

La distribución del agua subterránea en México

Héctor Luis Macías González y Rodolfo del Arenal Capetillo

Es bien sabido que el agua está presente en el subsuelo; sin embargo, no es de todos conocido que su presencia es desigual en distintas zonas, y esto ha acarreado problemas económicos y sociales que sólo podrán enfrentarse con el conocimiento preciso de su distribución.

Es muy extendida la creencia de que en el subsuelo hay agua en todas partes; de que en cualquier sitio tiene la misma disponibilidad, y de que lo único que varía es la profundidad. Lo cierto es que no es así. En la naturaleza, los cambios en la existencia y cantidad de agua subterránea en una cuenca pueden ir de moderados a drásticos. Entre cuencas adyacentes los cambios son mayores, y entre fragmentos continentales mucho mayores todavía.

La distribución espacial y disponibilidad del agua subterránea en México, como en cualquier parte de la Tierra, depende de tres aspectos principales: geología, topografía y clima. La descripción de estos aspectos y sus interacciones permite conocer por qué dentro de una misma región se encuentran valles áridos, semiáridos y húmedos, y agua en cantidades y profundidades diferentes.

A grandes rasgos, puede decirse que más de la mitad del territorio mexicano exhibe en su superficie rocas de origen volcánico. La gran masa de la Sierra Madre Occidental, el Eje Volcánico Mexicano, la Mesa Central y la Planicie Costera de Sinaloa está formada por ignimbritas, andesitas, basaltos y otros minerales volcánicos fragmentados y compactados. Le siguen en abundancia las rocas sedimentarias como calizas, lutitas y areniscas que forman la Sierra Madre Oriental, en la parte noreste de México, la península de Yucatán, las montañas de Guerrero, Oaxaca y Chiapas, y la planicie costera del Golfo, constituida por arenas y arcillas. En tercer lugar rocas ígneas –también de origen volcánico– y metamórficas, que cubren

grandes superficies en la península de Baja California, Sonora, Oaxaca, Guerrero y Chiapas. Las grandes fosas tectónicas de la franja noroeste-sureste fueron rellenadas por aluviones terciarios y cuaternarios y acarreo de fragmentos emitidos por volcanes.

El relieve del territorio es notablemente accidentado. Las sierras Madre Occidental y Madre Oriental, el Sistema Volcánico Transversal, la Sierra Madre del Sur y las Sierras de Chiapas, todas con elevaciones que alcanzan 3 mil metros o más, son las masas orográficas prominentes que exhiben las mayores elevaciones y las más profundas cañadas. En conjunto ocupan más de 70 por ciento de la superficie del territorio mexicano, y dentro de sus límites se encuentran extensos valles intermontanos. Con estas elevaciones contrastan las planicies costeras del Pacífico y del Golfo, la depresión del Balsas y la Plataforma de Yucatán (Figura 1).

Elementos y factores del clima

México ocupa la gran franja latitudinal entre los 14 y 32 grados norte, con la mitad de su superficie al norte del Trópico de Cáncer y la otra mitad al sur; este es uno de los factores principales que determinan su clima.

El Trópico de Cáncer, además de ser una línea significativa desde el punto de vista térmico, marca también en forma aproximada la franja de transición entre el clima árido y semiárido de la zona anticiclónica de las altas presiones del norte del trópico, y el clima húmedo y semihúmedo originado por los vientos fijos que soplan de la zona tórrida, con inclinación al noreste o al sudeste, según el hemisferio en que reinan (también llamados vientos alisios) y los ciclones del sur. Lo anterior explica que, a grandes rasgos, gran parte del territorio mexicano se encuentre bajo la influencia de los vientos alisios, que cargados de humedad en verano penetran desde el Este y Noreste. Éstos son los vientos húmedos que producen las lluvias y la recarga a los mantos acuíferos de la zona costera del Golfo y una parte significativa de la porción sur de la altiplanicie mexicana. En cambio, en la época más fría del año los vientos secos del noroeste y oeste son los que prevalecen en el norte, occidente y

