción adicional local. Sin embargo, existen otros aspectos básicos a los que no se da la consideración del caso, tales como:

i) los sistemas de flujo de agua subterránea de diferente calidad y potencialidad,
ii) los procesos de recarga y descarga,
iii) los límites físicos del material geológico que aporta el agua,
iv) los cambios de uso del suelo (tala, reforestación y/o forestación con especies que consumen mucha agua, urbanización, construcción de obras hidráulicas),

v) cambios inducidos en la calidad del agua extraída, y
vi) la extracción de agua subterránea a lo largo de sistemas de flujo intermedio y regionales.

El descuido de estos aspectos soslaya la definición de todas las componentes del abatimiento del nivel freático. Es de indicar que la suma de todos los *abatimientos* produce un cambio en el régimen hidrogeológico existente, lo que da como una consecuencia principal la reducción de flujo hacia las áreas de descarga. Un caso típico de esto es la zona de la ciudad de Aguascalientes, donde el nivel freático se ha abatido más de 70 m, respuesta que se considera sólo resultado de la extracción local.

En esa ciudad el nivel freático se abate un promedio estimado de entre 0.3 a 1.5 m/año (SARH, 1987), velocidad calculada con base en mediciones realizadas en pozos durante bombeo, lo que sin embargo no considera pérdidas de pozo, ni la entrada de agua termal, por lo que el nivel medido no representa el nivel de la carga hidráulica real, el cual si bien es más profundo, no manifiesta la respuesta real del sistema.

Debido a esto, los "niveles" del agua aparentan ser más profundos de lo que realmente son, esto es evidentemente notorio al construir un pozo nuevo junto a otro que ha sido usado por varios años, el pozo nuevo tiene un nivel estático más somero que el antiguo. Otra respuesta del pozo nuevo es aquella de un abatimiento mucho menor para el mismo caudal de extracción (el diseño del pozo es prácticamente el mismo). Este aspecto es un reflejo de una deficiente perforación, diseño, construcción y operación del pozo; esto hace, en general, que además de niveles dinámicos más profundos haya pozos con una vida más corta, exista un mayor gasto de energía, la profundidad del pozo sea mayor, y que las columnas de bombeo tengan mayor longitud, entre otros.

Consolidación del subsuelo

La consolidación del terreno está siendo continuamente documentada (Poland, 1984; Leake, 1991). Esta respuesta se da cuando se extrae agua de una formación geológica y la presión (hidráulica) del agua entre los granos es reducida. Cualquier reducción en la presión del agua produce un incremento del esfuerzo efectivo en la matriz del suelo. Este au-

mento ocasiona una deformación en la matriz sólida que produce el proceso de consolidación, lo que se manifiesta como una reducción en el nivel de terreno, como se observa en varias poblaciones de México: Celaya, Aguascalientes, Chalco, Toluca, Distrito Federal, entre otras. Esto resulta en daños serios a la infraestructura de esas ciudades, donde, sin embargo, se realizan medidas superficiales de control que al parecer son adecuadas debido a la relativa lenta respuesta del suelo a la consolidación de la matriz acuífera, pero tales acciones deben ser constantemente aplicadas. Otra acción que a menudo se ha considerado es el desplazamiento de la extracción del agua subterránea a otro lugar donde a menudo se genera el mismo problema (Carrillo-Rivera, 1997). De acuerdo con las condiciones higrogeológicas particulares de la cuenca de México, una componente principal del proceso de consolidación es el movimiento de agua del acuitardo superficial hacia las unidades geológicas que lo subyacen, de donde el agua prosigue hacia los pozos de extracción. Por tanto, un control de la consolidación donde se tenga ese marco hidrogeológico puede lograrse desconectando hidráulicamente el acuitardo y abatiendo el nivel de saturación por debajo de su base (Huízar *et al.*, 2002). Es evidente que este tipo de control deberá basarse en investigaciones interdisciplinarias detalladas (de campo y gabinete) donde se entiendan y valoren con claridad las implicaciones y respuestas causadas por una acción de esta magnitud en tiempo y espacio.

En el área de la ciudad de Aguascalientes la consolidación del material granular saturado por la reducción en la presión hidráulica y despreciando el peso de las construcciones, es resultado de:

i) la extracción local de agua subterránea,
ii) la reducción en el flujo regional hacia la ciudad, y
iii) el desplazamiento del agua fría por agua termal.

La primera puede ser estimada con los valores de las propiedades geomecánicas de las unidades litológicas resultado de medidas directas en campo; al carecer de estos valores, otra opción, aunque menos exacta, permite identificar la importancia de la consolidación en un momento y lugar dado, para esto se pueden usar valores como los que se indican en la Tabla 1. En la Tabla 2 se muestran estimaciones de la consolidación de estratos que consisten en material granular (localizados

arriba de material volcánico, los que se consideran tienen una compresibilidad muy baja). Para este caso, la consolidación aparente total se estima en unos 0.06 m.

Tabla 1. Propiedades geomecánicas estimadas para los materiales del subsuelo de la ciudad de Aguascalientes

	ARENAS	ARCILLAS
Porosidad	30%	40%
Contenido volumétrico de agua arriba del nivel freático	10%	------
Contenido volumétrico debajo del nivel freático	30%	40%
Densidad de las partículas sólidas	2.6 g/cm^3	2.7 g/cm^3
Módulo de elasticidad (E)	1000 kg/cm^2	100 kg/cm^2
Coeficiente de compresibilidad (c_u)	0.01	0.2

Fuente: Bouwer, 1978:321.

Tabla 2. Consolidación aparente en unidades litológicas del subsuelo de la ciudad de Aguascalientes

	ESPESOR (M)	$P_{i2} - P_{i1}$ (KG-CM^2)	E (KG/CM^2)	SB (M)
Arena$_{seca}$	30.0	0.60	1000	0.018
Arena$_{saturada}$	10.0	2.20	1000	0.022
Arcilla	60.0	2.20	100	0.132
Arena$_{saturada}$	200.0	2.20	1000	0.440
			TOTAL	0.612

Fuente: Carrillo Rivera *et al.*, 1997

El término usado aquí de consolidación aparente se aplica porque los cálculos efectuados no consideran las componentes *ii*) y *iii*), arriba indicadas. La componente *ii*) se presenta cuando el flujo original hacia arriba (descarga) es invertido, lo que produce una compactación de los granos (Bouwer, 1987). Este efecto puede presentarse aunque no cambie la posición del nivel freático. La consolidación debido al cambio en la dirección de flujo hacia abajo, incrementa la presión intergranular en una cantidad proporcional a la reducción de presión. El cambio de la temperatura en el área de saturación de fría a caliente también debe considerarse. En 1971 Aguascalientes tenía fuentes termales rodeadas de áreas amplias donde la temperatura del agua subterránea era entre 21 y 25° C (Figura 5). La extracción de agua subterránea indujo

agua termal subyacente, la cual desplazó el agua fría que se encontraba en la parte superior. De 1971 a 1995 (Figura 6) el agua subterránea ha tenido un incremento en la temperatura de más de 10° C. Este incremento implica una compactación del suelo adicional, la cual ha sido descrita para otras áreas por Mangold *et al.* (1980).

La consolidación de la matriz acuífera en la vecindad de la ciudad de Aguascalientes se da a profundidad. Esto es evidente debido a las fracturas que se han desarrollado en áreas alrededor de la ciudad. En comparación, en la Ciudad de México más del 50% de la consolidación sucede en los primeros 40 m a partir de la superficie (Tamés *et al.*, 1992) lo que ocasiona una consolidación que varía de un punto a otro debido a que se hace evidente la heterogeneidad del medio geológico.

Desaparición de freatofitas

Alguna vegetación tal como los sauces, que es el caso del Árbol del Tule en Oaxaca o de muchos otros casos de sauces (*Salex sp.*) y ahuehuetes (*Taxodium sp.*) no menos famosos como el Árbol de la Noche Triste, era vegetación que cubría zonas importantes de la Cuenca de México, la cual puede tomar varios miles de años para crecer a la altura a la que se encuentran recientemente (unos 2 000 años para el primero, según reportan Durazo y Farvolden, 1989) por lo que se necesita que exista una fuente de agua constante y continua, esto es que no tenga efectos de períodos de sequía, tal como lo es un área de descarga de un sistema regional. En cualquier ecosistema en condiciones naturales existe un grupo de vegetación y fauna particular conviviendo en interacción con otros factores tales como el clima y el suelo en un tiempo dado. La presencia de un ecosistema particular donde se tiene la falta de una fuente permanente de agua (de lluvia) hace evidente la dependencia del hábitat con el agua subterránea.

En las zonas áridas y semiáridas de México, un ecosistema tipo humedal puede variar en tamaño, dependiendo de la descarga del sistema de flujo a que está asociado. Existen humedales importantes resultado de manantiales de tipo local como los identificados en la Cuenca de México, por ejemplo los de Xochimilco (AIC, 1995). Otros ecosistemas están ligados a sistemas de flujo de tipo regional como el manantial de Ojo Caliente en Aguascalientes (Molina, 1996). En ambos, los cambios en el régimen de agua subterránea redujeron el flujo a las

áreas de descarga y modificaron los componentes bióticos de los ecosistemas asociados. Más aún, los impactos en los sistemas de flujo también se reflejan en los componentes abióticos. Este aspecto hace evidente la dependencia de un humedal como el de la zona de Cuatrociénegas en Coahuila, donde una precipitación de escasos 200 mm/año no puede explicar la existencia de los cuerpos de agua asociados a los humedales; la única explicación plausible es el flujo de agua subterránea intra-cuenca, ya identificado plenamente en otras cuencas superficiales como la Cuenca de México (Edmunds *et al.*, 2002), la cuenca de San Juan B. Londo en Baja California (Carrillo-Rivera, 2000) o la cuenca de San Luis Potosí (*Ibid.*).

REGIONES HIDROGEOLÓGICAS DE MÉXICO

En este apartado se propone una breve descripción de las regiones hidrogeológicas de México (Figura 7) tomando como referencia la división fisiográfica en Back *et al.* (1988). La delineación que se presenta es de acuerdo con información asequible mostrando una semblanza de las condiciones geológicas de control del flujo subterráneo y de evidencias de hidrología subterránea, así mismo, se presentan comentarios sobre la calidad fisicoquímica del agua subterránea. En general, se muestran descripciones basadas en aquellas de Back *et al.* (1988) a las que se trata de incorporar componentes de la teoría de los sistemas de flujo, haciendo uso de información sobre las características geológicas, químicas, físicas y biológicas que marcan evidencias sobre el comportamiento del agua subterránea. Se hace referencia a trabajos asequibles donde se han manejado diversas componentes de esa teoría; para mayor detalle sobre la geología de las regiones aquí tratadas se han desarrollado trabajos de gran importancia que no han sido incluidos aquí por espacio, pero se invita a consultar la carta geológica de la Republica Mexicana y su texto explicativo (Ortega, *et al.* 1992).

Figura 7. Regiones hidrogeológicas de México (adaptado de Back *et al.*, 1988).

Península de Yucatán

Introducción

La expresión de la forma y el relieve de las rocas que afloran en la República Mexicana ha sido utilizada para dividirla en provincias fisiográficas, de las cuales la denominada península de Yucatán se localiza en la porción este de México y se encuentra limitada hacia el oeste y norte por el Golfo de México, por el mar Caribe hacia el este, y hacia el suroeste se limita con la planicie costera del Golfo, su limite sur está constituido por la Sierra Madre del Sur.

Su clima es húmedo tropical con lluvia promedio anual que varía de 800 mm en el noroeste a unos 1 300 mm en la costa este y 1 700 mm en la isla de Cozumel. Las lluvias se presentan de mayo a octubre donde se precipita aproximadamente el 90% de ellas. La temperatura media anual es de 25° C con máximas en julio y agosto, y las menores en diciembre y enero. Los huracanes usualmente suceden a principios del mes de octubre.

La superficie de la península esta cubierta por abundante vegetación y se caracteriza por no tener escurrimientos superficiales debido a la naturaleza cárstica del terreno. La península se manifiesta por tener una topografía extremadamente plana, con una elevación máxima de 50 msnm, las elevaciones mayores se encuentran hacia el suroeste en la Sierra de Ticul con valores de 300 msnm.

Marco hidrogeológico

La península está conformada por rocas carbonatadas de edad Terciaria con espesor superior a los 1 000 m. La mayoría de las rocas que se encuentran aflorando están constituidas por calizas con edad del Eoceno y Mio-Plioceno. En general, estas rocas son desde estratos fosilíferos a calcarenitas, aunque también se reporta la presencia de dolomitas, yeso y anhidrita.

La península se puede subdividir en tres regiones fisiográficas principales (Figura 8a):

i) la planicie cárstica del norte,
ii) un plano cárstico montañoso del sur, y
iii) una zona bloque este de fallas.

Desde el punto de vista del agua subterránea, en general debido a la superficie plana y a la presencia de roca caliza y el grado avanzado de carstificación observada, permiten una rápida infiltración del agua de lluvia. Esta característica geomorfológica permite que no se formen corrientes superficiales o depósitos de agua superficial. Una consecuencia de esto es que usualmente los suelos son de poco espesor y sólo se presentan en lugares restringidos.

Por lo que se refiere al movimiento del agua en el subsuelo, ésta se mueve usualmente a través de poros y fisuras las cuales con el tiempo son afectadas por procesos de disolución, así el agua va formando cavidades que se alargan produciendo grandes cavernas. A menudo el techo de las cavernas se colapsa produciendo dolinas (Figura 8b) y hundimiento del suelo conocidos usualmente como *cenotes*, palabra de origen maya. La mayoría de los cenotes son circulares con paredes en forma vertical, aunque también los hay de forma irregular con comunicaciones angostas. Estas cavernas tienen una extensión muy amplia en el subsuelo de la península, existen muchos casos donde espeleólogos han encontrado que existe una comunicación de las estructuras por donde circula el agua subterránea desde el continente hasta el mar circundante, por lo que es común encontrar cenotes donde se puede sumergir el agua dulce tierra adentro y emerger en el mar. Existe un denominado anillo de cenotes (Perry *et al.*, 1995) que delimita, aproximadamente, la parte oeste de la zona plana. El nivel del agua subterránea se encuentra a una profundidad que varía entre unos 3 a 15 m, el movimiento general del agua subterránea (Figura 8c) indica que fluye hacia la zona de costa con un gradiente hidráulico muy bajo (casi plano).

Calidad del agua

Desde el punto de vista de la calidad fisicoquímica, el agua subterránea, que es resultado de la infiltración directa del agua de lluvia, tiene cuatro fuentes de salinidad, tres naturales y una producida por el hombre. Una de las naturales está dada por la disolución de las rocas por donde el agua circula, la segunda por el agua de mar circundante y una tercera de agua "atrapada" en las unidades geológicas subyacentes. La cuarta tiene que ver con la infiltración de agua residual y lixiviado, así como con la inyección de efluentes provenientes de usuarios agrícolas indus-

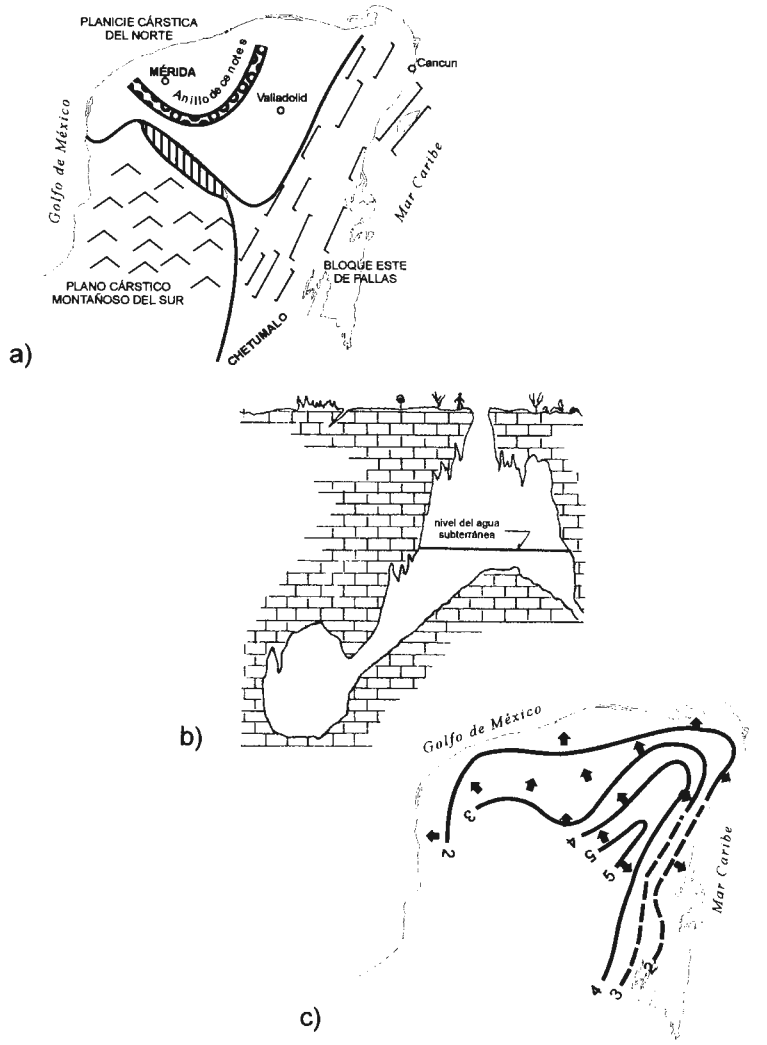


Figura 8. (a) Croquis con las zonas fisiográficas de la península de Yucatán; (b) bosquejo de un cenote formado por la disolución de roca caliza; (c) esbozo mostrado de la dirección general de movimientos del agua subterránea en el plano horizontal (elevación de capa freática en metros sobre el nivel del mar; adaptados de Back *et al.*, 1988).

triales y domésticos, debido a los diversos tipos productos derivados de las diversas actividades de la población. La falta de suelo evita que exista un filtro natural que elimine contaminantes nocivos en su trayecto desde la fuente hasta el nivel freático.

