

# PROVINCIAS HIDROGEOLÓGICAS DE MÉXICO

*Luis Velázquez Aguirre y Anselmo Ordaz Ayala*

## RESUMEN

En este artículo se enumeran y describen las características fisiográficas, climatológicas e hidráulicas de las once provincias hidrogeológicas en las que se ha dividido la república mexicana. A continuación se presenta el funcionamiento hidrogeológico de cada una.

**Península de Baja California.** Acuíferos libres costeros, constituidos por sedimentos granulares que se recargan a través del río Colorado y las sierras localizadas en la parte central de la península.

**Planicies costeras del Pacífico.** Acuíferos costeros asociados con sedimentos deltaicos que reciben la recarga de las aguas provenientes de la Sierra Madre Occidental.

**Sierra Madre Occidental.** Es un sistema que funciona principalmente como área de recarga a las provincias adyacentes.

**Cuencas aluviales del norte.** Son extensos valles que constituyen los principales acuíferos, separados por bloques montañosos, que funcionan como zonas de recarga.

**Sierra Madre Oriental.** Constituye acuíferos libres y confinados en rocas calcáreas plegadas, cuyas zonas de recarga se localizan principalmente en los anticlinales.

**Meseta central.** Es una cuenca cerrada y semiárida; los principales acuíferos los constituyen sedimentos granulares que son recargados por las rocas riolíticas o calizas que los subyacen. En la zona ixtlera las aguas almacenadas en los sedimentos granulares son de mala calidad.

**Planicie costera del Golfo de México.** Sedimentos consolidados y no consolidados, que conforman el acuífero principal, mismo que recibe la recarga de la Sierra Madre Oriental. Hacia la porción norte los acuíferos proporcionan agua de mala calidad, mejorando hacia el sur y sureste.

**Faja volcánica transmexicana.** Constituida principalmente por rocas volcánicas, con arcillas, arenas y gravas, intercaladas con basaltos, permeables. Conforman los principales acuíferos de la provincia.

**Sierra Madre del Sur.** Compuesta en la base por rocas metamórficas y graníticas impermeables que subyacen a calizas cretácicas, volcánicas y sedimentos granulares permeables que en conjunto forman los acuíferos de esta provincia.

**Sierras y valles del sureste.** Es una provincia con abundantes lluvias; constituida por acuíferos costeros al suroeste y acuíferos calcáreos libres y semiconfinados al noreste. Las áreas de recarga son la sierra de Chiapas y las sierras plegadas del centro y noreste.

**Península de Yucatán.** Conformada por calizas terciarias permeables que, por su alta capacidad de infiltración, no forman corrientes superficiales. Constituyen un acuífero de alto redimiento, cuyas recargas las recibe directamente de las lluvias y su explotación está limitada por su calidad.

## ANTECEDENTES

La división de la república mexicana en provincias hidrogeológicas (véase Fig. 1) es la respuesta a la necesidad de identificar regionalmente a ciertas áreas que se singularizan por su fisiografía y homogeneidad geológico-estructural, así como por ciertas características hidráulicas como la porosidad, permeabilidad y transmisividad de las rocas.

En esta delimitación de provincias hidrogeológicas se tomaron como base la división de las regiones hidrológicas de la SARH, las provincias fisiográficas y geológicas, así como la de los terrenos tectonoestratigráficos del país. Además, se consideró como parte fundamental el comportamiento del agua subterránea en cada una.

Se destaca que gran parte de la información de algunas

de las provincias hidrogeológicas de nuestro país, que se presentan en este trabajo, se tomó de la publicación *Hidrogeology*, que fue realizada con la colaboración de técnicos mexicanos para la Sociedad Geológica de América en 1988, con motivo del primer centenario de la citada sociedad.

Al considerar los diferentes factores a los que se hizo mención, el país se dividió en 11 provincias hidrogeológicas, resaltando de cada una su distribución y extensión, así como sus condiciones climáticas e hidrogeológicas (véase Tabla 1).

Con el propósito de tener un panorama general sobre el comportamiento de las rocas con respecto al agua subterránea en las diferentes regiones, se presenta esta primera versión.



Figura 1. Provincias hidrogeológicas de México.

## PROVINCIAS HIDROGEOLOGICAS

### Península de Baja California

**Localización.** La Península de Baja California (véase Fig. 2) comprende una superficie de 143,492 km<sup>2</sup> y en ella quedan incluidos en su totalidad los estados de Baja California y Baja California Sur; su característica es estar constituida por montañas de forma irregular, con una orientación general noroeste-sureste, y tiene a sus alrededores cuencas rellenas con materiales sedimentarios. La elevación de la península varía desde el nivel del mar, en el océano Pacífico y el golfo de California, hasta 2000 m, en la parte más alta de las montañas.

**Clima.** La temperatura media anual fluctúa de 16°C en la zona costera a 21°C en el desierto; tiene una variación de 38°C en verano y un clima tipo mediterráneo en el área costera; la precipitación ocurre principalmente en el invierno, varía de 50 mm/año en el desierto, entre 100 y 300 mm/año a lo largo de la costa, hasta 450 mm/año en las zonas montañosas.

**Hidrogeología.** Las áreas montañosas, por su alta elevación y precipitación, son las principales zonas de recarga y donde se inician las corrientes superficiales más

importantes que llegan hasta las cuencas aluviales más bajas. Las rocas consolidadas, que forman parte de las montañas, constituyen acuíferos con transmisividades menores a 185 m<sup>2</sup>/día y conductividades hidráulicas menores de 3 m/día; las características hidráulicas son generalmente el resultado de la permeabilidad por fracturamiento y, cerca de la superficie, por intemperismo de las rocas.

Las arenas y gravas aluviales, y la Formación Salada del Pleistoceno reciente constituida por areniscas arcillosas, arenas, limos y arcillas de tipo marino, aluvial, eólico y deltaico, representan los principales acuíferos en explotación.

En la Península de Baja California las cuencas aluviales del Pleistoceno reciente son pequeñas; el relleno sedimentario, a excepción del valle de Mexicali, en general es menor de 100 m de espesor y tiene una anchura promedio de 5 km. Son de forma irregular y los cauces de las corrientes se interdigitan y extienden de 8 a 15 km tierra adentro desde la costa. Debajo de los sedimentos aluvio-fluviales depositados en los arroyos existen rocas sedimentarias del Plioceno y Pleistoceno, que consisten en areniscas y lutitas intercaladas con conglomerados y estratos de arena y arcilla; estos sedimentos producen menos agua que el aluvión y la

Tabla 1. Descripción y resumen de características hidráulicas.

REGIÓN	SITUACIÓN HIDROGEOLÓGICA	RANGOS DE VARIACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LOS ACUÍFEROS DOMINANTES			
		T	K	R	Q
		m <sup>2</sup> /d	m/d	mm/año	l/s
1. Península de Baja California	Valles relativamente planos que tienen como base gruesos depósitos de aluvión separados por montañas alineadas, compuestas por rocas sedimentarias y metamórficas de edad mesozoica y rocas volcánicas del cenozoico.	10-200	1-100	5-50	10-150
2. Planicie costera del Pacífico	Planicies costeras que en algunas áreas se internan al continente varias decenas de kilómetros, compuestas por sedimentos arenosos hacia el interior; su base la forman rocas intrusivas y metamórficas del mesozoico y volcánicas del cenozoico.	10-100	5-100	5-50	5-150
3. Sierra Madre Occidental	Una región disectada relativamente alta, compuesta por una compleja secuencia de rocas volcánicas del cenozoico, cubiertas en algunos lugares por delgados depósitos de suelos residuales.	100-10,000	10-500	10-100	5-50
4. Cuencas aluviales del norte	Valles relativamente planos que tienen como base gruesos depósitos aluviales, separados por alargadas y discontinuadas cadenas de montañas compuestas, en parte, de rocas sedimentarias paleozoicas y mesozoicas, y en parte de rocas volcánicas del cenozoico.	10-2,000	10-200	5-50	10-150
5. Sierra Madre Oriental	Área relativamente alta de cadenas de montañas anticlinales y valles sinclinales, compuestos por rocas sedimentarias del mesozoico, cubiertas por delgadas capas de suelos residuales.	10-1,000	1-50	5-50	10-200
6. Meseta central	Valles relativamente planos que tienen como base gruesos depósitos aluviales separados por suaves cadenas de montañas, compuestas por rocas sedimentarias del paleozoico y mesozoico, y por rocas volcánicas del cenozoico	10-2,000	10-200	5-50	10-100
7. Planicie costera del Golfo de México	Planicie relativamente baja, poco disectada, que descansa sobre una interestratificación compleja de arenas, limos y arcillas del mesozoico y cenozoico, que progresivamente se hacen más densos hacia la costa.	500-10,000	5-100	5-500	10-100
8. Faja volcánica transmexicana	Un área de montañas altas compuesta por una secuencia compleja de rocas volcánicas del cenozoico, con fosas profundas rellenadas con material lacustre del terciario y cuaternario.	100-10,000	10-500	10-100	10-150
9. Sierra Madre del Sur	Áreas montañosas altamente disectadas compuestas por rocas metamórficas y paleozoicas, rocas sedimentarias del mesozoico y rocas volcánicas del mesozoico y cenozoico, cubiertas en las altiplanicies por suelos residuales y en las costas por material granular.	5-5,000	1-200	10-100	1-100
10. Sierras y valles del sureste	Área relativamente alta de cadenas de montañas anticlinales y valles sinclinales, compuestos por rocas sedimentarias del mesozoico, cubiertas por delgadas capas de suelos residuales.	10-1,000	1-50	5-5	10-200
11. Península de Yucatán	Una extensa planicie baja constituida por rocas carbonatadas consolidadas a semiconsolidadas del cenozoico.	10-2,000	10-200	5-100	10-100

T = transmisividad; K = conductividad hidráulica; R = lámina de recarga; Q = prod. por pozo

\* Datos tomados y adecuados de la Tabla 2. Hydrogeologic situation and common ranges of selected hydraulic characteristics of the ground-water regions of North America. The geology of North America, Vol. 0-2. Hydrogeology, GSA., 1988.

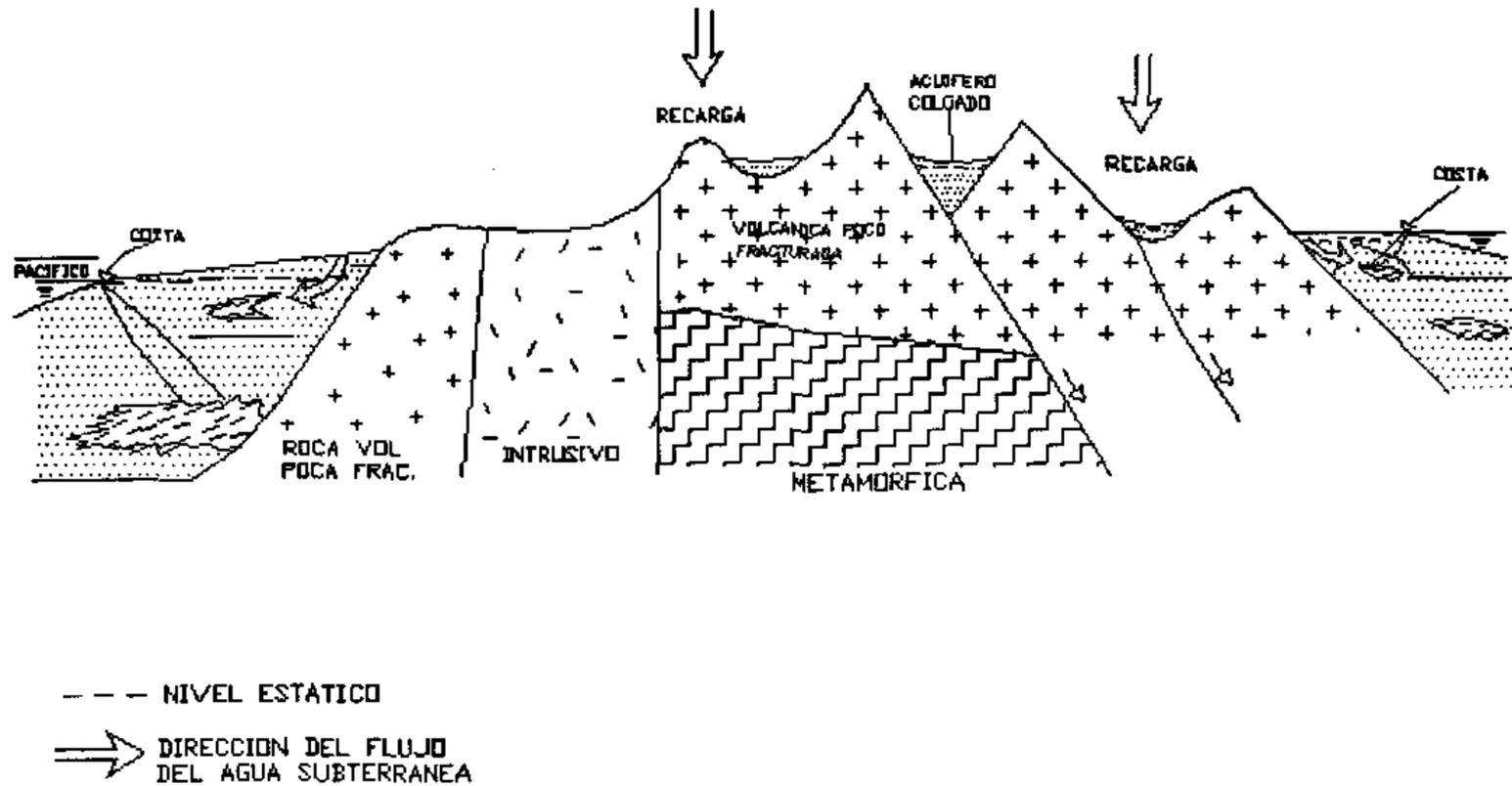


Figura 2. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia de Baja California.