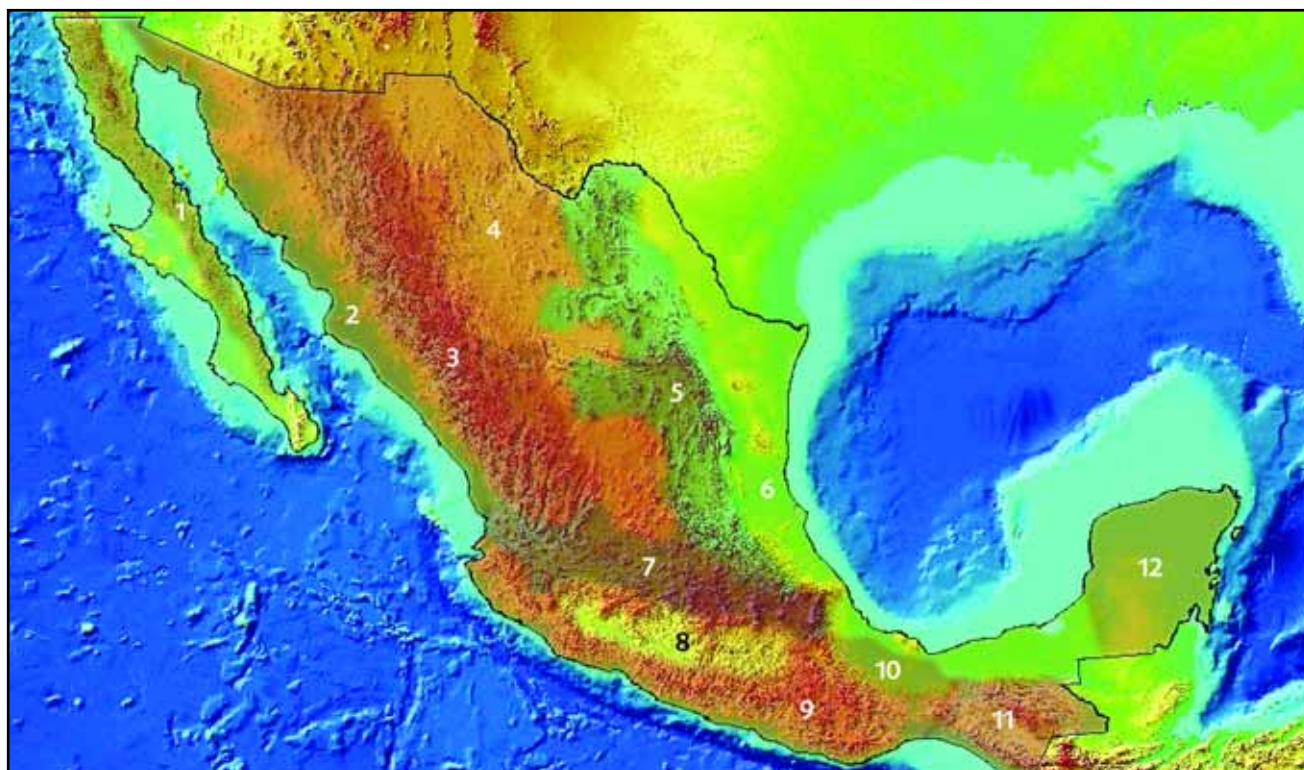


Figura 1. 1. Sierra de Baja California. 2. Llanura Costera del Pacífico. 3. Sierra Madre Occidental. 4. Altiplanicie Mexicana. 5. Sierra Madre Oriental. 6. Llanura Costera del Golfo. 7. Sistema Volcánico Transversal. 8. Depresión del Balsas. 9. Sierra Madre del Sur. 10. Sierra Madre Oriental. 11. Sierras de Chiapas. 12. Plataforma Yucateca. Fuente: INEGI.

parte del centro del país. Es necesario advertir, no obstante, que debido a la interferencia de los complicados sistemas de montañas y valles, la dirección real del viento varía notablemente de una zona a otra, muchas veces entre áreas muy cercanas entre sí. Otro de los factores principales del clima es la influencia oceánica debida a la estrechez de la masa continental.

Como factores de segundo orden, y particularmente a nivel regional, pueden considerarse la forma misma del territorio, que delimita una región continental en el oriente, por donde, como se mencionó antes, tienen acceso los vientos calientes del Golfo de México. Otro factor esencial es la ubicación de la parte noroeste del territorio en el extremo occidental de la gran masa continental de Norteamérica, sometida durante la mayor parte del año a los efectos de las celdas de alta presión por donde penetran vientos secos y fríos, que generan aridez. Otro factor adicional es la región sur, cercana al Ecuador y por tanto es más cálida. También se citan entre los factores determinantes del clima la complicada y variada topografía del país, que origina una amplia diversidad de microclimas, y la situación de sus principales cordilleras.