La característica importante de carecer de ríos ha evitado la oportunidad de usarlos para conducir las aguas residuales, como ha sido el caso en el resto de México. Un problema que es más notorio respecto a la contaminación del agua subterránea obtenida mediante pozos es aquél que se manifiesta en la zona centro de la península, donde se tiene la entrada de agua salada que usualmente se relaciona con la intrusión de agua de mar. Sin embargo, la mayor parte del aporte de agua salada está representado por agua de mar que permaneció atrapada en las formaciones geológicas y que llega a los pozos inducida por el régimen particular de extracción. Esto último tiene que ver con el funcionamiento del agua subterránea en esta región, en donde el movimiento vertical de agua de calidad no deseada puede ser inducido con relativa facilidad en el plano vertical. Un problema más clásico de intrusión de agua de mar parece ser característico en la isla de Cozumel y en tierra firme, donde el mar está a pocas decenas de metros de distancia de un pozo de extracción.

La contaminación debida a los asentamientos humanos y actividades agrícolas es un aspecto preocupante, ya que los primeros carecen de sistemas de drenaje y tratamiento de sus aguas residuales, y lo mismo sucede con la importante industria de granjas porcinas existentes en la península. La entrada de agua al subsuelo como resultado de fugas del sistema de abastecimiento es una variable importante que en algunos casos, por ejemplo, representa un aporte adicional de entre 100 a 300% de la recarga natural estimada para la zona de Mérida (Graniel *et al.*, 1999).

Cuencas aluviales centrales

Introducción

Esta región se encuentra compartida con los Estados Unidos, la parte que se encuentra en México se localiza hacia el centro-norte del país. Su clima es de semiárido a árido con una precipitación que tiene relación con la altitud topográfica. La precipitación media anual varía de

menos de 400 mm a más de 600 mm. La región se caracteriza por una fisiografía de montañas y planicies donde las primeras tienen una presencia abrupta en relación con la parte plana. La razón de esta morfología es resultado de movimientos geológicos distensivos de magnitud regional que fracturaron la corteza terrestre produciendo una serie de bloques altos y bajos. Los primeros representan las montañas observadas y los segundos han sido sepultados por material sedimentario y en ocasiones volcánico con varios cientos de metros de espesor. Las montañas tienen una orientación al noroeste y dividen a la región en pequeñas cuencas. Estas cuencas son las que han sido rellenadas por material diverso y es frecuente que formen cuencas cerradas. La altura general de la planicie de estas cuencas es de menos de 1 000 msnm a más de los 1 300 msnm. Las montañas tienen una altitud de 1 500 a 4 000 msnm y se caracterizan por tener laderas con pendientes muy fuertes.

Marco hidrogeológico

Esta región incluye rocas de origen ígneo, metamórfico y sedimentario que pueden ser divididas en dos grandes grupos, las rocas pre-cenozoicas y las del Cenozoico. La edad de estas rocas incorpora una diferencia en su estructura geológica y en su tipo de roca, en consecuencia, las características de las unidades como contenedoras de agua es contrastante. En general, las rocas pre-cenozoicas forman montañas que bordean o limitan cuencas aluviales. Las montañas están constituidas por uno o más de los siguientes tipos de roca: granitos de edad Precámbrica; esquistos, gneises, filitas y cuarcitas del Precámbrico al Terciario; rocas carbonatadas, areniscas, limolitas y lutitas del Paleozoico y Mesozoico. Estas rocas usualmente han proveído del material con el que se rellenaron las cuencas intra-montanas, los materiales depositados tienen una influencia directa en la escorrentía, infiltración y almacenamiento del agua subterránea en las cuencas. A menudo se encuentran materiales de origen volcánico y de edad Terciaria intercalados entre los depósitos sedimentarios. La extensión de los depósitos es poco conocida.

Es común observar que hacia el centro de las cuencas existan depósitos de playa, lo que significa la presencia de material de grano fino bien graduado y cuyo tamaño va creciendo hacia sedimentos más gruesos en la cercanía de las montañas (Figura 9). Los depósitos más antiguos

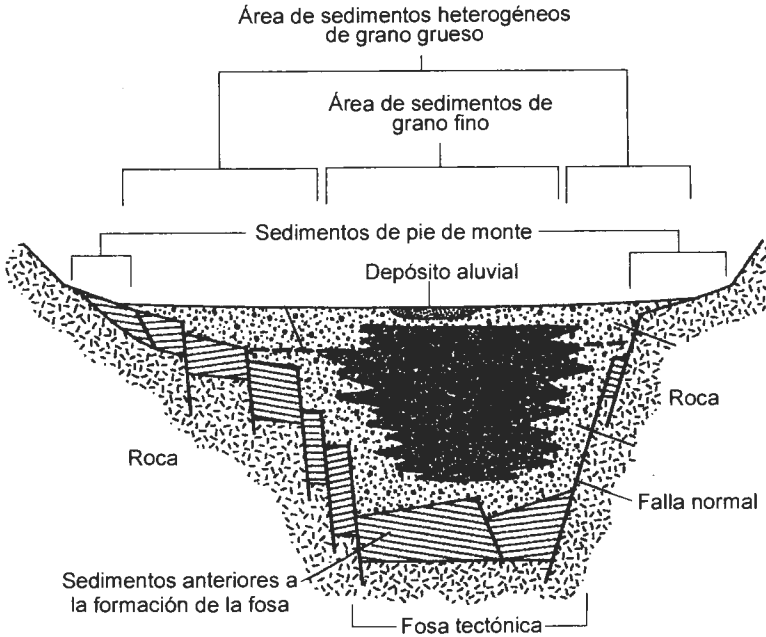


Figura 9. Forma distintiva de depósito de materiales geológicos en una fosa tectónica, que puede ser característica entre otras, para las Cuencas Aluviales Centrales (adaptado de Back *et al.*, 1988).

pertenecen al Terciario medio y pueden tener, en algunos lugares, varios miles de metros de espesor, aunque su distribución horizontal es poco conocida. Es común encontrar intercalaciones de lavas y piroclastos que indican un intenso vulcanismo contemporáneo. La presencia de sedimentos evaporíticos está típicamente asociada con facies de grano fino y es común observar yeso diseminado o en capas delgadas. También existen depósitos de anhidrita y halita en algunas de las cuencas más profundas y se estima que su espesor puede ser de cientos de metros. La extensión de los depósitos de cuenca estuvo alterada como resultado de esfuerzos de tipo distensivo durante el Mioceno medio o tardío; en este caso los efectos fueron acompañados por vulcanismo de tipo basáltico. El depósito de sedimentos en estas cuencas ha sido continuo hasta el Cuaternario, periodo en el que muchas de las cuencas tuvieron avenamiento abierto. Se considera que los sedimentos forman la prin-

cipal unidad acuífera, están contenidos en las fosas tectónicas y están limitados por los bloques montañosos.

Tradicionalmente se ha estimado que dichas montañas forman barreras hidrológicas al flujo de agua subterránea; sin embargo, es pertinente indicar que los sistemas de falla producidos durante la formación de las fosas resultado de fenómenos distensivos propició un sistema de fracturas asociadas; estas estructuras son de extensión regional y usualmente es factible delinear una continuidad hidráulica entre diferentes cuencas.

Características hidrogeológicas

Muchas de las cuencas que están superficialmente cerradas y que tienen un avenamiento interno, se había presumido que era evidencia de tener un funcionamiento hidráulico subterráneo independiente entre una cuenca y otra. Usualmente se ha considerado que los macizos montañosos circundantes son fronteras impermeables; sin embargo, evidencias químicas y de geología estructural sugieren una comunicación hidráulica entre cuencas superficiales. La descarga natural subterránea de estas cuencas es hacia su parte más baja, donde la evaporación ejerce su efecto sobre un nivel freático muy cercano a la superficie del terreno. En muchos casos, estas cuencas han sido desarrolladas para fines agrícolas e industriales por medio de pozos que al extraer el agua subterránea han reducido la salida por evaporación.

Debido a las condiciones climáticas de aridez se estima que la recarga sucede cuando se tienen las tormentas clásicas que acontecen en estas cuencas donde la lluvia media anual se precipita en sólo unos días o hasta en algunas horas. Es de hacer notar que si bien las lluvias están interrumpidas por lapsos importantes de varios años, se considera que el agua subterránea es poco afectada por la falta de la presencia de precipitación. Este argumento está basado en la gran extensión y espesor de las unidades geológicas que se consideran como almacén de agua. Usualmente, el flujo del agua subterránea que se delimita en las partes planas con la ayuda de información de pozos sugiere la entrada de agua de las zonas montañosas adyacentes. El movimiento del agua en el plano vertical es importante especialmente hacia la zona montañosa, donde tiene una componente vertical hacia abajo en las zonas altas y hacia la zona más baja, donde la componente vertical es ascen-

dente. El movimiento del agua se establece en dos tipos de unidad geológica: las rocas que forman las montañas (a través de sus fracturas y fallas) y el material sedimentario contenido en las fosas. Como consecuencia de esto, se estima la existencia de flujos regionales intracuenca e intermedios en los sedimentos que las rellenan. Los flujos locales se definen en las partes altas de las montañas.

Usualmente, las zonas planas son de descarga de agua subterránea en donde en forma natural existe un empuje hidráulico importante de ésta hacia arriba sobre las partículas del subsuelo, por lo tanto, cuando la extracción altera esta componente reduciendo su empuje, se produce el proceso de consolidación en el subsuelo que se manifiesta como hundimiento. Evidentemente existen otras causas asociadas con la extracción que influyen en la respuesta del hundimiento cuyo trato sale del contexto de este documento. En términos estrictos, la relación consolidación-extracción está desligada totalmente de la cantidad de recarga que se pudiera tener en una cuenca dada, ya que usualmente se tienen más salidas de agua que la aparente entrada de recarga por lluvia, la razón de esto es el aporte por flujo lateral y muy profundo (a nivel de la roca basamento) proveniente de más allá de la cuenca. Esta entrada es posible debido a la estructura geológica de fallas regionales (y fracturas asociadas) que unen subterráneamente cuencas superficiales. Así la extracción de agua subterránea no ha considerado esta respuesta como tampoco el efecto de la misma sobre la calidad del agua extraída.

Calidad del agua

Desde el punto de vista químico, la calidad del agua está controlada por los minerales que componen las unidades geológicas por donde ésta circula. Usualmente, la calidad del agua es buena en flujos intermedios en zonas cercanas hacia sus áreas de recarga, y se deteriora a medida que se llega a las áreas bajas debido a la influencia de la evaporización, lo que produce la presencia de capas con suelo donde se concentra la salinidad. Sin embargo, este fenómeno que sucede hacia zonas cercanas a la superficie del terreno implica que a mayor profundidad la calidad del agua estará menos condicionada a una alta salinidad. Es común encontrar agua con un contenido importante de sodio, sulfato y fluoruro, principalmente, este último en especial en zonas asociadas con rocas volcánicas de tipo ácido (riolítico) de edad Terciaria.

Normalmente, la extracción de agua subterránea es intensiva y está basada en obtener en cada pozo el mayor caudal posible. Esta política de extracción ha provocado, además del problema de consolidación arriba indicado, varios efectos ambientales negativos, como el de extraer agua de calidad diferente a la obtenida inicialmente cuando el pozo fue construido. El efecto de la evolución de la calidad del agua con el tiempo de extracción se debe a que los pozos usualmente penetran sólo la parte superior de los sedimentos y con el tiempo inducen agua más profunda de calidad físico-química diferente.

La contaminación del agua subterránea por aguas residuales ha sido también un problema potencial desde que se inició el desarrollo de estas zonas. La característica de cuenca cerrada que no cuenta con ríos perennes que usualmente se usan (en el resto del país) para transportar aguas residuales –sin tratamiento alguno– ha originado, en muchos casos, su acumulación en la parte más baja de la planicie creando un foco de contaminación significativo. Otro problema asociado es que en estas áreas, el uso más cotidiano es el agrícola, lo que crea un riesgo potencial de contaminación por compuestos derivados de los agroquímicos que se aplican indiscriminadamente a los campos de cultivo.

Sierra Madre Oriental

Introducción

En esta región, así como en las demás de las regiones aquí analizadas, la litología y la estructura geológica (Figura 10a y b) juegan un papel preponderante en el tipo de sistemas de flujo que se desarrollan, y en consecuencia, en cómo el agua se infiltra, circula y descarga. Esta región esta compuesta de una serie de rocas calcáreas plegadas de edad Mesozoica, las cuales tienen una orientación general noreste a sureste. Al considerar la estructura geológica, esta región puede subdividirse en tres sub-regiones (Figura 10a):

i) Serranía del Burro,
ii) Cuenca Ojinaga–Monclova–La Paila, y
iii) Sierra de Torreón, Monterrey y Tamazunchale.

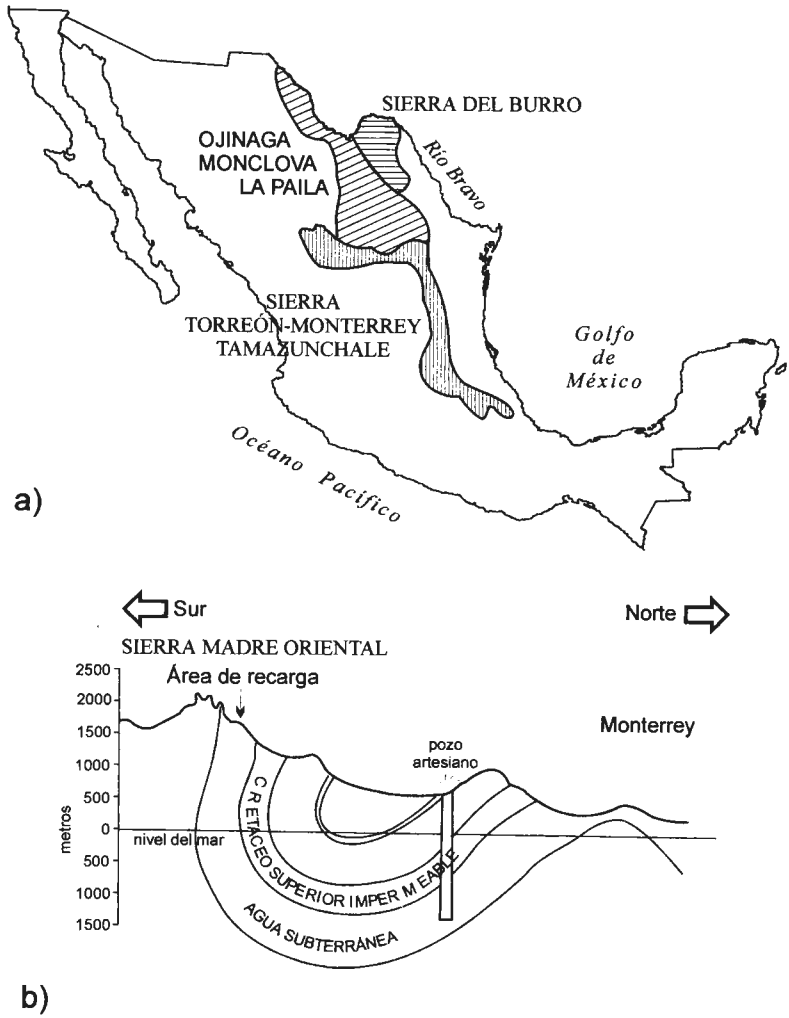


Figura 10. Croquis mostrado (a) las subdivisiones de la Sierra Madre Oriental y (b) una sección característica de estructura geológica y control de la presencia del agua subterránea (adaptado de Back *et al.*, 1988).

Desde el punto de vista de clima, la Sierra Madre Oriental posee el 99% de los climas presentes en México, ya que contiene grupos climáticos cálidos, semi-cálidos, templados y secos; los tres primeros se presentan en todas las variantes de humedad con condiciones de muy húmedas, húmedas y sub-húmedas. Dentro del grupo de los secos están representados los semiáridos, áridos y muy áridos. En forma general, el clima de la región es árido a semiárido, excepto hacia la zona sur en su cercanía con el Golfo de México, donde el clima es de tipo húmedo y tropical.