Fm. Salada, cubren una mayor área y tienen como máximo un espesor de 600 m.

La mayoría del área de tierra adentro consta de montañas formadas principalmente por rocas ígneas y metamórficas pre-cenozoicas; el tipo de roca dominante es granito, el cual produce agua básicamente de un sistema de fracturas que llegan como máximo hasta 100 m de profundidad. Los granitos remanentes se intemperizan con facilidad y su desintegración forma acuíferos para pozos someros (máximo 30 m de profundidad).

El nivel estático regional, la ocurrencia y el movimiento del agua subterránea del acuífero son en gran parte controlados por la topografía de la península.

La cordillera peninsular se extiende desde Tijuana-Mexicali hasta Los Cabos, con aproximadamente 1,700 km de largo y de 50 a 100 km de ancho. Las cordilleras montañosas al norte son largos batolitos graníticos que en los flancos tienen rocas metamórficas y sedimentarias del Mesozoico y, al sur, predominan rocas sedimentarias y volcánicas del Cenozoico.

La península, en lo general, es un gran bloque de falla que se está separando de la parte continental de México. Sus acuíferos, a excepción del de Mexicali, son de bajo potencial debido a la falta de infiltración, al resultado de precipitaciones dispersas en pequeñas áreas de captación y a la baja permeabilidad de las rocas.

#### Planicies costeras del Pacífico

**Localización.** Esta provincia hidrogeológica (véase Fig. 3) abarca una superficie aproximada de 104,491 km<sup>2</sup> y comprende la porción occidental de los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit; limita al norte con el valle de Yuma en los Estados Unidos, al oriente con la Sierra Madre Occidental, y al sur y poniente con el océano Pacífico. La elevación de toda esta provincia varía desde el nivel del mar hasta los 200 m.

**Clima.** Las condiciones climáticas varían de desérticas a semidesérticas; la temperatura media anual cambia de 16°C en la zona costera a 21°C en el desierto, y alcanza los 38°C en el verano. La precipitación ocurre principalmente en el invierno, va de 50 mm/año en el desierto hasta 380 mm/año a lo largo de la costa, y se incrementa hacia los flancos de la Sierra Madre Occidental.

**Hidrogeología.** Las rocas que predominan son sedimentarias, metamórficas e ígneas; estas últimas ocupan una gran área y suprayacen a antiguas superficies de erosión de rocas sedimentarias y plutónicas; en general, éstas son bordeadas por los sedimentos aluviales que, junto a los derrames volcánicos del Cenozoico, constituyen los mejores acuíferos.

Los principales acuíferos están asociados a deltas cercanos a las costas; al oriente, hacia las partes altas, se encuentran en los abanicos aluviales formados por mate-

riales gruesos provenientes de las montañas; son de poco espesor y niveles profundos.

Los espesores más potentes de la planicie costera se encuentran en sedimentos continentales y marinos intercalados por derrames basálticos. La Formación Baucari, constituida por conglomerados, subyace a los mejores acuíferos en depósitos aluviales; esta formación, de origen sedimentario continental, presenta una permeabilidad de media a baja, ya que en ella prevalece el contenido de arcillas compactas.

Al oriente de la meseta arenosa de San Luis Río Colorado, hacia el flanco oriental de la sierra del Rosario, el acuífero está constituido por los sedimentos clásicos semi-consolidados, que rellenan las depresiones formadas por las rocas pre-terciarias y cuya recarga subterránea proviene del lado norteamericano. El inconveniente de esta región es que el nivel estático del acuífero es profundo, por arriba de los 100 m.

En el resto de los acuíferos que se localizan desde San Luis Río Colorado y Caborca, en Sonora, hasta el valle de Bahía de Banderas, en Nayarit, la gran mayoría está constituida por sedimentos arenosos aluviales con buena porosidad y permeabilidad.

Sierra Madre Occidental

Localización. Cubre aproximadamente 358,845 km<sup>2</sup>. Esta cadena tiene 1,500 km de longitud y es esencialmente

paralela a la costa occidental de México. Se extiende desde el límite internacional, cerca de la población de Agua Prieta, en dirección sureste, hasta la región del cinturón volcánico, en el paralelo 20° de latitud norte. El ancho de la sierra es en promedio de 220 km (véase Fig. 4).

Clima. Las condiciones climatológicas de esta zona varían desde húmedo templado, con lluvias todo el año en las partes altas de la sierra, a un clima de estepa seco al este, y en las partes bajas, al lado oeste, es caluroso y húmedo con lluvias en el verano.

La precipitación en la Sierra Madre Occidental es principalmente de tipo orogénico; hacia la parte sur y cerca del Pacífico la lluvia es mayor que 1,600 mm/año; en la parte central el promedio de la lluvia es ligeramente menor, y en la porción oriental la precipitación decrece hasta 600 mm. La precipitación máxima se da de junio a septiembre; la mínima, de marzo a mayo. La temperatura media anual varía desde 12°C en el área alta a 22°C en las áreas bajas de la vertiente del océano Pacífico; en la región de la Meseta central la temperatura media es de 16°C; la evaporación potencial excede a los 2,000 mm por año.

Hidrogeología. Los ríos que descargan en el Pacífico son virtualmente perennes y los cauces en la parte baja son de gran longitud; por ejemplo, los ríos Yaqui y Culiacán tienen 680 y 340 km, respectivamente. Los principales ríos que fluyen hacia las cuencas aluviales del norte y Mesa central son intermitentes, como el Conchos y el Nazas, con longitudes de 480 y 400 km. Las grandes cantidades de

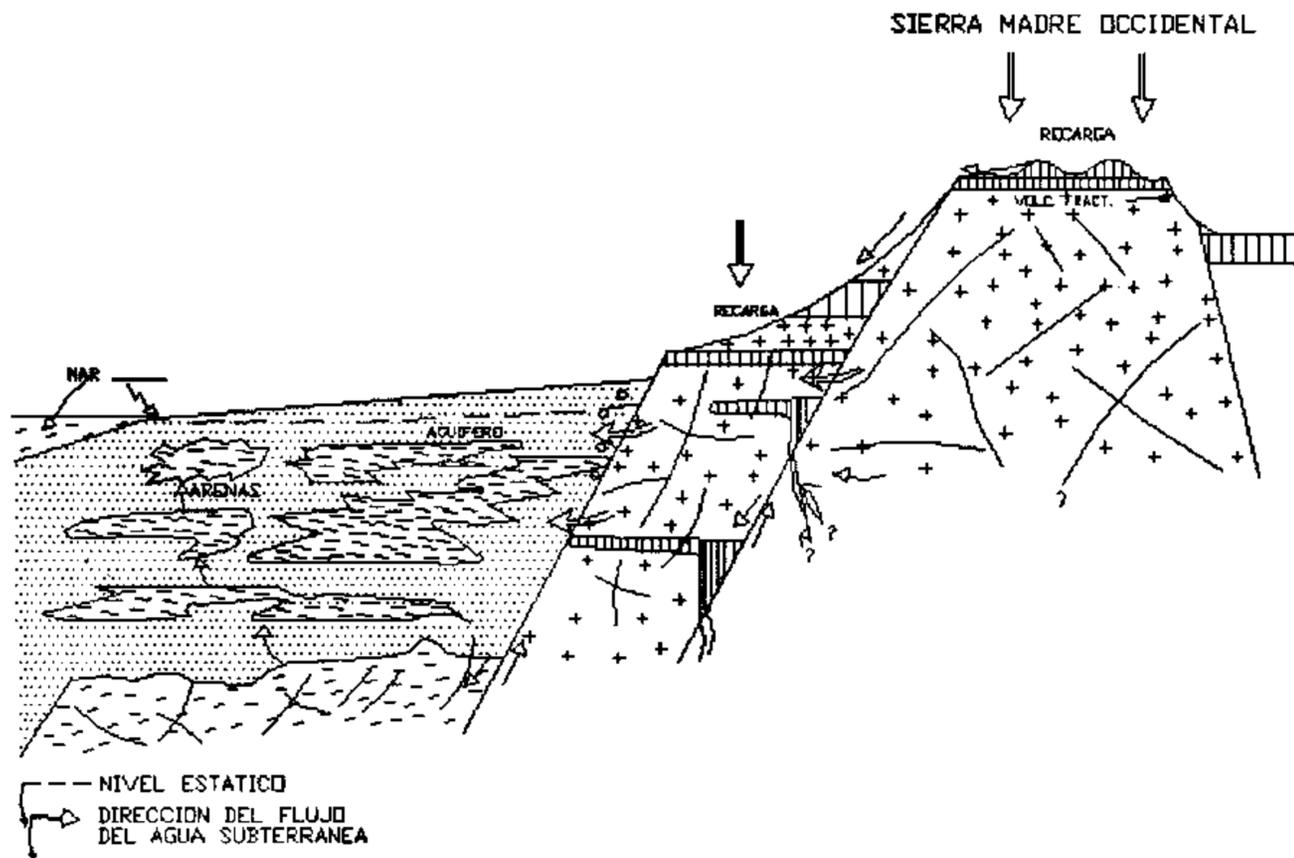


Figura 3. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Planicie Costera del Pacífico.

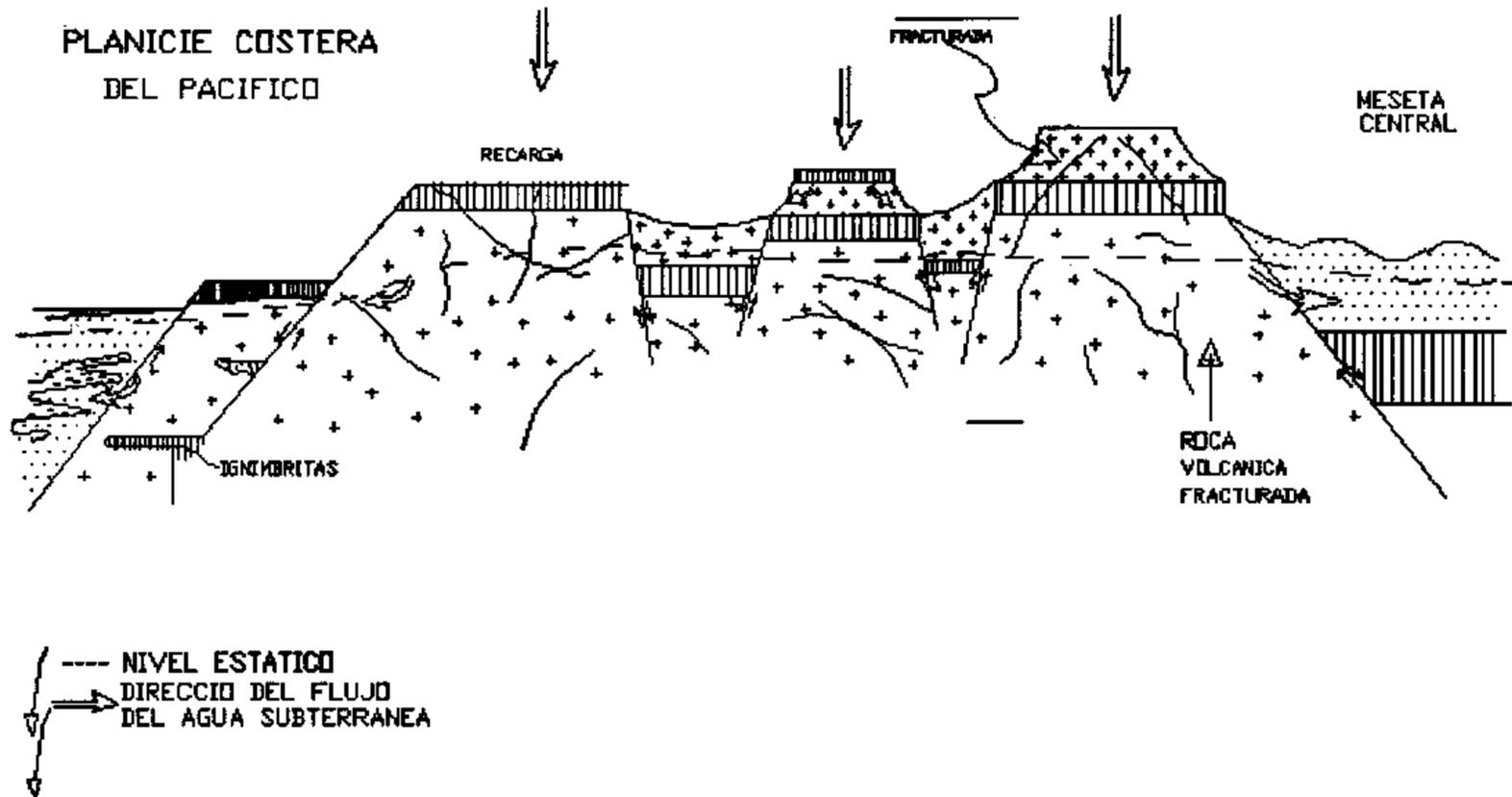


Figura 4. Sección hidrogeológica de la provincia Sierra Madre Occidental.

aguas superficial y subterránea que drenan al Pacífico son resultado de las copiosas lluvias que caen sobre las rocas con un amplio rango de permeabilidad.

