

## IMPORTANCIA DEL CONTROL GEOLOGICO EN LA BUSQUEDA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

JORGE GARCÍA CALDERÓN

Investigador del Instituto de Geología, U.N.A.M.

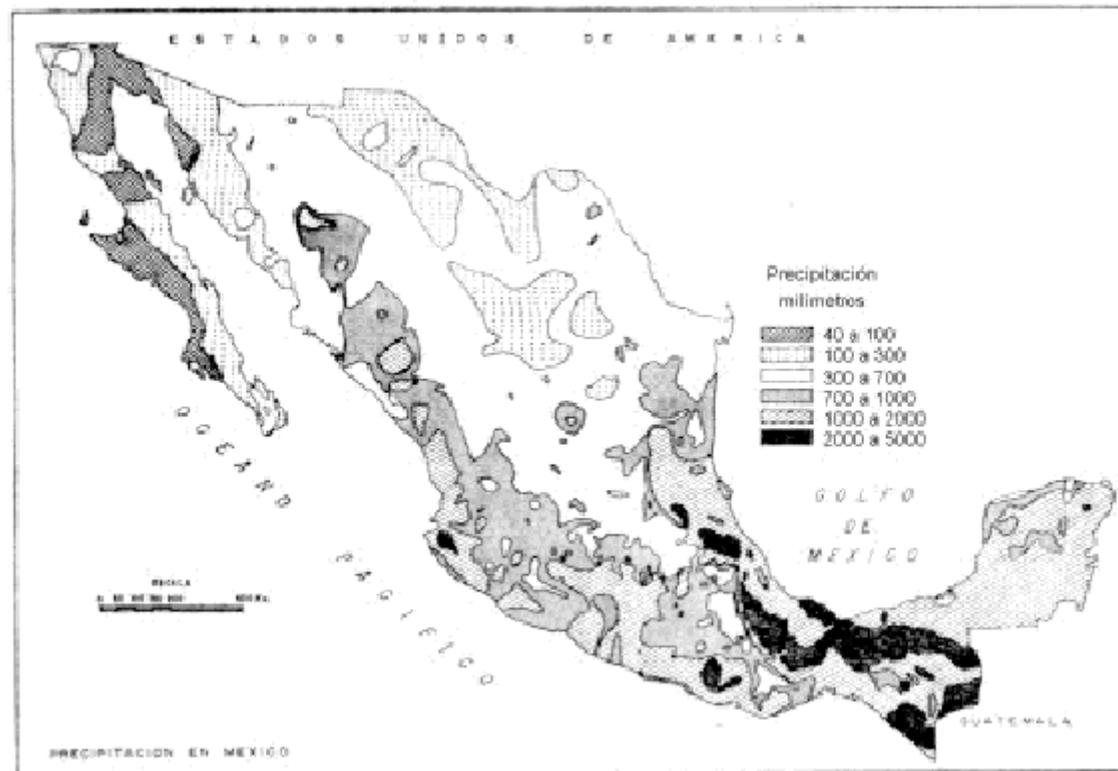
### GENERALIDADES

Sobre el problema del agua se ha hablado mucho y se sigue haciéndolo, pero todavía es poco lo que se ha hecho para tratar de resolverlo racionalmente.

En México el problema del agua es sin ninguna duda uno de los más importantes para su desarrollo económico y social. Al estudiar el mapa hidrográfico y el climatológico del Territorio Nacional, se verá que la distribución de las corrientes de agua están agrupadas en determinadas áreas, quedando la mayoría de la superficie sin un adecuado abastecimiento de este vital elemento. Asimismo, la distribución irregular de la precipitación pluvial acentúa sus características climáticas.

El país está comprendido entre los 15° a los 33° de latitud norte y de los 87° a 117° de longitud oeste del Meridiano de Greenwich, estando bisectado por el Trópico de Cáncer, lo que da como resultado que aproximadamente la mitad de la superficie se encuentra en la zona templada y la otra mitad se localice en la zona intertropical.

La distribución de la precipitación pluvial y por ende la localización de las regiones áridas sobre la superficie nacional, tienen como factores fundamentales la circulación general de la atmósfera y las peculiaridades del relieve continental. A nuestras latitudes, la corriente aérea dominante, en contraste con la de las latitudes superiores, tiene una marcada componente oriental; la forman masas aéreas procedentes del Golfo de México, de la parte tropical del Atlántico, del Mar Caribe y de la región tropical del Océano Pacífico, penetrando a nuestro país por el sur, por el sureste y por el este. Los datos pluviométricos permiten comprobar una disminución acentuada de la precipitación pluvial en una dirección general de sureste a noroeste; las sierras próximas a la costa hacia los rumbos de penetración de los vientos, determinan un marcado contraste en la cantidad de lluvia que corresponde a uno y otro lado de las montañas. Las mayores precipitaciones pluviales ocurren sobre la vertiente de barlovento, y en todos los casos, cuando del lado de sotavento se presenta un valle profundo a una hondonada, el ressecamiento del aire ocasionado por su descenso, produce áreas de gran aridez. Por esta razón, aparte de la extensa región árida del norte, que es consecuencia de este sistema general de vientos y orografía, en el centro y el sur del país también existen dispersas porciones que sufren de acentuada deficiencia pluvial.



En las costas del Golfo de México y en las de la parte noroeste del país se presentan fuertes lluvias orográficas, pero las mayores precipitaciones anuales tienen lugar en la parte sur del Golfo de México y en las proximidades del volcán de Tacaná donde se han medido hasta 5 000 mm anuales.

En general, la distribución de la precipitación, dada en porcentaje del área del país, es la siguiente:

<i>Variaciónmm/ año</i>	<i>Area del país%</i>
40—100	4
100—300	17
300—700	40
700—1000	15
1000—2000	21
2000—5000	3

De lo anterior se deduce que el 61% de la superficie del país recibe menos de 700 mm de lluvia anual. En la parte noroeste la precipitación anual es menor de 100 mm. La lluvia media anual en todo el país es de 704 mm, produciéndose el 80% de esta durante los meses de mayo a septiembre.