Sierra del Burro

Esta sub-región tiene una elevación de 600 msnm y corresponde a un macizo de roca caliza de edad Cretácica, la cual forma un anticlinal con una orientación hacia el noroeste; los flancos del anticlinal tienen pendientes suaves normalmente de 3 a 5°. Esta roca tiene características hidrogeológicas contrastantes con aquéllas que le subyacen. Si bien estas rocas son preferentemente carbonatadas, se tienen sitios donde se vuelven más arcillosas. Estas rocas se depositaron en un ambiente marino somero conocido como la Laguna de Maverick, son altamente solubles, con alta porosidad primaria y numerosas fracturas que incrementan el valor de su conductividad hidráulica. Las rocas del Cretácico superior son más arcillosas y, en consecuencia, son de menor conductividad hidráulica. El flanco este de la Sierra del Burro está cubierto por relleno aluvial y conglomerados de edad Terciaria a Cuaternaria, aunque su espesor es de sólo unos 50 m; contiene y produce una cantidad importante de agua subterránea, ya que cuenta con una alimentación importante proveniente del aporte de las rocas calizas que le subyacen.

La calidad del agua en esta sub-región es variable, y aunque debiera definirse en tres dimensiones, en términos generales se puede establecer que existe agua de mejor calidad hacia la parte oeste de una línea imaginaria norte-sur que cruza por la presa de la Amistad. La presencia de agua está condicionada a los poros y fracturas existentes en las rocas calcáreas como en la Formación McKnight y a la disolución de pirita, como en las formaciones Buda y Eagle Ford. La temperatura del agua en estas formaciones es más alta que la del resto del agua subterránea en la vecindad. Las rocas con agua apta para uso potable son aquéllas que pertenecen a las formaciones Aurora y Edwards. A profundidad, el agua es salina del tipo cálcico bicarbonatado. Dadas las

condiciones de estratificación de las rocas, se presentan diferentes capas confinantes las que, debido a los fenómenos tectónicos de plegamientos, se han fracturado y presentan condiciones favorables para la interconexión de unidades acuíferas intercaladas. Estas características provocan una variación local importante del nivel de agua en los pozos, así como de la calidad y cantidad de agua a obtener. La recarga de estas unidades geológicas es por agua de lluvia que se infiltra en la parte alta de la serranía y que posteriormente fluye hacia el norte y este de la misma, donde antaño descargaba a través de manantiales producto de sistemas de carácter intermedio y regional, y hoy desaparecieron con todos los ecosistemas a los que estaban ligados; una razón, entre otras, fueron las captaciones construidas para abastecimiento de agua.

Cuenca Ojinaga-Monclova-La Paila

Esta sub-región está compuesta por rocas calcáreas del Cretácico que fueron plegadas en una serie de anticlinales orientados N20°W. Las sierras emergen como formas separadas en planicies extensas compuestas por material aluvial. Las rocas cretácicas fueron depositadas en mar abierto o en ambiente de plataforma y usualmente están representadas por micritas densas con poca o ninguna porosidad, por lo que carecen de importancia para el almacenamiento y movimiento del agua subterránea. Las únicas condiciones que las hacen favorables para almacenar y transmitir agua son cuando están fracturadas o cuando los fenómenos de disolución han producido condiciones como cavidades de disolución de dimensión diferente.

En esta sub-región existen dos tipos de unidad que almacena el agua subterránea:

i) aquellas que se encuentran en medio granular sedimentario que sepultan topografías antiguas, y
ii) las que están en roca caliza.

En general, el material granular sedimentario encontrado en las partes planas consta de arcilla y arena de baja conductividad hidráulica. A menudo estas unidades contienen agua salada derivada de la disolución de yeso presente en unidades jurásicas que afloran en las partes altas de las sierras. Las unidades del segundo tipo están representadas por calizas de edad Cretácica que afloran en las sierras y donde el agua

de lluvia se recarga directamente y se mueve hacia las partes topográficamente más bajas. Los pozos que se han perforado en los flancos de las sierras encuentran estas unidades a profundidades de entre los 1 000 y 2 000 m, y la respuesta de los niveles de agua registrados en los pozos muestran una relación directa con la estación de lluvia y estiaje elevando y abatiendo la superficie potenciométrica, respectivamente.

En algunos lugares de las planicies se observan manantiales comúnmente de gran caudal, que son resultado del movimiento de agua a través de fracturas que comunican zonas productoras que se encuentran a profundidad con la superficie del terreno; dentro de éstos sobresalen los de Cuatrociénagas, Monclova y Múzquiz, con un flujo de más de 1 000 l/s.

El agua subterránea de mejor calidad está presente en las calizas y corresponde a agua cálcica carbonatada con bajo contenido de sólidos totales disueltos. El agua de alta salinidad es preferentemente cálcica sulfatada con temperatura mayor que la media ambiental y un contenido alto de ácido sulfhídrico. Este último tipo de agua usualmente se presenta en zonas profundas a una distancia considerable de la zona de recarga. Ocasionalmente el agua se mueve de la profundidad hacia la superficie a través de fallas, y fracturas asociadas, invadiendo zonas someras productoras de agua de calidad diferente.

Sierra Torreón-Monterrey-Tamazunchale

Esta sub-región se encuentra dentro de la Sierra Madre Oriental donde predominan rocas de edad Cretácica sobre las del Jurásico, y están aquéllas representadas por una serie de pliegues con orientación N40°W, su límite se ubica en la zona de Mapimí, continúan hacia Torreón en el sureste, donde los pliegues cambian a una orientación este-oeste en la latitud de la ciudad de Monterrey y después cambian a N20°W. La sierra tiene alturas mayores a los 4 000 m snm, su longitud es de unos 1 200 km y tiene un ancho de aproximadamente 200 km. En la sierra se pueden observar cañones con paredes verticales donde afloran rocas que tienen edad desde el Precámbrico al Cuaternario, aunque estas geoformas exponen calizas de edad Cretácica, principalmente. Desde el punto de vista de clima, la Sierra Madre Oriental posee el 99% de los climas presentes en México, ya que contiene zonas con grupos climáticos cálidos, semi-cálidos, templados y secos, en los tres prime-

ros se presentan todas las variantes de humedad con condiciones de muy húmedas, húmedas y sub-húmedas. Dentro del grupo de los secos están representados los semiáridos, áridos y muy áridos. En general, en la parte este de la sierra el clima es húmedo tropical, allí las montañas reciben la precipitación y humedad del Golfo de México. Este clima se torna diferente hacia las partes oeste de la sierra que tiene alturas de unos 2 000 msnm, en donde la lluvia disminuye, teniéndose zonas de características árida y semi-árida.

La Sierra de Torreón se distingue por cuencas intra-montanas que usualmente han sido desarrolladas para una agricultura muy productiva, donde evidentemente el agua subterránea ha sido el foco principal de progreso. Este recurso ha sido extraído en forma indiscriminada produciendo problemas de índole ambiental como el secado de lagunas, humedales, manantiales y ríos, con los consecuentes efectos negativos a los ecosistemas que dependían del aporte continuo de agua subterránea dado por flujos regionales.

En el caso de la Sierra de Monterrey la presencia de unidades de tipo arrecifal cuya porosidad y conductividad hidráulica original han sido aumentadas por fracturas y disolución, permite que el agua se recargue, circule y descargue en cantidades importantes. En esta sierra, el agua que circula en las estructuras anticlinales ha sido captada por pozos a profundidad de más de 1 000 m, encontrándose condiciones de artesianismo surgente.

En la Sierra de Tamazunchale las condiciones son poco diferentes en el sentido de que en las rocas carbonatadas se han formado numerosas dolinas o sumidero, donde el agua de lluvia se infiltra, y después de fluir lateralmente, descarga como manantiales en la base de las montañas; algunos de estos manantiales son de los más grandes del mundo como el Frío, que tiene una caudal de 25 m^3/s. Los flujos locales son de agua cálcica bicarbonatada y los flujos regionales contienen adicionalmente cantidades de magnesio y sulfato.

Sierra Madre Occidental

Introducción

Esta región es la más prominente, ya que cubre un tercio del territorio nacional, unos 310 000 km^2. Es una sierra larga (1 500 km) muy distin-

tiva desde el punto de vista geomorfológico; está caracterizada por altiplanos formados en rocas de naturaleza extrusiva de tipo riolítico (Figura 11a). La sierra está cortada por cañones y ríos que avenan al Pacífico y a las Cuencas Aluviales Centrales. El clima varía de húmedo templado con lluvias todo el año hacia las partes altas, a seco estepario hacia las partes bajas y zona este de la región. En la vertiente del Pacífico y zona central las lluvias son orogénicas, con valores del orden de 1 600 mm/año; hacia la parte este la lluvia decrece a menos de 600 mm/año con precipitación de junio a septiembre. La temperatura media anual es de 12 a 22° C en partes altas y bajas, respectivamente. Los ríos que descargan al Pacífico son perennes y recorren grandes cuencas, desatacando el Yaqui y el Culiacán; éstos contrastan con los ríos que terminan en las Cuencas Aluviales Centrales como el Conchos y Nazas, los cuales son intermitentes. El caudal de todos los ríos principales ha sido controlado en varios sitios a lo largo del cauce por medio de presas, construcciones que han alterado el sistema natural de recarga y descarga de agua subterránea.

Marco hidrogeológico

La Sierra Madre Occidental es única por la edad, composición, extensión y espesor de las rocas que la componen. Se trata de rocas ígneas volcánicas de edad Terciaria. Lo importante de esta región, desde el punto de vista del agua subterránea, incluye:

i) su composición química y mineralógica,
ii) la extensión geográfica que cubre en el contexto de la República Mexicana, y
iii) el espesor de las unidades geológicas que la componen.

Se trata de rocas de composición predominantemente félsica a intermedia, por lo que muchos de los silicatos que las componen presentan concentraciones elevadas de elementos como sodio, potasio y fluoruro; otros elementos como uranio, litio y arsénico se encuentran en fases minerales asociadas con estas rocas. Desde el punto de vista geográfico, se trata de rocas cuya distribución comprende prácticamente un tercio de la superficie del territorio nacional y que enlazan en forma subterránea las cuencas superficiales que la componen; esto es en particular relevante debido a los espesores de las rocas que la for-

man, ya que en ocasiones llegan a más de los 3 000 m. Esta región ha sido afectada por fenómenos distensivos que han formado una serie de fosas y pilares tectónicos resultado de fallas regionales con dirección preferente N30-40°W, tendencia que gradualmente se modifica hacia el NNE en el área del Río Grande. En la parte central de México las fallas tienen una orientación N y NW (Figura 11b). Las fosas han sido rellenadas por sedimentos y material volcánico (lavas y piroclástos) contemporáneo a la formación de las fosas, formando planicies en las partes bajas de regular extensión (Figura 11c). Los pilares están representados por cuerpos montañosos constituidos por rocas usualmente con fracturas asociadas a las fallas que dieron origen a esas estructuras. Esta geología estructural particular controla la presencia y movimiento del agua subterránea.

En efecto, una consecuencia del movimiento del agua en un marco geológico u otro, puede reflejarse en la velocidad con la que circula. Usualmente, las unidades compuestas por material granular (como el encontrado en partes topográficamente bajas y planas) permiten una velocidad de movimiento muy baja del agua subterránea (de milímetros a centímetros por año). Las rocas volcánicas fracturadas (como las encontradas a profundidad en las partes planas debajo de los sedimentos así como en zonas montañosas) permiten el movimiento del agua a velocidad mayor (de hasta metros por año). En este sentido, debido a las distancias de circulación involucrada y a la baja velocidad, es de esperar que el agua subterránea de la Sierra Madre Occidental tenga edades de hasta varios miles de años y, en consecuencia, las llamadas *"aguas fósiles"* sean una mejor fuente de abastecimiento que el "agua joven". Esto se hace evidente al darnos cuenta de que el agua superficial *per se,* como recurso, es más vulnerable a cambios en las condiciones climáticas que el agua subterránea.

El tipo de material geológico es importante también desde la perspectiva del volumen de agua que éste almacena, por ejemplo, el material granular almacena cantidades importantes en su espacio poroso (de hasta un 10% de su volumen total). Si bien las rocas fracturadas poseen menor capacidad de almacenamiento del agua subterránea (porosidad ≈1%) al cubrir en superficie unos 350 000 km^2 (250 km de ancho por 1 400 km de largo) el volumen de agua subterránea almacenada involucrado es sustancial –el espesor medio es de ≈1.5 km–.

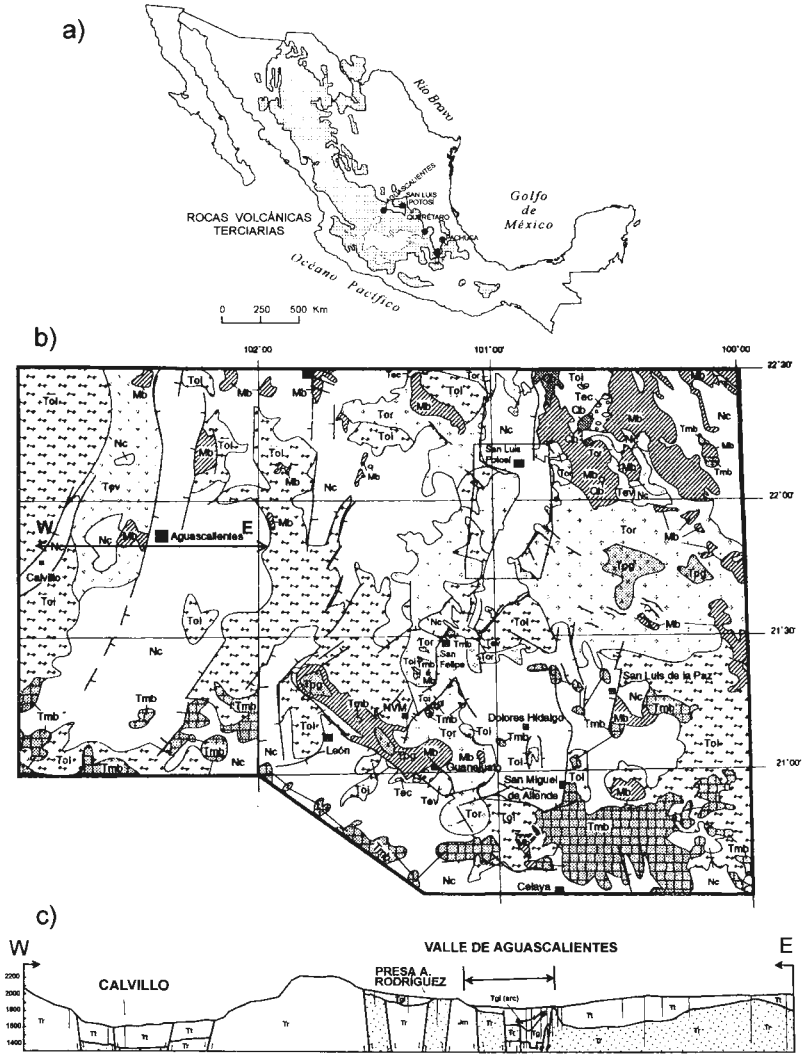


Figura 11. (a) Distribución de la Sierra Madre Occidental que corresponde con el afloramiento de rocas volcánicas terciario; (b) mapa geológico de la región de Aguascalientes (Ob, Basalto Cuaternario; Nc, Sedimento continental Neogénico; Tmb, Basalto Miocénico; Toi, Ignimbrita Oligocénica; Tor, Domos Riolíticos Oligocénicos; Tev, Roca volcánica Eocénica Tec, Sedimento continental Eocénico; Tpg, Granito Paleocénico; Mb Basamento Mesozoico); (c) sección geológica WE por la ciudad de Aguascalientes, ubicación de sección en Figura 11b (Jm, Basamento Mesozoico; Tr, rocas volcánicas Terciarias; Tt, Tobas y sedimientos arcillo-arenosos del Terciario; Tgi, Terciario granular indiferenciado; adaptado de Carrillo *et al.*, 2001).

Un aspecto de influencia relevante de la distribución espacial y espesor de las unidades geológicas de esta región en el movimiento del agua subterránea es su desplazamiento de una cuenca superficial a otra. Estudios sobre un análisis crítico al balance hídrico subterráneo aportan respuestas positivas a preguntas sobre la continuidad hidráulica subterránea entre cuencas superficiales (Carrillo-Rivera, 2000) en la Sierra Madre Occidental.

El aspecto cantidad no debe tomarse con simpleza, ya que una disminución incontrolada del orden de una fracción de punto porcentual del espesor de agua asequible afectará negativamente a ecosistemas relacionados con niveles de agua someros (zonas de descarga). El efecto de una extracción inmoderada también se ha visto reflejado en el cambio en la calidad del agua subterránea extraída.