Hacia el oriente, donde se encuentra el altiplano central o áreas de mesetas altas, se encuentran flujos de lava, asociados con piroclásticos y conglomerados; allí la infiltración es pequeña debido a lo compacto de estos materiales y a lo abrupto de la topografía que favorece más bien una gran disección fluvial.

El flujo de las corrientes aumenta por el flujo base de las rocas de baja permeabilidad que afloran a lo largo del cauce. Los principales ríos son el Yaqui, con un flujo promedio anual de  $2,700 \text{ mm}^3/\text{año}$ ; el Culiacán, con  $3,500 \text{ mm}^3/\text{año}$ ; el Nazas, con  $1,100 \text{ mm}^3/\text{año}$ , y el Conchos, con  $5,100 \text{ mm}^3/\text{año}$ . La alta precipitación y los numerosos embalses son una contribución directa para los sistemas de agua subterránea. La recarga afecta a manantiales que están a decenas de kilómetros de los embalses.

Hacia la porción occidental esta provincia se encuentra constituida por densos bloques de lava inclinados, con grandes fallas, que dan idea de los fuertes eventos tectónicos a que estuvieron sometidas estas rocas de carácter riolítico, fuertemente compactas y con poca infiltración. Estas rocas de baja permeabilidad constituyen el acuitardo. Su ancho y gran espesor, así como la relativa posición topográfica horizontal que tienen, hacen que la explotación del agua del subsuelo sea en pequeña escala y sólo se use para el suministro de pequeños poblados.

En general, el carácter hidrogeológico de esta provincia es tal, que la gran cantidad de agua captada en las cadenas montañosas se descarga local y regionalmente para escurrir a lo largo de las principales corrientes superficiales, salir de éstas, infiltrarse y recargar los grandes acuíferos de las provincias adyacentes.

#### Cuencas aluviales del norte

**Localización.** Las cuencas aluviales del norte de México abarcan una superficie aproximada de  $205,000 \text{ km}^2$ . La forma del terreno del área es característica de una fisiografía de cuencas con extensas planicies aluviales. Las estructuras que se presentan manifestando el hundimiento vertiginoso de las rocas preexistentes se efectúan durante el Terciario medio y superior; la tendencia de las montañas es en general norte-noroeste y dividen el área en varias cuencas; el término cuenca se refiere al graben rellenado por sedimentos situados entre montañas, las cuales pueden tener drenaje endorreico y exorreico (véase Fig. 5).

**Clima.** El clima en esta región varía de árido a semiárido y la temperatura media anual oscila entre  $14^\circ\text{C}$  y  $18^\circ\text{C}$  en toda la provincia. La precipitación está relacionada con la altitud de la superficie del terreno y en esta área la media anual cambia de 400 a 800 mm. Las lluvias son sumamente raras y son absorbidas rápidamente por un suelo sediento, por lo que dichas aguas nunca llegan a verter al mar ni se

juntan en cantidades grandes en el interior de los bolsones; por esta circunstancia en dicha provincia no existen verdaderas corrientes.

**Hidrogeología.** La región de las cuencas aluviales del norte incluye rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, que pueden dividirse en dos amplios grupos de edades correspondientes al pre-Cenozoico y al Cenozoico. Las rocas de ambos grupos difieren en estructura, tipo y características del acuífero; en general, las pre-cenozoicas forman las montañas que bordean las cuencas aluviales.

Las montañas están constituidas por granito de edad pre-cámbrica, esquistos, gneiss, filitas, pizarras y cuarcitas (del pre-Cámbrico al Terciario inferior); rocas sedimentarias carbonatadas, areniscas, limonitas y lutitas del Paleozoico al Mesozoico, y diversos tipos de rocas ígneas intrusivas y extrusivas del Cretácico superior. Aunque éstas no forman parte significativa del acuífero, proporcionan la fuente de los materiales que rellenan las cuencas. También sus características litológicas y estructurales influyen en las salidas de agua y en la infiltración, de allí que el agua circule y abastezca a las cuencas.

Las rocas del Cenozoico que rellenan las cuencas consisten en depósitos clásticos consolidados y no consolidados, interdigitados con rocas volcánicas. Los sedimentos fueron depositados durante y desde la formación de las cordilleras y cuencas propiciadas por fallas. Los depósitos de cuencas más viejos son del Terciario inferior al medio y pueden tener varios miles de metros de espesor en

algunos lugares. Las extensas áreas de dichos depósitos son poco conocidas. Intercalados con éstos se encuentran amplios depósitos de rocas volcánicas del Terciario medio; los sedimentos fueron depositados en cuencas cerradas con orientación norte-noroeste, creadas por la tectónica extensiva.

Los abanicos aluviales en la base de las montañas se unen para formar extensos depósitos de pie de monte y los tipo playa ocurren cerca del centro, en la zona más baja de la cuenca; este tipo de medio natural de depósitos produce dos facies generales de cuenca: grano fino y bien seleccionado cerca del centro de ésta, y grano grueso y pobremente seleccionado cerca del frente de la montaña. Las facies de grano fino, en general, se localizan hacia el interior de la cuenca limitada por las fallas; en las cuencas cerradas las evaporitas se asocian íntimamente con las facies de sedimentos finos. La evaporita más común es el yeso, el cual está diseminado dentro de los depósitos finos o en estratos delgados. La anhidrita masiva y los depósitos de halita están presentes en algunas cuencas profundas y pueden tener cientos de metros de espesor. La facie de grano grueso es altamente heterogénea y los sedimentos varían desde limos y arcillas a guijaros y cantos rodados.

Las extensas áreas de los depósitos de cuenca fueron alteradas como resultado de un cambio en los esfuerzos tensionales de tipo regional que se produjeron durante el Mioceno medio y superior; el fallamiento normal profun-

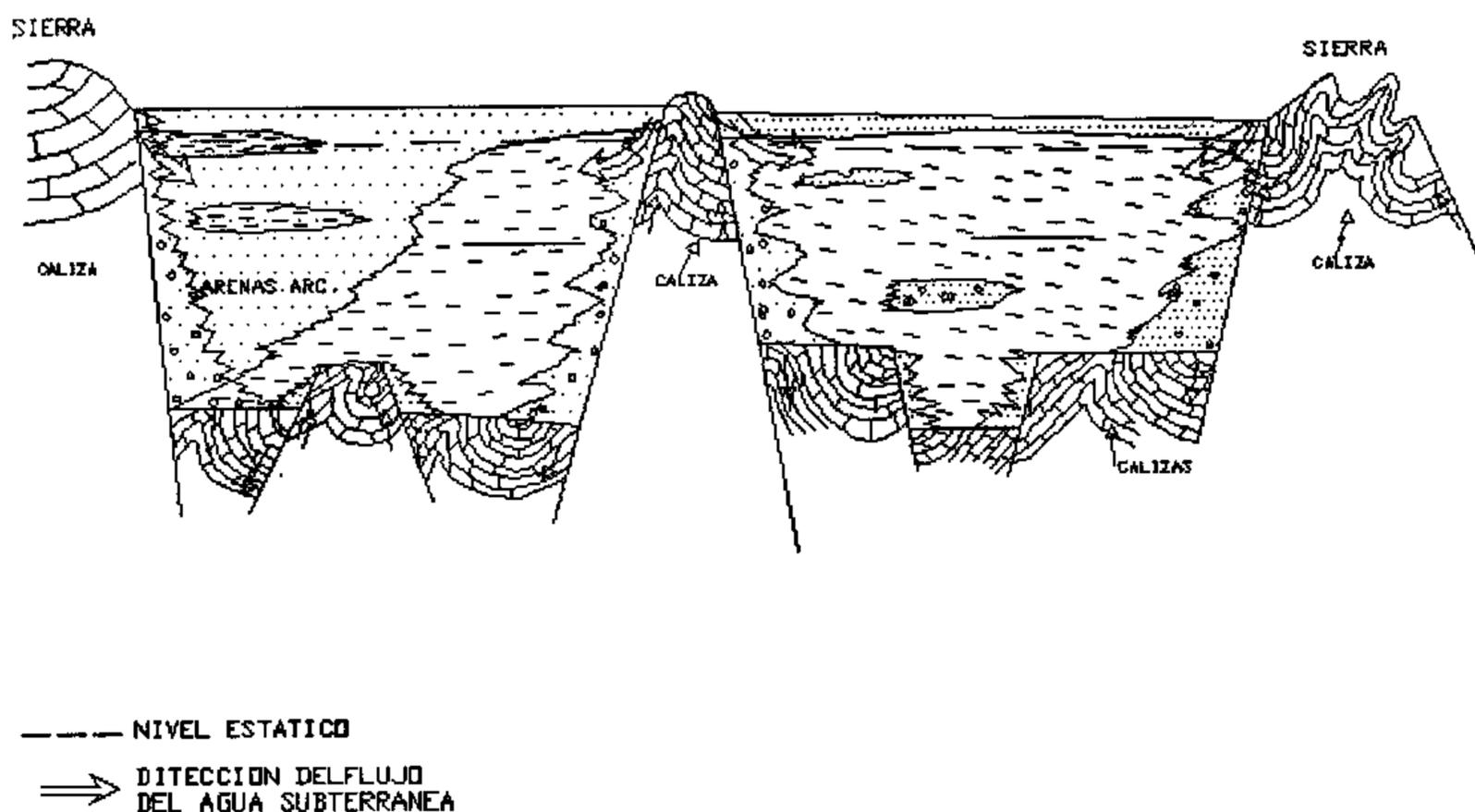


Figura 5. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Cuencas Aluviales del Norte.

do progresó de oeste a este durante ese periodo y fue acompañado por vulcanismo basáltico. Este periodo de formación de fallas dio lugar a la actual distribución de cordilleras y cuencas. Las cuencas del norte de México poseen su desagüe superficial cerrado; la mayoría de ellas también tiene un sistema de agua subterránea cerrado. Los depósitos del centro de las cuencas en gran parte son lacustres y consisten principalmente en limos, arcillas y evaporitas.

Los mayores acuíferos del área están compuestos de sedimentos de cuenca del Cenozoico, los cuales están contenidos dentro de los grabens, entre los bloques montañosos, y las montañas actúan como límites hidrogeológicos. Los sedimentos en la cuenca, en general, están hidráulicamente interconectados y forman un acuífero simple; localmente, la separación en una o varias unidades confinadas y una unidad superior libre ocurre como resultado de la intervención de unidades de grano fino y, en algunos lugares, por intercalaciones de rocas volcánicas. Los sedimentos de cuenca se estiman en 2,000 m de espesor y en algunos otros lugares puede contener menos de 300 metros.

En general, el marco hidrológico de las cuencas cerradas es de dos tipos, endorreicos o exorreicos, como los de las lagunas de Guzmán y Santa María, en el estado de Chihuahua. Se desconoce el flujo del agua superficial o el de la subterránea al salir de la cuenca. Antes de su desarrollo, el mecanismo de descarga consistía en evaporación y transpiración de la vegetación, lo cual ocurre cerca del centro de la cuenca cerrada, bajo las presentes condiciones de desarrollo, siendo la mayor parte de la descarga a través de pozos.

Algunas de las cuencas que no son cerradas pueden estar hidráulicamente interconectadas y la salida de una puede ser parte de la entrada de otra en la dirección que baja el gradiente; muchas de las cuencas aluviales son abiertas y están incluidas en un sistema regional, en el cual, por lo general, se alinean en la misma dirección del flujo y tienen el sistema de salida del agua superficial. El flujo de la subterránea en cada cuenca es controlado por el volumen y distribución del área de recarga y descarga, y por las propiedades hidráulicas de los materiales del acuífero. La recarga está relacionada con la cantidad de precipitación alrededor de las montañas; dicha recarga se incrementa con la altitud y ocurre principalmente en el área de contacto aluvión-roca, en el frente de la montaña y a lo largo de la superficie de desagüe, cerca del eje central de la cuenca. El flujo subterráneo que entra y sale de las cuencas ocurre en la zona de unión entre ellas, pero casi siempre es pequeño; sin embargo, puede constituir una gran parte del total de la recarga en la mayoría de las

cuencas del norte de Sonora. Bajo las condiciones anteriores al desarrollo, la descarga de las cuencas con sistemas de desagües se da como flujos subterráneos, evapotranspiración y corriente.

La influencia geológica en la hidrología de las cuencas aluviales del norte es importante porque determina la ocurrencia y el movimiento de las aguas subterráneas. Los límites laterales y verticales del sistema acuífero en una cuenca están controlados por los cambios litológicos y de permeabilidad, los cuales se relacionan con la forma de depositación aluvial y con la estructura geológica.