El clima de México está definido por una serie de factores tales como su posición geográfica, los efectos orográficos de sus cadenas montañosas costeras y sus tormentas marítimas. En el mundo, las zonas desérticas están situadas entre los paralelos 15° a 35° en ambos hemisferios, por lo que estando el Territorio Mexicano dentro de estos límites geográficos su clima es principalmente árido o semiárido. En general la distribución climática en el país es la siguiente:

*Zona desértica*, se encuentra situada en los litorales del Golfo de California y comprende el 4% de la superficie total.

*Zona árida*, comprende la Baja California, Sonora y gran parte de la Altiplanicie próxima a los Estados Unidos y representa aproximadamente un 34% de la superficie total. *Zona semiárida*, se encuentra diseminada irregularmente en el altiplano, desde la frontera de Estados Unidos hasta Oaxaca y también incluye parte de la Península de Yucatán, su extensión aproximada es del 33%.

*Zona de transición*, se encuentra distribuida irregularmente por toda la República y comprende el 12%.

*Zona semihúmeda*, se halla distribuida desde Tampico hasta los límites con Guatemala, rodeando zonas más húmedas, así como también en las Sierras de Chihuahua y Durango y en Puebla y Michoacán; comprenden el 10% de la superficie.

*Zona húmeda y muy húmeda*, comprenden las áreas situadas en la parte sur de la Costa del Golfo de México y en la porción que colinda con la República de Guatemala.

Teniendo la superficie de México las condiciones climáticas que se han señalado anteriormente, es obvia la importancia que tiene para su desarrollo el abastecimiento del agua para sus diferentes usos, especialmente en aquellas regiones donde se acentúa su escasez, debido a su poca precipitación y a la carencia de manantiales o de vías pluviales. Al llevar a cabo una investigación sobre la distribución del ciclo hidrológico en estas regiones, se ve que la mayor parte de la precipitación se evapora, una parte muy pequeña escurre y la mayoría de las veces durante una corta longitud, y la otra parte se infiltra alimentando los depósitos subterráneos; por consiguiente, la única forma de subsanar las necesidades de agua para sus diferentes usos, en estas regiones, es aprovechando racionalmente las aguas subterráneas existentes.

Por lo anterior, se ve claramente la necesidad de incrementar la investigación de las aguas subterráneas, siendo este el principal objetivo que persigue el presente estudio, tratando de establecer una metodología para la solución de estos problemas.

Una investigación hidrogeológica en su primera etapa que comprende desde los estudios preliminares hasta la localización para la perforación de pozos u otra obra de extracción, deberá seguir la siguiente secuencia:



- 1.—Topografía.
- 2.—Geología general del área.
- 3.—Climatología.
- 4.—Hidrología.
- 5.—Hidrogeología.

*Topografía.*—Las condiciones topográficas más importantes incluyen la extensión superficial y los niveles relativos de las cuencas de alimentación con respecto a las áreas en que los acuíferos son susceptibles de explotación.

*La Geología general del área* que se pretende estudiar, constituye el marco general del problema y proporciona parte de los elementos que se van a evaluar, tales como rocas, estructura, etc., y comprende las siguientes disciplinas principalmente:

- Petrografía.
- Estratigrafía.
- Geología Estructural
- Geomorfología.

*Hidrología.*—Siendo esta la ciencia que estudia la presencia del agua sobre la sierra y sus relaciones con ella, se base fundamentalmente en el concepto del ciclo hidrológico. Por consiguiente, con base en datos climatológicos, los conceptos de precipitación, evapotranspiración, escurrimiento e infiltración, son la base para determinar la potencialidad de los acuíferos.

*Hidrogeología.*—Considerada como la Hidrología subterránea, se refiere al comportamiento de las aguas subterráneas en relación con el medio geológico, es decir, relaciona las condiciones geológicas con las hidráulicas.

Para ilustrar la secuencia de trabajo anteriormente establecida, se llevó a cabo un estudio en la región de El Cardito, Zacatecas. Este trabajo se efectuó en una zona del país donde las condiciones son completamente adversas en lo referente a la información adecuada, derivada fundamentalmente de la falta de estaciones meteorológicas y en el caso de que existan, por lo general no cuenta con el personal y el equipo adecuados. Se escogió esta zona precisamente para hacer resaltar las carencias de que se adolece y proponer soluciones adecuadas.

#### LOCALIZACIÓN

El área se encuentra situada entre los 24°00' y 24°30' de latitud norte y tramo Zacatecas-Río Grande y luego siguiendo por la carretera, que pasando entre los 101°20' y 102°00' longitud oeste del meridiano de Greenwich. Comprende parte de los Municipios de Concepción del Oro y Mazapil del Estado de Zacatecas. Tiene una superficie aproximada de 3 800 km<sup>2</sup>.

#### VÍAS DE COMUNICACIÓN

El área se encuentra cruzada de norte a sur en su porción oriental, por la carretera Federal No. 54, en el tramo comprendido entre Zacatecas y Concepción del Oro. A partir de esta carretera existe una serie de caminos de tierra en todas direcciones, siendo los principales los que unen San Tiburcio, San Francisco, El Cardito y La Gruñidora, con Nuevo Mercurio y Camacho; estas dos últimas localidades se encuentran fuera de esta zona en estudio. Otro camino importante es el que une el Centro Caprino, localizado a la altura del km 196 de la carretera número 54, con La Partida, Tanquecillos, El Rosario, La Presita y El Cardito. Los innumerables caminos de tierra existentes son transitables especialmente en la época de secas y por vehículos de rodada alta.