Calidad del agua

La calidad del agua subterránea en esta región presenta condiciones muy interesantes, ya que convergen dos conceptos que limitan los volúmenes de agua asequible desde el punto de vista de calidad para ser utilizada en abastecimiento a la población en general (doméstico y agrícola):

i) efectos antropogénicos,
ii) efectos naturales de interacción agua-material geológico.

El primer caso está marcado por el manejo inadecuado del agua residual generada por la población, y más recientemente por la industria; se caracteriza en muchos casos por su desalojo a través de canales sin revestir. Posteriormente, estas aguas se utilizan para riego, por lo que es común tener la presencia de contaminantes en el agua subterránea de niveles someros (elevadas concentraciones de NO_3^-, Cl^-, HCO_3^- y Fe_{total}). En este sentido, existe un riesgo potencial de contaminación de pozos profundos por la contaminación producida en niveles someros como en la ciudad de San Luís Potosí, donde este riesgo a la contaminación se ha reportado desde finales de la década de los años sesenta (Cardona, 1990).

El tipo de unidades geológicas presentes en esta región produce efectos naturales de interacción agua-material geológico que ocasionan elevadas concentraciones de fluoruro disuelto en el agua subterrá-

nea termal dependiendo de la zona; por ejemplo, en la cuenca de San Luis Potosí se tiene hasta de más de 3.8 mg/l, en la ciudad de Aguascalientes se han registrado valores de hasta 4.24 mg/l. Ambos valores son mayores al límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994 que en México señala los límites máximos permisibles en el agua destinada para consumo humano. La gran extensión y espesor de las rocas que componen esta región ha permitido un desarrollo preferencial de sistemas de flujo de tipo regional, los cuales se caracterizan por tener una temperatura alta debido a su recorrido a mayor profundidad que los flujos intermedios y locales. La extracción del agua subterránea ha estado dirigida a niveles someros, resultado de usar pozos poco profundos que requieren de un costo menor en su perforación y construcción. El agua fría que en ellos se obtenía era de una composición química más baja en sodio que el agua de flujos regionales; sin embargo, este elemento que está impactando negativamente a la agricultura, es inducido con el agua regional (termal) a niveles de extracción someros. La extracción indiferenciada y sin control del agua subterránea ha producido agua con exceso en sodio que es un elemento que cuando está en concentraciones en exceso en el agua de riego, le produce a los cultivos una deficiencia en hierro y zinc que afecta negativamente las cosechas debido a alteraciones en su funcionamiento fisiológico (Castellanos *et al.,* 1998); adicionalmente causa problemas graves de reducción de la permeabilidad del suelo y se incrementa su salinidad, estos efectos son reportados en el estado de Guanajuato.

Existen casos como en la Sierra Madre Occidental donde el saber cómo funcionan los sistemas de flujo de agua subterránea pueden aportar criterios para el control de la calidad del agua a extraer en un pozo. En esencia, se han aplicado las técnicas que permiten desde definir las características fisicoquímicas del agua de cada sistema de flujo (local, intermedio y regional), así como los procesos que rigen la presencia de determinado elemento disuelto en el agua extraída, de este entendimiento es factible controlar la calidad del agua obtenida en los pozos (Carrillo-Rivera *et al.,* 2002). Aunque el control particular de la calidad del agua a extraer está fuera de los objetivos de este trabajo, baste indicar con que el control está dado por la consideración de: *a*) los controles de solubilidad de minerales involucrados (por ejemplo, calcita y fluorita en el caso del fluoruro, y *b*) la mezcla que se produce

con el agua de otros sistemas de flujo (el intermedio en el caso del fluoruro).

En este sentido, es necesario considerar cuatro aspectos básicos:

i) tipo de material geológico atravesado por el pozo,
ii) tipo de flujo interceptado,
iii) diseño constructivo, y
iv) política de operación del pozo.

Por lo tanto, es de primordial importancia contar con información irrefutable y confiable de estos aspectos a efecto de poder, cuando así se considere, realizar programas de control de la salinidad obtenida en los pozos.

Cinturón Volcánico Trans-Mexicano

Introducción

Esta región es bastante extensa, es una franja E-W que cubre el centro de México con una superficie de aproximadamente 105 000 km^2 con una longitud y anchura de 950 km y 110 km, respectivamente (Figura 7). El clima dominante sobre esta franja es tropical y húmedo en la parte oeste, semi-húmedo templado a árido templado en la mesa central y húmedo a árido frío en las zonas montañosas al noreste. La lluvia media anual está controlada por la orografía y varía de 300 a 4 000 mm, con máximos en las zonas montañosas. La época de lluvias es en verano y principios del otoño, con abundante nieve en invierno que se acumula en los picos altos. La temperatura media anual es baja en las cimas montañosas (13° C) y los valores más altos se registran en la parte baja de las planicies (23° C).

Esta región es eminentemente resultado de actividad volcánica de tipo andesítico basáltico del Terciario con derrames esporádicos de rocas riolíticas durante el Terciario medio e incluso en el Plioceno tardío. El espesor conjunto de estas unidades volcánicas alcanza los dos kilómetros. La mayor parte de los edificios volcánicos conspicuos son resultado de erupciones acaecidas durante el Pleistoceno-Holoceno. Estas erupciones tienen un control geológico estructural importante, ya que la mayor parte de la actividad volcánica está alineada sobre fallas con una orientación E-W, en especial en la parte central, a la que se incor-

poran otros sistemas principales como el NW-SE en la parte oeste y el NE-SW en la parte este. Estos movimientos produjeron una serie de fosas y pilares tectónicos que son característicos de la región y que han formado una sucesión de cuencas que han sido llenadas, en casos, por más de 2 000 m de sedimentos producto del depósito de material proveniente de las rocas circundantes, así como por material volcánico resultado de las diferentes efusiones representadas por lava y ceniza (Huízar-Álvarez, *et al.*, 2002). En otros casos, estas fosas formaron cuencas que quedaron cerradas formando lagos con una extensión importante, en los cuales hubo un depósito de material aluvial de grano fino a muy fino con la incorporación ocasional de material piroclástico y orgánico, su espesor es variable llegando en ocasiones a más de 500 m.

Este paquete de rocas ígneas extrusivas descansa sobre rocas del Cretácico, las cuales son preferentemente formaciones de tipo calizo; su espesor conjunto es de más de 1 500 m la base de estas rocas no ha sido definida.

Marco hidrogeológico

En general, el funcionamiento del agua subterránea en esta región tiene que ver con la continuidad hídrica subterránea entre cuencas superficiales. Esto se debe a que el comportamiento hidrogeológico de esta región se identifica por la presencia de fallas, fracturas, diaclasas y los poros vesiculares inherentes a las rocas volcánicas que conforman la región, así como por su espesor conjunto de varios kilómetros a lo que se le adiciona su extensión. En otras palabras, esta región forma un paquete potente de rocas y sedimentos saturados. Dentro de la Región del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano se ha identificado evidencia que sugiere una continuidad hidráulica subterránea entre cuencas vecinas, como es el caso de la de México. En efecto, Edmunds *et al.* (2002) definen que el agua subterránea que se está extrayendo en la cuenca de México tiene, dependiendo de dónde es la extracción, edades de relativamente recientes a más de 6 000 años (Figura 12). La posición topográfica relativa de la cuenca de México (que indica que no es la más alta), las edades del agua extraída y sus características de temperatura y salinidad (cloruros) sugieren que el agua con una edad de más de 6 000 años se recargó al sistema a una distancia de entre 120 y 150 km de la zona de extracción (dependiendo de los valores de

conductividad hidráulica, gradiente hidráulico y porosidad usados); sin embargo, en cualquiera de los casos, el límite de la cuenca está a sólo unos 20-25 km de distancia. Esto tomando en cuenta los bajos gradientes hidráulicos incluso a través de zonas montañosas, como lo demuestran pozos realizados al norte (Sierra de Teotihuacan) y sur (Sierra del Ajusco) de la cuenca de México, donde el nivel freático se encontró a una profundidad equivalente a pocos metros por abajo del nivel de la planicie, así como por las conductividades hidráulicas moderadas que han sido definidas para las diferentes unidades geológicas de la región ($1x10^{-5}$ m/s).

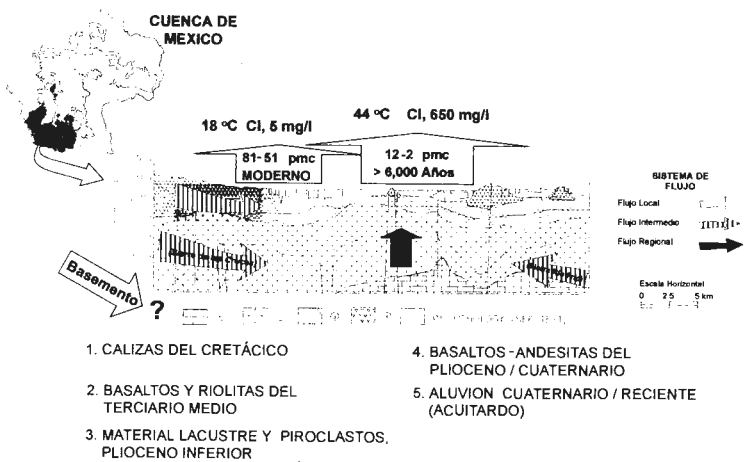


Figura 12. Sección en la parte suroriental de la cuenca de México mostrando unidades geológicas, edad del agua subterránea extraída y flujos conceptuales de tipo local (agua fría) e intermedio. El flujo regional (agua caliente) tiene una edad de más de 6 000 años (detectada por ^{14}C). Notar los espesores de las unidades geológicas y la profundidad de los pozos (adaptado de Edmunds *et al.*, 2002).

En general, el proceso de recarga y descarga de flujos intermedios y regionales que se presenta en zonas montañosas y planicies, respectivamente, ha marcado un comportamiento hidrogeológico muy particular, en especial debido a que en las planicies de las cuencas ha quedado incorporado material geológico de grano muy fino (con un gran contenido de agua, >300% y muy baja conductividad hidráulica, $<10^{-7}$ m/s). Las condiciones naturales de descarga existentes hacen que el agua subterránea tenga una carga vertical ascendente, la cual empuja a los granos del material sedimentario.

La extracción del agua subterránea causa, entre otros, dos procesos principales: *a*) el empuje hacia arriba se ve disminuido y *b*) se reduce el volumen de agua existente en el material afectado. Ambos dan como resultado la pérdida de volumen del suelo (o material acuífero) que se ha visto reflejado como hundimiento del terreno y que es característico en casi todas las ciudades localizadas a lo largo de la región, en especial en aquéllas que se asentaron en zonas de descarga, usualmente presente en los altiplanos y en zonas bajas. Existe un control del funcionamiento del agua subterránea sobre la respuesta del material granular de grano fino a la extracción, el cual es, por un lado, una fuente importante de agua subterránea y, por la otra, debido a la posición superficial de estos sedimentos, son comúnmente usados directa, o indirectamente, como fuente de abastecimiento. Un caso más notorio de hundimiento del suelo, que el clásico reportado para la Ciudad de México, es el observado en la vecina zona de Chalco, donde un crecimiento urbano y extracción sin control produjo en 1984 una subsidencia a la velocidad de 0.40 m/año (Ortega *et al.*, 1999). Para 1991 se tenía un hundimiento acumulado de 8 m hacia el centro de esta subcuenca, característica que le impone riesgos de inundación por agua de lluvia o por el rompimiento del canal de Chalco que transporta agua residual, como el acaecido el 2 de junio del 2000. De continuar con el ritmo de extracción actual, se espera que para el 2010 el hundimiento total llegue a los 15 m.

Los manantiales que se generan al pie de las montañas que limitan este tipo de material granular fino y que están compuestas de rocas basálticas del Holoceno, permitieron condiciones naturales para el desarrollo de humedales de importancia, tanto por su magnitud como por los ecosistemas y biodiversidad que en ellos se generó. Si bien Xochimilco y los *almohlos* de la cuenca alta del Lerma fueron ejemplo de estos ecosistemas, una extracción desmedida del agua subterránea propició la desaparición de manantiales, respuesta que ha quedado bien documentada desde la perspectiva de diversas disciplinas. La descarga de agua subterránea de varios tipos de flujo (local, intermedio y regional) fue también muy importante bajo condiciones naturales en los lagos de Pátzcuaro, Chapala, Cuitzeo, lo cual ha sido evidente, ya que la desecación del Lago de Cuitzeo permitió recorrer físicamente el perímetro del fondo y se encontró la presencia de manantiales con temperatura contrastante (>90 y <30° C, respectivamente) a pocos metros de dis-

tancia (Contreras y Cuesta, 1990) denotando la descarga de flujos de diferente jerarquía. Esto sugiere que un efecto del incremento drástico en la extracción de la última mitad del siglo XX se refleja en la disminución de la productividad de los manantiales que antaño soportaban a los ecosistemas y que la descarga natural de agua ahora ha sido permutada por agua residual semi-tratada.

Calidad del agua

El marco hidrogeológico es congruente con el tipo de calidad de agua que se encuentra en esta región, el cual está controlado por el tipo de sistema de flujo subterráneo; por ejemplo, los manantiales de origen local, debido a la dinámica del movimiento del agua subterránea que los compone, tienen agua con una calidad baja en sales y fría. Esta calidad contrasta con aquélla observada en manantiales con agua de origen regional, donde el agua es termal y con una salinidad que se puede ver incrementada en su contenido particular de sales disueltas como el exceso de sodio (que causa problemas a la agricultura) y el fluoruro (que produce inconvenientes a la salud humana). Es necesario comentar que la calidad del agua extraída por los pozos puede ser controlada (Carrillo-Rivera, 2002, Huízar *et al.*, 2004) si se conoce el funcionamiento del sistema de flujo, lo que implica conocer el marco geológico y el diseño constructivo del pozo.

Cuencas aluviales costeras

Introducción

La región de cuencas costeras está referida a las depresiones topográficas que rodean el Mar de Cortés, incluyendo toda la península de Baja California Sur. Las partes más prominentes de las divisorias de esta península tienen una elevación máxima del orden de 600 msnm y muestran una pendiente relativamente suave hasta el nivel del mar. En la parte este continental, la zona de montañas es desértica donde la parte plana de las cuencas tiene una elevación de unos 150 msnm.

La temperatura media anual varía de 16° C en las zonas costeras, a 21° C en el desierto. Las zonas costeras tienen un clima de tipo mediterráneo, y tierra adentro en el desierto la temperatura llega a más de 38° C. La precipitación media anual sucede en invierno, la cual varía

de unos 140 mm en muchas de las cuencas asociadas al Mar de Cortés, así como en el desierto, a un máximo de 510 mm a lo largo de la costa y unos 760 a 1 270 mm en las montañas. Es común que las precipitaciones bajas produzcan escorrentía sin importancia.

Marco hidrogeológico

La región está incluida en una geología donde las montañas constan de sedimentos consolidados y de material ígneo, también se encuentran unidades meta-sedimentarias y meta-volcánicas, principalmente. Las partes más bajas son resultado del depósito de materiales que se han intemperisado, disgregado y transportado de las montañas hasta la zona costera. La geología es extremadamente compleja, lo cual se acentúa por los diferentes sistemas de falla existente. Es usual la presencia de fosas y pilares tectónicos; las fosas están rellenas de material volcánico y sedimentario del Terciario al Cuaternario con espesores de 1 600 a >3 500 m (Carrillo-Rivera, 2000). Es común observar que estos materiales están distribuidos regionalmente abarcando varias cuencas superficiales. Se considera que el basamento es aquel formado por rocas del Cretácico y un granito del Terciario temprano. La región, desde el punto de vista hidrogeológico, es menos compleja donde la mayor parte del agua subterránea es asequible por medio de manantiales de origen local y usualmente por medio de pozos de profundidad somera. En las planicies no se observa que sean receptoras de descargas de sistemas de flujo de tipo intermedio y regional; estos flujos que se generan en las zonas montañosas circundantes descargan fuera de la cuenca de origen. Es usual que el agua subterránea se extraiga principalmente de los sedimentos asociados al material de relleno de las cuencas aluviales, la edad de estos depósitos es del Plioceno, Pleistoceno y Holoceno.

Las rocas que constituyen las zonas montañosas producen elevaciones de importancia y tienen usualmente una conductividad hidráulica moderada (10^{-5} m/s); muchas de las características productoras de agua de estas unidades geológicas son resultado de fracturas e intemperismo físico que se ha producido en la región. Evidencia hidrológica sugiere que si bien la topografía es un factor importante en el control de la presencia y movimiento del agua subterránea, ésta no refleja el comportamiento estricto del agua subterránea. Las fallas geológicas dentro de los límites de las cuencas aluviales actúan como barreras o como

conductos preferenciales al movimiento del agua subterránea y tienen grandes efectos en la respuesta a la extracción por bombeo, en especial en cuencas que están sujetas a un gran desarrollo de su recurso hídrico subterráneo. Esto implica que cuando actúan como barrera influirán en un abatimiento mayor del nivel freático a la extracción si no estuvieran presentes, y tendrían un efecto contrario (el abatimiento) que sería menor si permitieran el flujo. Estudios realizados sugieren que es factible considerar un criterio que enmarca el funcionamiento del agua subterránea y que la desliga de la cuenca superficial. En efecto, investigaciones recientes indican que muchas de las cuencas de esta región, como la de San Juan B. Londó localizada al sur de la parte del Mar de Cortés de la península, poseen comunicación hidráulica subterránea directa e importante con cuencas vecinas a través de estas fallas y fracturas en las unidades geológicas que las contienen (Carrillo-Rivera, 2000). La continuidad de las unidades geológicas más allá de cada parteaguas y los grandes espesores de material geológico receptor y conductor de agua subterránea permiten esta comunicación. En otras palabras, varias cuencas superficiales comparten la misma unidad geológica.