Las rocas precenozoicas y volcánicas cenozoicas generalmente son de baja permeabilidad y dificultan el movimiento del agua subterránea, pero pueden ocurrir en rocas carbonatadas a nivel estructural. El material aluvial que forma el acuífero principal en las cuencas fue erosionado de las montañas adyacentes por las corrientes con fuerte gradiente y depositado como abanicos aluviales. En general, los depósitos en abanicos se van haciendo cada vez más finos hacia el centro de las cuencas; sin embargo, algunos estratos de grano grueso pueden extenderse hasta la parte central, permitiendo que los altos y bajos de la conductividad hidráulica de los materiales tiendan a disminuir con el incremento en las proporciones de material grueso y fino. Los depósitos de pre-cuencas y de las cordilleras están interdigitados con rocas volcánicas y son deformados en el nivel estructural; se presentan de moderada a altamente consolidados y constituyen acuíferos pobres. Las cuencas bajas rellenas cerca de la grieta del río Grande fueron perturbadas por una falla normal, pero no tienen inclinación fuerte y son acuíferos importantes. Cerca de los centros de las cuencas a lo largo del mismo río éstas se rellenaron con material fino y, en consecuencia, no son buenas productoras de agua.

### Sierra Madre Oriental

**Localización.** Esta provincia cubre una superficie de 250,096 km<sup>2</sup> (véase Fig. 6). Se divide en tres subregiones: norte, central y sur, que se han designado, respectivamente, como: sector sierra del Burro, sector Ojinaga-La Paila y sector Sierra Madre Torreón-Monterrey-Tamazunchale.

**Clima.** Las condiciones climáticas de la Sierra Madre Oriental varían con la topografía y la altitud. Predominan dos principales tipos de climas: el templado-semicálido-semiárido, que abarca desde el río Bravo y centro de Coahuila, y continúa por toda la porción occidental de la sierra; aquí la precipitación media anual es de 500 mm y la temperatura de 22°C, que disminuye localmente en algunos sitios altos hasta los 16°C. El otro tipo de clima en la por-

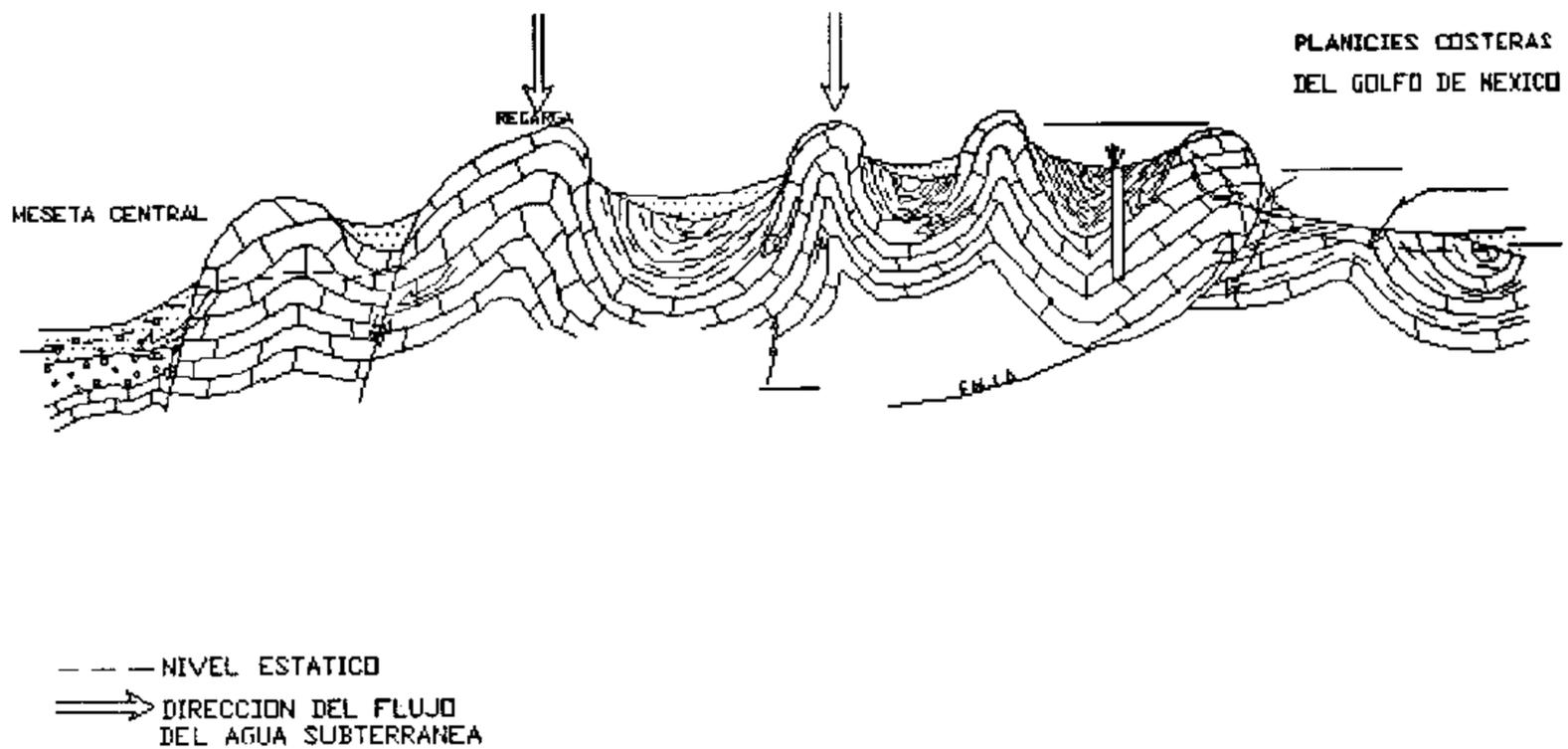


Figura 6. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Sierra Madre Oriental.

ción oriental de la sierra abarca desde el sur de Monterrey hasta el límite con la faja volcánica transmexicana; se caracteriza por variar de tropical húmedo o templado a subhúmedo y de semicálido a húmedo; la precipitación media anual en esta zona varía de 700 mm en la cercanía de Monterrey hasta 2,000 mm en la porción norte del estado de Hidalgo. La temperatura media anual es de 22°C.

**Sector sierra del Burro**

Las rocas del Cretácico inferior y medio que se localizan en esta sierra son altamente solubles, calizas de estratificación mediana con pequeñas cantidades de lutitas. Estas rocas varían lateralmente dentro del arrecife Stuart City, el cual tiene una alta porosidad primaria y algunas fracturas que incrementan la permeabilidad. Las rocas del Cretácico superior contienen más arcilla y tienen una permeabilidad más baja.

El flanco este de la sierra del Burro está cubierto por rellenos aluviales y conglomerados del Terciario y Cuaternario, producidos por la erosión e intemperismo de las regiones topográficamente más altas. Estos depósitos tienen un espesor aproximado de 50 m, son altamente permeables y contienen importantes volúmenes de agua subterránea.

Las diferentes unidades de rocas que existen en la subregión contienen acuíferos confinados. Algunas de las estrechas capas confinantes se rompieron por esfuerzos

tensionales que mejoraron el grado de interconexión hidráulica entre los acuíferos. Éstos son recargados por agua de lluvia que se infiltra en las partes altas de la sierra del Burro y, generalmente, fluye al noreste.

La prolongación sureste de la sierra del Burro, conocida como el Peyote, es un anticlinal con flancos suavemente buzantes. Aquí los afloramientos de la formación Austin están constituidos por rocas calcáreas con pequeñas cantidades de pizarras. En la parte fracturada de esta formación ocurre un acuífero somero de pequeño potencial. El flanco de la sierra del Burro está cubierto por aluvión granular permeable de 30 a 50 m de espesor, el cual es recargado por el acuífero en las calizas.

**Sector Ojinaga-La Paila**

Esta subregión de rocas calcáreas plegadas del Cretácico forma una serie de anticlinales que, a su vez, producen sierras orientadas noroeste-sureste. Éstas emergen en forma aislada dentro de las planicies formadas por el material aluvial. Estos sedimentos de edad cretácica fueron depositados en un mar abierto sobre una plataforma y están constituidos por micrita densa, con poca o nula permeabilidad primaria. Dichos sedimentos no forman acuíferos, excepto en las zonas plegadas que han sido fracturadas, donde la disolución a lo largo de las fracturas resulta del desarrollo de buena permeabilidad.

En esta subregión se localizan dos tipos de acuíferos:

los que ocurren en los rellenos granulares sedimentarios y aquellos que se dan en las calizas.

Los acuíferos en los sedimentos granulares de los valles y cuencas contienen arenas y arcillas de baja permeabilidad, y aguas salinas derivadas de la evaporación de materiales acumulados en las porciones centrales de las cuencas. Los acuíferos en las calizas del Cretácico medio afloran en las sierras y son recargados directamente por la lluvia; esta recarga se mueve hacia la parte baja de los valles. Las perforaciones profundas localizadas en los flancos de las sierras penetraron a los acuíferos a profundidades de 1,000 y 2,000 m. Cerca de los pisos de los valles las fracturas que penetran los acuíferos dan lugar a grandes manantiales, como los de Múzquiz, Monclova y Cuatro Ciénegas, con gastos de 1,000 litros/segundo.

#### **Sector Sierra Madre Torreón-Monterrey-Tamazunchale**

Entre las sierras que se encuentran en las cercanías de Torreón existen valles intermontan y cuencas constituidas por materiales aluviales formadores de acuíferos. La región de la laguna de Torreón es un área de clima árido y una de las principales regiones agrícolas de México. En ella existen alrededor de 3,000 pozos para irrigación que tienen sobreexplotado el acuífero aluvial. Hacia el oeste y sur los acuíferos de las rocas carbonatadas presentan espesores mayores de 1,000 metros.

Las calizas pueden o no contener pequeñas cantidades de lutitas, están dolomitizadas y han estado sujetas a disolución. Este acuífero recarga a los aluviones sobreexplotados de la región lagunera, como se confirmó por los estudios isotópicos.

En la zona de Monterrey, en la parte más grande de la sierra, existen complejos arrecifales que contienen permeabilidad primaria, la cual aumenta por el fracturamiento y forma zonas altamente permeables. Las elevaciones más altas representan las zonas de recarga y en las más bajas se localizan los acuíferos. Los anticlinales que forman los cerros de esta región tienen fuertes pendientes, con flancos inclinados y estratos escarpados que favorecen la porosidad primaria y la secundaria, lo que permite el desarrollo de acuíferos de gran potencial. Sobre los flancos y anticlinales con nariz buzante de estas estructuras el agua se encuentra en una profundidad aproximada de 1,000 m y bajo condiciones artesianas. Este tipo de acuífero es principalmente explotado en la zona de Monterrey-Saltillo, donde la abundante producción satisface las necesidades de Monterrey, la tercera metrópoli más grande del país.

En la parte sur de la Sierra Madre Oriental, en la zona de Tamazunchale, el agua se infiltra en sus por-

ciones altas y es descargada a través de grandes manantiales en la base de las sierras adyacentes a la planicie costera. Los patrones de sedimentación de los carbonatos juegan un papel fundamental en el desarrollo del acuífero; la extensión del complejo arrecifal, el abra-doctor que se formó en las márgenes de la plataforma Valles-San Luis Potosí en el Albiano Cenomaniano, contiene carbonatos con alta permeabilidad. En el área existen numerosas dolinas y huecos donde el agua se infiltra, fluye lateralmente y descarga en forma de manantiales en la base de la sierra. Estos manantiales, como el Coy y Frío, se consideran entre los más grandes del mundo, ya que tienen descargas de 25 m<sup>3</sup>/segundo.

#### **Meseta central**

**Localización.** La Meseta central (véase Fig. 7) se ubica en la parte central del país. Comprende una superficie de aproximadamente 102,519 km<sup>2</sup> e incluye parte de los estados de Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Jalisco, Guanajuato y Querétaro. Limita en sus porciones boreales y orientales con la Sierra Madre Oriental; al sur, con la franja volcánica transmexicana y al poniente con la Sierra Madre Occidental.

**Clima.** La Meseta central es muy uniforme en sus condiciones climáticas debido probablemente a su latitud y su característica morfológica; en la mayor parte de la provincia predomina un clima de templado-semiseco a semiárido, con un microclima (al sur de San Juan de Guadalupe, Durango) semicálido seco o árido. La precipitación media anual varía de 350 mm/año en San Juan de Guadalupe a 600 mm/año en la zona de Sombrerete, Zacatecas; en general, predomina la de 400 mm/año. La temperatura media anual oscila entre 16 y 18°C en toda la provincia.

**Hidrogeología.** La Meseta central abarca parte de varias cuencas hidrológicas, como las cerradas y áridas del norte, donde el agua es un recurso bajo y exiguo; la de Aguanaval; la de Nazas en su parte media; la del Grande de Santiago, con los ríos Juchipila, Verde, San Juan de los Lagos y sus tributarios más orientales; así como los afluentes del Lerma, y las sierras y llanuras del norte de Guanajuato.

En esta provincia hidrogeológica se encuentran rocas metamórficas, sedimentarias, consolidadas y no consolidadas, y rocas ígneas extrusivas e intrusivas. En este conjunto existen algunas que son permeables, poco permeables e impermeables.