En 40 por ciento del territorio mexicano prevalecen condiciones climáticas áridas (Figura 2). Este porcentaje del territorio lo ocupan en gran parte la península de Baja California, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas y la porción norte de Nuevo León. En esta superficie caen menos de 500 milímetros de lluvia al año. Además, otra circunstancia desfavorable se agrega a la escasez de lluvia: la precipitación pluvial sucede en poco tiempo, y su contacto con el terreno permeable es efímero. Bajo estas condiciones, la infiltración de agua al subsuelo es mínima, y no hay ríos de régimen de escurrimiento permanente. En estas regiones el agua subterránea que se almacenó en el subsuelo durante millones de años es el único recurso de agua disponible.

En 33 por ciento del territorio, donde se asientan superficies considerables de los estados de Sinaloa, Jalisco, sur de Nuevo León,



Figura 2. Distribución de las lluvias en el territorio mexicano.

Tamaulipas, San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro, Michoacán, México, Morelos, Guerrero, Puebla y Oaxaca predominan climas semiáridos. La altura de lluvia media anual en estas zonas es menor de 700 milímetros.

El clima semihúmedo o subhúmedo que cubre 21.41 por ciento del país se encuentra en Tepic, en una delgada franja en la costa del Pacífico que se extiende desde Colima al Golfo de Tehuantepec, la Península de Yucatán y una franja más gruesa que bordea por el norte el Golfo de México, entre La Laguna de Tamiahua y Veracruz, y se extiende al sur en una franja más delgada que ocupa el norte del estado de Chiapas.

La zona húmeda cubre únicamente 5 por ciento del territorio mexicano, en el sur de Veracruz, Tabasco, Campeche, este de Chiapas, Oaxaca y una pequeña extensión en las sierras altas de Querétaro e Hidalgo. En esta zona la precipitación media anual es superior a mil 200 milímetros al año.

En 73 por ciento del territorio, que ocupan las zonas áridas y semiáridas, con condiciones extremas de aridez e insuficiencia de agua subterránea, habitan 77 millones de habitantes y se produce 84 por ciento del Producto Interno Bruto. En contraste, en el 26 por ciento restante, donde las condiciones climáticas son más

benignas, la población es de 23 millones de personas y la proporción del Producto Interno Bruto es de 16 por ciento.

La mayor cantidad de lluvia en esta región no se refleja, como pudiera esperarse, en la cantidad de agua subterránea disponible. En la franja costera del Pacífico la lluvia escurre rápidamente de la sierras al mar, y la infiltración es mínima a excepción de Tepic, donde el medio geográfico es más favorable.

Y en la franja aledaña al Golfo de México la planicie costera está formada por arcillas arenosas de muy poca permeabilidad, por lo que la infiltración es también muy baja.

De acuerdo con la distribución de la lluvia, y con el propósito de mostrar una visión más clara de su relación con el macroclima y la distribución del agua subterránea, en las Figuras 3 y 4 se muestran cuatro tipos de climas: muy árido, árido, semiárido, semihúmedo y húmedo.

La irregularidad en la distribución del agua subterránea: clima muy árido y árido

La irregularidad en la distribución de agua subterránea en las zonas áridas, situadas al norte del Trópico de Cáncer, es notoria. En la península de Baja California, por ejemplo, las precipitaciones invernales varían de 25 a 50 milímetros en las zonas de desiertos, y de 100 a 300 milímetros en las costas, sobre todo en la del Pacífico. Pero por su relieve y situación dentro de la franja desértica mundial que la atraviesa, hay localidades, particularmente en la costa del Mar de Cortés, donde no llueve en dos o tres años consecutivos. Estos contrastes de la lluvia tienen su origen en la influencia del relieve de las sierras