El flujo de calor a través de los sedimentos de las cuencas es mayor que el promedio observado en el resto de las regiones vecinas, en consecuencia, es común encontrar agua con temperatura alta del orden de 200° C a profundidades de 1 800 a 4 500 m, como es notorio hacia las inmediaciones del delta del rió Colorado. Localmente, en San Juan B. Londó, el que haya agua termal en pozos someros con temperatura alta (46.5° C) se considera como evidencia de la existencia de flujos de tipo intermedio y regional, que son sin lugar a dudas de gran importancia en lo que a lo asequible del recurso se refiere. La presencia de estructuras geológicas resultado de elementos tectónicos de gran dimensión (fallas y fracturas asociadas) parecen sugerir que son evidencia de flujos regionales que pueden verse favorecidos por ellas. Sin embargo, es menester hacer énfasis en lo que a la calidad del agua subterránea corresponde como limitante a considerar en cualquier esquema de extracción del recurso.

Calidad del agua

El tipo de geología particular es un control único en la calidad específica del agua subterránea que puede producirse por medio de un

pozo, a este respecto es factible enmarcar la diferencia de la calidad del agua obtenida en San Juan B. Londó, donde el sistema regional es característico de alta temperatura (29.0-46.5° C) y con una alta conductividad eléctrica (1 724-4 300 μS/cm), así como alta concentración de boro (1.85-9.95 mg/l), fluoruro (0.32-3.40 mg/l) y sodio (283-436 mg/l). En contraste, las características del agua de sistemas intermedios muestra moderada temperatura (22.3-28.9° C) y baja conductividad eléctrica (749-1 077 μS/cm), así como baja concentración de boro (1.1 mg/l), fluoruro (0.24-0.37 mg/l) y sodio (≈168 mg/l). Es evidente que estas características fisicoquímicas del agua subterránea son aspectos que deben considerarse al diseñar la extracción de agua de un pozo y son limitantes a incorporar en cualquier tipo de uso potencial que se desee dar al recurso.

Debido a que no existen corrientes superficiales perennes, es común en esta región que se usen pozos para satisfacer las necesidades de agua para actividades productivas como la agricultura. Al existir una relativa proximidad del mar a las zonas agrícolas, se ha considerado tradicional que existan problemas de salinización de suelo y agua subterránea debido a que se considera que el agua de mar entra desde la línea de costa en forma lateral hacia los pozos, lo cual tiene, entre otras, implicaciones graves en la agricultura. En consecuencia, la técnica que se ha ido operando para aliviar el incremento de sal disuelta en el agua de pozo, es construir un pozo nuevo en un lugar más distante de la línea de costa. Sin embargo, si bien el inconveniente de salinidad es momentáneamente controlado, el incremento de sales disueltas en el agua que produce el pozo es experimentado de nuevo. Cardona *et al.* (2003) encontraron que la entrada lateral de agua de mar hacia el pozo de extracción es la excepción, más que la regla. Esta complicación continuará, a menos que se reconozca que la principal limitante se encuentra en los retornos de agua de riego y en el agua salada que está atrapada en las unidades geológicas que yacen por debajo de las unidades de material sedimentario que son usualmente usadas para captar el agua a través de los pozos. Solo cuando estas fuentes adicionales de salinización sean reconocidas, será factible controlar el inconveniente de la salinidad creciente en el suelo y el agua extraída por los pozos. En general, se deberán imponer cuidados particulares cuando se ins-

talen los pozos y se deberá guardar y controlar su relación con las capas de material arcilloso que son receptáculo del material productor, el caudal de extracción deberá modificarse así como el régimen de operación, de acuerdo con la calidad química del agua que entra al pozo. Es evidente que deberán adecuarse otras actividades relacionadas con la fase productiva, mas cualquier consideración en ese respecto está más allá de los objetivos de este libro.

Sierra Madre del Sur

Introducción

Esta región hidrogeológica toma su nombre de las montañas que son el rasgo fisiográfico más prominente (Figura 13). En esta región acaece la mayor de las precipitaciones que se encuentran en Norteamérica con una media anual de 5 500 mm hacia el sur en la frontera mexicana con Guatemala, y de 4 500 mm en la parte central de Chiapas.

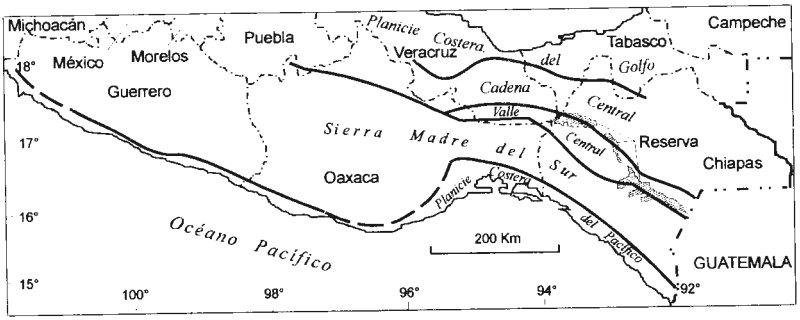


Figura 13. Mapa mostrando las subdivisiones hidrogeológicas de la Sierra madre del Sur (adaptado de Back *et al.*, 1988).

Debido en parte a la preponderancia de agua superficial en esta región, el agua subterránea ha sido poco estudiada; este atraso en el conocimiento de elementos básicos para discernir el funcionamiento del agua subterránea está adicionalmente vinculado con una compleja geomorfología y un considerable retraso económico y social, lo cual implica que extensas áreas se encuentren sin estudios e información suficiente y actualizada para llevar a cabo una completa evaluación del recurso. En consecuencia, se tiene una serie de problemas que no han quedado del todo planteados como:

i) el aumento de salinidad del agua por inducción de flujo profundo,
ii) la desecación de manantiales y corrientes permanentes,
iii) la desaparición de especies de flora y fauna,
iv) el inadecuado control de la extracción,
v) la inadecuada administración de zonas de recarga y descarga con los problemas de contaminación potencial y subsidencia,
vi) el incremento de los procesos de erosión,
vii) el mayor costo para el tratamiento de agua obtenida mediante pozos, y
viii) el uso adicional innecesario de energía para la extracción de agua.

Marco hidrogeológico

La Sierra Madre del Sur es una cadena montañosa compuesta principalmente de rocas metamórficas que fueron desplazadas durante el Jurásico, a lo que se le une un batolito que constituye el llamado macizo de Oaxaca y la Sierra Madre de Chiapas. La geología también está caracterizada por incluir unidades geológicas que en superficie se manifiestan como materiales granulares con alta porosidad o materiales consolidados con gran densidad de fisuras y/o cavidades de disolución, tales como calizas, tobas andesíticas, aluvión, conglomerado y arenisca. También se tienen unidades litológicas con presencia moderada de fallas y fracturas como las representadas por rocas sedimentarias (margas, limolitas, dolomitas) y material metamórfico con un grado moderado a alto de densidad de fracturas y fallas. También se encuentran unidades litológicas con bajo grado de conductividad hidráulica, tales como rocas metamórficas e ígneas intrusivas que no han sido afectadas por fallas. Las edades de los materiales geológicos van desde el Triásico hasta el reciente.

Hacia la zona del Pacífico se encuentra una planicie angosta de 10 a 25 km de anchura que va paralela a las montañas, así como a la línea de costa; esta franja está compuesta de material aluvial del Cuaternario representado por material fino derivado de la erosión de la Sierra Madre del Sur y transportado y depositado por las numerosas corrientes que fluyen hacia el océano. Estas planicies aluviales proveen un caudal bajo a los pozos que extraen el agua de esos sedimentos. Es común encontrar en los cauces de los ríos, en las partes altas, zonas que captan

flujos de tipo intermedio y regional y que se manifiestan por ser corrientes perennes que mantienen una vegetación de freatofítas (vegetación de galería) importante. Esto último es notorio en los llamados Valles Centrales de Oaxaca, donde se tiene una serie de depresiones en rocas sedimentarias del Cenozoico.

Una consecuencia de la alta precipitación en las zonas montañosas en la Sierra Madre del Sur y baja conductividad hidráulica de los materiales finos que se encuentran hacia la planicie costera, ocasiona que haya un bajo aporte, pero continuo, de agua subterránea, lo que hace que se tenga una serie de pequeños lagos y zonas pantanosas a lo largo de la costa. Lo importante del caudal de descarga se da por el aporte de agua por unidad de área que estos materiales aportan. En las partes altas el aporte de sistemas de flujo local es preponderante, y debido a la intensidad de las lluvias, el caudal de descarga es constante a lo largo del año.

Las denominadas cadenas frontales hacia la vertiente del Golfo están compuestas por una serie de sierras y planicies formadas por rocas permeables que permiten la mejor transmisión y almacenamiento del agua subterránea. Éstas se encuentran representadas por calizas y dolomitas cretácicas altamente carstificadas. Las mesas y altiplanos están compuestos de material sedimentario del Terciario que también incluye depósitos aluviales del Holoceno y un espesor grueso de material piroclástico del Cuaternario. La topografía abrupta y la heterogeneidad de los materiales geológicos presentes, así como las numerosas estructuras tectónicas, producen corrientes superficiales que desaparecen y que reaparecen como manantiales y que, en ocasiones, forman cascadas impresionantes. El agua subterránea usualmente está controlada por estructuras cársticas y por patrones de fracturas y fallas.

Calidad del agua

Desde la perspectiva conceptual que sugiere que el agua subterránea tendrá en la zona de recarga una calidad físico-química diferente a la observada en la zona de descarga y que ésta estará influenciada directamente por el medio geológico por donde circula, es factible comentar lo siguiente. Básicamente la calidad esperada del agua que tiene poco recorrido desde la zona de recarga hasta el sitio donde se extrae o el manantial puede observarse en municipios ubicados en las partes más

altas como en las sierras de Juárez, Tamazulapa, Tlaxiaco, Almolanga, Garza, Atravesada, Nochixtlán y Peñoles. En efecto, desde el punto de vista de su calidad química, el agua en las zonas de recarga tendrá comparativamente alto contenido de oxígeno disuelto y valor alto de Eh, bajo pH y baja concentración de sales disueltas; de acuerdo con esto, los distritos de Sola de Vega, Mixe, Villa Alta, Choapam e Ixtlán, son, o incluyen, zonas de recarga dependiendo de la extensión de su territorio. Si bien se carece de información y de una integración en tres dimensiones de la calidad físico-química del agua subterránea, se puede comentar que hacia la zona central del estado de Oaxaca el contenido de sólidos totales disueltos puede variar de entre 350 y 850 mg/l con una temperatura de entre 20 y 23° C, aunque se reportan temperaturas de 27° C, lo que implica que provienen de sistemas de flujo más profundos. Sin embargo, hacia la costa, si bien se tienen concentraciones de entre los 300 a los 700 mg/l denotando la presencia de sistemas de flujo local e intermedio, también se reportan salinidades de hasta 5 240 mg/l sugiriendo la presencia de zonas de descarga de flujos de mayor recorrido y que son evidentes por la permanencia de los humedales que allí se observan.

Planicie Costera del Golfo de México

Introducción

La precipitación en esta zona tiene valores de 700 mm/año, en especial en la parte central de Tamaulipas, pero puede llegar a más de 2 500 mm/año en la vecindad del río Coatzacoalcos, hacia la parte limítrofe sur de la región.

Marco hidrogeológico

Esta región, como su nombre lo indica, comprende toda la zona plana que rodea al Golfo de México y está compartida con los Estados Unidos, ya que continúa más allá del límite del río Bravo, por lo que la descripción aquí incluida sólo hace referencia a esta fracción. Los sedimentos más antiguos de la planicie costera del Golfo son de edad Cretácica y están representados predominantemente por rocas de origen marino que tienen una conductividad hidráulica muy baja, por lo que no presentan condiciones de interés desde el punto de vista del agua

subterránea. Esto debido a la presencia de depósitos regionales de bentonita, a la presencia de material granular entremezclado con material de grano fino, y a la predominancia de sedimentos del tipo de lutita y arenisca compacta.

Cuando estas rocas tienen una conductividad hidráulica importante esto sucede a profundidad donde, sin embargo, los poros y cavidades están saturados con agua salada o hidrocarburos. En esta región es factible encontrar sólo manantiales de agua dulce resultado de flujos locales; en ocasiones se reporta la presencia de algún manantial de agua termal como aquél localizado al final de la cuenca del río el Viejón en el estado de Veracruz

El depósito relativamente rápido de sedimentos y una subsidencia comparativamente lenta de la cuenca del Golfo de México ha resultado en un gran volumen de sedimentos semi-compactados en especial en las zonas cercanas a la costa. La extracción de fluidos (agua e hidrocarburos) de estos sedimentos ha acelerado esta compactación y, en términos generales, se ha manifestado como una subsidencia del suelo de uno a tres metros.

La secuencia de unidades hidrogeológicas es compleja, la mayor parte de las rocas pertenece al Terciario (Figura 14) Las rocas del Paleoceno son de origen predominantemente marino, mientras que las rocas del Eoceno medio son de origen continental principalmente; las rocas del Eoceno tardío y Oligoceno son primordialmente de origen marino y las rocas del Mioceno a más jóvenes fueron depositadas en ambiente continental y ambiente marino somero. También se tienen rocas volcánicas, las cuales pertenecen al Plioceno y Pleistoceno. Los depósitos aluviales son del Cuaternario y usualmente están asociados a los cauces de ríos. Las rocas del Paleoceno sugieren un espesor en exceso de los 1 000 m, las unidades del Eoceno al Mioceno constituyen un espesor conjunto de más de 10 000 m.

En la parte central de Veracruz y Tabasco el movimiento del agua subterránea detectado se ha restringido a las rocas del Mioceno y a otras más jóvenes, esto debido a que usualmente la información se restringe a pozos que penetran esas rocas y lo hacen por sólo algunos cientos de metros. Debido al tipo y granulometría del material geológico captado por los pozos, es típico que se tengan materiales de grano muy fino que es preciso detener y controlar en las labores de producción de los pozos.

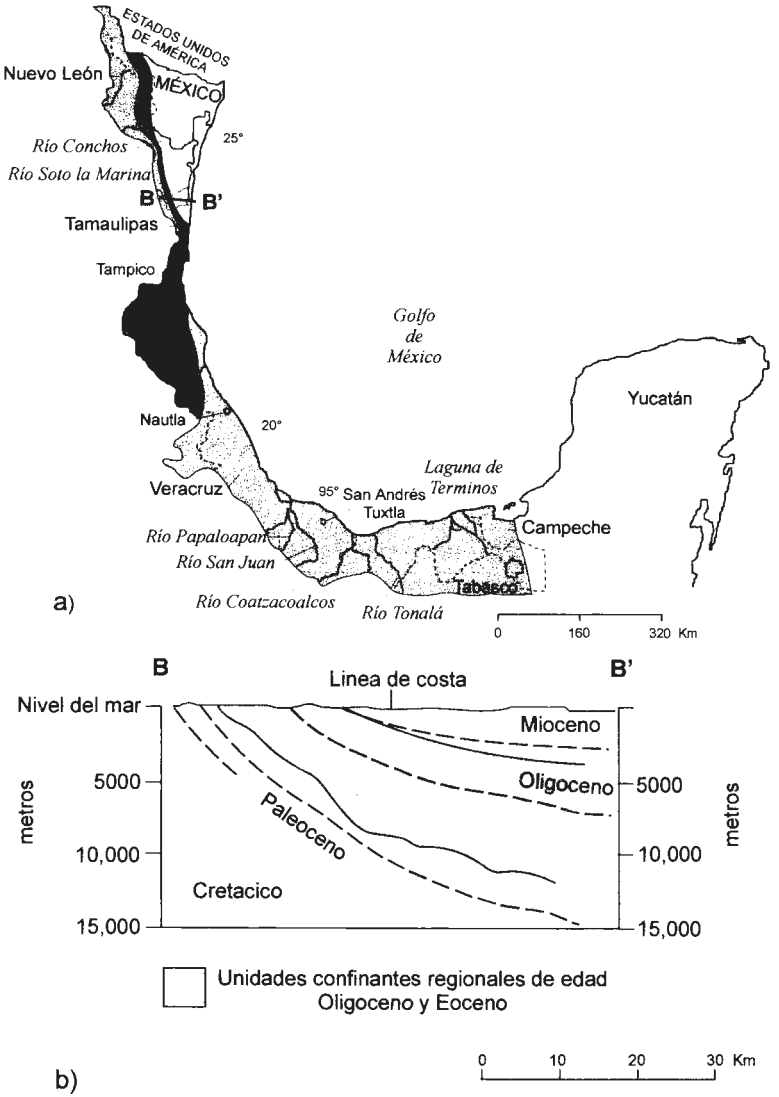


Figura 14. (a) Distribución de la planicie costera del Golfo de México y (b) Sección geológica general localizada en figura 14[a] (adaptado de Grubb y Carrillo-Rivera, en Back *et al.*, 1988).