Entre las rocas permeables se consideran a los conglomerados y areniscas de la Formación Nazas, las calizas de las formaciones Zuloaga y Cuesta del Cura,

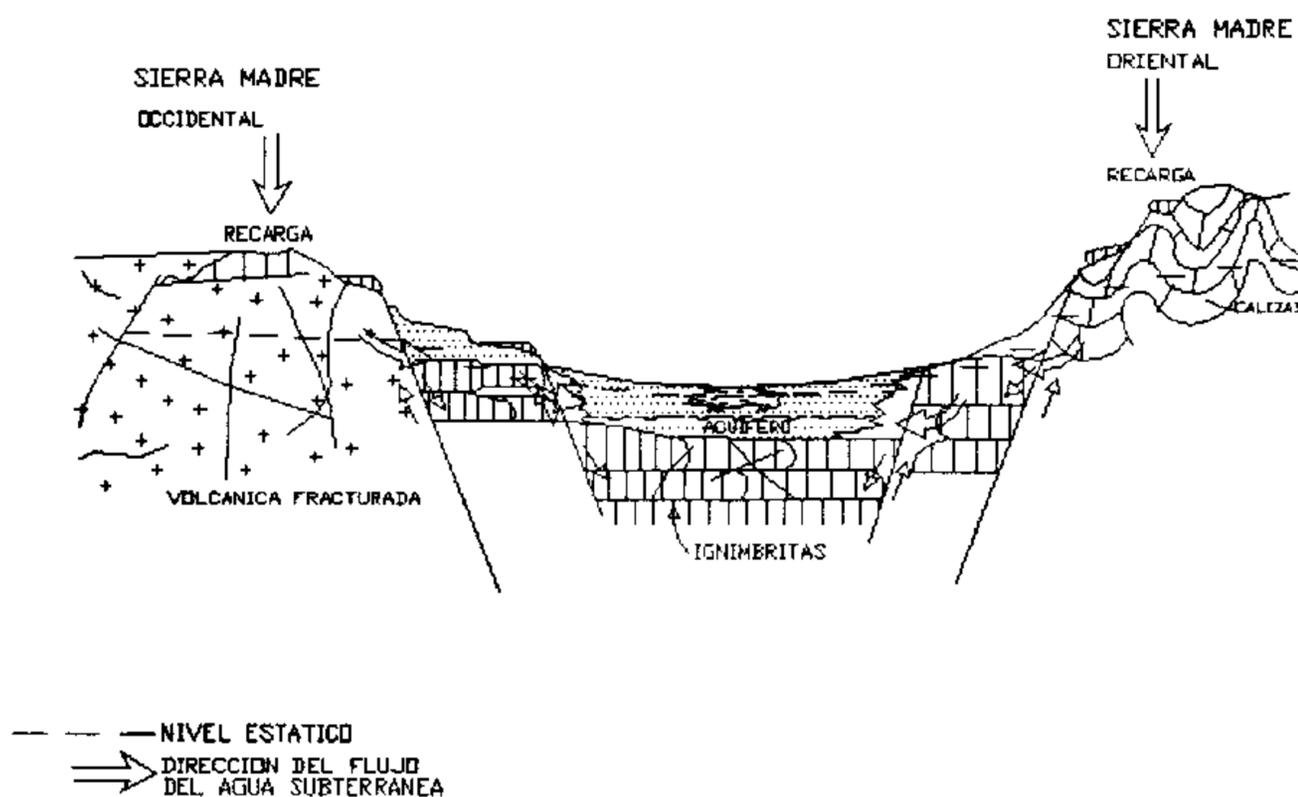


Figura 7. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Meseta Central.

las rocas riolíticas en algunas áreas y los sedimentos granulares que rellenan los extensos valles. De estos materiales, los que constituyen los principales acuíferos de toda la provincia son los sedimentos granulares; aunque en algunas zonas, como la ixtlera, la mayoría de estos acuíferos contiene agua de mala calidad. Entre los acuíferos donde se encuentran estos materiales destacan los de Calera, Vicente Guerrero, La Blanca, Aguascalientes, Ojo Caliente y San Luis Potosí, gran parte de ellos con problemas de sobreexplotación. Las rocas volcánicas riolíticas tienen una permeabilidad anisotrópica, debida posiblemente al fracturamiento en las zonas de falla o a sus características físicas adquiridas durante las etapas de piroconsolidación. Existen varias zonas donde estas rocas constituyen acuíferos, la de Ojo Caliente en Zacatecas, El Llano en Aguascalientes, Villa de Arriaga y Gogorrón en San Luis Potosí, y San Juan del Río en Durango.

Entre las que más destacan están las de Gogorrón y San Juan del Río por haber pozos brotantes con caudales mayores a los 80 l/s. Sin embargo, es conveniente aclarar que en otras áreas como El Llano y Villa de Arriaga los niveles son profundos y los caudales modestos.

Una característica de los acuíferos riolíticos es el termalismo de sus aguas, que en ocasiones alcanzan hasta 42°C. En lo que se refiere a las calizas de la Formación Cuesta del Cura, dado que son rocas depositadas en una cuenca con porosidad primaria casi nula, es muy posible

que ésta se haya incrementado por el fracturamiento como consecuencia del plegamiento y afollamiento sufridos durante la revolución laramíca. Como evidencia de que estas rocas son permeables en algunas áreas se tiene el pozo emplazado en la zona del Calabazal en Sombrerete, Zacatecas, el cual proporciona un caudal de 130 l/s, con una profundidad del nivel dinámico de 60 m. Otro sitio donde se encuentra otro pozo en estas calizas es el poblado de Manuel Ávila Camacho, al sureste de San José de los Morteros, al norte de Zacatecas, el cual resultó brotante con 1 l/s. En Aguascalientes, al poniente de la sierra de Tepezalá, en un lugar denominado Las Pilas, se localizó otro pozo con 72 l/s. En Durango, por la zona de Ramón Corona, se conocen varias grutas, lo que significa que por lo menos en algunos lugares estas rocas están afectadas por la disolución.

Las rocas en las cuencas aluviales incluyen metamórficas, ígneas y sedimentarias del Paleozoico superior al reciente; en general, están bordeadas por los sedimentos aluviales. Las rocas son: esquistos, calizas, areniscas y lutitas del Mesozoico, ígneas intrusivas y extrusivas del Mesozoico y Cenozoico. Aunque no forman parte de los acuíferos de la región, sí funcionan como basamento o barrera al flujo subterráneo; además, son las que han dado origen a los sedimentos granulares que constituyen el sistema acuífero de mayores almacenamientos de agua subterránea en esta provincia.

Los depósitos granulares aluviales van del Terciario

medio hasta el reciente y consisten en clásticos consolidados y no consolidados, intercalados con rocas volcánicas, entre las que predominan las ignimbritas riolíticas. Dichos depósitos granulares tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se produjeron durante la revolución laramídica.

Los depósitos granulares abarcan del Terciario inferior hasta el Cuaternario. Los abanicos aluviales están formados al pie de las montañas de las diversas cuencas cerradas del centro de México, y propician el depósito de sales asociadas con arcillas, limos y arenas. La mayoría de las cuencas está separada y no tiene conexión hidráulica, por lo que el análisis geohidrológico de cada una no resulta tan complejo. Los principales acuíferos de esta provincia hidrogeológica están constituidos por los materiales granulares depositados en cuencas cerradas o abiertas, salvo en casos excepcionales, como el valle de Guadiana en Durango, donde el acuífero se encuentra en rocas volcánicas.

#### Planicies costeras del Golfo de México

**Localización.** La provincia fisiográfica de la planicie costera del golfo (véase Fig. 8) se desarrolla de suavemente ondulada a plana y ocupa una área de 183,313 km<sup>2</sup>, extendiéndose desde el río Bravo hasta la laguna de Términos, cerca del suroeste de la Península de Yucatán.

**Clima.** Esta planicie costera tiene un clima muy variado, por ejemplo, en la parte norte predomina el cálido-semiárido; hacia la porción central, en las cercanías de Tampico, se tiene el tropical lluvioso cálido-subhúmedo, y hacia la costa de Veracruz varía de tropical-cálido-subhúmedo a muy cálido-húmedo. La precipitación media anual oscila entre 500 mm al norte hasta 4,000 mm en las costas de Tabasco y Veracruz. La temperatura media anual es de 22°C al norte y 26°C al sur.

**Hidrogeología.** Las planicies costeras del golfo se encuentran cubiertas por una cuña de rocas sedimentarias consolidadas y no consolidadas del Cenozoico. Estos sedimentos descansan sobre las rocas del Mesozoico y tienen un espesor que varía de pocos metros, cerca de sus límites hacia tierra, a más de 6,000 m en la zona costera. Las rocas cenozoicas consisten en su mayoría en arena, limo y arcilla, derivados de la erosión de las zonas continentales altas. En estos sedimentos se han desarrollado muchos acuíferos regionales. Los sedimentos más antiguos de la planicie costera (cretácicos) en México consisten en rocas de origen marino, con una permeabilidad mínima y regionalmente no contienen acuíferos importantes, debido a

- La presencia de áreas extensas de depósitos bentoníticos,
- la ocurrencia de material grueso en una matriz de sedimentos de grano fino y, sobre todo,
- al predominio de sedimentos parecidos a los esquistos y areniscas compactas.

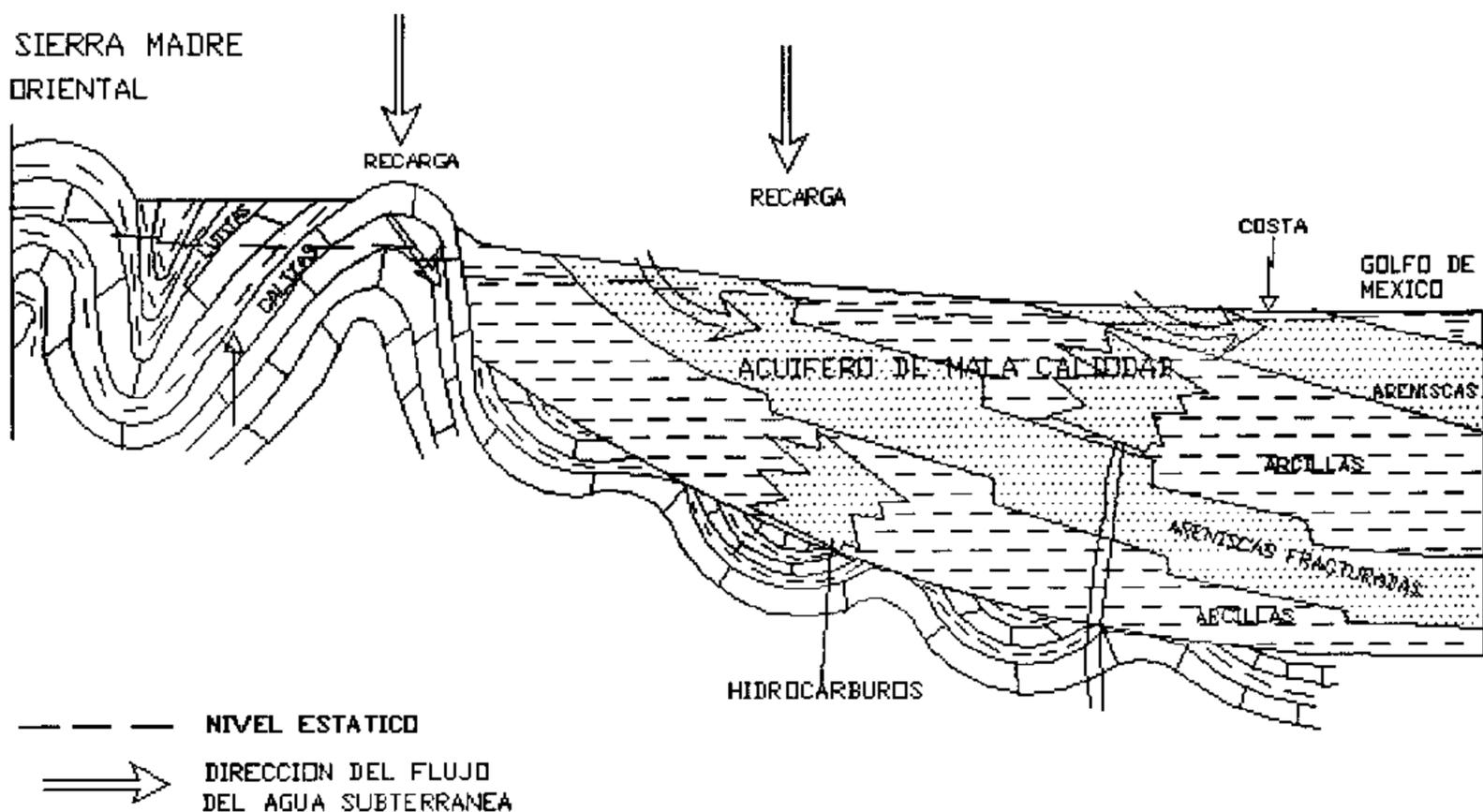


Figura 8. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Planicie Costera del Golfo de México.

