

LOS PROBLEMAS GEOHIDROLOGICOS QUE PLANTEAN LAS ZONAS ARIDAS DE LA REPUBLICA MEXICANA

J. P. STRETTA ²

La gran extensión de las zonas áridas y semiáridas de México plantea problemas de diferenciación de grados de aridez en función de la pluviometría, de la temperatura, y sobre todo de la altitud.

Plantea igualmente cierto número de problemas geohidrológicos muy particulares, como consecuencia de la presencia de inmensas unidades estructurales de formación relativamente reciente que ocupa una gran superficie a elevada altitud dentro del conjunto de las regiones áridas del país.

Además, en el estudio geohidrológico general de todo un país, parece imposible separar el estudio de la repartición de las zonas áridas, de los problemas que presenta la influencia de la estructura geológica. Esta influencia es por lo menos de igual importancia que la de la precipitación, las características de la pluviosidad, o las consecuencias de la evaporación. En efecto, la litología y la estructura geológica condicionan siempre directamente el almacenamiento de las reservas acuíferas subterráneas en las zonas áridas mucho más que en las zonas templadas, y más aún cuando los fenómenos de aridez afectan a una gran extensión territorial.

Es por esto que presentamos aquí, por una parte, un ensayo de delimitación de la distribución de las zonas áridas de la República Mexicana según la fórmula climática del botánico Emberger (Universidad de Montpellier), y por otra, en función de la importancia de los afloramientos de terrenos eruptivos compactos o sedimentarios, algunos de los problemas generales que presenta la geohidrología del país.

(1) Original recibida en julio de 1961.

(2) Experto de la UNESCO en Geohidrología.

EXTENSION DE LAS ZONAS ARIDAS DE LA REPUBLICA MEXICANA

En una publicación reciente ³ demostramos que era indispensable asociar a todo estudio geohidrológico sistemático de un país, el estudio de la distribución de las zonas áridas, templadas y húmedas. En efecto, los problemas geohidrológicos a resolver son tanto más agudos cuanto mayor es el grado de aridez y más difíciles las condiciones de vida. Por otra parte, los métodos de prospección requieren tanto de las técnicas orientadas hacia la geofísica, la geoquímica y la geología estructural como de la simple hidrología clásica de los mantos acuíferos subterráneos.

A título de ejemplo, hemos presentado también ³ un mapa mostrando la extensión de las zonas áridas y semi-áridas de la República Mexicana (Esc. 1:3.500,000) establecido según la fórmula climática o cociente pluviométrico de Emberger, difundido ya por las numerosas publicaciones de este autor.

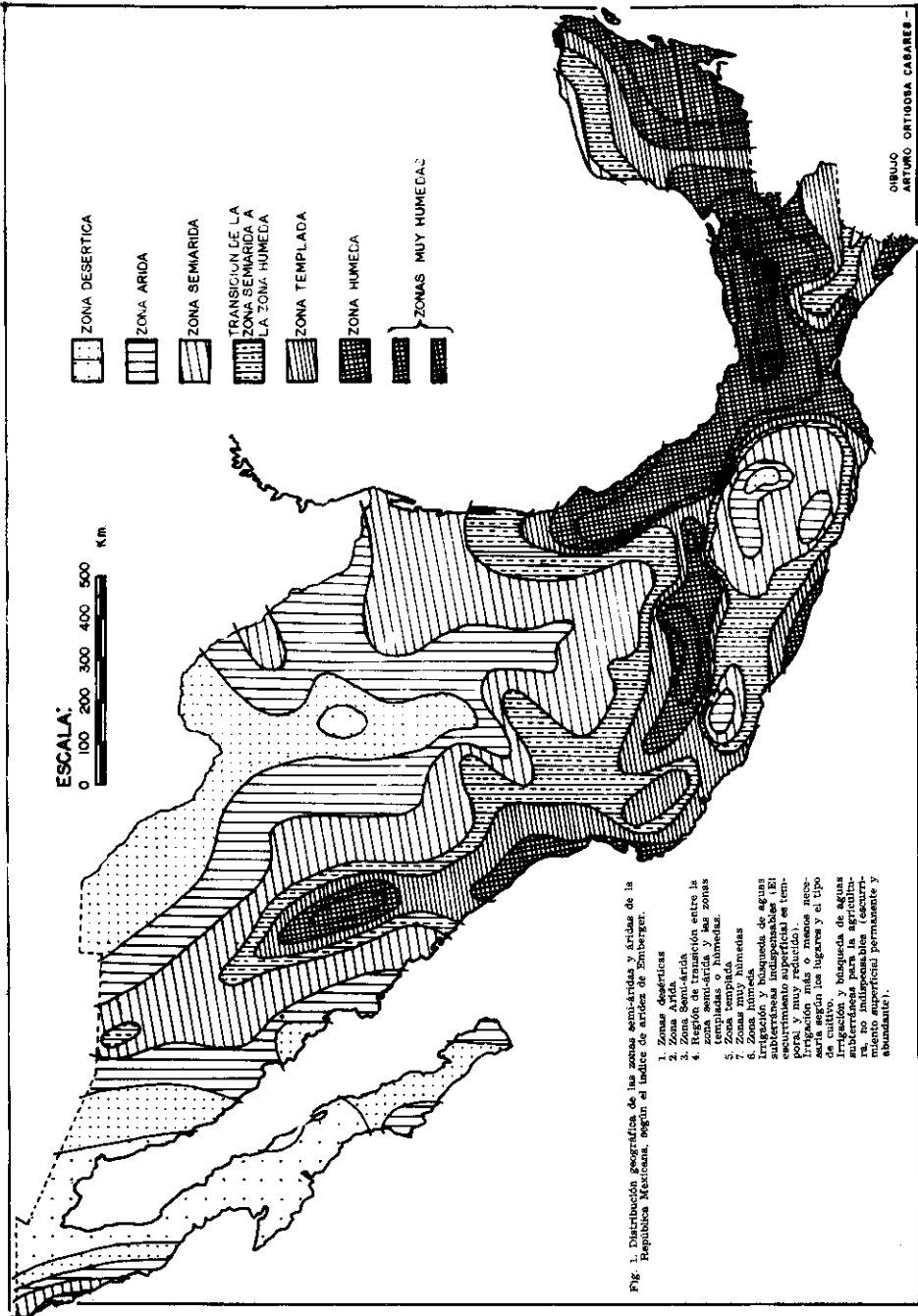
En dicho mapa (Fig. 1), puede verse que las provincias de la República donde el desarrollo agrícola está ligado a la irrigación ocupan una superficie considerable y que, en consecuencia, todo estudio de las aguas subterráneas puede adquirir una importancia primordial en dichas zonas y condicionar tanto el desarrollo económico como los estudios de hidrología superficial.