El acceso a la región puede hacerse por dos direcciones principales, una de ellas sería aprovechando la Carretera No. 54 y la otra, la No. 49, por Nieves, llega a Camacho y de esta última localidad se sigue hacia el oriente, se pasa por Nuevo Mercurio y finalmente se llega a La Gruñidora ya en el área de estudio. También se pueden aprovechar varios campos de aterrizaje, tales como el que está en el Centro Caprino o el de Camacho.

#### FISIOGRAFÍA

De acuerdo con la clasificación de las provincias fisiográficas de la República Mexicana, publicada por Raisz (1959), la región El Cardito, está situada en la subprovincia denominada Mesa Central y su porción oriental colinda con la subprovincia llamada Sierras Bajas, ambas forman parte de la provincia fisiográfica llamada Sierra Madre Oriental.

Los rasgos geomorfológicos de la región están representados por una serie de sierras alargadas, con una orientación general ligeramente hacia el noroeste, lo cual se acentúa en su porción septentrional. Los contornos de estas sierras destacan sobre las extensas llanuras aluviales, especialmente en las partes central y sur de la zona.

Los sedimentos marinos que forman la mayor parte de estas montañas, se presentan fuertemente plegados y la intensa erosión que ha actuado sobre de ellos ha contribuido considerablemente al modelado de las actuales formas geomorfológicas, dando origen a una región que presenta un relieve general que varía entre 1000 y 1200 m. sobre el nivel del mar y con alturas máximas de 2 800 m.s.n.m. en la Sierra de Santa Rita y de 2 200 a 2 300 m, en las Sierras de La Gruñidora, del Toro y de La Centella. Los cerros están erosionados en forma característica, redondeados y con pendientes suaves. En su base se han formado abanicos aluviales, continuándose con las llanuras aluviales, extensas y poco inclinadas. Algunas de las sierras se encuentran cortadas por cañones que se han desarrollado en fracturas y fallas.

Hacia el sur, el relieve topográfico disminuye originando una serie de sierras de menor elevación, tales como las que se presentan a inmediaciones de Rancho Nuevo.

En general, dentro de esta área, se presentan dos formas fisiológicas bien definidas; hacia el norte y teniendo como límite una línea imaginaria que pasa por La Gruñidora, El Cardito, El Berrendo y La Pardita, las sierras son más altas y sus relieves y contornos más acentuados, mientras que hacia el sur, las sierras tienen elevaciones menores de contornos más suaves y de área menor.

Las sierras o grupos de ellas, se encuentran separadas por amplios valles, los cuales también aumentan en magnitud hacia el sur.

Toda la región se encuentra intensamente surcada por innumerables arroyos intermitentes, los cuales forman sistemas de drenaje de tipo dendrítico estas corrientes fluyen hacia los valles, en los cuales desaparecen por evaporación e infiltración y solamente cuando ocurren tormentas violentas, con gran precipitación, se presenta el flujo superficial del agua. El sistema hidrográfico es endorréico. En general, se presentan unas series de cuencas de tamaños muy diversos, algunas de ellas real o virtualmente comunicadas entre sí, ya sea en la superficie o bien por vía subterránea. En las partes más bajas de estas cuencas se forman lagunas intermitentes o zonas de inundación.

Los fenómenos kársticos se presentan muy aisladamente y solamente se manifiestan por la presencia de algunas cavernas de disolución. Las calizas densas de las Formaciones Zuloaga y Cupido, que por lo general afloran en las partes altas de las sierras, son las que más han resistido a la erosión.

Toda la región se encuentra situada en la cuenca hidrográfica interior denominada de Concepción del Oro.



EXPLICACION



MAPA HIDROGEOLOGICO  
 EL CARDITO, ZAC.  
 Autor:  
 JORGE GARCIA CALDERON  
 MAYO DE 1974

<i>Estación</i>	<i>Coordenadas</i>	<i>Altura s.n.m.</i>	<i>Período observación</i>	<i>Temp. media anual °C</i>	<i>Precip. promedio anual (mm)</i>	<i>Coef. Lang.</i>	<i>Clima</i>
San Tiburcio	24°08'101°29'	2020 m	T —P 17	—	309.5		
Concepción del Oro	24°37'101°25'	2543 m	T 8P 8	16.9	370.3	21.9	BS <sub>0</sub> km'' (e)
Mazapil	24°39'101°34'	2250 m	T 5P 17	17.2	580.0	33.7	Cw <sub>0</sub> (x')b(e)
Cedros	24°41'101°47'	2355 m	T —P 12	—	340.2	—	
San Rafael	24°37'101°59'	1706 m	T —P 16	—	392.3		
Camacho	24°26'101°21'	1664 m	T —P 19	—	250.5		
Pacheco	24°01'102°26'	1886 m	T —P 15	—	320.3		
Cañitas	23°35'102°44'	2009 m	T 4P 19	14.5	380.0	26.2	BS <sub>1</sub> kw'(e)
Guadalupe de las Corrientes	23°43'102°28'	1950 m	T 19P 19	15.7	320.6		BS <sub>0</sub> km(w)(e)

#### CLIMA

Dentro del área estudiada solamente hay una estación meteorológica, que es la de San Tiburcio, pero en la periferia existen varias que son las que han servido para determinar el clima. La mayoría de dichas estaciones no están equipadas convenientemente, por lo que, en lo general, solamente se tienen datos de precipitación.

De las observaciones efectuadas en las estaciones meteorológicas y de observaciones de campo, se pueden inferir la existencia de microclimas, derivados de lo cambiante de los factores que los determinan.

Se ha usado el sistema de clasificación climática de Köppen (1948, p. 172) modificado por García (1964) para adaptarlo a las condiciones particulares de la República Mexicana. De acuerdo con lo anterior, el clima predominante en esta región, es semiárido templado y en algunas partes, templado húmedo.

Los datos que se presentan en la Tabla 1, han sido obtenidos en el Instituto de Geografía de la U.N.A.M.