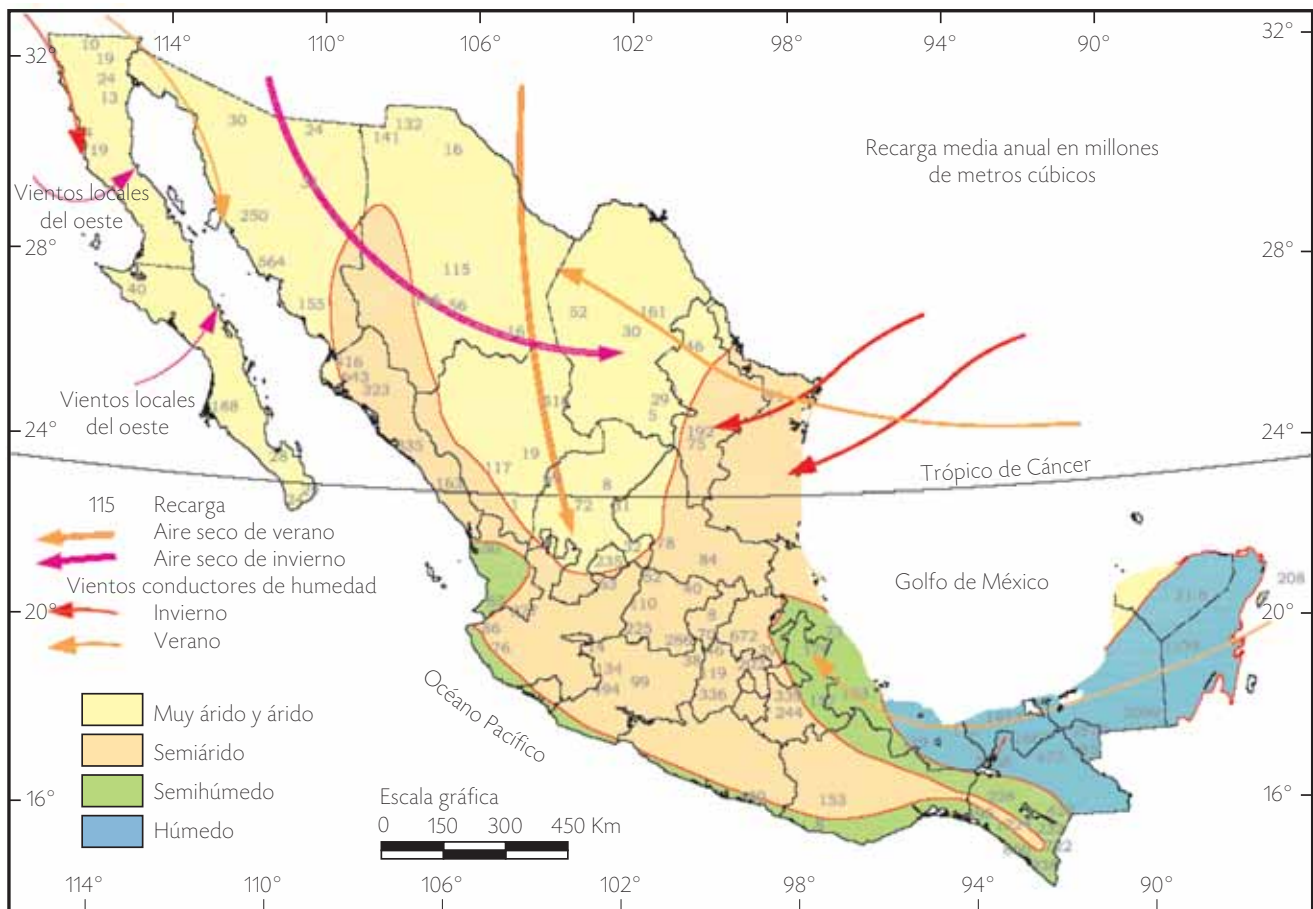


Figura 3. Recarga media anual de agua subterránea en millones de metros cúbicos.

de San Pedro Mártir y la Giganta, y en la amplitud desigual de las franjas costeras a ambos lados de las sierras. La acción de una corriente marina fría en la costa occidental de la península contribuye también a acentuar la aridez. En otras localidades de la región se dispone de mayor cantidad de agua subterránea, debido a condiciones orográficas que producen microclimas, como es el caso notable del Valle de la Trinidad, que presenta un clima templado subhúmedo y una recarga media anual de 24 millones de metros cúbicos anuales. En el sur de la península la recarga oscila de 24 a 28 millones de metros cúbicos anuales; salvo el caso excepcional del valle de Santo Domingo, donde los aportes de los arroyos que descienden de la Sierra de la Giganta y la influencia de lluvias ciclónicas forman una recarga excepcional de 188 millones de metros cúbicos anuales (Figura 3). En esta zona ingresan vientos fríos y secos del norte en verano, y otros secos provenientes del oeste.