Debe recordarse que los Estados Unidos Mexicanos tienen una superficie de 1.970,000 kilómetros cuadrados, y se extienden entre los 14 y los 33° de latitud Norte. Sin embargo, las variaciones clásicas del clima en función de la latitud se encuentran aquí notablemente perturbadas por el relieve montañoso. En efecto, cierto número de problemas relativos a los escurrimientos subterráneos, principalmente en los grandes macizos calcáreos, presentan mayor complejidad por el hecho de que alrededor del 35% del país se encuentra por encima de la cuota de 1000 m. y el 14% (incluyendo toda la cuenca de México), por encima de los 2000 m. de altitud (Fig. 2).

Es, pues, normal, encontrar en la República Mexicana toda la gama de climas, desde el muy húmedo de tipo tropical (Estado de Tabasco), hasta el muy seco y desértico (Estado de Baja California).

Numerosos estudios anteriores sobre los fenómenos de aridez, y que emplean diversos métodos y fórmulas de climatólogos conocidos (Koppen, Thornthwaite, etc.), dan resultados sensiblemente idénticos, a condición de

(3) "Le Carte des zones arides comme document préliminaire a l'étude des eaux souterraines et l'établissement des cartes hydrogéologiques" XII e Ass. Gén. de l'UGGI.—A. I. H. S. N° 52, p. 33-39, Helsinki, Août 1960.



ESCALA:

0 100 200 300 400 500
K.M.

- ZONA DESERTICA
- ZONA ARIDA
- ZONA SEMIARIDA
- TRANSICIÓN DE LA ZONA SEMIARIDA A LA ZONA HUMEDA
- ZONA TEMPLADA
- ZONA HUMEDA
- ZONAS MUY HUMEDAS

Fig. 1. Distribución geográfica de las zonas semi-áridas y áridas de la República Mexicana, según el índice de Emberger.

1. Zonas desérticas
 2. Zona árida
 3. Zona semi-árida
 4. Región de transición entre la zona semi-árida y las zonas semi-húmedas.
 5. Zona templada
 6. Zonas muy húmedas
 7. Zonas húmedas
- Las zonas húmedas de aguas subterráneas indispensables (El escurecimiento superficial se intensifica en las zonas de irrigación árida o raras necesarias según los lugares y el tipo de cultivo.) Bloqueada de aguas subterráneas para la agricultura, no indispensables (oscurecimiento superficial permanente y abundante).

tener en cuenta los efectos de la altitud, a los que está estrechamente sometido al régimen de las lluvias.⁴

De allí se deduce que el 36% de la superficie de la República es francamente árido y a veces hasta desértico, y que hay que considerar además el 23% de esta superficie como semi-árido. Así pues, casi en el 60% de la superficie total del país no hay agricultura posible más que por la irrigación, y en consecuencia, la prospección de las aguas subterráneas constituye necesariamente una buena parte de los proyectos estudiados. Añadiremos que esta inmensa zona árida y semi-árida, que cubre en la República cerca de 1.200,000 km². corresponde bastante bien a la extensión de las altas mesetas interiores, excepto para el Golfo de California.