Tabla 2

Cálculo de la Precipitación en la Región de El Cardito, Zacatecas con los promedio obtenidos durante 1960-1970

(por el método de las isoyetas)

	(areas km <sup>2</sup> )	<i>Precipitación anual entre isoyetas</i>	(mm) promedio	<i>Area por precipitación (X10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>)</i>
1	126.00	500-450	475	59850.00
2	171.54	450-400	425	72904.50
3	1398.60	400-350	375	524475.00

4	2103.86	350-300	325	683754.50
<i>Total</i>				<i>1340984.00</i>

$$P_m = \frac{1340984.00}{3800.000} = 352.89 \text{ mm anuales}$$

$$V_{\text{anual}} = 1340984.00 \times 10^3 \text{ m}^3$$

Cálculo de la evapotranspiración de la región de el Cardito, Zac., con datos del período 1960-70 usando la fórmula de Turc.

$$P_m = 352.89$$

$$T_m = 17^\circ \text{ C.}$$

$$L = 300+495+254.65= 970.65$$

$$E_b = \frac{352.89}{\sqrt{0.95 + \left(\frac{352.89}{970.65}\right)^2}} = \frac{352.89}{\sqrt{15.3 + 0.132}}$$

$$E_t = \frac{352.89}{\sqrt{15.43}} = \frac{352.89}{3.90} = 94 \text{ mm}$$

$$E_t = 94 \text{ mm / m}^2$$

## GEOLOGÍA

En la región en estudio afloran formaciones pertenecientes posiblemente a edades desde el Paleozoico hasta el Reciente, presentándose completa la secuencia cretácica. Están constituidas litológicamente, por rocas sedimentarias de origen marino principalmente y algunos depósitos continentales, así también afloran, aunque en forma muy subordinada, rocas metamórficas e ígneas extrusivas e intrusivas, entre las primeras se tienen grauvacas, filitas y algunos pequeños cuerpos de metamorfismo de contacto. Entre las ígneas afloran pequeños intrusivos granodioríticos y algunos de tipo riolítico, y en mayor cantidad se presentan pequeños manchones de derrames basálticos, especialmente en la porción sureste del área. Los amplios valles y las pendientes inferiores de las montañas están cubiertas por una capa de aluvión de espesor muy variable.

La tectónica de esta área es muy complicada, como en general lo es toda esta región; está regida por una gran falla que con una orientación NO-SE la cruza en su totalidad, presentándose además dos series de fallas de menores dimensiones, con orientaciones generales NO-SE y SO-NE.

El área planificada incluye una serie de pliegues asimétricos en su mayoría, con una orientación general hacia el noroeste, aunque en la parte septentrional tienden a cambiar este rumbo por el este-oeste. Se exceptúa de la orientación general, la estructura denominada La Sierrita, la cual tiene una orientación hacia el noroeste.

## HIDROGEOLOGÍA

La hidrogeología se define como la ciencia que estudia las aguas subterráneas, relacionando el medio geológico con las características hidrológicas de las aguas.

*Características de las unidades hidrogeológicas.* Una unidad hidrogeológica es una subdivisión de las rocas de la corteza terrestre basada en sus características de porosidad y permeabilidad. Por consiguiente, su determinación está en función de estas propiedades físicas.

Para determinar las propiedades hidrogeológicas de las rocas se siguen varios métodos:

1. —Método fotointerpretativo.
2. —Método de reconocimiento de campo.
3. —Métodos de laboratorio.
4. —Métodos Geofísicos.
5. —Sensores remotos.

## UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Basándose en los criterios de interpretación hidrogeológica enunciados en el párrafo anterior, en el área de estudio se determinaron las siguientes unidades hidrogeológicas. Debe hacerse la aclaración de que todas las conclusiones obtenidas al respecto, son consecuencia, fundamentalmente, de observaciones, de campo.

*Unidad A.* Rocas ígneas y metamórficas. Esta unidad incluye a los basaltos que aparecen en forma de pequeños conos en las inmediaciones de San Tiburcio o como derrames al noroeste de Rancho Nuevo, las granodioritas del Valle de San Feliciano y las riolitas del Cañón del Potrero, ambas en la Sierra de Santa Rita. Estas rocas se presentan fracturadas e intemperizadas. Su espesor es pequeño, del orden de los 30 m.

*Unidad B.* Está constituida por una secuencia de rocas que integran las Formaciones Taray y Nazas y están formadas de abajo hacia arriba, por gravaca con interestratificaciones de firta, luego capas delgadas de lutita, riolita, toba arenisca y conglomerado, afloran en pequeñas áreas en la Sierra de la Candelaria y en la del Toro. Tiene un espesor aproximado de 700 m, pero es muy irregular.

*Unidad C.* Está formada por la Caliza Zuloaga que litológicamente es una secuencia de caliza microcristalina, en capas de 50 cm. a 5 m. de espesor, tiene muchas pequeñas fracturas rellenas de calcita, estilolitos y lapiez. Aflora esta caliza en la cima de los cerros más elevados, especialmente en la Sierra de la Candelaria. Tiene un espesor de 600 m aproximadamente.

*Unidad D.* Litológicamente está formada por las rocas de las Formaciones La Caja Taraises que en esta área están constituidas por una alternancia, en la primera, de limolita y limolita calcárea, de 10 a 30 cm. de espesor, intercaladas con calizas cristalinas y oolíticas en capas de 20 a 40 cm. de espesor: hacia arriba aparecen las calizas arcillosas de la segunda formación en capas de 10 a 30 cm, con intercalaciones de capas de limolita de 2 a 5 cm. de espesor. Aflora principalmente en las Sierras de la Candelaria, El Barroso, La Centella, de El Junco y Santa Rita. Tiene un espesor variable entre 70 y 90 m.