Calidad del agua

La calidad del agua subterránea en las partes altas, en especial hacia el noreste de México, está caracterizada por un área relativamente pequeña de agua dulce típicamente de unos 50 m de espesor en rocas del Eoceno y Oligoceno. La mayor parte de los sedimentos contiene agua salobre y el agua dulce sólo está restringida a sitios localizados. La salinidad encontrada no puede ser totalmente explicada de acuerdo con la posición topográfica, al parecer está más relacionada con menor precipitación o con sedimentos menos permeables. Estos dos últimos puntos pueden inhibir el lavado de agua de mar por dulce de más reciente infiltración, lo que implica que es común encontrarlos saturados con agua de mar.

IV. DISPONIBILIDAD DE AGUA

Conocer la disponibilidad* de agua implica hacer la cuantificación de los recursos hidrológicos, tarea en la que los conceptos hidrometría, hidrología superficial y subterránea, cuenca hidrológica, necesidades de los ecosistemas y población tienen gran importancia.

Red hidrométrica

La hidrometría se ocupa de las técnicas para medir y cuantificar el agua en cualquiera de las fases del ciclo hidrológico (evaporación, precipitación, escurrimiento, infiltración, flujos subterráneos); sin embargo, al hablar de la red hidrométrica se destacan las estaciones hidrométricas o fluviométricas, es decir, aquéllas que se sitúan en las corrientes de agua con el objeto de conocer la altura del agua y su caudal.

En México, la red hidrométrica consta aproximadamente de 600 estaciones fluviométricas, pero su distribución geográfica no es uniforme a lo largo del territorio (Figura 15). Se aprecia una concentración de estaciones en la parte central del país, en donde la densidad de

---

* De acuerdo con la NOM 011-CNA-2000, que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, marca:

3.1.5 Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica: volumen medio anual de agua subterránea que puede ser extraído de una unidad hidrogeológica para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga material comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas.

3.1.6 Disponibilidad media anual de agua superficial en una cuenca hidrológica: valor que resulta de la diferencia entre el volumen medio anual de escurrimiento de una cuenca hacia aguas abajo y el volumen anual actual comprometido aguas abajo.

población y por tanto las actividades económicas son mayores y, como consecuencia, es más urgente conocer la cantidad de agua de que se dispone.

A partir de la información que se genera en la red de estaciones meteorológicas, en las cuales se registran la precipitación y la evaporación, y en las estaciones fluviométricas, es posible estimar los recursos hidrológicos con que cuenta un determinado territorio, que frecuentemente constituye una cuenca o una serie de cuencas hidrográficas.

En la Figura 16 se muestra la altura en milímetros del agua de escurrimiento medio anual en México, cuya distribución se puede comparar con la de la precipitación (Figura 2) y observar la dependencia que guarda, en general, la primera con respecto a la segunda. El agua de escurrimiento es la que aparece en los cauces de las corrientes fluviales y su volumen representa la cantidad de agua superficial con que se cuenta en la cuenca que drenan.

La medición del agua subterránea ofrece mayor dificultad; generalmente se realiza en el sitio en que se proyecta su extracción, a través de estudios geológicos y geofísicos. De cualquier manera, parte del agua que se registra en las estaciones hidrométricas o fluviométricas proviene de los mantos de agua subterránea que alimentan a las corrientes fluviales y ésta, junto con el agua que corre por la superficie y después por los cauces de las corrientes, constituye el agua que, por el ciclo hidrológico a través de la fase del escurrimiento, la cuenca descarga naturalmente, es decir, el agua disponible. Aún quedarían por explorar e incorporar los flujos profundos de agua subterránea que no afloran a la superficie terrestre (en las zonas costeras).

Regiones hidrológicas y población

Una región hidrológica está formada por una o varias cuencas hidrográficas; todo centro de población se ubica dentro de una cuenca hidrográfica, por la misma razón no hay que perder de vista que, cuando se hace una obra para aprovechamiento hidrológico en un punto, se afecta no sólo al recurso agua sino a los demás recursos relacionados con ella dentro de la cuenca en la que está situado. Con base en ello, los estudios hidrológicos se hacen a partir de las cuencas hidrográficas o de las regiones hidrológicas.

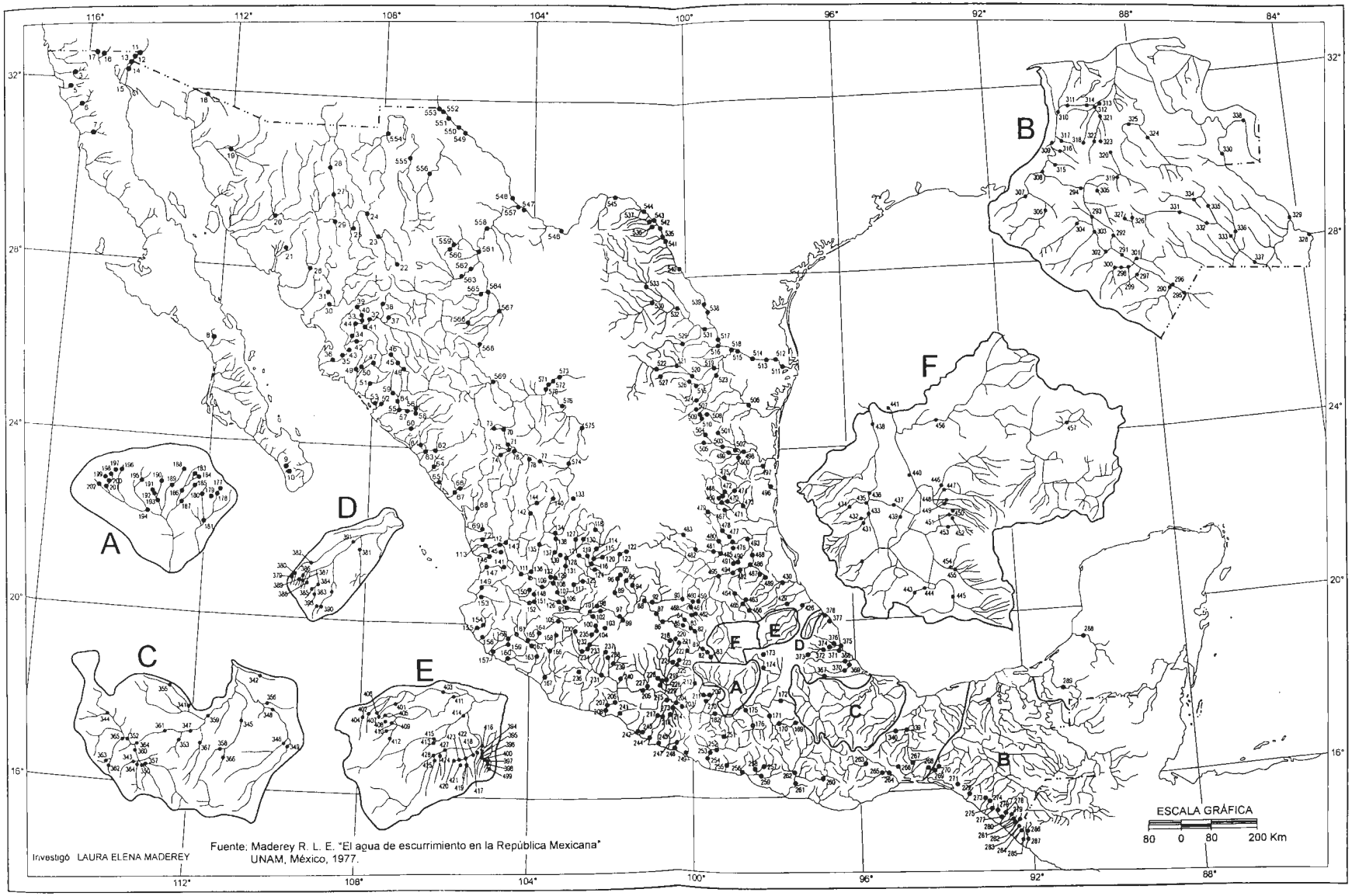


Figura 15. Red hidrométrica de la República Mexicana.

Figura 16. Escurrimiento medio anual en milímetros en la República Mexicana.

La anterior Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (actualmente la Comisión Nacional del Agua) dividió al país en 37 regiones hidrológicas (Figura 17). Relacionando esta división con la información de la Figura 16 y con la población total de cada región hidrológica, se estimaron los parámetros que aparecen en la Tabla 3. En ella se observa la lógica disminución de la disponibilidad de agua por habitante derivada del aumento de la población entre 1980 y 2000 (30 636 579 habitantes) y se aprecia además que, en general, tanto el volumen medio anual de agua superficial como la disponibilidad de ella aumentan de noroeste a sureste, obedeciendo a la variación espacial de la precipitación, la cual también aumenta hacia el sureste, a diferencia de la población, que se encuentra concentrada en el centro del país.

Se observa que la disponibilidad de agua, en especial superficial, es nula o muy baja en la península de Baja California, en la península de Yucatán y en la cuenca de México, y baja en la mayor parte de la Altiplanicie Mexicana y en la región hidrológica del sistema fluvial Lerma-Santiago. En el caso de la península de Baja California y la Altiplanicie Mexicana, los valores nulos y bajos se explican por la escasa precipitación que se registra; en la península de Yucatán, aunque la lluvia es abundante, la gran permeabilidad del terreno impide la existencia de corrientes fluviales en la superficie. La situación de las cuencas de México y del Lerma-Santiago se explica por el elevado número de habitantes y actividades productivas que en ellas se asientan, especialmente en la cuenca de México.

Si se considera que las necesidades medias actuales de agua de la población se cubren con aproximadamente de 250 l/h/día (litros por habitante por día) y que la de las grandes ciudades como México, Guadalajara y Monterrey es de alrededor de 350 l/h/d (valores calculados con datos del Plan Nacional Hidráulico, 1981), se puede decir que ésta es factible de satisfacer ampliamente, con excepción de la cuenca Lerma Santiago y la península de Baja California. Sin embargo, hay que aclarar que no todos los habitantes cuentan con el servicio de agua, acción que requeriría de grandes proyectos y que, por lo mismo, es difícil de realizar en la medida y con la rapidez necesarias.

Por otra parte, al destacar el bajo potencial del agua superficial en las zonas mencionadas se infiere la importancia que tiene el aprove-

chamiento del agua subterránea, recurso cuya explotación no es la adecuada en algunas regiones como la costa de Sonora (Región Hidrológica de Sonora Sur) y la Comarca Lagunera (Región Hidrológica Mesa del Norte Sur), donde se emplea en actividades agrícolas, y desde luego en la cuenca de México, donde es necesaria para usos municipales e industriales.

Tabla 3. Disponibilidad de agua por habitante en cada región hidrológica

REGIÓN HIDROLÓGICA	VOLUMEN MEDIO ANUAL APROXIMADO DE AGUA SUPERFICIAL EN m^3 [1]	NÚMERO DE HABITANTES			DISPONIBILIDAD APROXIMADA DE AGUA POR HABITANTE EN LITROS POR DIA		
		1980 [2]	1990 [3]	2000 [4]	1980	1990	2000
1 BAJA CALIFORNIA NOROESTE	175 972 230	639 381	1 017 342	1 663 266	754 035	473 897	289 86
2 BAJA CALIFORNIA CENTRO OESTE	0	16 866	24 557	32 333	0 000	0 000	0 00
3 BAJA CALIFORNIA SUROESTE	0	61 364	105 029	135 569	0 000	0 000	0 00
4 BAJA CALIFORNIA NORESTE	0	112 431	135 964	175 347	0 000	0 000	0 00
5 BAJA CALIFORNIA CENTRO ESTE	0	27 659	39 969	50 729	0 000	0 000	0 00
6 BAJA CALIFORNIA SURESTE	0	126 792	174 207	242 483	0 000	0 000	0 00
7 CUENCA DEL RÍO COLORADO	12 173 450	482 763	569 974	727 686	69 085	58 515	45 83
8 SONORA NORTE	533 148 175	250 784	320 014	412 094	5 824 454	4 564 425	3 544 53
9 SONORA SUR	4 026 128 000	1 242 638	1 467 073	1 732 551	8 876 669	7 518 704	6 366 61
10 SINALOA	17 834 524 918	1 813 701	2 127 374	2 441 956	26 940 341	22 968 087	20 009 25
11 CUENCA DE LOS RÍOS PRESIDIO Y SAN PEDRO	9 725 423 810	1 043 403	1 207 137	1 312 752	25 536 635	22 072 885	20 297 05
12 SISTEMA FLUVIAL LERMA - SANTIAGO	12 598 032 429	11 004 837	14 019 060	16 870 374	3 136 362	2 462 017	2 045 90
13 PACÍFICO CENTRO, RÍOS SAN BLAS Y HUICICILA	1 808 662 489	202 655	259 585	342 217	24 451 652	19 089 083	14 479 81
14 PACÍFICO CENTRO, RÍO AMECA	2 366 268 856	352 656	437 082	528 612	18 383 153	14 832 293	12 264 05
15 PACÍFICO CENTRO, COSTA DE JALISCO	6 943 473 226	198 840	239 507	288 481	95 670 915	79 426 548	65 942 69
16 PACÍFICO CENTRO, RÍOS ARMERÍA Y COAHUAYANA	3 442 414 950	700 717	786 892	890 405	13 459 460	11 985 474	10 592 11
17 PACÍFICO CENTRO, COSTA DE MICHOACÁN	2 089 236 000	89 679	117 471	138 874	63 826 812	48 726 360	41 216 74
18 CUENCA DEL RÍO BALSAS	25 497 795 127	6 714 603	8 237 167	10 005 656	10 403 739	8 480 704	6 981 74
19 COSTA GRANDE DE GUERRERO	7 731 413 333	606 879	861 780	1 028 150	34 903 088	24 579 306	20 602 00
20 COSTA CHICA DE GUERRERO	15 364 268 000	1 538 002	1 921 900	2 314 088	27 369 209	21 902 224	18 190 27
21 COSTA DE OAXACA	1 096 000 000	224 350	319 785	401 103	13 384 175	9 389 870	7 486 20
22 TEHUANTEPEC	4 980 910 667	319 768	407 484	442 129	42 675 723	33 489 243	30 865 04
23 COSTA DE CHIAPAS	15 634 442 591	541 664	781 927	894 868	79 078 708	54 780 164	47 866 37
24 MESA DEL NORTE (NORESTE)	3 729 113 228	5 193 583	6 469 960	8 183 785	1 967 187	1 579 105	1 248 41
25 GOLFO NORTE	6 017 331 769	502 024	605 194	693 212	32 838 769	27 240 588	23 781 81
26 CUENCA DEL RÍO PÁNUCO	22 920 872 615	3 689 144	4 319 458	4 906 410	17 022 080	14 538 146	12 798 95
26a CUENCA DE MÉXICO	582 213 333	14 587 535	15 729 810	18 596 610	109 347	101 407	85 77
27 GOLFO CENTRO	16 816 446 667	2 353 937	2 601 611	2 861 491	19 572 510	17 709 203	16 100 85
28 GOLFO SUROESTE	49 583 720 000	3 795 225	4 587 500	5 328 165	35 793 875	29 612 165	25 495 79
29 GOLFO ZONA ÍSTMICA	38 619 134 571	916 720	1 282 568	1 419 960	115 417 878	82 495 313	74 513 26
30 GOLFO SURESTE	100 351 971 245	2 440 872	3 662 029	4 599 596	112 638 787	75 077 753	59 774 14
31 YUCATÁN OESTE	15 549 040 000	280 293	377 956	502 239	151 984 479	112 711 823	84 820 39
32 YUCATÁN NORTE	24 000 000	1 223 997	1 719 791	2 357 489	53 720	38 233	27 89
33 YUCATÁN ESTE	228 000 000	143 722	237 010	292 328	4 346 287	2 635 575	2 136 82
34 CUENCAS CERRADAS DEL NORTE	1 099 486 959	575 692	735 498	945 692	5 232 472	4 095 583	3 185 27
35 MESA DEL NORTE CENTRO	463 200 000	88 489	91 306	82 319	14 341 246	13 898 770	15 416 13
36 MESA DEL NORTE SUR	2 140 382 781	1 381 140	1 595 750	1 695 013	4 245 813	3 674 800	3 459 59
37 MESA DEL NORTE EL SALADO	805 836 139	1 362 028	1 655 924	1 947 380	1 620 943	1 333 256	1 133 71
TOTALES Y DISPONIBILIDAD MEDIA DIARIA P/HABITANTE	390 791 037 558	66 846 833	81 249 645	97 483 412	26 629 727	20 356 356	17 185 92

FUENTES: (1) SARH. BOLETINES HIDROLÓGICOS. MÉXICO.
(2) SPP. INEGI. X CENSO GENERAL DE POBLACIÓN Y VIVIENDA 1980. MÉXICO. 1986.
(3) INEGI. XI CENSO GENERAL DE POBLACIÓN Y VIVIENDA 1990. MÉXICO. 1992.
(4) INEGI. XI CENSO GENERAL DE POBLACIÓN Y VIVIENDA 2000. MÉXICO. 2001.