Pero esto no quiere decir que en el resto del país sea posible algún cultivo sin irrigación. También allí se presentan serios problemas de abastecimiento de agua potable, para usos industriales, y, sobre todo, agrícolas.

En efecto, algunos especialistas mexicanos (O. Benasinni - G. Martínez) consideran la llamada zona de transición y la zona templada, que representan en conjunto cerca del 40% de la superficie del país, como formando parte de una zona semi-árida intermedia que puede ser, según los años, moderadamente húmeda o seca.

Pero sólo un 17% del país es húmedo o muy húmedo todos los años y en todas las estaciones.

El clima no es el único responsable de la extensión de las zonas áridas; la latitud juega a su vez un papel importante, pues, como se ve en el mapa adjunto, la extensión de las zonas áridas crece en dirección de la frontera con Estados Unidos y más particularmente en el borde de los Estados de Texas, Nuevo México y California.

Paradójicamente, estas regiones áridas son, sin embargo, las más prósperas del país, añadiéndose allí la riqueza minera a la riqueza agrícola, debida esta última a la irrigación a partir de grandes presas y, en menor proporción, a la proveniente de las aguas subterráneas. Los cultivos del algodón y de diversas plantas alimenticias son las más comunes, principalmente en el Estado de Sonora, en el Golfo de California (Ilanura costera de Hermosillo), y en el de Coahuila ("Laguna" de Torreón, con irrigación a partir de las aguas subterráneas y del Río Nazas).

Por ejemplo, las obras de retención construidas a lo largo de los flancos de la Sierra Madre Occidental que dominan las más grandes extensiones áridas de la República, representan una reserva útil de agua de más de 15,000 millones de metros cúbicos, que se utilizan para la irrigación de alrededor de 600,000 hectáreas de tierras agrícolas.

(4) E. M. Fournier d'Albe. Recherches sur la zone aride au Mexique. Bull. de la Zone Aride. N° 8, UNESCO, Juin, 1960.

LOS PROBLEMAS GEOHIDROLOGICOS

Más del 80% de las aguas que se explotan en la República provienen de recursos superficiales; el resto, de las aguas subterráneas.

Existen numerosos sectores donde la sub-explotación de esta riqueza es evidente, principalmente en el centro del país, mientras que en otros lugares la sobre-explotación comienza a plantear serios problemas, sobre todo en Torreón y en Hermosillo.

Fuera de estos casos precisos, donde es necesario invertir sumas importantes para estudios geohidrológicos y de cálculos de balance hidráulico, existe en la República cierto número de problemas-tipo planteados por la búsqueda de nuevos recursos de aguas subterráneas, cualquiera que sea el género y el grado de aridez de la región considerada.

Se trata principalmente:

- De problemas generales ligados a la gran elevación del país y por tanto al carácter casi exclusivamente montañoso de las zonas potencialmente explotables, y a la disparidad entre los recursos hidráulicos de toda la zona norte, arriba del Trópico de Cáncer, y los del sur-este.
- De problemas planteados por la extraordinaria abundancia de afloramientos de terrenos eruptivos de litología y de estructura muy variadas.
- De problemas de zonas montañosas con predominio de calizas en bordes y a un nivel inferior al de la altiplanicie central.
- **Los problemas geohidrológicos concernientes al relieve y a la disparidad de los recursos hidráulicos.**

Estos no son exclusivos de la República Mexicana, pero presentan serios problemas de economía agrícola en el país.

Según los cálculos más recientes⁵ la superficie actualmente irrigada es aproximadamente de 3.200,000 hectáreas, de las cuales alrededor de un 25% se riega con aguas subterráneas.

Esta superficie, ya considerable de por sí, representa alrededor del 30% de la superficie total cultivada, pero corresponde apenas al 1.6% de la superficie total del país.

De todos los países en que existe una zona árida y semi-árida muy extensa, México parece ser uno de aquellos en que la orografía reduce más las posibilidades de explotación agrícola en gran escala, y de irrigación.

(5) Oscar Benassini.—Los recursos hidráulicos, elemento de planeación, Ingeniería Hidráulica, Vol. XIV, N° 4, México, Dic. 1960.