*Unidad E.* Está constituida por la Formación Cupido y es una de las unidades más importantes hidrogeológicamente, teniéndose amplia experiencia sobre de ella en otras áreas, especialmente en las de Monterrey y Saltillo, al noreste y al norte de la presente área respectivamente; sin embargo en esta región no ha sido probada todavía.

Litológicamente está formada por caliza criptocristalina con nódulos y lentes de pedernal, en capas de hasta 6 m. de espesor. En el área presenta muy buenos y extensos afloramientos, especialmente en las Sierras de La Gruñidora, La Candelaria, La Sierrita, El Junco, La Centella, Santa Rita y en las elevaciones que se encuentran en la parte sureste del área estudiada. Tiene un espesor de 500 m.

*Unidad F.* Las Formaciones La Peña y Cuesta del Cura son las que constituyen esta unidad hidrogeológica. Litológicamente están formadas, de abajo hacia arriba, por caliza en capas de 0.40 a 1 m., interestratificadas con arcillas y limolitas calcáreas; hacia arriba aumenta el espesor de las calizas y se presentan alternando con caliza arcillosa y lutita; la caliza contiene abundantes lentes o nódulos de pedernal. La caliza de la parte superior presenta estratificación ondulante. Estas rocas afloran prácticamente en todas las sierras de la región. Su espesor total es aproximadamente de 450 m.

*Unidad G.* Esta unidad comprende a las Formaciones Indidura y Caracol, las cuales litológicamente están formadas, de abajo hacia arriba, por caliza lajosa de 20 a 40 cm. de espesor, alternando con caliza de 5 a 15 cm., arcillosa; sigue limolita en capas muy delgadas de 3 cm. de espesor, luego aparece la arenisca de grano fino y lutita interestratificada. La erosión diferencial es muy notable en estas rocas, sobresaliendo las capas de arenisca. Esta unidad se presenta en afloramientos muy escasos y aislados, encontrándose generalmente al pie de las sierras cubiertos por sedimentos recientes. En estas condiciones aflora en pequeñas lomas situadas al occidente y al sur de la población de la Gruñidora, al norte de Rancho Nuevo y Tanquecillos y en el flanco nororiental de la Sierra de Santa Rita, así como también en las Sierras de la Centella y de Potrerillos. Su espesor es muy variable y en esta área no fue posible determinarlo; sin embargo, por correlación en áreas vecinas (García Calderón, 1968) se puede suponer un espesor del orden de los 600 m.

*Unidad H.* Esta unidad está formada por la Formación Ahuichila, constituida por una secuencia de areniscas bien cementadas de grano medio, en capas de 5 a 15 cm. de espesor; hacia arriba se presenta un conglomerado de cantos calcáreos de 2 a 5 cm. de diámetro. Aflora formando los Cerritos de Jesús a la altura del km. 200 de la Carretera Zacatecas - Concepción del Oro, en unas pequeñas elevaciones al noroeste de Rancho Nuevo y en la parte norte de la Sierra La Gruñidora. Tiene un espesor en los Cerritos de Jesús de 40 m.

*Unidad I.* Está formada por la Grava Peribáñez que consiste en gravas sin clasificar, de subredondeadas a subangulosas, el tamaño de los fragmentos varía entre 15 y 20 cm. principalmente a veces se presenta pobremente cementada por material arcilloso o caliche; los fragmentos son principalmente calcáreos. Aflora en varias localidades, principalmente en los flancos poniente y oriente de la Sierra del Toro, en unas pequeñas lomas situadas entre la Sierrita de Tanquecillos y la Sierra de Santa Rita. El espesor promedio de esta unidad es de 80 m., pero en general es muy variable.

*Unidad J.* Esta unidad está formada por los aluviones que afloran ampliamente en toda el área. De acuerdo con su composición litológica se agrupan en tres tipos: primero, depósitos de pie de monte, que forman los abanicos aluviales y que están constituidos principalmente por gravas y en menor cantidad por arena, limo y arcilla. El segundo tipo de aluvión está formado por arena, limo y arcilla con cementante calcáreo, formándose en este grandes capas de caliche. El tercer tipo está formado por clásticos semejantes al anterior, pero con alto contenido de yeso. Este último tipo de aluvión se presenta especialmente en el borde oriental del área.

El espesor de este aluvión es muy variable, ya que en las inmediaciones de La Gruñidora tiene un espesor de 1 m. y en otros lugares se han medido 100 m.

*Características hidrogeológicas de las unidades definidas.* Como se ha descrito anteriormente, la mayor parte de las rocas que se presentan en la región, están constituidas por aluviones que forman aproximadamente el 60% del área; calizas en una amplia variedad y lutitas, siendo las rocas ígneas y metamórficas las más escasas. Las características físicas de estas rocas han sido determinadas megascópicamente. De acuerdo con estas apreciaciones generales se ha establecido la siguiente escala arbitraria de permeabilidad e infiltración.

	Permeable
Escala de permeabilidad	semi-permeable
	impermeable
	Alta
Escala de infiltración	deficiente o reducida
	nula

Se hace constar que las características de las rocas y de los suelos como son la permeabilidad y la infiltración, deberán ser determinadas con el auxilio de un laboratorio equipado convenientemente, pero en este caso, el autor tuvo necesidad de adoptar criterios generales, debido a no haber podido contar con el equipo indispensable.

De acuerdo con la capacidad de una roca para contener y transmitir agua, se hace la siguiente clasificación:

*Acuífero:* capa o cuerpo de roca suficientemente permeable que es capaz de contener y de transmitir agua. Algunos autores agregan, "en cantidad que pueda usarse para alimentar un manantial o un pozo". (Heath, R. 1968).

*Acuicludo:* cuerpos rocosos de muy baja permeabilidad que no son capaces de transmitir agua, pero que pueden almacenarla.