En la porción noroeste del territorio, en los estados de Sonora y Chihuahua, en los elevados corredores formados en la

Sierra Madre Occidental y las serranías menores del norte de Chihuahua, penetran del norte corrientes frías y secas que producen precipitaciones menores. En esta región los extensos valles de depósitos aluviales reciben recargas mínimas de 16 millones y máximas de 115 millones de metros cúbicos al año. En la angosta franja de la costa de Sonora, los mantos acuíferos de la costa de Hermosillo y de los ríos Yaqui y Mayo son recargados por las infiltraciones de estas corrientes que descienden de la Sierra Madre Occidental, la cual funciona a su vez como una extensísima área de recarga.

En Durango y Zacatecas los bajíos aluviales intermontanos de la Sierra Madre Occidental, así como los aluviales y lacustres ubicados entre las dos grandes sierras y la sierra transversal de Fresnillo, reciben aportaciones mínimas de

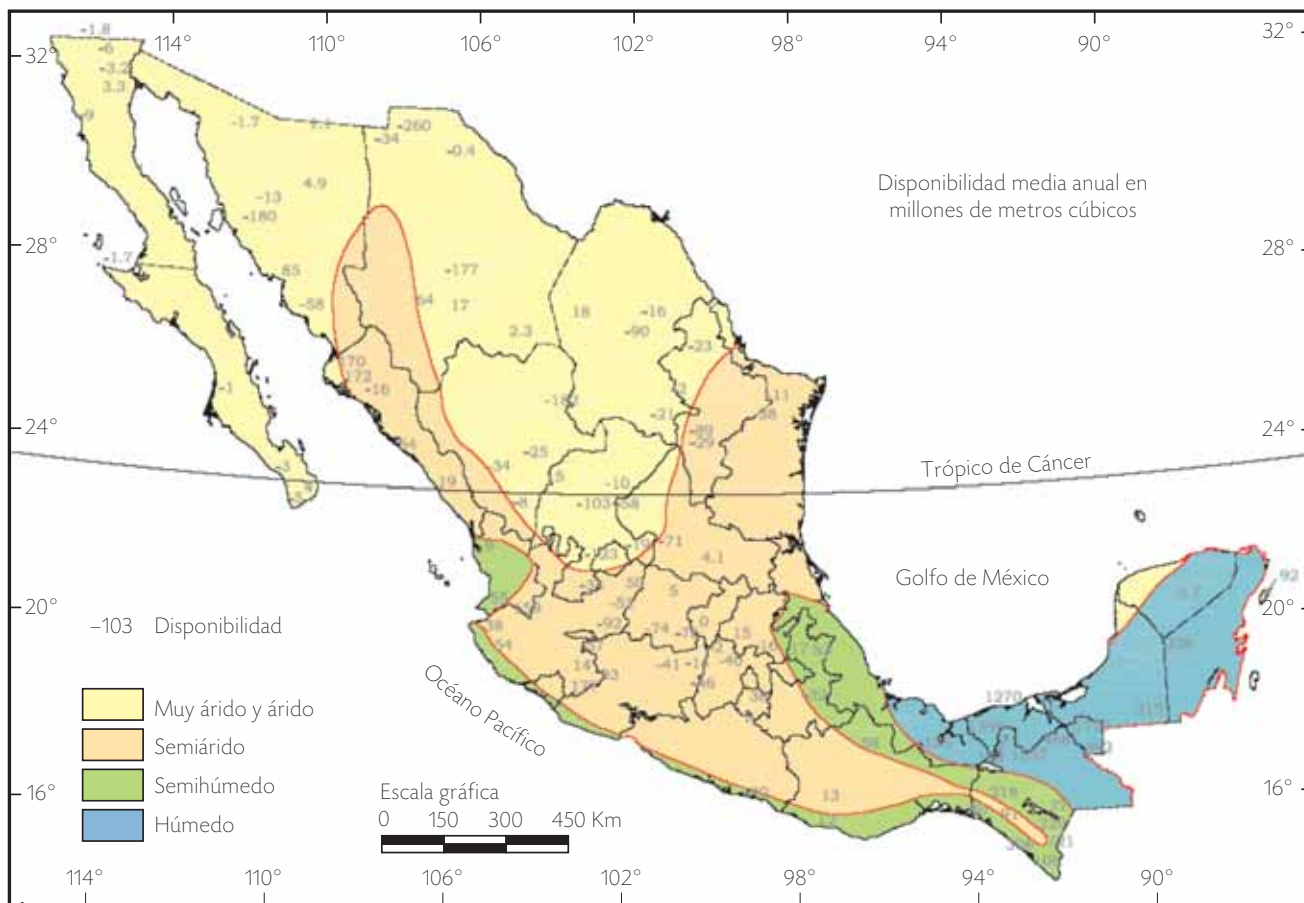


Figura 4. Disponibilidad media anual en millones de metros cúbicos. Fuente: Comisión Nacional del Agua (CNA).