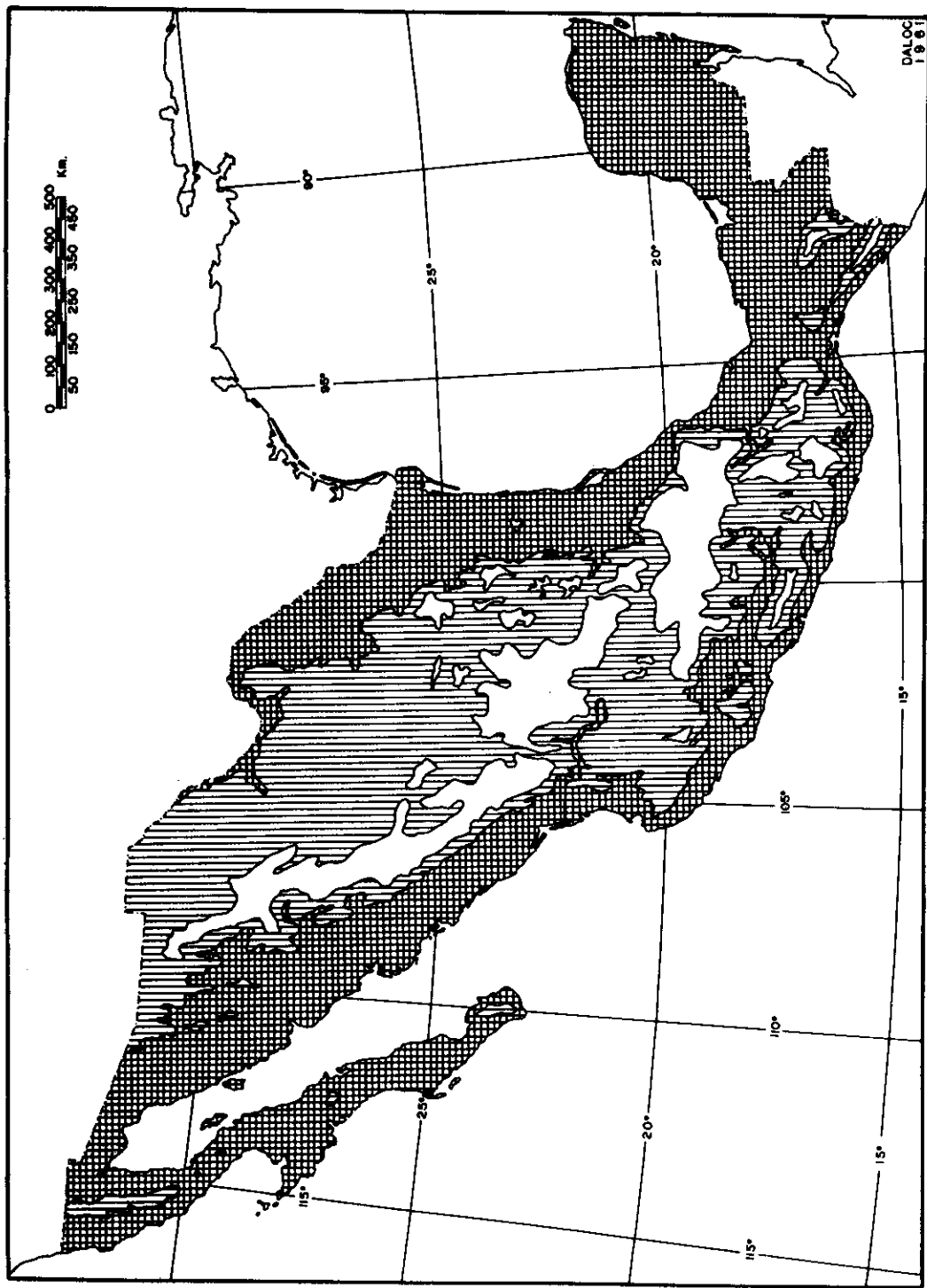


Fig. 2. Delimitación de las regiones situadas bajo la cota 1000 (cuadrícula fina), bajo la cota 2000 (líneas verticales) y arriba de la cota 2000 (en blanco).