Muchas rocas son claramente acuíferas o acuicludos, sin embargo, existe un grupo intermedio que no es claramente ni uno ni otro. Este grupo ha sido denominado acuitardo, pero por razones prácticas este término es poco usado.

*Acuífugo:* una roca que ni almacena ni transmite agua. Los términos acuífero y acuicludo son relativos, pues rocas que podrían considerarse acuíferos en un área, pueden llamarse acuicludos en otra.

Con base en los conceptos anteriores, se determinan las características hidrológicas de las unidades definidas:

Unidad A. (Rocas ígneas y metamórficas)

Semi impermeables.

Reducida capacidad de infiltración.

Forma acuicludos.

Unidad B. (Interestratificaciones de filita, con grauvaca, lutita, riolita, toba, arenisca, conglomerado).

Impermeable.

Nula capacidad de infiltración.

Acuicludo.

Unidad C. (Caliza microcristalina, fracturada)

Permeable.

Alta capacidad de infiltración.

Acuíferos libres y confinados.

Unidad D (Caliza alternando con limolita y caliza arcillosa).

Impermeable.

Reducida o nula capacidad de infiltración.

Acuicludos.

Unidad E. (Caliza cripto cristalina, con nódulos de pedernal, fracturadas).

Permeable.

Alta capacidad de infiltración.

Acuíferos libres y confinados.

Unidad F. (Caliza con capas de limolita y caliza arcillosa).

Semi-impermeable.

Reducida capacidad de infiltración.

Acuicludo.

Unidad G (Caliza lajosa, limolita y arenisca).

Impermeable.

Reducida o nula capacidad de infiltración.

Acuicludo.

Unidad H. (Arenisca y conglomerado).

Impermeable.

Reducida o nula capacidad de infiltración.

Acuicludo o acuífugo.

Unidad I. (Gravas).

Permeable.

Alta capacidad de infiltración.

Acuífero libre.

Unidad J. (Gravas, arena y arcilla en lentes).

Permeable.

Alta capacidad de infiltración.

Acuíferos libres.

*Funcionamiento hidrogeológico de las unidades definidas.* El área estudiada se divide en dos zonas hidrológicas e hidrogeológicas principales: la primera se encuentra en la porción norte a partir del parteaguas que se localiza en la Sierra de la Gruñidora, de la Candelaria y de la Centella y la segunda comprende la parte sur de toda el área a partir del mismo parteaguas. En este caso particular parece ser que coinciden ambas zonas, tanto la hidrológica como la hidrogeológica.

El sistema de flujo de las aguas subterráneas de poca profundidad en estas zonas, se compara con el sistema ideal descrito por Hubbert (1940), en el cual los componentes principales del sistema están constituidos por la siguiente secuencia: zona de recarga situada en los flancos de las elevaciones topográficas, zona de flujo lateral y zona de descarga que puede coincidir con la costa o el mar, o como en este caso, con las depresiones de los valles. Los límites del sistema son el parteaguas natural del área, el nivel freático, la superficie superior y la zona de rocas impermeables o cualquier otro límite que impida el flujo en las partes bajas de todo el sistema.

*Unidad A.* Los afloramientos constituidos por rocas ígneas y metamórficas son de poca magnitud en el área y en general están muy aislados unos de otros por lo que no se puede considerar continuidad en todos ellos; sin embargo, por las características propias de este tipo de rocas, se puede clasificar como semi-impermeables y de reducida capacidad de infiltración. En el área no tienen importancia hidrogeológica.

*Unidad B.* Los afloramientos representativos de esta unidad están agrupados en la parte noroccidental y son de poca extensión en el área. Por sus características litológicas no tiene importancia hidrogeológica, pero si permite que el agua escurra sobre de ellos y ésta alcance a los aluviones.

*Unidad C.* Esta unidad formada por potentes capas de calizas fracturadas, en algunas partes constituye una unidad hidrogeológica importante. Presenta amplios afloramientos en la cima de las elevaciones topográficas, especialmente en las Sierras de la Centella y de Santa Rita, constituyendo una roca muy importante desde el punto de vista de la recarga de las aguas. El movimiento de éstas es en su mayoría, hacia el sur y el oeste, exceptuando una pequeña parte que drena hacia el norte. Esta unidad es capaz de constituir muy buenos acuíferos, tanto libres como confinados.

*Unidad D.* Debido a su alto contenido de limolitas y de calizas arcillosas, esta unidad no tiene ninguna importancia desde el punto de vista hidrogeológico. Además su espesor es muy reducido.

*Unidad E.* Con base en experiencias obtenidas en otras áreas en condiciones semejantes, y dadas sus características litológicas, esta unidad es posiblemente la más importante en esta región. Tiene muy buenos y amplios afloramientos los cuales proporcionan considerables áreas de recarga. El movimiento general de las aguas en la parte norte de la Sierra de la Gruñidora es hacia el noroeste y hacia el sureste. En la parte media de la misma sierra el movimiento es al oriente y al poniente a partir del parteaguas. En la Sierra de la Candelaria es hacia el norte y en la del Toro sigue una dirección general hacia el sur. En las demás sierras localizadas en la parte central del área, el drenaje varía del norte al sur. En la Sierra de Santa Rita también sigue esas mismas direcciones a partir del parteaguas general. Esta unidad puede formar acuíferos confinados principalmente.

*Unidad F.* Esta unidad aflora abundantemente en toda la región, pero debido principalmente a su contenido de lutitas y limolitas, tiene poca importancia desde el punto de vista hidrogeológico considerándose que tiene poca permeabilidad y reducida capacidad de infiltración sin embargo, en algunas localidades se presenta muy fracturada, lo cual cambia considerablemente sus características desde ese punto de vista. El movimiento general de las aguas en esta unidad, en caso de contenerla, también es muy variable, pero se pueden considerar dos direcciones predominantes, hacia el norte y hacia el sur. Puede formar acuícludos.