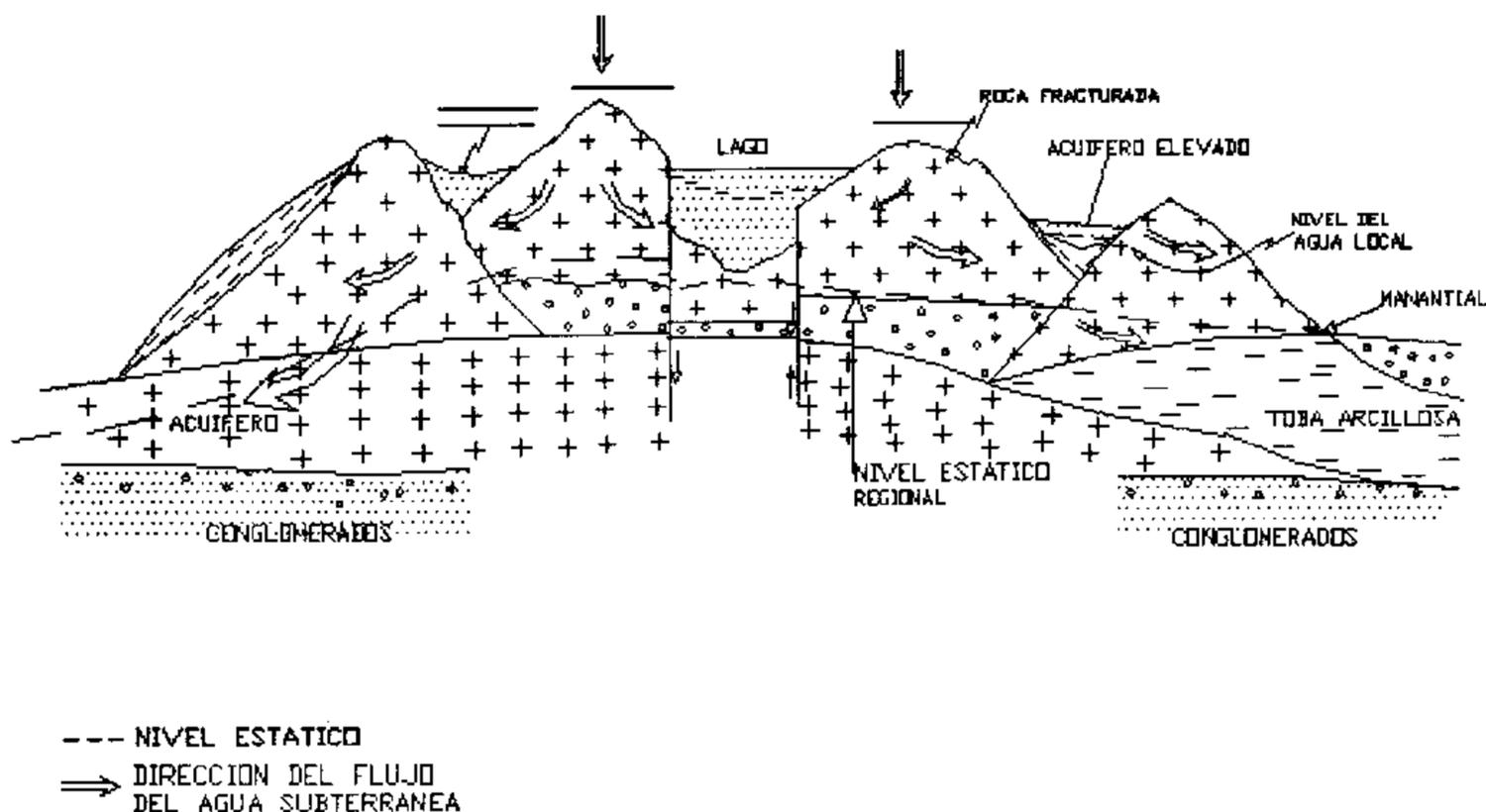


Figura 9. Sección hidrogeológica esquemática de la provincia Faja Volcánica Transmexicana.

La permeabilidad que ocurre en las rocas cenozoicas es muy significativa; el contenido de fluidos es típicamente de agua salada o aceite. Las rocas de la planicie costera se profundizan suavemente hacia el Golfo de México, excepto donde hay rasgos estructurales regionales, como arcos, fallas, bahías, fosas, y levantamientos tectónicos que afectaron la distribución y espesor de los sedimentos. La profundidad y algunas veces el espesor de los sedimentos se ven afectados localmente por domos salinos que suben de las profundidades de los estratos de sal jurásica, los cuales son intrusivos a los sedimentos cenozoicos. El incremento más abrupto de espesor en unidades individuales dentro de distancias cortas está asociado con fallas (formadas contemporáneamente a la deposición). Relacionada con el fallamiento regional existe una zona anormal de alta presión de fluidos (también llamada geopresión), que ha sido desarrollada por sedimentos del Eoceno cercanos a la costa, en algunas partes costeras de Tamaulipas y la porción norte y noreste de Nuevo León. La alta geopresión o la transición de la presión hidrostática normal a una alta presión anormal se considera como la base del flujo del agua subterránea.

La zona de geopresión ha sido típicamente un horizonte de la producción de hidrocarburos y aguas salinas asociadas con el retiro de los hidrocarburos. Normalmente, el agua de la zona de geopresión tiene una temperatura mayor de 100°C y contiene cantidades variantes de metano. La energía concerniente a la década pasada se ha dirigido con

una mayor atención a la zona de geopresión y a las aguas que ahí ocurren. La profundidad de esta zona varía desde 2,000 a 4,500 m.

El movimiento del agua en la zona de geopresión es lento y los datos de presión indican que generalmente es hacia arriba, donde se encuentra la zona de meteorización. Sin embargo, a causa de la permeabilidad insignificante de los sedimentos, el volumen de agua que fluye fuera de la zona de geopresión es relativamente muy pequeño en relación con el que circula en los sedimentos que contienen aguas meteóricas. La rápida depositación de los sedimentos ha provocado que se hundan poco a poco en la cuenca del Golfo de México, lo que ha dado como resultado un gran volumen de sedimentos compuestos bajo la actual línea costera.

#### Faja volcánica transmexicana

**Localización.** La región hidrogeológica conocida como franja volcánica transmexicana (véase Fig. 9) coincide aproximadamente con la provincia fisiográfica del mismo nombre; se localiza en el centro del país, cubre un área de casi 130,000 km<sup>2</sup> y se extiende parcial o totalmente sobre algunos estados de la república mexicana, incluido el Distrito Federal. Esta región es alargada y de forma irregular, con una longitud de 950 km este-oceste y una anchura promedio de 110 kilómetros.

**Clima.** Tiene una gran variedad de condiciones climá-

ticas debida a su topografía montañosa y a su amplio rango de elevaciones. Los climas dominantes son:

- Tropical y húmedo templado en la porción oeste.
- Subhúmedo árido templado en la mesa central.
- Frío, húmedo a árido en las áreas montañosas de la porción noreste.

La precipitación oscila entre 300 y 4,000 mm/año y está determinada en principio por la orografía; una gran parte de la región recibe más de 500 mm/año y sólo en pocas áreas de la porción norte recibe menos. La precipitación en las regiones montañosas es superior a los 1,200 mm/año y en las sierras más altas excede los 2,000 mm/año; la temporada de lluvia es en verano, a principios de otoño y disminuye en invierno; en general, hay un patrón de lluvias aisladas en la región y abundan las heladas en los picos más altos. La temperatura promedio anual varía, en relación con la altitud, entre 13 y 23°C; las temperaturas registradas son menores en las áreas montañosas y aumentan en las partes bajas de la cuenca. En el verano el promedio de la temperatura diaria tiene rangos de 15 a 26°C, con altas de 36°C; durante el invierno el promedio de temperatura diaria es de 12 a 20°C, con bajas de -5°C en las montañas.

Las condiciones anteriores producen valores de evaporación potencial de 1,600 a 2,000 mm/año, aunque su promedio sea mayor que la precipitación. Hay un exceso de ésta durante la estación de lluvias, las cuales generan flujo y recargas a los acuíferos.

**Hidrogeología.** Los derrames basálticos y la mayoría de rocas que se extienden en toda la faja volcánica transmexicana se caracterizan por una alta permeabilidad que varía en un amplio rango, controlado principalmente por su grado de fracturamiento, la presencia de tubificaciones en los derrames y la intercalación de material escoriaeo.

En el subsuelo de los valles, las rocas consolidadas y no fracturadas abajo del nivel regional de saturación forman barreras para el flujo de agua subterránea, como los derrames andesíticos que funcionan como basamento geohidrológico; en el caso de los valles tectónicos, este basamento se puede encontrar en cientos de metros de profundidad. Los derrames de rocas no fracturadas intercaladas con relleno aluvial en diferentes profundidades forman acuíferos locales independientes en rocas adyacentes. En contraste, la mayoría de las rocas de composición riolítica, presente en la parte norte de esta región y que se extiende dentro de las cuencas aluviales en el sur, forma acuíferos de gran densidad y de permeabilidad moderada debido a su fracturamiento.

En las partes más bajas de las cuencas, los acuíferos en derrames volcánicos fracturados están cubiertos por depósitos lacustres y aluviales de menor permeabilidad, por lo

que son acuíferos confinados o semiconfinados y se caracterizan por un coeficiente de almacenamiento bajo, debido a su virtual incompresibilidad.

Los piroclastos tienen una alta porosidad, aunque su permeabilidad sea baja; en la zona de saturación funcionan como acuitardos, los cuales en escala regional pueden producir o transmitir grandes cantidades de agua a los acuíferos adyacentes. Estos materiales abundan en la base de los volcanes aunque con un espesor menor, son menos porosos y más permeables que los de arriba.

Ampliamente distribuidos en la superficie se encuentran los depósitos lacustres muy porosos y de poca permeabilidad del Plioceno tardío, que forman acuitardos de algunos metros de espesor y de grandes volúmenes de agua. En un nivel regional, estos depósitos contribuyen al gran volumen de agua de los acuíferos adyacentes, ya sea natural o de bombeo.

Los materiales aluviales no consolidados, gravas, arenas y sedimentos finos, están ampliamente expuestos en los valles y forman acuíferos someros. Su permeabilidad y transmisividad varía de acuerdo con el tamaño del grano y del espesor. El coeficiente de transmisividad varía según el tamaño del grano y del espesor. El coeficiente de transmisividad de los acuíferos aluviales oscila entre  $5 \times 10^{-4}$  y  $5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ . El espesor y la alta permeabilidad de los clásticos son comunes en los arroyos, también forman canales activos y viejos que funcionan como acuíferos semiconfinados. Sobre las extensas llanuras inundadas son más abundantes los clásticos de granos medios a finos y permeabilidad moderada a baja.

El agua circula preferencialmente a través de los estratos más permeables, los cuales presentan menos resistencia al flujo de la subterránea y tienden a cruzar los estratos menos permeables por la ruta más corta. Cuando estos estratos se encuentran en la parte superior de la secuencia estratigráfica, la mayoría de las aguas infiltradas se incorpora al sistema local, caso muy frecuente en la faja volcánica transmexicana. Los flujos de lava basáltica, y los gruesos paquetes de piroclásticos que forman el mayor volumen de las rocas volcánicas jóvenes, producen excelentes áreas de recarga y rápidamente transmiten el agua a profundidad, alimentado al acuífero profundo, abajo de los valles adyacentes.

En el subsuelo de los valles y planicies lacustres el agua se desplaza hacia las áreas de descarga. De acuerdo con las observaciones realizadas y con plantamientos teóricos parece que hay una continuidad hidráulica de la zona saturada, consiste en el relleno, que constituye un sistema de flujo solo, además de que todos los estratos están hidráulicamente interconectados. No obstante, debidas a la heterogeneidad y anisotropía del relleno, hay diferen-

cias significantes en la carga hidráulica, temperatura y calidad del agua en el sentido vertical.

**Sierra Madre del Sur**

**Localizaci3n.** Esta provincia hidrogeol3gica toma su nombre de las montañas que son las características fisiográficas más permanentes en la regi3n (véase Fig. 10); cubre un área de 258,274 km<sup>2</sup>. Limita al norte con la faja volcánica transmexicana; al sur con el océano Pacífico, y al oriente con las provincias de sierras y valles del sureste y con la parte sur de la planicie costera del golfo.

**Clima.** Se presenta una variedad de climas acordes con las diferentes latitudes y altitudes que tienen las regiones que integran esta gran provincia. Así se tiene que en las porciones altas de la sierra hay climas templados húmedos y subhúmedos con abundantes lluvias en verano, mientras que hacia las partes bajas, como la zona costera y la cuenca del Balsas, el clima se torna semicálido-húmedo y muy caluroso húmedo. En ambas áreas la precipitaci3n también se presenta en el verano; la media anual en esta provincia varía de 500 mm/año en la presa del Infiernillo y Cañada oaxaqueña, hasta 5,000 mm/año en la sierra de Juárez. La temperatura media anual es también muy variable, pues va de 18 C en las partes altas hasta 26 C en las zonas costeras, con mínimas de 0 C en la zona de Altamirano, Guerrero.

**Hidrogeología.** La Sierra Madre del Sur es una cadena montañosa compuesta principalmente por un basamento

de rocas metam3rficas que fueron desplazadas durante el Jurásico y un batolito que constituye el Macizo de Oaxaca. Esta  rea también sirve de base para otras formaciones impermeables compuestas de dolomías, calizas recristalizadas y lechos rojos compuestos de arcilla, arena y limo del Paleozoico, Triásico y Jurásico.

Por sus rasgos geomorfol3gicos esta provincia se ha dividido en dos subregiones que se denominan: la planicie costera y las sierras transversales.