DALOC
1961

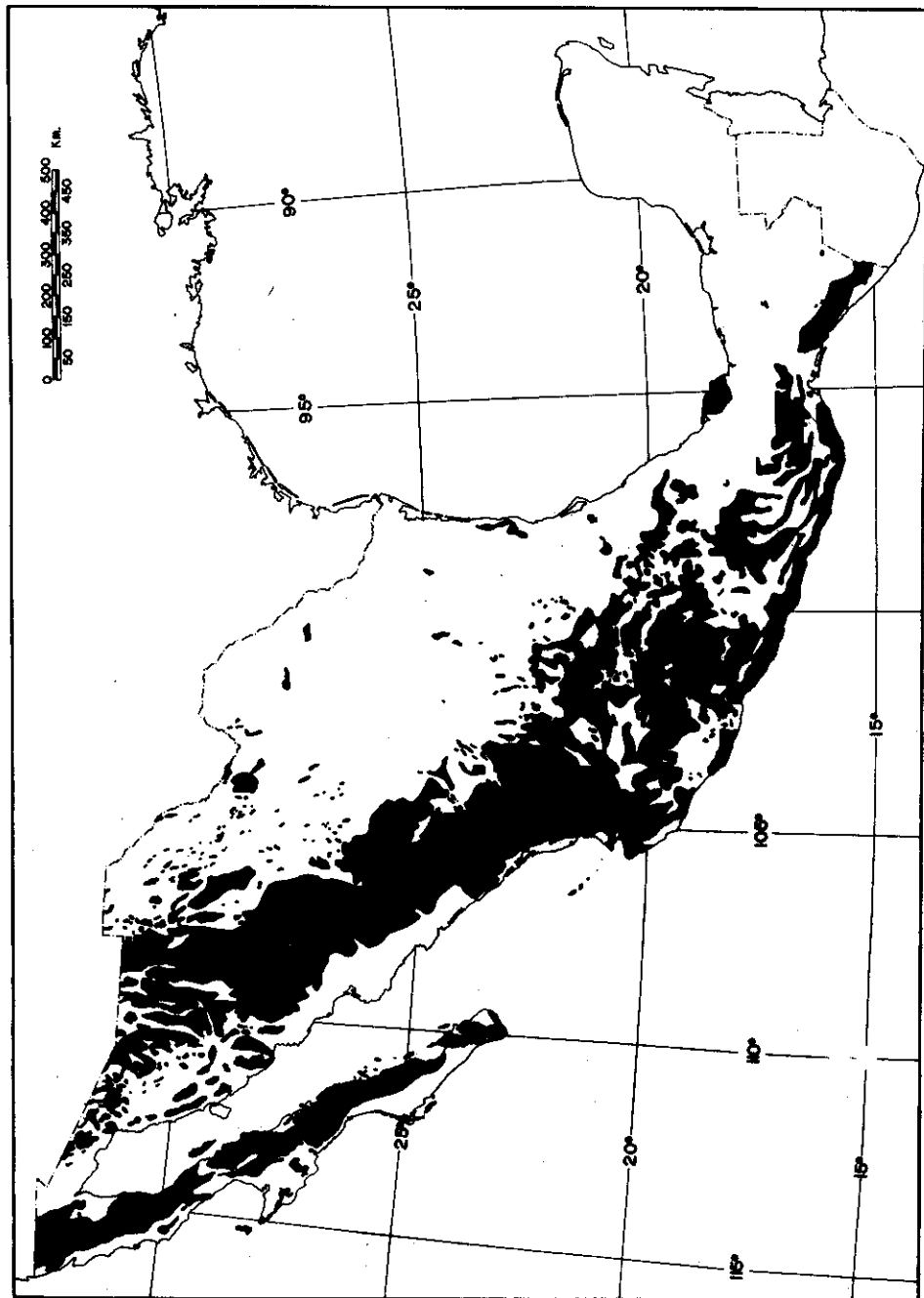


Fig. 3. Distribución de los afloramientos de rocas volcánicas y eruptivas de diversos tipos en México, incluyendo las formaciones antiguas o metamórficas consideradas como impermeables.

En la India, en China y aun en Italia, donde la aridez impone la irrigación sobre grandes superficies, del 4 al 7% de territorio nacional se riega con aguas superficiales o subterráneas.

En los Estados Unidos, 90% de los 14 millones de hectáreas irrigadas se encuentran en los 17 Estados del Oeste o del Suroeste, situados en su mayor parte dentro de la zona árida.

En este país, como en México, cerca del 20% del consumo total de agua proviene de mantos acuíferos subterráneos, pero en éste último la extracción anual de aguas del subsuelo se estima en 13,000 millones de metros cúbicos por año, o sea un promedio de 4412 m³/seg.

En comparación con estas cifras, los recursos de aguas superficiales siguen siendo considerables, pero localizados sobre una superficie relativamente pequeña en regiones donde su utilización para fines agrícolas es siempre costosa y difícil.

El escurrimiento total anual se estima en cerca de 360,000 millones de metros cúbicos, 60% de los cuales proviene de 7 ríos principales. Estos sólo afectan a unos 450,000 kilómetros cuadrados de cuencas hidroeléctricas, o sea solamente 23% de la superficie del país y principalmente en las zonas más húmedas y de clima tropical.

En cuanto a las zonas más áridas, sobre todo en el norte y en el noroeste, los ríos no proporcionan más que un 8% del escurrimiento superficial total, o sea alrededor de 30,000 millones de metros cúbicos.

Se subraya así, no solamente la importancia de esta desproporción, sino también la del interés que debe ponerse tanto en la investigación y el estudio de la infiltración, como en los de las estructuras geológicas favorables allí donde los recursos superficiales hacen más falta.