lluvia que descargan los vientos fríos del norte y las corrientes semisecas provenientes del Golfo, las cuales atraviesan la Sierra Madre Oriental. De igual manera, en estas zonas los movimientos de convección locales originan abundante condensación y precipitaciones en los altos valles de la sierra, que ayudan significativamente a la recarga de los mantos acuíferos.

Las magnitudes de recarga en estos dos estados van de 1 a 32 millones de metros cúbicos anuales, y alcanzan 117 millones en el acuífero del Valle del Guadiana, que está emplazado en una zona hidrográfica muy rica, en la frontera entre los climas áridos y semiáridos.

En el territorio coahuilense y la porción norte de Nuevo León, la barrera de la Sierra Madre Oriental restringe la precipitación y provoca recargas mínimas de 4 y máximas de 52 millones de metros cúbicos al año. En con-

traste, en las altas sierras del Burro y Peyotes se alcanzan lluvias del orden de 600 milímetros de altura que abastecen a corrientes importantes, cuya infiltración recarga al acuífero granular y calizo de la región carbonífera con un monto de 161 millones de metros cúbicos al año. En el caso de la Región Lagunera, la influencia de los ríos Nazas y Aguanaval es muy importante en el abastecimiento del acuífero granular y el monto de la recarga.

Distribución del agua subterránea en clima semiárido

La mayor superficie del clima semiárido del país se encuentra al sur del Trópico de Cáncer, con excepción de la franja costera de Sinaloa y las zonas orientales de Nuevo León y Tamaulipas. En la zona costera de Sinaloa el verano es más cálido en la franja terrestre, y la presión más baja. Esto produce vientos del mar a la tierra, y como consecuencia lluvias de barrera que descargan su agua al interceptar el frente de la Sierra

Madre, con lo cual provocan lluvia en la planicie costera. En la franja costera de Tamaulipas los vientos alisios de verano producen abundantes lluvias. En estas zonas los valores de recarga contrastan fuertemente con los de la zona árida. En la región sinaloense las recargas a los mantos acuíferos cubren una gama de 335 a 643 millones de metros cúbicos anuales, y en la región de Nuevo León y Tamaulipas la cifra es de 54 a 192 millones de metros cúbicos al año.

La fracción de clima semiárido al sur del Trópico de Cáncer ocupa las porciones sur de la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre Occidental y la Mesa Central, la totalidad del Eje Volcánico Mexicano, la Sierra Madre del Sur y una angosta fracción de las montañas de Chiapas. Esta fracción de territorio semiárido recibe casi toda la lluvia proveniente del Golfo de México a través de los vientos alisios de verano y los huracanes formados en el Golfo y el Pacífico.

La Figura 3 muestra que aun cuando los valores de recarga son en general medios, hay irregularidad en la distribución, debido a que la casi totalidad de los acuíferos se alojan en valles intermontanos donde las condiciones climáticas locales proveen de mayor o menor cantidad de agua a los valles aluviales y fosas tectónicas por lluvias convectivas. En esta área semiárida

la mayoría de acuíferos son de medios granulares, excepto la zona noreste y algunas localidades de Puebla, Oaxaca y Chiapas, donde hay acuíferos en rocas calizas fracturadas. Las magnitudes de recarga en esta zona van desde 8 millones de metros cúbicos anuales en el Valle de Tolimán, Querétaro, a 494 millones de metros cúbicos al año en el Valle de Apatzingán, Michoacán. También se puede observar una importante recarga de 672 millones de metros cúbicos anuales en el Valle del Mezquital, Hidalgo, si bien es inducida artificialmente por el agua residual enviada a este valle desde la ciudad de México.