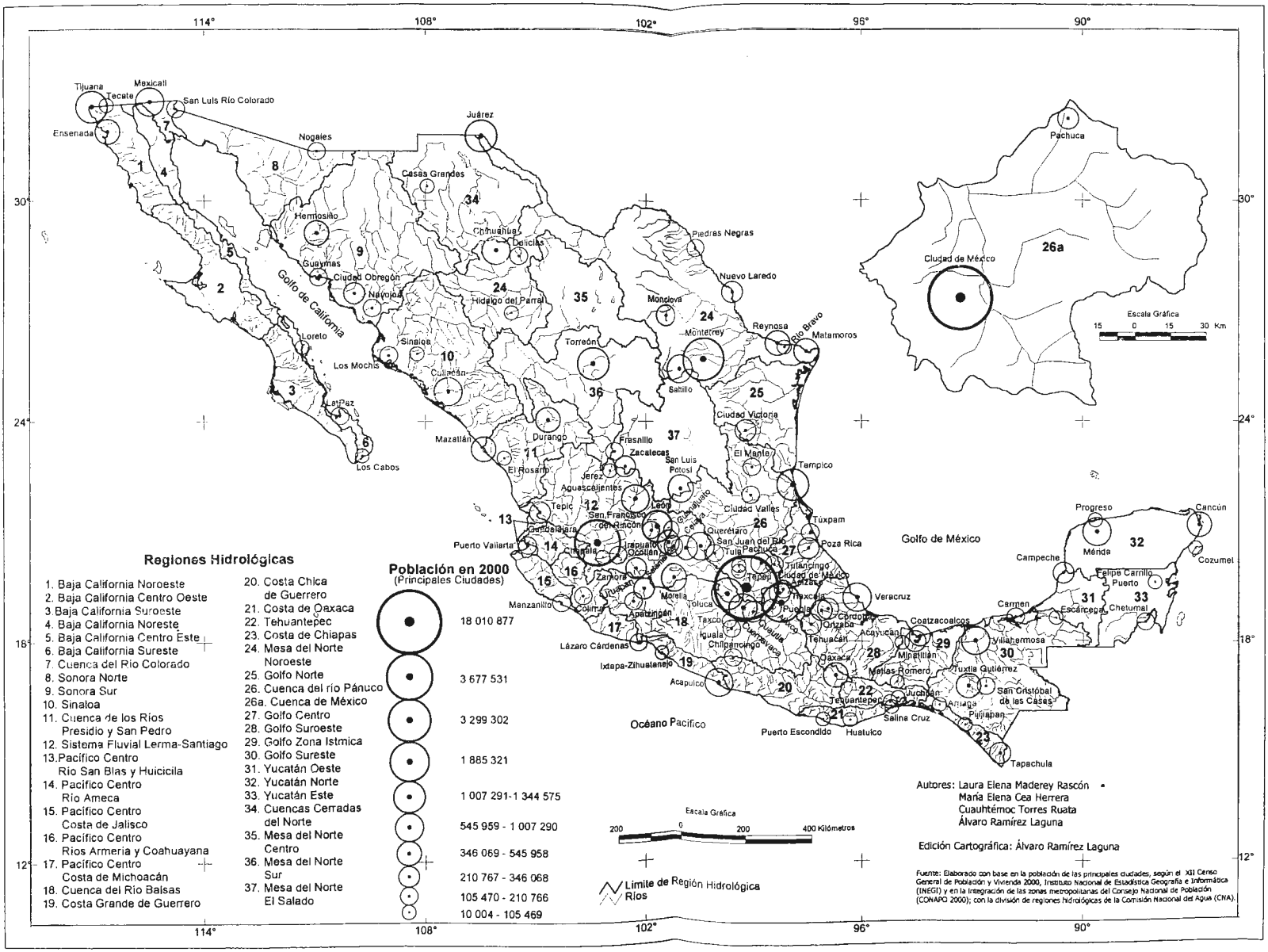


Figura 17. Regiones hidrológicas y población en el 2000 para la República Mexicana.

V. CONSIDERACIONES FINALES

De la interacción de los factores expuestos como determinantes del comportamiento hidrológico (fisiografía, clima y vegetación), resulta el patrón hidrográfico en el territorio mexicano. Se cuenta con tres vertientes: la del Océano Pacífico, la del Golfo de México y la interior. La red fluvial es, por lo general, de cursos de corta longitud, con excepción de algunos sistemas como el Grijalva-Usumacinta, el Balsas, el Lerma-Santiago, el Pánuco y algunos del noroeste de la vertiente noroccidental del Océano Pacífico.

En cuanto a la disponibilidad del agua superficial, la población no se concentra en donde existen los mayores volúmenes, sino en la parte central de México en donde, si bien el recurso históricamente ha sido abundante, por la gran densidad de habitantes, la infraestructura y manejo resultan insuficientes para satisfacer las necesidades, incluso considerando el agua del subsuelo. Existen casos donde, al parecer, se hace necesario importarla de otras regiones hidrológicas, como en la cuenca de México, lo cual ocasiona el desequilibrio natural de las regiones afectadas. La razón de que estas zonas sean las más pobladas se debe, originalmente, a dos factores muy importantes para el desarrollo óptimo de la vida: el clima y que se tenía agua subterránea descargando en forma natural (manantiales). En la parte central del país se tiene un clima templado que, además de proporcionar un índice de bienestar muy bueno, influye en la ocurrencia de otros recursos básicos como el suelo, el agua y la vegetación.

En la actualidad ya no es válido decir que la población en la cuenca de México aumenta por su clima, pues éste ya está alterado debido al abuso en la extracción de sus recursos naturales y, por tanto, el

índice de comodidad ya no es el óptimo; sin embargo, dado que por las razones apuntadas anteriormente en esta cuenca se estableció la capital de la República Mexicana con un sistema de centralización general, la población de la misma sigue en aumento, aunque con una tasa menor (Maderey, 2004).

El desarrollo sustentable de cualquier región debe mantener un equilibrio positivo en su ecología; más aún, en sentido más amplio, un equilibrio ambiental, y éste depende directamente del agua asequible. Se estima que el común denominador de muchos problemas en materia ambiental es la falta de educación pertinente, a todos los niveles, sobre la importancia del recurso agua y de su participación preponderante en el ambiente. En la misma forma que para definir la viabilidad de cualquier proyecto sobre agua superficial, es necesario conocer los factores que controlan su cuantía, calidad y posición en el espacio, el conocimiento de los sistemas de flujo de agua subterránea existentes y su significado como fuente de agua y componente del ambiente es un prerrequisito para definir la presencia de problemas ambientales relacionados con el recurso agua subterránea, y de ahí proponer soluciones viables. Así como resulta evidente la imposibilidad de realizar acciones acertadas sobre agua superficial desde una perspectiva ambiental si se desconoce la naturaleza y funcionamiento de su cuenca, en forma análoga debe tenerse un conocimiento equivalente para el funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea. Es conveniente que estos sistemas se definan en tres dimensiones, lo cual incluye la definición de sistemas locales, intermedios y regionales. Las componentes del movimiento del agua subterránea son: en vertical hacia abajo, horizontal y vertical hacia arriba, esto es, recarga, tránsito y descarga, respectivamente. La definición de estos sistemas de flujo, realizada en varias regiones de México, propone una dinámica del agua subterránea distinta a la restringida a la cuenca superficial, aspecto de singular importancia si se intenta manejar el recurso con base en entender cómo funciona y con el fin de minimizar los impactos negativos ya definidos.

Las actividades humanas cambian la recarga natural y procesos inherentes a ésta, lo cual altera los caudales de agua que escurren hacia zonas de captación por pozos, y hacia pantanos, humedales, ríos y cuerpos de agua en áreas costeras o en el continente; la reducción del caudal de aporte de agua subterránea ha producido la desaparición de

un número importante de humedales naturales, y otros están en riesgo de desaparecer.

La calidad del agua también se encuentra en riesgo. Los lixiviados producto del manejo inadecuado de residuos sólidos viajan hacia el agua subterránea como resultado de una mala ubicación de los sitios de depósito. Cada vez más agua con alta salinidad y/o elementos traza y mayores está siendo inducida a zonas de extracción de agua subterránea.

Por otro lado, el ambiente está siendo alterado como resultado de cambios en el régimen del agua subterránea. La remoción de la cubierta vegetal por una reducción del recurso agua subterránea puede resultar en un incremento de la erosión que afecta el embalse de las presas y la presencia de suelo. La vegetación y otras componentes bióticas de los ecosistemas se verán afectadas por la reducción del aporte de flujos regionales de agua debida a un uso indiscriminado que ignora la comunicación hidráulica subterránea entre cuencas superficiales, la cual usualmente se manifiesta después de varias decenas de años.

Por otro lado, el exceso de agua en una cuenca, resultado de la importación de un caudal continuo de otra cuenca, puede causar daño a los ecosistemas existentes, así como la inundación de las partes bajas que incluyen infraestructura y puede propiciar un cambio socioeconómico asociado en la comunidad productiva. La perforación, diseño, construcción y régimen de operación inadecuado en los pozos significa abatimientos adicionales que repercuten en mayor consumo de energía e innecesarios costos financieros para reponer la infraestructura relacionada.

Las zonas de descarga de cuencas sedimentarias están siendo afectadas por una extracción indiscriminada de agua subterránea, efecto que se hace evidente en la consolidación de la matriz acuífera. Este impacto es mayor cuando se tienen:

i) sedimentos finos,
ii) unidades acuíferas de gran espesor,
iii) abatimiento excesivo del nivel de agua subterránea,
iv) flujo inverso de arriba hacia abajo, y
v) aumento en la temperatura del agua extraída.

La interacción del agua subterránea en el ambiente requiere de un programa de observación integral de variables que incorporen el funcionamiento del recurso en el espacio y en el tiempo, así como de los efectos esperados. Aún falta definir y establecer indicadores confiables a través de programas de detección, no necesariamente costosos, de fácil determinación y científicamente comprobados, para poder tener elementos de juicio que permitan fundamentar la realización de cualquier tipo de medida preventiva y correctiva relacionada con el agua y su entorno ambiental. Dichos indicadores serán de invaluable ayuda en el planteamiento de propuestas de desarrollo, donde es deseable incorporar variables sociales, económicas y jurídicas que conduzcan hacia el equilibrio ambiental.

En la situación actual resulta esencial hacer dos llamados urgentes con respecto al recurso agua en México, especialmente en las zonas de mayor población y actividad económica: uno referente a su conservación –a través de la racionalización de su consumo– y el otro a la contaminación de que es objeto. Este último aspecto, aunque entra en el primero, es indispensable tomarlo en cuenta cada vez que se extrae agua para su aprovechamiento, no importa para qué fin ni de dónde provenga el recurso, si del subsuelo o directamente de la red hidrográfica.

GLOSARIO

Acuífero. Formación geológica, parte de una formación geológica o conjunto de formaciones que producen agua en cantidad y calidad económicamente asequible; tiene extensión territorial y espesor, esto es su presencia es en tres dimensiones

Agua subterránea. Es el agua que se encuentra por debajo del nivel del suelo, tanto en la zona no saturada (agua en su camino a la superficie freática) como aquélla debajo del nivel freático.

Basamento. Es una formación geológica, o conjunto de ellas, que contienen a la formación o formaciones acuíferas y que para términos prácticos funcionan como una frontera impermeable al flujo subterráneo a nivel regional.

Coeficiente de almacenamiento. Es la propiedad que mide la cantidad de agua que se puede obtener o que un material acuífero puede tomar por el cambio en posición del nivel freático o superficie potenciométrica, se mide en porcentaje del volumen unitario de material geológico considerado.

Compresibilidad. Es una propiedad de los materiales (geológicos) que describe el cambio en volumen inducido en un material bajo la aplicación de un esfuerzo o presión

Conductividad hidráulica. Es la propiedad de un material geológico que determina la facilidad con que se mueve el agua a través de éste y se mide como la cantidad de agua que puede circular por una sección unitaria del acuífero bajo un gradiente hidráulico unitario, cantidad que depende de la densidad y viscosidad del agua.

Consolidación. Es el cambio de volumen de un material (geológico) como respuesta a una acción que permite el escape de un volumen de agua en él almacenado. En mecánica de suelos, es el proceso de com-

pactación asociado con el drenaje del agua saturando una capa de arcilla.

Contaminación. Cualquier cambio en la calidad del agua subterránea producto de alteraciones durante su dinámica natural.

Flujo base. Es el caudal de agua subterránea que aportan a un río, uno o varios sistemas de flujo durante la época de lluvias y estiaje; y que usualmente mantiene el caudal del río en época de estiaje.

Freatofita. Variedad de planta vegetal la cual se ha adaptado a vivir a partir de un nivel freático somero. Es un tipo particular del grupo de plantas hidrófitas características de ambientes muy húmedos (humedales).

Porosidad. Porcentaje de relación del volumen de vacíos respecto al volumen total de una muestra de material geológico.

Recarga (artificial). Es cualquier proceso realizado por el ser humano mediante el cual se transfiere agua de la superficie a los sistemas de agua subterránea.

Recarga (natural). Es la porción de la precipitación que llega al nivel freático y que contribuye a la renovación del agua subterránea presente en el acuífero.

Recarga (inducida). Es el proceso de cambio en la dirección de movimiento del agua subterránea, que ha sido alterado por una extracción excesiva y su nueva dirección es hacia esa zona de extracción.

Sistema de flujo de agua subterránea. Unidad básica de comportamiento del recurso hídrico en un territorio determinado, que se define como una unidad natural y coherente en espacio y tiempo, consistente de agua subterránea con calidad fisicoquímica particular, que circula a través de materiales geológicos y está caracterizada por condiciones de flujo específicas, denominadas zonas de recarga, tránsito y descarga, que se manifiestan por un tipo característico de vegetación y suelo. Cada una de las tres condiciones en la distribución del flujo subterráneo condiciona un arreglo específico y definido de presión de poro, carga hidráulica, gradiente hidráulico (horizontal y vertical), temperatura, salinidad, composición química del agua subterránea, efectos biológicos y edafológicos en la superficie del terreno; características que permiten su identificación a partir de información básica de este tipo, recopilada en campo y que se puede manifestar como sistemas locales, intermedios y regionales.

Superficie freática. Está representada por el nivel del agua que se

encuentra en un pozo, noria o pozo de observación, cuando éste se encuentre bajo la presión atmosférica; también está representada por la carga hidráulica observada en un manantial.

Velocidad del agua subterránea. Es el grado de rapidez de movimiento del flujo de agua que es directamente proporcional al gradiente hidráulico y la conductividad hidráulica e inversamente proporcional a la porosidad del medio por donde circula. En un medio granular (totalmente saturado) la velocidad es de centímetros a metros por año; en un medio fracturado es de metros a cientos de metros por año. En medios parcialmente saturados, (como lo es en una zona de recarga) la velocidad es menor hasta en varios órdenes de magnitud.

Zona de descarga. Se relaciona con partes del territorio donde existe flujo base en ríos, presencia de manantiales, existencia de vegetación freatofita, presencia de vegetación capaz de soportar cierta cantidad de salinidad (plantas halófilas), el nivel freático es somero, la salinidad en el agua es mayor comparada con otras regiones y generalmente coinciden con un territorio de menor elevación de una cuenca, así como la presencia de suelo alcalino o salino. Es la parte del territorio donde aflora el agua del nivel freático producto de cualquier tipo de sistema (local, intermedio o regional).

Zonas de recarga. Éstas se manifiestan cuando las corrientes superficiales únicamente presentan agua inmediatamente después de la lluvia, no existen manantiales, la vegetación normalmente consiste de especies xerófitas o aquéllas que son capaces de subsistir en períodos de estiaje, generalmente existe déficit de humedad del suelo, el nivel freático se encuentra a gran profundidad, la salinidad del agua subterránea es menor que en otras partes dentro de la cuenca y coincide con sitios del territorio topográficamente más elevados; la geología del subsuelo, en especial el contraste de las propiedades hidráulicas, tiene una influencia directa en la definición del tipo de sistemas de flujo que se desarrollan en un territorio determinado. Es la parte del territorio donde se infiltra agua que llega al nivel freático, existen tres tipos de estas zonas: las de recarga a un sistema local, aquéllas a un sistema intermedio y las de un sistema regional.