*Unidad G.* Esta unidad tiene poca extensión en el área y además contiene varios miembros arcillosos por lo que se considera que no tiene importancia hidrogeológica en esta localidad.

*Unidad H.* Esta unidad aflora en pocas localidades y en extensiones muy pequeñas. Debido a que su cementante es calcáreo y arcilloso se le considera una reducida o nula capacidad de infiltración. Forma acuícludos o acuífugos.

*Unidad I.* Aflora en pocas localidades y es de pequeñas dimensiones. Debido a sus características litológicas presenta bastante permeabilidad y alta capacidad de infiltración, por lo que en el caso de estar sobreyaciendo a rocas impermeables podrá formar acuíferos libres de alguna importancia.

*Unidad J.* Esta unidad tiene una extensión considerable en el área. Su composición litológica es muy variable e irregular, debido a que está formada por clásticos de muy diversas dimensiones y a que los cuerpos o capas que la forman, presentan secuencias muy diferentes de una localidad a otra. Su espesor es muy variable, desde un metro hasta 100 m. aproximadamente, conteniendo grava, arena, limo y arcilla, pero sin obedecer a ningún orden determinado. En algunas partes tiene alta capacidad de infiltración y mucha permeabilidad, pero en otras presenta unas capas en la superficie, en forma de costras de carbonatos y sulfatos, las cuales reducen su permeabilidad. Pueden formar acuíferos libres pero de muy poca capacidad de almacenamiento y debido a su alto contenido de sales, las aguas que contienen son en su mayoría de muy mala calidad, no sólo para el uso doméstico sino también para los cultivos.

El movimiento general que siguen las aguas contenidas en esta unidad es, en su mayoría, hacia el sur y al suroeste y una pequeña parte es hacia el norte.

Las direcciones generales de todas las aguas en la región de El Cardito se ha determinado tomando en consideración las características hidrológicas señaladas por el parteaguas principal y por las condiciones estructurales; sin embargo, el autor considera que cuando se trate de resolver problemas locales en el área estudiada, deberán efectuarse trabajos complementarios de mayor detalle.

## AGUAS SUBTERRÁNEAS

En la región de El Cardito se han perforado aproximadamente 30 pozos o norias, a profundidades comprendidas entre 6 y 110 m. y con diámetros muy variables. El objeto de estas perforaciones ha sido principalmente, obtener agua para usos domésticos y para abrevaderos; en algunos pocos casos también se ha tratado de obtener agua para usos agrícolas, pero los resultados conseguidos no han sido satisfactorios, debido principalmente a la limitada cantidad de agua conseguida.

Todas estas obras han sido localizadas en los aluviones, donde generalmente se encuentra agua a poca profundidad, pero en cantidades muy pequeñas y en la mayoría de las veces, de mala calidad.

En la localidad denominada La Gruñidora brotan tres manantiales aparentemente de la Formación Caracol, la que en esta área se presenta muy fracturada; sin embargo, es más factible que esta agua provenga de los aluviones, los cuales tienen una gran amplitud lateral aunque son de poco espesor. El caudal de cada uno de estos manantiales es muy pequeño.

Los pozos y norias fueron perforados sin ningún control durante su ejecución, además de que posteriormente no se aforaron como es indispensable. Esto hace prácticamente imposible llevar a cabo una evaluación de su capacidad. Los únicos pozos que se han perforado apegándose más a la técnica han sido los de El Crucero, La Pardita, El Berrendo, La Grulla y La Presita, sin embargo, no se tienen los datos relacionados con sus aforos. De los análisis químicos de las aguas se deduce que la mayoría de ellas son de muy mala calidad, sin embargo, aceptando como potables las que tienen hasta 1 gr/litro de residuo total; las de Jazminal 3, Canderalia, El Cardito, La Presita, Tanquecillos 1, Tanquecillos 2, San Francisco, El Berrendo, Rancho Nuevo, San José Carbonerías 2, La Pardita y La Cigüeña, son aguas que se pueden considerar como potables.

## CONCLUSIONES

1. —El área de recarga principal está constituida por los aluviones y en menor grado por las calizas de la unidad C y E (Caliza Zuloaga y Caliza Cupido).
2. —El proceso dominante es el de infiltración y el de evaporación, existiendo muy poco escurrimiento superficial.
3. —El movimiento general de las aguas es hacia el sur y al poniente aunque parece ser que existe una barrera que controla la migración del agua hacia el poniente a la altura del poblado La Gruñidora, debido a la presencia de la Unidad G (Formación Caracol y Formación Indidura), aflorando en algunos lugares y sepultada a poca profundidad en otros.
4. —Es imposible efectuar una cuantificación real de las posibilidades de las aguas subterráneas en esta región debido a las causas siguientes:
  - a) No existe suficiente número de estaciones meteorológicas y las pocas que existen no están equipadas convenientemente, así como que su localización obedeció más a razones de comodidad que a la conveniencia hidrológica.
  - b) Los pozos o norias perforadas hasta la fecha, lo han sido sin obedecer a ningún planteamiento general desde el punto de vista hidrológico, sino solamente para tratar de resolver problemas muy locales.
  - c) De todas estas perforaciones no se ha llevado un control adecuado y son muy pocos los datos que se pueden obtener de ellos; es indispensable conocer la columna geológica atravesada, la localización de los acuíferos en el caso de que existan, en qué tipo de roca están, dimensiones del orificio, profundidad total, profundidad a que se encuentran los niveles estáticos y dinámicos, etcétera.
  - d) No se tiene ninguna información relacionado con los aforos de los pozos o norias y su comportamiento hidráulico derivado de él.
5. —Los aluviones contienen agua en su mayoría, pero de acuerdo con los datos obtenidos ésta es de mala calidad, se encuentra muy cargada de sales y los caudales que se obtienen son pequeños. Esto se debe principalmente a que su composición litológica es muy diversa ya que están formados por clásticos de diferentes dimensiones, en su mayoría de constitución calcárea ya que forman lentes entrelazados de arenas, limos y arcillas.
6. —Las calizas no han sido todavía probadas. Las de las unidades C y E parecen tener posibilidades, sobre todo si se considera las experiencias que se han obtenido en otras áreas, por lo que convendría hacer algunas perforaciones de exploración, especialmente en las Sierras de Santa Rita y de la Centella.
7. —De los análisis químicos de las aguas obtenidas en los pozos, norias y manantiales se puede deducir que han circulado por rocas carbonatadas principalmente, lo que explica su alto contenido de sales. Asimismo se observa una concentración de estas que se incrementa de las sierras hacia los valles.
8. —La tectónica del área es también bastante compleja y esta tiene un interés muy especial desde el punto de vista de la circulación de las aguas subterráneas, pero ésta debe ser resuelta regionalmente.