— Los problemas geohidrológicos en los terrenos eruptivos.

El mapa adjunto (Fig. 3) muestra la extremada abundancia de afloramientos de terrenos eruptivos en México, los cuales interesan no solamente la estructura de las zonas de alta-montaña, que juegan el papel tradicional de "chateau d'eau", sino también el subsuelo de las regiones propicias para la agricultura.

Se sabe que las erupciones terciarias y cretácicas constituyen el acontecimiento geológico que más ha modificado, hasta el Cuaternario Reciente, la topografía de las regiones central y occidental de la República Mexicana. Inmensas masas eruptivas, constituidas en su mayoría por riolitas y andesitas, así como por grandes espesores de "brechas" volcánicas, de tobas y cenizas, han sobrepuesto a una topografía antigua más de 1500 metros de espesor de eyecciones diversas.

Las andesitas y las riolitas, con numerosas variantes petrográficas, afloran principalmente en la Sierra Madre Occidental, en prolongación de las provincias volcánicas occidentales de los Estados Unidos y del Canadá.

En cuanto al eje volcánico, constituye los puntos culminantes del país

(Popocatepetl - 5,500 m., y Pico de Orizaba 5,750 m.), y se sitúa siguiendo una línea E-W entre los paralelos 18 y 20° N.

Este conjunto, que pertenece casi enteramente al Terciario Superior, está constituido en su mayor parte por basaltos. Por el contrario, las grandes acumulaciones de lavas cuaternarias a lo largo de ese mismo eje son tanto andesíticas como basálticas. Se trata de la zona de fracturas "Clarión", bien conocida en la República entre Colima y Puebla, pasando por la cuenca de México.

Dada la inmensa extensión y la variedad litológica de estos afloramientos, no es posible certificar que tal o tal tipo de roca eruptiva deba considerarse como compacto o poroso, con fisuración de masa o de intersticios secundarios.

El verdadero problema geohidrológico reside, sin embargo, en la extraordinaria abundancia, cualquiera que sea el tipo de erupción y de derrame, de cineritas, tobas riolíticas o andesíticas y de brechas volcánicas con estructuras muy variadas.

En una publicación muy reciente, F. Mooser y M. Maldonado Koerdell⁶ señalan igualmente la abundancia de sedimentos aéreos volcánicos, residuos de enormes nubes ardientes que prácticamente habrían rellenado las principales cuencas situadas en los bordes del eje volcánico (serían bastante frecuentes los depósitos de nubes ardientes con potencias de 500 a 800 m.).

La porosidad de estos terrenos de tipo cinerítico es muy variable, pero sin embargo, las cenizas y brechas pueden considerarse como el terreno acuífero por excelencia de la mayor parte de la vertiente mexicana del Pacífico, principalmente entre la frontera de California y la región de Acapulco, incluido el eje volcánico central.

Los estudios geohidrológicos sobre el abastecimiento de agua para la ciudad de San Luis Potosí y los estudios para emplazamiento de presas en el Estado de Michoacán efectuados por el autor en 1959 y 1960, han demostrado la existencia frecuente de la alternancia de depósitos volcánicos compactos (andesitas - riolitas - latitas) y de capas cineríticas de textura muy arenosa.

Estas contienen frecuentemente mantos acuíferos en carga, que se difunden en los aluviones recientes de las llanuras elevadas. Es el caso del manto artesiano de la cuenca de San Luis Potosí, cuya explotación para usos agrícolas, ya antigua, se ha reemplazado actualmente con un gasto total cercano a los 10 m.³/seg.

(6) F. Mooser y M. Maldonado Koerdell.—Tectónica pre-contemporánea a lo largo de la costa mexicana del Océano Pacífico. *Geo. Intern.* Vol. I, N° 1, Enero 1961, México.