Xerofita. Planta cuyas características especiales (xeromórficas) le permiten sobrevivir en climas con un prolongado período de estiaje. Las plantas xerófitas presentan algunas de las siguientes características,

rara vez todas a la vez: reducción del tamaño de la hoja, engrosamiento de la cubierta cuticular de hojas y tallo, estomas ocultas y protegidas por otras estructuras celulares, hojas que rotan para permanecer ocultas del sol, etcétera.

BIBLIOGRAFÍA

AIC (1995). *El agua y la ciudad de México*, Academia de la Investigación Científica, Academia Nacional de Ingeniería y Academia Nacional de Medicina.

Back, W., J. S. Rosenshein and P. R. Seaber (1988), *Hydrogeology, The Geology of North America*, The Geological Society of North America, V. 0-2.

Bear, J., D. Zaslavsky and S. Irmay (1968), *Physical principles of water percolation and seepage*, UNESCO, Arid Zone Research.

Bernáldez, F. G., R. J. M. Benayas and A. Martínez (1993), "Ecological impact of groundwater extraction on wetlands" (Douro Basin, Spain), *Journal of Hydrology*, v. 141, pp. 219-238.

Bouwer, H. (1987), *Groundwater Hydrology*, McGraw-Hill Book Co.

BGS, (1996). "Impacto del reuso de las aguas residuales sobre el agua subterránea en el valle del Mezquital, Edo. de Hidalgo, México", *British Geological Survey*, VIII Curso OMS-PNUMA-GEOMS/OPS-CEPIS/ODABGS, La protección de acuíferos como fuente de agua potable, Querétaro, marzo 4-8.

Cardona, B. A. (1990), *Caracterización físico-química y origen de los sólidos disueltos en el agua subterránea del valle de San Luis Potosí: su relación con el sistema de flujo*, tesis de Maestría en Aguas Subterráneas, Facultad Ingeniería Civil, Universidad de Nuevo León, México.

Cardona, A., J. J. Carrillo-Rivera, R. Huízar-Álvarez and E. Graniel-Castro (2003), "Salinization in coastal aquifers developed for agriculture in arid zones: an example from Santo Domingo, Baja California Sur, Mexico", *Environmental Geology*, v. 45 no. 3, pp. 350-366.

Carrillo-Rivera, J. J., A. Cardona and R. Margain (1997), "Groundwater flow and environmental impact in Mexico". *Geografía y Desarrollo*, núm. 15, México, pp. 17-26.

Carrillo-Rivera, J. J. (1996), "Monitoring of exploited aquifers resulting in subsidence, example: Mexico City", UNESCO volume, Paris; Groundwater Monitoring in (Semi)Arid Regions. Part II, *Studies and Reports in Hydrology*, v. 57, pp. 151-166.

Carrillo-Rivera, J. J., B. A. Cardona and D. Moss (1996), "The importance of the vertical component of groundwater flow: a hydrogeochemical approach in the valley of San Luis Potosí, Mexico", *Journal of Hydrology*, v. 185, pp. 23-44.

Carrillo-Rivera, J. J. (2000), "Application of the groundwater-balance equation to indicate interbasin and vertical flow in two semi-arid drainage basins, Mexico", *Hydrogeology Journal*, v. 8, no. 5, pp. 503-520.

Carrillo-Rivera, J. J., A. Cardona y T. Herat (2001), "Inducción de agua termal profunda a zonas someras: Aguascalientes, México", *Revista Latinoamericana de Hidrología*, vol. 1, núm. 1, pp. 41-53.

Carrillo-Rivera, J. J., A. Cardona and W. M. Edmundo (2002), "Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high fluoride concentration in abstracted groundwater: basin of San Luis Potosi, Mexico", *Journal of Hydrology*, v. 261, pp. 24-47.

Castellanos, J. Z., B. Hurtado y S. Villalobos (1998), "Cambio en la calidad del agua subterránea debido al abatimiento del nivel piezométrico en el estado de Guanajuato", *Memorias Simposio Internacional ALHSUD-AIH-INIFAF*, León, Guanajuato, México. Pp. 137-152.

Comisión Nacional del Agua (CNA), Subdirección General Técnica. SEMARNAT (2003), *Presas de México, tomos I-XVI,* México.

Comisión del Plan Nacional Hidráulico, SARH (1981), *Plan Nacional Hidráulico 1981. Anexo 3. Usos del Agua,* México.

Contreras, M. S. y E. M. A. Cuesta (1990), *Flujo subterráneo en el sistema acuífero del área Morelia, Queréndaro y Pátzcuaro, Michoacán, México*, tesis de Ingeniería Geológica, Ciencias de la Tierra, Escuela Superior e Ingeniería y Arquitectura, IPN, México.

Cherry, J. A. (1983; Guest-Editor), "Migration of contaminants in groundwater at a landfill: a case study", *Journal of Hydrology* Special Issue v. 63, no. ½, May, pp. 1-197.

Día siete. "aguas que matan" (2003), págs, 40-47, Suplemento semanal del Periódico *El Universal*, 2 de noviembre de 2003, México.

Durazo, J. and R. Farbolden (1989), "The groundwater regime of the valley of Mexico from historic evidence and field observations", *Journal of Hydrology*, v. 112, pp. 171-190.

Edmunds, W. M., J. J. Carrillo-Rivera and A. Cardona (2002), "Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City", *Journal of Hydrology*, vol. 258, pp. 1-24.

EODC, ONU (1998), Análisis del Desempeño Ambiental. Reporte. México. La protección de acuíferos como fuente de agua potable, marzo 4-8, Querétaro, México.

Freeze, R. A. y J. A. Cherry (1979), *Groundwater*..Prentice-Hall, Inc.

Gash, J. H. C., C. R. Lloyd and Lachaud, (1995), "Estimating sparse forest interception with an analytical model", *Journal of Hydrology,* v. 170, pp. 79-86.

GEOMS/OPS-CEPIS/ODABGS, Ortega-Gutiérrez, F., L. M. Mitre-Salazar, J. Roldán-Quintana, J. J. Aranda-Gómez, D. Morán-Zenteno, S. Alaniz-Álvarez y Á. Nieto-Samaniego (1992), Texto explicativo de la carta Geológica de la República Mexicana, escala 1:2 000 000, 5ª edición, Consejo de Recursos Naturales e Instituto de Geología, UNAM, México.

Graniel C. E., B. L. Morris and J. J. Carrillo-Rivera (1999), "Effects of Urbanisation on groundwater resources of Mérida, Yucatán, Mexico", *Environmental Geology*, vol. 37(4), pp. 303-312.

Grimaldo, M., V.-H. Borja-Aburto, A. L. Ramírez, M. R. Ponce and F. Díaz-Barriga (1995), "Endemic fluorosis in San Luis Potosí, México", *Environmental Research*, v. 68, pp. 25-30.

Huízar-Álvarez, R., G. Hernández, M. Carrillo-Martínez, J. J. Carrillo-Rivera, T. Herat and G. Ángeles (2002), "Geologic structure and groundwater flow in the Pachuca-Zumpango sub-basin, Central Mexico", *Environmental Geology*, vol. 43, pp. 385-399.

Huízar-Álvarez, R., J. J. Carrillo-Rivera, G. Ángeles-Serrano, T. Hergt and A. Cardona (2004), "Chemical response to groundwater extraction southeast of Mexico City", *Hydrogeology Journal*, aceptado para publicación febrero 2004.

IAH (1991), "Aquifer overexplotation", *XXIII Proceedings of the International Congress, International Association of Hydrogeologists*, Canary Islands, Spain, v. I, 580 pp. y v. II. 146 pp.

Jayasuriya, M. D. A., G. Dunn, R. Beyon and P. J. O Shaughnessy (1995), "Some factors affecting water yield from mountain as (*Eucaliptus regnans*) dominated forest in sout-east Australia". *Journal of Hydrology*, v. 150, pp. 345-367.

Jiménez B. Cruicshank C., S. Capella, A. Chávez, A. Palma, R. Pérez y V. García (1998), *Estudio de la factibilidad del empleo de agua del acuífero del Valle del Mezquital para suministro del Valle de México*, Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto 8384 elaborado para la Comisión Nacional del Agua.

Jiménez, V. (1990). *El Árbol del Tule en la Historia*, Codex Editores, México.

Leake, S. A. (1991), "Simulation of vertical compaction in models of regional groundwater flow", *Proceedings Forth Symposium on land Subsidence*, Houston, USA. IAHS, Pub. 200, pp. 565-574.

Maderey R., L. E. (1977), *El agua de escurrimiento en la República Mexicana*, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Maderey R., L. E. y R. C. Torres (1990), "Hidrografía e Hidrometría", esc. 1:4 000 000, Hoja IV.6.1, "Hidrografía e Hidrometría", Mapa A, en García de Fuentes, A. (ed.), *Atlas Nacional de México*, vol. 2, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Maderey R., L. E. (2004), "Semblanza histórica y futuro del recurso agua en la Ciudad de México, una visión del consumo de agua por Cuencas Hidrológicas", en Collado, M. del C. (coord.), *Miradas Recurrentes II. La Ciudad de México en los siglos XIX y XX*, Instituto Mora/UAM, México, pp. 370-377.

Mangold, C.-D., M. J. Lippman and G. S. Bodradsson (1980), CCC Users Manual Version II (Draft). LBL-10909. Lawrence Berkeley Laboratory, Universidad de California, Berkeley, USA.

Martínez L., V. M. (1999), "Los lagos y lagunas, un enfoque hidrogeográfico general", *Notas. Revista de Información y Análisis*, núm. 7, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), México, pp. 46-58.

Molina, A. S. (1996), *Diferenciación hidrogeoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en la zona sur-centro del estado de Aguascalientes, México*, tesis de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

Ortega-Guerrero, A., D. L. Rudolph and J. A. Cherry (1999), "Analysis of long-term subsidence near Mexico City: field investigations and predictive modelling", *Water Resources Research*, v. 15, no. 11, pp. 3327-3341.

Paz-Becerril, J. A. (1991), "Efecto del tiradero de basura de Santa Fe Catarina en pozos de agua potable". *1er. Congreso Nacional de Residuos sólidos y peligrosos: ¿recurso o desperdicio?*, Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos, pp. 1-27.

Perry, E., J. Swift, J. Gamboa, A. Reeve, R. Sanborn, L. Marin and M. Villasuso (1989), "Geologic and environmental aspects of surface cementation, north coast, Yucatán, Mexico", *Geology*, v. 17, pp. 818-821.

Perry, E. C., L.E. Marin, J. McClain and G. Velázquez-Olimán (1995), "The Ring of Cenotes (sinkholes) northwest Yucatan, Mexico: its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub Impact Crater", *Geology*, v. 23, pp. 17-20.

Poland, J. F. (1984), Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal. UNESCO, PHI Working group 8.4.

Salama, R. B., G. A. Bartle and P. Farrington (1994), "Water use of plantation *Eucalyptus camaldulensis* estimated by groundwater hydrograph separation Techniques and heat pulse method", *Journal of Hydrology*, v. 156, pp. 163-180.

Sánchez, V. A. (1996), *Determinación de las características hidráulicas de las unidades litoestratigráficas del subsuelo de la ciudad de Aguascalientes*, tesis de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

SARH (1987), *Sipnopsis geohidrológica del estado de Aguascalientes*, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México.

SEDESOL-INE (1994), *Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección del ambiente*, Secretaría de Desarrollo Social, Instituto Nacional de Ecología, México.

Tamayo, J. L. (1962), *Geografía General de México. Geografía Física*, tomo II, Instituto Mexicano de Investigaciones Económicas, México, pp. 249-354.

Tamez, G. E., V. E. Santillo y R. A. Cuevas (1992), "Enfrentando el hundimiento de la Catedral, parte 1ª", *Revista Ingeniería Civil*, Colegio de Ingenieros de México, núm. 284, pp. 24-35.

Tóth, J. (1962), "A theory of groundwater motion in a small drainage basin in central Alberta, Canada", *Journal of Geophysical Research*, v. 67, no. 11, pp. 4375-4387.

Tóth J. (2000), "Las aguas subterráneas como agente geológico: causas procesos y manifestaciones", *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Tecnológico GeoMinero de España, julio-agosto, v. 111, núm. 4, pp. 9-26.

Van Lanen, H. A. J. and J. J. Carrillo-Rivera (1998), Framework for groundwater monitoring in (semi) arid regions. Chapter 2, UNESCO volume, Paris, in Monitoring for groundwater management in (semi-) arid regions, *Studies and Reports in Hydrology*, v. 57, pp. 7-20.

OBRAS PUBLICADAS DENTRO DE LA COLECCIÓN

I. Textos Monográficos

1. Historia y Geografía

   1. *Europa y el urbanismo neoclásico en la Ciudad de México. Antecedentes y esplendores*
      Federico Fernández Christlieb

   2. *México a través de los mapas*
      Héctor Mendoza Vargas (coord.)

   3. *La Geografía, arma científica para la defensa del territorio*
      Luz Ma. O. Tamayo P. de Ham

   4. *Cartografía de las divisiones territoriales de México, 1519-2000*
      Áurea Commons

   5. *La enseñanza de la Geografía en los proyectos educativos del siglo XIX en México*
      Patricia Gómez Rey

   6. *El nacimiento de una disciplina: la Geografía en México siglo XVI a XIX*
      José Omar Moncada Maya

   7. *La Geografía de la Ilustración*
      José Omar Moncada Maya (coord.)

   8 *Trazos, usos y arquitectura. La estructura de las ciudades mexicanas en el siglo XIX*
      Eulalia Ribera Carbó (coord.)

2. Naturaleza

   1. *¿Geografía sin Geología?*
      Zoltan de Cserna, Magdalena Alcayde Orraca y Esteban Monroy Soto

   2. *Las regiones climáticas de México*
      Rosalía Vidal Zepeda

3. Sociedad

   1. *Aspectos sociales de la población en México: educación y cultura*
      Susana Padilla y Sotelo

   2. *Aspectos sociales de la población en México: vivienda*
      Susana Padilla y Sotelo

   3. *La población hablante de lenguas indígenas en México*
      María Inés Ortiz Ávarez

4. Urbanización

   1. *El clima de la Ciudad de México*
      Ernesto Jáuregui Ostos

   2. *Geohistoria de la Ciudad de México (siglos XIV a XIX)*
      María Teresa Gutiérrez de MacGregor y Jorge González Sánchez

5. Economía

   1. *La ganadería en México*
      Gregorio Villegas Durán, Arturo Bolaños Medina y Leonardo Olguín Prado

   2. *La minería en México*
      Atlántida Coll-Hurtado, María Teresa Sánchez-Salazar y Josefina Morales

   3. *Plantas de importancia económica en las zonas áridas y semiáridas de México*
      Marta Concepción Cervantes Ramírez

   4. *La agricultura en México: un atlas en blanco y negro*
      Atlántida Coll-Hurtado y María de Lourdes Godínez Calderón

   5. *México. Tendencias recientes en la geografía industrial*
      Josefina Morales

6. Medio Ambiente

   1. *Los ciclones tropicales de México*
      María Engracia Hernández Cerda (coord.)

   2. *Áreas Naturales Protegidas de México en el siglo XX*
      Carlos Melo Gallegos

7. Relaciones Internacionales

   1. *Las relaciones diplomáticas de México*
      Mercedes Pereña-García

8. La cuenca de México

   1. *La cuenca de México y sus cambios demográfico-espaciales*
      María Teresa Gutiérrez de MacMgregor,
      Jorge González Sánchez y José Juan Zamorano Orozco

9. Las costas y los mares de México

   1. *Características físico-químicas de los mares de México*
      Guadalupe de la Lanza Espino

II. Textos de Carácter General

1. *México: una visión geográfica*
   Atlántida Coll-Hurtado

2. *México: una visión geográfica (2° ed.)*
   Atlántida Coll-Hurtado

III. Métodos y Técnicas

1. *Los mares mexicanos a través de la percepción remota*
   Raúl Aguirre Gómez

2. *El paisaje en el ámbito de la Geografía*
   Arturo García Romero y Julio Muñoz Jiménez

3. *Teorías y métodos en Geografía Económica*
   Enrique Propin Frejomil

4. *Metodos y técnicas de la Cartografía Temática*
   María del Consuelo Gómez Escobar

EL RECURSO AGUA EN MÉXICO:
Un análisis geográfico

Se terminó de imprimir en el mes
de agosto del 2005, en los talleres de
Punto Gráfico, M. Gutiérrez Nájera 135-2
Col. Obrera. Tiraje de 500 ejemplares.

El recurso agua en México: un análisis geográfico, es un libro dirigido al lector interesado en conocer los aspectos básicos del cómo y del por qué de la distribución del agua, tanto superficial como subterránea, en el territorio mexicano, tomando en cuenta la red hidrográfica, las regiones hidrogeológicas, la red hidrométrica y la población.

Asimismo, con base en el resultado de la interrelación de los factores determinantes del comportamiento hidrológico expuestos en el libro y en la distribución de la población por regiones hidrológicas, se hacen algunas consideraciones sobre la disposición y disponibilidad del recurso agua en el país.

ISBN 970-32-2822-4