La primera es una franja estrecha que abarca desde unos cuantos metros hasta 25 km de ancho y se extiende paralelamente a la línea de costa. Está compuesta principalmente de aluvi3n cuaternario limoso, derivado de la erosi3n de la Sierra Madre del Sur y depositado por las corrientes que fluyen al océano Pacífico. Este aluvi3n de grano fino constituye ac feros de baja producci3n. Algunas de las principales características hidrol3gicas de las planicies costeras son las numerosas lagunas que contienen los materiales de grano fino y los abundantes detritos orgánicos. La planicie es un área pantanosa compuesta de sedimentos de grano fino con bajo potencial para almacenar agua subterránea.

Las sierras transversales contienen las principales rocas permeables de la provincia y, en consecuencia, la mayor ocurrencia de agua subterránea. Las compone una serie de cadenas montañosas y valles. Las montañas las forman principalmente calizas y dolomías del Cretácico, las cuales están altamente carstificadas. Las mesetas y

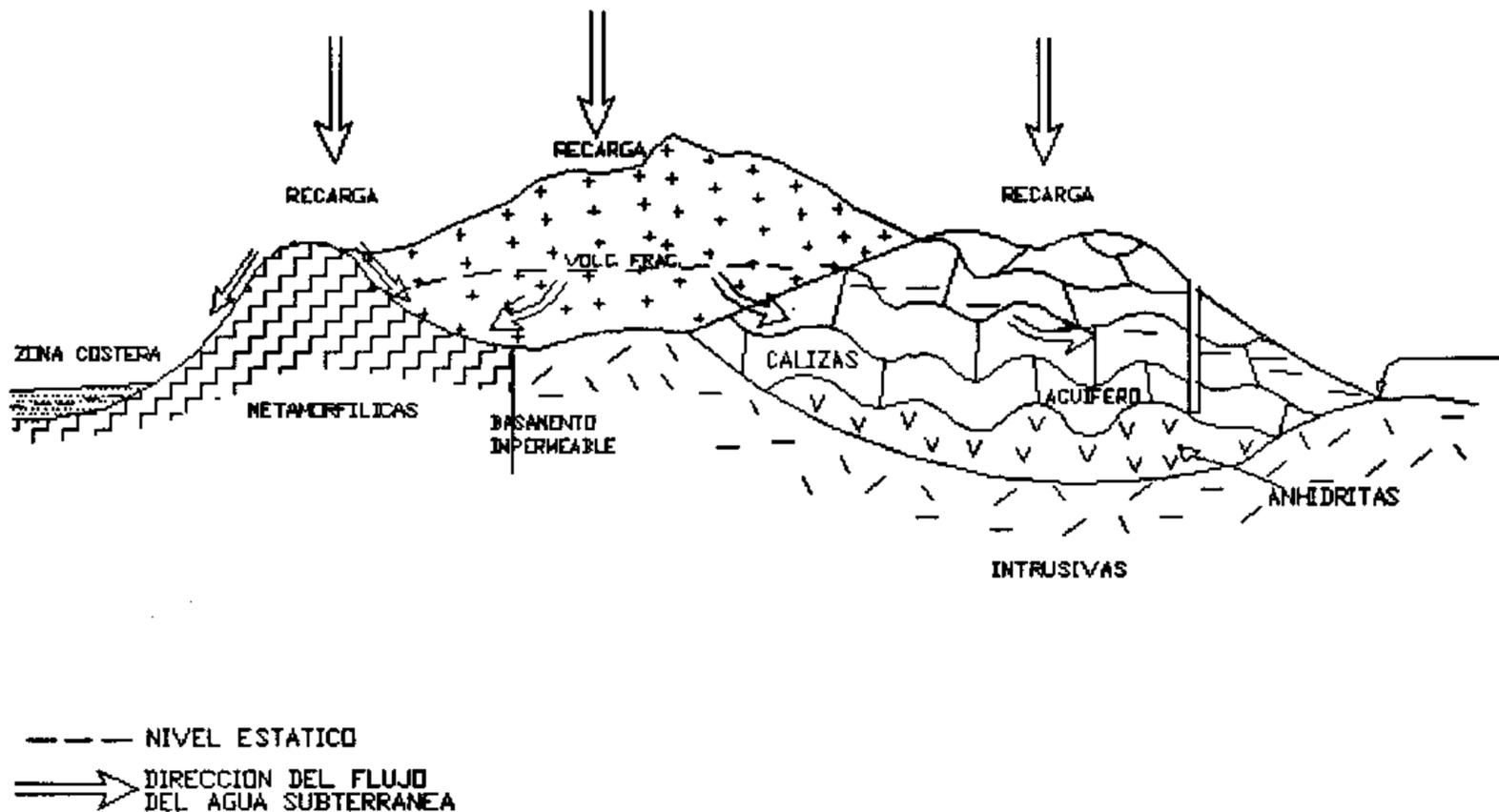


Figura 10. Secci3n hidrogeol3gica esquemática de la provincia Sierra Madre del Sur.

valles altos están compuestos de rocas sedimentarias continentales del Terciario, aluvión del Holoceno y gruesos depósitos de sedimentos piroclásticos del Cuaternario. El área de desagüe de estas montañas es compleja debido a los rangos tan amplios en la permeabilidad de las rocas y por las numerosas estructuras tectónicas; comúnmente las corrientes se pierden en las cavidades de las calizas y reaparecen como manantiales que forman magníficas cascadas abajo de las cordilleras. En otros lugares, las corrientes reaparecen en forma de lagos que sirven como centros de diversión y dan lugar a nacimientos de ríos. Todas estas aguas finalmente drenan a los principales ríos, otras van por la tierra o en forma de flujo subterráneo hacia la planicie costera, antes de descargar en el océano Pacífico. Las calizas y dolomías de esta área tienen un espesor aproximado de 2,800 m y consisten en una secuencia alterna de calizas litográficas con pedernal, calizas dolomitizadas, dolomías y calizas secundarias, debido al fracturamiento y a la disolución. En algunos sitios las rocas calcáreas están cubiertas por material terrígeno impermeable del Terciario. Esta área sufrió una gran actividad tectónica durante la cual se produjeron horst y gravens.

### Sierras y valles del sureste

**Localización.** Esta provincia hidrogeológica (véase Fig. 11) comprende una superficie de 84,280 km<sup>2</sup> y abarca

todo el estado de Chiapas y parte de Oaxaca y Tabasco. Limita al norte con la planicie costera del golfo, al sur con el océano Pacífico, al occidente con la Sierra Madre del Sur y al oriente con la frontera de México-Guatemala.

**Clima.** Las condiciones climáticas de esta provincia varían de templada a semicálida húmeda en las partes altas de la sierra de Soconusco y sierras de Chiapas, y cálida subhúmeda en las llanuras costeras, así como en la depresión central de Chiapas. La temperatura media anual es de 25°C, con una mínima de 16 y máxima de 40°C. Aunque la época más lluviosa es en el verano, las precipitaciones se presentan casi todo el año. Éstas varían de 1,000 a 4,500 mm/año en el Istmo de Tehuantepec, en la zona del Tacaná y en las sierras plegadas del norte.

**Hidrogeología.** Esta provincia hidrogeológica es una de las más privilegiadas en cuanto a riqueza hidráulica se refiere, ya que su precipitación pluvial es de las más elevadas del país, además de que cuenta con algunos de los ríos más caudalosos de México, como el Grijalva y Usumacinta. Sin embargo, a pesar de las abundantes lluvias y escurrimientos superficiales, éstos se concentran en un periodo del año y su almacenamiento es fundamentalmente en las partes bajas. Para conducirlos a otras áreas donde se requieren el costo sería muy grande; por esto, en extensas áreas de la provincia, los acuíferos son la única opción para cualquier tipo de desarrollo, sea urbano, agrícola o industrial.

En la planicie costera la litología está representada por

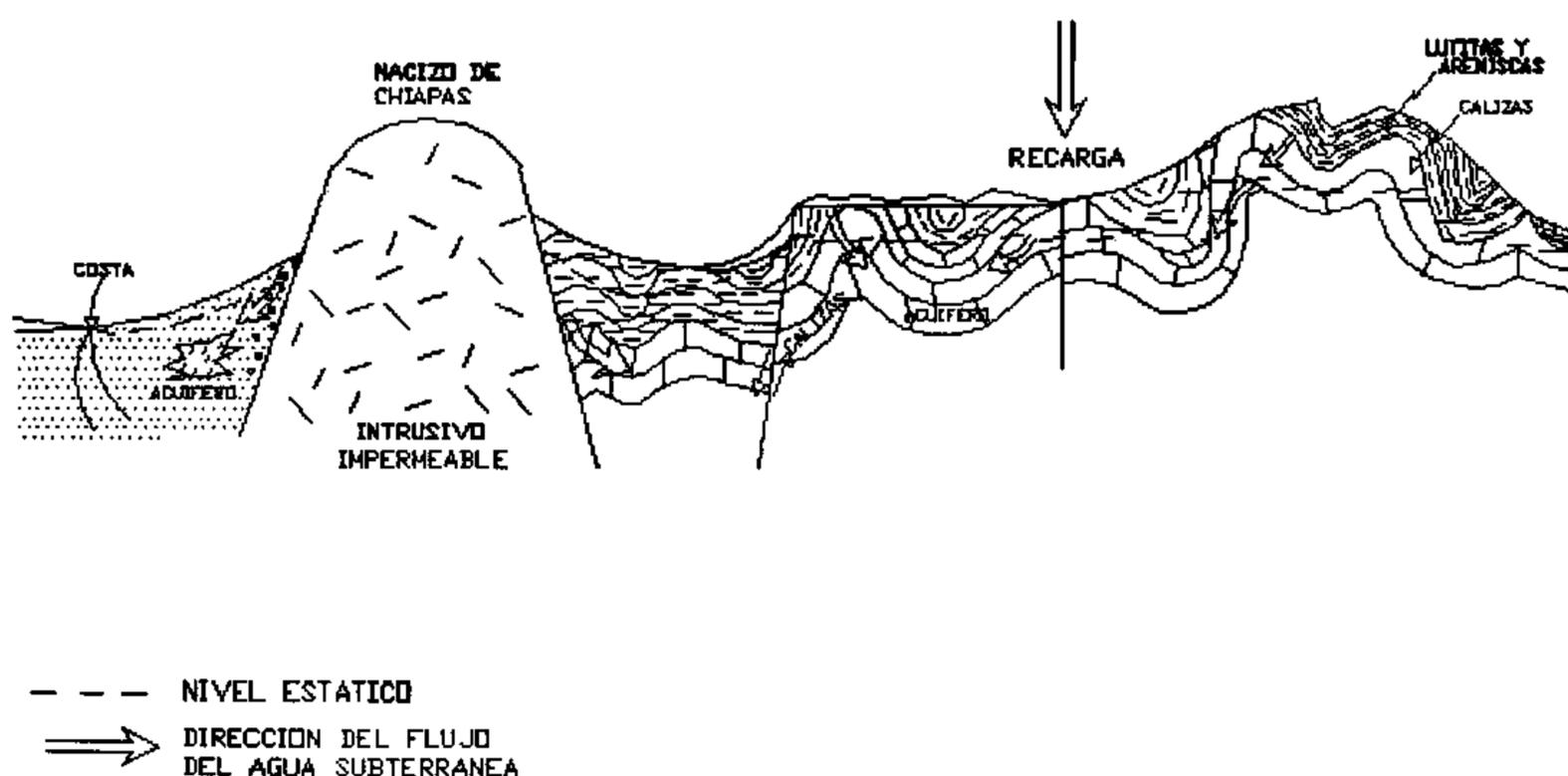


Figura 11. Sección hidrogeológica esquemática de las provincias Sierras y Valles del Sureste.

arenas, limos y arcillas, derivados principalmente de la erosión de las rocas graníticas. Estos materiales constituyen el acuífero costero, el cual posee un espesor que varía de 8 a más de 200 m. Tiene como basamento rocas metamórficas y graníticas. El acuífero recibe la recarga directamente de la lluvia o a través de los ríos y arroyos que descienden de las montañas y descargan sus aguas en el Pacífico.

En la sierra de Chiapas, constituida por un macizo granítico, se presentan condiciones desfavorables para la explotación acuífera, reduciéndose el aprovechamiento de pequeños manantiales originados en zonas de rocas fracturadas. Es la región de mayor precipitación pero, por la baja permeabilidad de sus materiales, el agua escurre por ambos flancos de la sierra a través de arroyos que descienden vertiginosamente hasta la parte de pendiente suave, sitios a donde se lleva a cabo la infiltración de gran parte del agua.

La depresión central del estado de Chiapas es un graben compuesto por rocas sedimentarias del Mesozoico superior y Cenozoico. Tiene una topografía suave hacia el noreste, no así hacia el suroeste, donde empiezan las estribaciones de la sierra de Chiapas. La baja permeabilidad de los sedimentos es la causa de la baja producción de los acuíferos, que se obtienen en pequeñas cantidades. Las diversas perforaciones exploratorias que se han realizado en esta región han demostrado que las calizas arcillosas del Cretácico superior no constituyen acuíferos importantes, sirven únicamente para abastecer por medio de excavaciones poco profundas las necesidades de agua para usos domésticos de pequeñas comunidades, donde la extracción en general se hace por medios manuales. Más al sur, dentro de la depresión, los rellenos son de poco espesor, 2 a 3 m. Como basamento se tiene al granito, por lo que sus posibilidades acuíferas son prácticamente nulas.