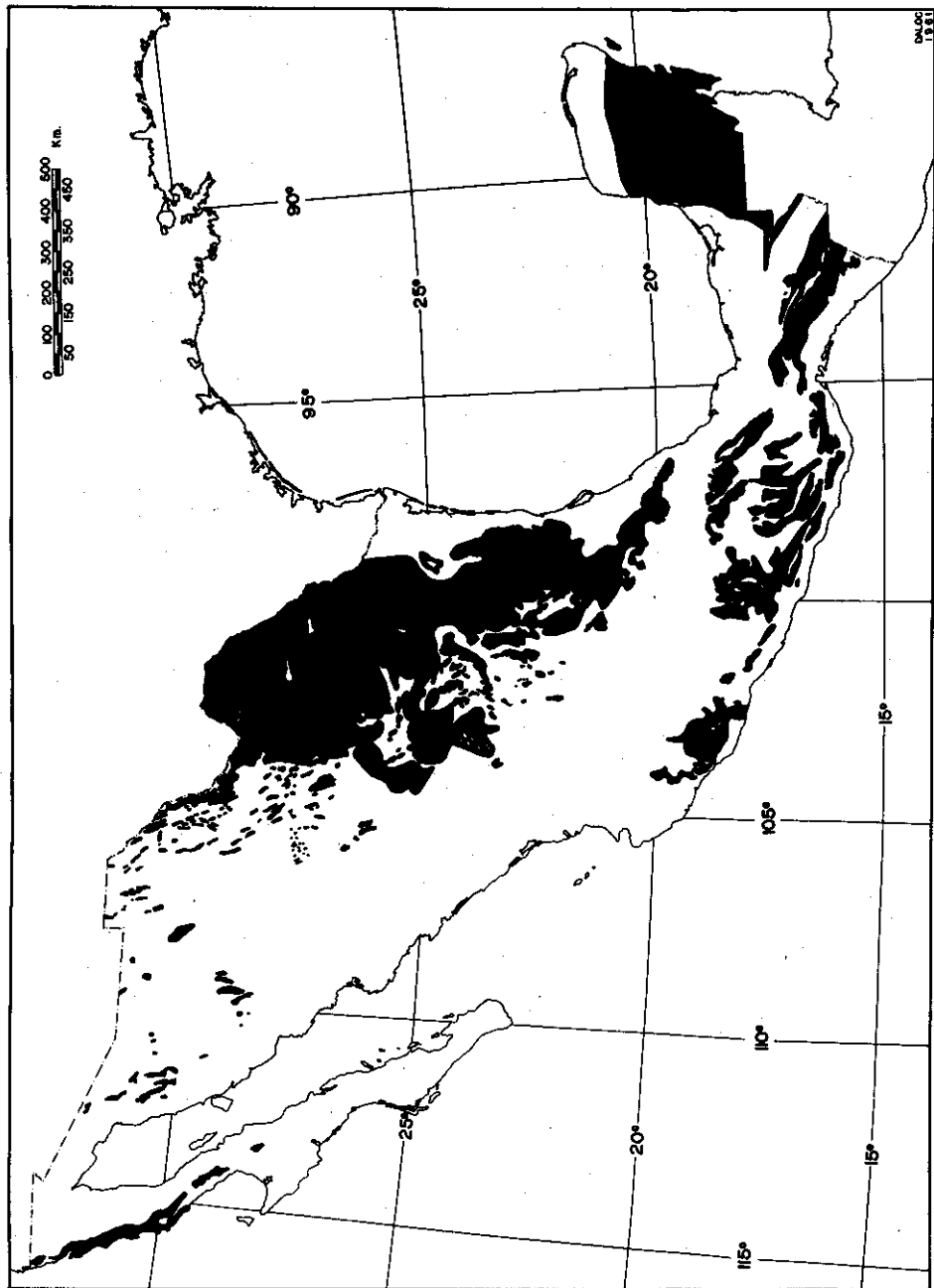


Fig. 4. Distribución de los afloramientos de rocas sedimentarias de diversos tipos, comprendiendo principalmente calizas, y consideradas como permeables.

En la cuenca de México, el problema es idéntico, dadas las necesidades de agua, siempre renovadas, de una capital de cerca de 5 millones de habitantes, donde las reservas hidráulicas subterráneas provenientes de terrenos eruptivos de tipo cinerítico se han explotado ampliamente desde hace muchos años.

Aquí el problema se complica por el hecho de que las erupciones del Cuaternario han cerrado antiguos valles con numerosas corrientes basálticas compactas. Estas, por consiguiente, han favorecido una enorme acumulación de depósitos fluviales clásicos a los cuales se han incorporado cineritas y depósitos de nubes ardientes.

Los antiguos lagos de México han visto así reducirse considerablemente su nivel de agua, tanto por los derrumbes volcánicos como por el rellenamiento normal debido al escurrimiento. Actualmente, la extracción de cerca de 9 m³/seg. de agua del subsuelo de la ciudad misma, a través de 3 250 pozos particulares o municipales, entre 10 y 300 m. de profundidad, es la causa del espectacular hundimiento general de los suelos. Este se calcula entre 15 y 30 cm. por año, desde hace una treintena de años.

Esto demuestra que el estudio de los recursos acuíferos de los terrenos volcánicos debe completarse con el más complejo y más delicado de los efectos de este volcanismo en la modificación del modelado antiguo de los valles y el de la determinación de la posible presencia de rocas sedimentarias permeables bajo los derrames recientes.