## RECOMENDACIONES

1. —Los gobiernos de los Estados, en este caso el de Zacatecas y las Dependencias Federales correspondientes, deberán levantar un inventario completo de todas las obras hidráulicas de este tipo que existan (pozos, norias, manantiales, etc.). En este inventario se debe incluir todos los datos propiamente hidráulicos de las obras y los

relacionados con sus dimensiones y características. Llevar un control efectivo cuando se ejecuten, con el objeto de asegurarse que se hacen de acuerdo con un programa previamente establecido y que se vaya recabando toda la información derivada de la obra en cuestión.

El contar con toda esta información unida a la hidrológica general, permitirá hacer evaluaciones hidrogeológicas en tiempo mínimo y a bajo costo y se verá, además la conveniencia de hacer otras obras o de cómo aprovechar mejor las existentes.

2. —Establecer nuevas estaciones meteorológicas y equipar adecuadamente a las que ya existen. En el área de El Cardito se recomienda poner estaciones en los siguientes lugares: al norte de Tanque de Piedras en la Sierra de la Gruñidora, en Calabazal, en el Rosario, en algún lugar de la Sierra del Junco y en Rancho Nuevo. Estas estaciones deberán estar dotadas del siguiente equipo mínimos pluviómetro, termómetro, anemómetro, evaporímetro tanque de evaporación, etc.

Cada una de las estaciones deberán estar atendidas por dos personas, previamente entrenadas, las cuales podrán turnarse en sus actividades.

3. —En los pozos y norias perforadas con anterioridad se debe obtener toda la información posible, tales como columna geológica, horizontes donde brota el agua, tipo de roca, dimensiones de la obra, etc., y efectuar un aforo completo.

Al tener toda esta información debe hacerse una nueva evaluación de la región.

4. —En todos los pozos nuevos y en los antiguos donde sea posible, debe correrse registros eléctricos. Los aforos que se hagan deberán ser durante 24 horas consecutivas como mínimo.

5. —Hacer un muestreo sistemático de las Formaciones Zuloaga y Cupido para poder determinar en el laboratorio sus características de porosidad y de permeabilidad. Se recomienda levantar secciones en la Sierra del Toro y en la de la Gruñidora siguiendo una dirección NO-SE, cortando las estructuras. En las Sierras de la Centella y de Santa Rita las secciones tendrán una dirección NE-SO.

6. —Lo ideal sería efectuar estudios geofísicos sistemáticos para determinar el verdadero espesor de los aluviones y para conocer toda la estructura geológica del subsuelo, de acuerdo con el poder de penetración de cada método y equipo. En esta región no es conveniente hacerlo debido al elevado costo de operación de la mayoría de estos métodos ya que los resultados prácticos que se obtendrían no compensarían los gastos. Sin embargo, es recomendable levantar una sección sísmológica en La Partida y Noria de Guadalupe, considerando que los pozos y el agua obtenida en la primera y en El Crucero son de las mejores que se tienen en la región, por la que vale la pena conocer mejor toda el área. En otras localidades deben usarse métodos eléctricos de resistividad o de polarización inducida.

7. —Hacer un estudio de la tectónica regional para poder resolver todos los problemas que se derivan de ella y que la expliquen.

## RESUMEN

Se hacen una serie de consideraciones generales sobre las condiciones climatológicas y la irregular distribución pluvial en el terreno nacional, obteniéndose como resultado de ellas la necesidad de incrementar la investigación sobre las aguas subterráneas. Se propone una secuencia de análisis del problema que comprende: Topografía, Geología, Climatología, Hidrología e Hidrogeología. Posteriormente se definen las unidades hidrogeológicas del área que se estudia, como ejemplo. Como resultado de dichas unidades se determinan sus características y su funcionamiento, obteniéndose al final una serie de conclusiones, las cuales sirven de base para dar algunas recomendaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

COMISIÓN AMERICANA DE NOMENCLATURA ESTRATIGRÁFICA, 1970. *Código de nomenclatura estratigráfica*. Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, 28 p.

GARCÍA CALDERON, JORGE, 1908. *Hoja El Salado 14 R-J (11)* con Resumen de la *geología de la Hoja El Salado, Estados de Zacatecas y San Luis Potosí*. Univ. Nal. Autónoma de México, Inst. Geología, Carta Geológica de México, serie de 1: 100,000.

GARCÍA, ENRIQUETA, 1964. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köeppen*: Offset Larios, S. A., México, D. F.

HEATH, RALPH C., 1968. *Introduction to Ground-Water Hydrology*. John Wiley and Sons, New York.

HUBBERT, M. K., 1940. *The theory of ground-water motion*. The Journal of Geology, 48 (8), p. 785-944. (Nov.-Dic.).

KÖEPPEN WILHELM, 1948. *Climatología*. Fondo de Cultura Económica, México, p. 152-192.

RAISZ, ERWIN, 1959. *Landforms of Mexico*. Cambridge, Mass. Mapa con texto, 1: 3,000,000.