Distribución del agua subterránea en clima semihúmedo

En la franja costera del Océano Pacífico el clima semihúmedo conforma una franja angosta de 300 kilómetros en Nayarit, de 90



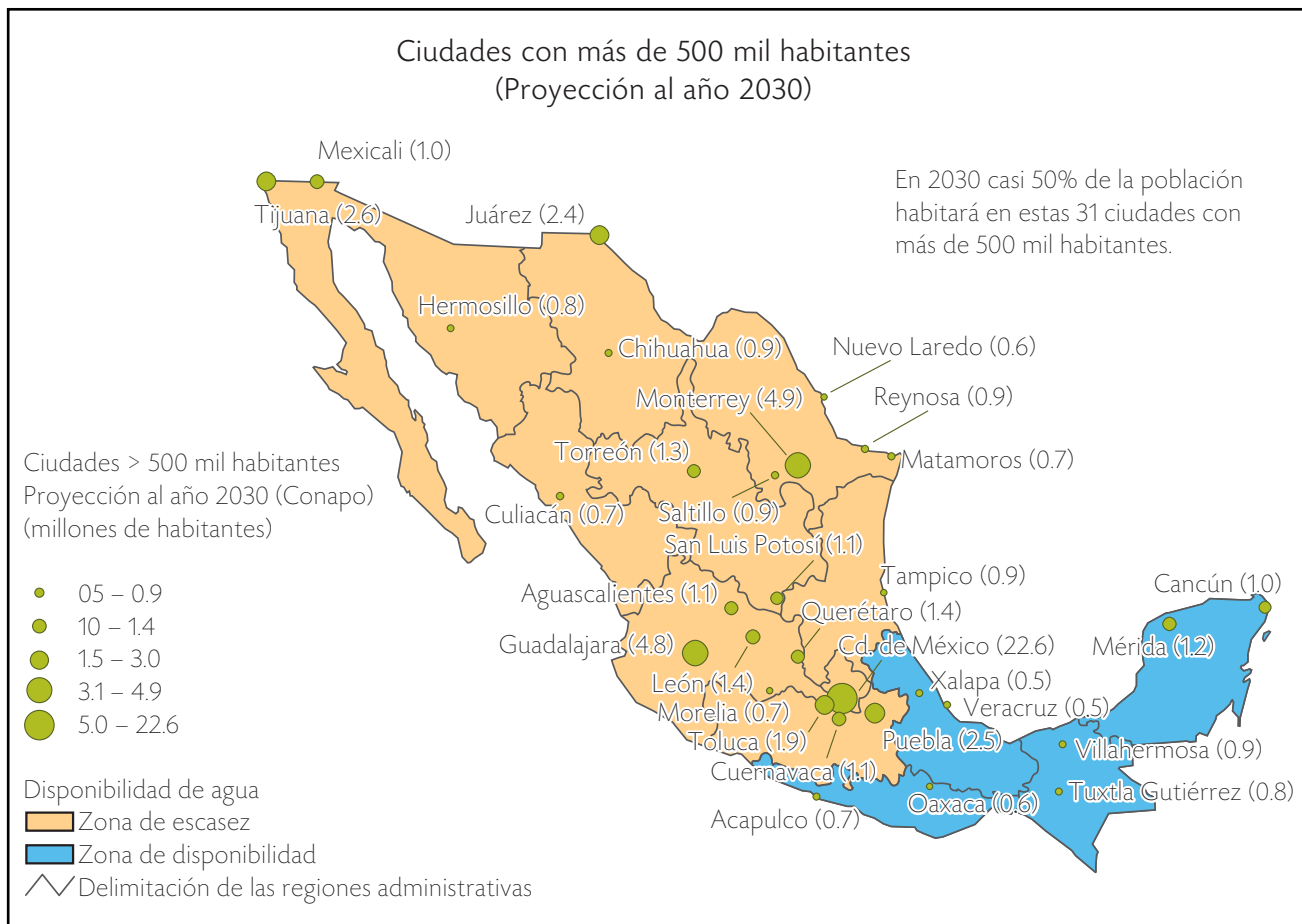


Figura 5. Ciudades con más de 500 mil habitantes. Fuente: CONAPO.

en las costas de Colima, Michoacán y Guerrero, y de 180 kilómetros en Chiapas. Queda limitada al Oriente por la Sierra Madre Occidental, las elevaciones del Eje Volcánico Mexicano, la Sierra Madre del Sur y por las montañas de Chiapas. A lo largo de esta franja existen vientos locales del Oeste con corrientes de aire húmedas que se desplazan hacia el continente durante la mitad del año, y corrientes secas hacia el mar en la otra mitad. Durante el verano las lluvias de barrera abastecen los mantos acuíferos costeros, cuyas recargas y disponibilidades de agua subterránea son altas, sobre todo en la parte sur de Chiapas, la parte más cercana al Ecuador y donde suceden recargas de 495 a 935 millones de metros cúbicos al año.