En nuestra opinión, sólo el estudio geoquímico de las aguas permite determinar si los mantos acuíferos, de cineritas por ejemplo, pueden provenir de infiltraciones a partir de afloramientos calcáreos o areniscas que constituyen, por supuesto, mejores receptáculos de aguas de infiltración que las riolitas o las andesitas. Esto no es válido más que en los límites de los derrames eruptivos, fuera del eje volcánico y principalmente a lo largo de los bordes Este de la altiplanicie. Diversos ensayos de comparación de análisis químicos de agua por el procedimiento de diagramas semi-logarítmicos de Schoeller-Berkaloff, nos han proporcionado ya indicaciones útiles

— El problema de los terrenos sedimentarios.

Si se trata de formaciones aluviales de constitución reciente, una de las características sobresalientes de la República Mexicana radica precisamente en la ausencia de grandes llanuras marítimas o interiores con mantos freáticos abundantes, que podrían completar el sistema de irrigación por medio de grandes presas. Esto se debe al relieve particular del país, del que se sabe que la configuración general está regida por la presencia de las Sierras Madres Oriental y Occidental que limitan las vertientes del Atlántico y del Pacífico, encerrando las altas mesetas interiores.

El régimen pluvial, por otra parte, es casi siempre de tipo torrencial con frecuentes variaciones anuales debidas a la ausencia del efecto regulador de nevadas.

La red hidrográfica se caracteriza por lo tanto, por escurrimientos temporales, así que el complemento necesario debe proporcionarlo el estudio de las aguas subterráneas. Es precisamente en esta región donde los afloramientos de rocas sedimentarias compactas son los más importantes.

Se trata sobre todo de grandes espesores de calizas del Cretácico Inferior y Superior en los Estados de Coahuila, Nuevo León, Chihuahua, Tamaulipas y San Luis Potosí. Los macizos calcáreos de gran extensión, tal como existen en la región de Monterrey, por ejemplo, no dominan grandes regiones agrícolas, y sus recursos en agua son más bien difícilmente utilizables para fines de irrigación. Por último, los niveles hidrostáticos son a menudo muy bajos y plantean serios problemas de explotación.

Sobre la altiplanicie, las estructuras son más complejas, generalmente pequeñas y sepultadas, y hay que resolver por separado cada caso particular exactamente como se estudiarían las estructuras de domos anticlinales o de zonas falladas para la búsqueda de hidrocarburos (problema de las aguas artesianas de Saltillo, Cuatro-Ciénegas, Paredón, en el Estado de Coahuila).

El hecho de que un relieve de origen reciente, aun en este conjunto calcáreo, provoque un reajuste constante de los perfiles de equilibrio con frecuentes fenómenos de capturas superficiales, elimina a menudo la presencia de "Karsts" fósiles susceptibles de constituir reservas subterráneas importantes.

Esto se observa frecuentemente en las pequeñas estructuras calcáreas de la región norte (zona árida de Saltillo - Torreón), y al sur de México (zona semi-árida de Iguala).

El fenómeno inverso existe en la Península de Yucatán. Toda esta región no es más que un inmenso afloramiento de calizas kársticas de pendiente suave y de morfología uniforme, del Eoceno y del Mioceno Superior⁷. Todos los recursos en agua subterránea provienen necesariamente de estas calizas, donde las aguas dulces se sobreponen a las aguas de infiltración marina. Existe allí un karst fósil de más de 200 m. de potencia, y tan bien constituido, que el sistema hidrográfico superficial se ha vuelto inexistente y el escurrimiento, en consecuencia, absolutamente nulo. Esta península, cuya altitud media es del orden de 50 - 60 m., con algunos puntos culminantes a 300 m., presenta un caso bastante raro de afloramientos calcáreos, cuyo mayor espesor se encuentra bajo el nivel

(7) J. Butterlin y F. Bonnet.—Données nouvelles sur le géologie de la partie mexicaine de la presqu'île de Yucatan, G. R. Ac. des Sciences, Paris, 3 Oct. 1960.

del mar que la rodea. Todo pozo de una profundidad superior a 60 - 80 m. donde el bombeo no ha sido controlado, puede provocar un abatimiento local que favorecería bien pronto la invasión de las aguas salobres. En Mérida, el nivel hidrostático medio de las calizas se encuentra en la cota +2, y la potencia total del manto freático dulce se estima en 70 m.⁸

Recordemos, en fin, que este problema tan particular de las aguas subterráneas en regiones calcáreas afecta, en Yucatán, a una superficie del orden de 100,000 km.²

Abundan otros ejemplos concernientes a la dificultad de explotar económicamente el agua de terrenos sedimentarios distintos de los aluviones, pero de manera general, el principal problema reside a menudo en el hecho de que tales terrenos, notablemente favorables para las investigaciones geohidrológicas, no dominan, ni con mucho, las zonas de posible utilización agrícola.

(8) H. Lesser Jones y M. Anaya.—Abastecimiento del agua potable y eliminación de aguas negras en Mérida, Yuc. Ing. Hidr. en Méx., N° 2, Vol. XIV, Junio, 1960.