En el altiplano de Chiapas y en las sierras plegadas del norte, hacia las zonas de Ocozocuatla y Comitán, se han ejecutado varias perforaciones exploratorias en las calizas y dolomías que han resultado con buenos caudales (60-70 l/s), aunque también se han tenido pozos con bajos rendimientos; sin embargo, esto es normal, ya que corresponde al comportamiento clásico de los terrenos calcáreos. Hacia las áreas de mayor altura, donde llueve más, se lleva a cabo la recarga de los acuíferos calcáreos que están actualmente en explotación.

La morfología tectónica (morfotectónica) dominante refleja, por lo menos, dos etapas de plegamiento y fracturamiento, que generaron grandes estructuras anticlinales que dan paso a los terrenos calcáreos altos con un gran desarrollo de aparatos cársticos con numerosos "picos",

"torres" y "sumideros". Con excepción de las grandes corrientes en lo profundo de los valles, las corrientes menores son escasas y recorren distancias muy cortas para terminar abruptamente en hundimientos o "tragaderos" comunes de "valles ciegos". El flujo del agua subterránea es controlado por el patrón de fracturamiento, que origina la descarga principal hacia las corrientes profundas; dado este drenaje subterráneo profundo, los niveles del agua se encuentran a bastante profundidad.

### Península de Yucatán

**Localización.** La Península de Yucatán cubre un área de 136,240 km<sup>2</sup> en la porción este del país (véase Figura 12); está limitada al oeste y norte por el Golfo de México, al este por el mar Caribe, en el suroeste se une con la planicie costera del golfo y hacia el sur limita con la Sierra Madre del Sur.

**Clima.** El clima de la península es de cálido a muy cálido y subhúmedo, con variación a cálido semiseco en la porción septentrional, con lluvias que van desde 500 mm/año en el noroeste, a 1,300 mm/año en la costa este y 1,500 mm/año en la isla de Cozumel, fuera de la costa este; aproximadamente el 90% de la lluvia ocurre en el periodo de mayo a octubre. La temperatura media anual es de 25°C, la más alta se da en julio y agosto con 46°C, y la más baja en diciembre y enero, de 4°C. La alta temperatura y abundante vegetación son causa de que se pierda alrededor del 85% del agua de lluvia por evapotranspiración; el otro 15% se infiltra al subsuelo. Virtualmente, no existen corrientes ni cuerpos de agua superficial en la península.

**Hidrogeología.** Por sus características morfológicas esta provincia se ha subdividido en cuatro regiones que son:

#### *Planicie cárstica con cenotes del norte*

Esta región ocupa la porción norte de la península; desde la línea costera se incrementa suavemente su elevación tierra dentro, hacia el sur, de 35 a 40 m cerca de la base de la sierrita de Ticul. El relieve local alguna vez excede de los 10 m. Esta área está formada por carbonatos marinos del Terciario que han estado sujetos a una gran disolución; los grandes orificios de disolución y cavidades se han originado por infiltración de la lluvia y han formado acuíferos altamente permeables. El alto grado de carstificación permite una rápida infiltración y no hay flujos superficiales. En ausencia de la erosión por estas corrientes existe una fuerte erosión del subsuelo que da como resultado el desarrollo de la topografía cárstica típica. En el subsuelo se presentan ambos tipos de erosión, química y mecánica.

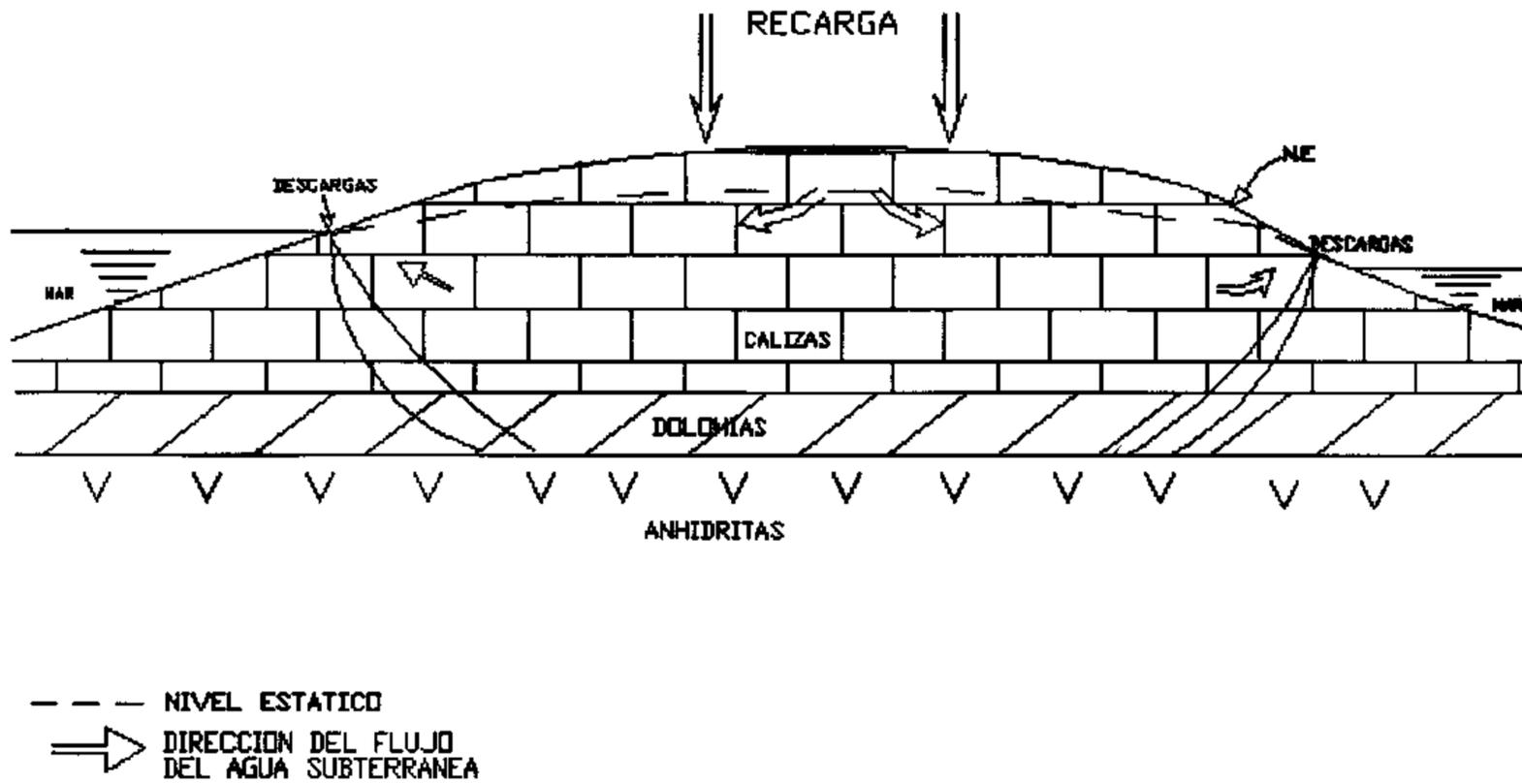


Figura 12. Sección hidrogeológica de la Península de Yucatán.

La erosión mecánica ocurre cerca de la superficie donde las arcillas son lavadas, abiertas y depositadas debajo de la superficie calichosa. La ausencia de suelo es una de las características de la planicie; las arcillas se encontraban a profundidades de 0.5 a 1.5 m. Debajo de la superficie donde son atrapadas por las raíces de las plantas, la rápida infiltración del agua de lluvia en el acuífero da como resultado un agua insaturada, la cual conserva un alto potencial de disolución; ésta agranda las fisuras y cavidades, produciendo mayores aberturas y cavernas. El colapso de las rocas produce las dolinas y sumideros conocidos localmente como "cenotes", palabra de origen maya. Estos rasgos cársticos son de varios tipos y se forman en respuesta a las fluctuaciones del nivel freático. Éste se presenta a profundidades de 4 a 20 m en las elevaciones superficiales. La mayoría de los cenotes es circular, con paredes verticales y diámetro cercano a 100 m, donde la profundidad del agua tiene aproximadamente 15 m. Diversos trabajos muestran que los cenotes se estrechan con la profundidad y tienen forma cónica.

Con frecuencia, el techo del cenote se ha derrumbado completamente; en otros casos es semiesférico con pequeñas aberturas de 1 a 3 m de diámetro. Estas típicas aberturas se hacen más grandes con la profundidad y sus diámetros pueden alcanzar algunas decenas de metros; la formación de estos cenotes, así como los otros rasgos cársticos, está en función del nivel freático. A esta profundidad, el agua es cargada con bióxido de carbono promo-

viendo la formación de ácido carbónico, el cual disuelve los carbonatos del subsuelo; varios niveles de disolución señalan que el nivel freático ha fluctuado aparentemente en respuesta a la emergencia gradual de la península. En la parte norte de ésta los carbonatos del Terciario están horizontales y muestran significativos cambios de facies, los cuales controlan la ocurrencia de zonas de diferentes grados de carstificación. Los cenotes o sumideros ocurren a lo largo de grandes longitudes de la península, pero son más notables y numerosos en ciertas zonas, donde una faja alargada se caracteriza por abundantes rasgos cársticos, especialmente de gran tamaño.

#### *Planicie cárstica montañosa del sur*

En esta zona la topografía es variada; existen formas aisladas de bajo relieve, cerros con formas cársticas cónicas de aproximadamente 40 m de altitud en relación con la superficie que los rodea. La altitud máxima de esta región es de 300 msnm.

La planicie está formada por carbonatos del Eoceno, incluidos calizas, calizas dolomíticas y dolomías. Algunos de los carbonatos presentan un ligero grado de silicificación. Los estratos presentan desde formas horizontales hasta pequeños pliegues con inclinación de 15 a 20° y se encuentran altamente fracturados.

La alta permeabilidad de estos carbonatos fracturados refleja un bajo gradiente en el nivel freático. En algunos

lugares dicho nivel se encuentra a 100 m de profundidad, y hace difícil y costosa la explotación del agua subterránea. Por esta razón hay pocos pozos privados o no existen debido a la alta topografía y profundidad de los acuíferos.

La presencia de rocas evaporíticas que se localizan aflorando en la porción central, al sur de la península, propicia acuíferos con agua de mala calidad, que son descargados siguiendo el patrón estructural regional hacia las zonas externas y se mezclan con aguas de mejor calidad, "contaminando" a éstas, como al parecer ocurre hacia las zonas de Calkini y Tenabo en Campeche, y la de Polyuc en Quintana Roo.

#### *Sierrita de Ticul*

Entre las extensas planicies del norte de la península y las sierras del sur se presenta una forma topográfica alta, conocida como sierrita de Ticul. Está constituida por calizas del Eoceno, de orientación noroeste a sureste; tiene 160 km de longitud y 15 km de ancho. La sierrita es un escarpe de falla formado por una falla normal, en la que el bloque caído es el norte. La altitud en la región es de 150 msnm y de 100 y 110 m en relación con la planicie norte. Las elevaciones a lo largo del escarpe son prácticamente los únicos rasgos geomórficos que interrumpen el paisaje característico de la península.

#### *Región de bloques afallados del este*

Esta área, de aproximadamente 80 km de ancho, se extiende desde cabo Catoche, en la parte noroeste de la península, hasta el sur, en el límite con la república de Belice. En esta región las rocas carbonatadas se deben a una serie de fallas normales con tendencia norte-noreste (falla de río Hondo) formando horst y grabens; las fallas varían en longitud y desplazamiento, y algunas se pueden observar en la superficie.

La expresión más notable de estas fallas a lo largo de la costa caribeña, incluida la isla de Cozumel, es un bloque limitado al este y oeste por grandes fallas. Cerca de la costa

existe una marcada orientación y alimentación de las bahías como Chetumal y la de la Ascensión. Ligeramente al interior existen depresiones elongadas de 10 a 15 m de profundidad que forman lagos y regiones pantanosas. Buenos ejemplos de estas grandes depresiones son los lagos de Bacalar, orientados noroeste-sureste y noreste-suroeste, que fueron formados por la caída de bloques de 8 a 10 m. Abajo de la superficie que los rodea estos lagos varían en lo ancho desde los más pequeños, de 2 a 10 m, hasta los de 50 km de longitud. Más al noroeste, cerca de la costa, rasgos similares pero más pequeños se presentan a pocos metros sobre el nivel del mar, formando pantanos y pequeños lagos. En la zona costera el agua subterránea descarga en el mar Caribe, disolviendo los carbonatos y formando caletas y lagunas.

#### BIBLIOGRAFÍA

- Atlas de Agua de la República Mexicana. Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1976.
- Bemavodes, G. L. Notas Sobre la Geología Petrolera de México. Simposio Sobre Yacimientos de Petróleo y Gas, XX Congreso Geológico Internacional, 1956.
- Comisión del Plan Nacional Hidráulico. Inventario Regional de Aguas Subterráneas, Doc. núm. 19, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, 1977.
- Coney, P. J. y M. F. Campa, "Tectono-stratigraphic Terranes and Mineral Resource Distributions in México", *Can. Jour. Earth Sci.*, 20: 1040-1051, 1983.
- López Ramos, E. *Geología de México*, pp. 296-298, 1980.
- The Geology of North America. Col. 0-2. Hidrogeology, the Geological Society of America, 1988.
- Raisz, E. *Physiographic Provinces Prepared for the Geography Branch of the Office of Naval Research*, Cambridge, Mass. 1959.