En la vertiente del Golfo el aire caliente proveniente del océano produce en verano llu-

vias abundantes que provocan abundancia de agua subterránea en los acuíferos costeros. El aire caliente que origina estas lluvias se eleva por el frente de la Sierra Madre Oriental y descarga agua en las partes serranas de Tlaxcala y Puebla. En esta última región los montos de recarga van de 70 a 160 millones de metros cúbicos anuales, y de 200 a 700 millones de metros cúbicos por año en la porción sur de Chiapas.

Distribución del agua subterránea en clima húmedo

La región de clima húmedo ocupa el sur del estado de Veracruz, Tabasco, Campeche, el norte de Chiapas y parte de la Península de Yucatán. En esta zona las precipitaciones más copiosas se registran en los declives de barlovento de la Sierra Madre Oriental, las sierras del norte de Oaxaca y del macizo central de Chiapas, y llega a sobrepasar 4 mil milímetros anuales. Además, los ciclones provenientes del Golfo pro-

vocan una gran aportación de lluvias que reabastecen a los embalses subterráneos. En esta región los volúmenes de recarga van de 172 a 2 mil 968 millones de metros cúbicos al año.

En la zonas de clima árido, muy árido y semiárido la disponibilidad de agua subterránea –entendida como la diferencia de la recarga y las descargas aprovechadas por la agricultura, uso municipal, industrial y lúdico– es deficitaria en casi todos los acuíferos estudiados y publicados por la Comisión Nacional del Agua. Sólo hay disponibilidad en las regiones semihúmedas y muy húmedas. En la Figura 4 se muestran los contrastes de valores de disponibilidad según el clima prevaleciente.

La disparidad en disponibilidad de agua subterránea entre el norte y el sur del territorio mexicano es ya en la actualidad un motivo de alarma nacional. Una proyección de distribución de población para el año 2030 indica que la mayor parte se alojará en la zona del territorio donde el agua subterránea será escasa. En la Figura 5 se muestran los resultados de esta proyección.

Mostrar y alertar a la sociedad sobre un porvenir con escasez de agua, para que tome conciencia de sus desastrosas consecuencias y participe en la preservación del recurso, es una tarea impostergable de los científicos mexicanos.



Bibliografía

Blanco M., G. y G. Ramírez Cervantes (1966), *La conservación del suelo y el agua en México*. México, Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, A.C.

Vivó, Jorge A. (1982), *Geografía física*, México, Herrero.

Pinna, L. (2000), *El clima*, Italia, Editex.

Clima, hoja IV, 5.1., Instituto de Geografía, UNAM

Páginas de internet recomendadas:

Comisión Nacional del agua: www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/directorio/default.aspx

www.Elbalero.gob.mx/explora/htm/atlas/relieve1.html

Héctor Luis Macías González es ingeniero geólogo por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), donde es profesor titular desde 1990. Su área de interés es la hidrogeología. Ha realizado numerosos trabajos de exploración y evaluación de aguas subterráneas para el sector público, como empresario y consultor independiente. Es académico titular de la Academia de Ingeniería, A. C.

maciaslh@hotmail.com

Rodolfo del Arenal Capetillo es investigador titular adscrito al Instituto de Geología de la UNAM, donde actualmente funge como Coordinador de Vinculación. Como parte del Proyecto Mayor de Zonas Áridas de la UNESCO, realizó estudios en las Universidades de Bordeaux y Montpellier (Francia), y en el *Bureau de Recherches Géologiques et Minières*. Su campo de estudio es la hidrogeología, y es coautor de la primera Carta Hidrogeológica publicada en México. Ha sido consultor de la Organización Mundial de la Salud en República Dominicana, Haití, Bolivia y República del Salvador, y ha realizado estudios hidrogeológicos en Nicaragua y Honduras. Durante diez años estuvo al frente del Comité Nacional Mexicano para el Decenio Hidrológico Internacional, y es autor de varios trabajos relacionados con su área.

delaren@geol-sun.igeolcu.unam.mx