



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

18  
7

**CALIDAD DEL AGUA  
SUBTERRANEA**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:

**INGENIERO CIVIL**

P r e s e n t a :

**MIGUEL ALVAREZ GERVANTES**



México, D. F.

1984



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# I N D I C E

I.- I N T R O D U C C I O N.....	3
I.1.- Origen del agua y ciclo hidrológico.....	3
I.2.- Distribución del agua en nuestro planeta.....	6
I.3.- La búsqueda del agua subterránea.....	9
II.- PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS DEL AGUA SUBTERRANEA, COMO FLUIDO.....	11
II.1.- Densidad.....	11
II.2.- Peso específico.....	14
II.3.- Compresibilidad.....	15
II.4.- Tensión superficial.....	15
II.5.- Viscosidad.....	17
III.- PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS DEL AGUA UTILIZADAS EN PROSPECCION GEOHIDROLOGICA.....	20
III.1.- Temperatura.....	20
III.2.- Conductividad y resistividad eléctrica del agua...	24
III.3.- Definición de pH.....	27
IV.- HIDROGEOQUIMICA.....	32
IV.1.- Introducción.....	32
IV.2.- Muestreo.....	33
IV.3.- Análisis que se practican al agua subterránea.....	40
IV.4.- Laboratorios.....	41
IV.5.- Formas de expresión de los análisis químicos.....	42
IV.6.- Principales constituyentes químicos del agua subterránea.....	46
IV.7.- Problemas resueltos.....	59

V.	INTERPRETACION DE LOS ANALISIS HIDROGEOQUIMICOS.....	63
V.1.-	Representación gráfica de las características químicas del agua.....	64
V.2.-	Fórmula iónica.....	82
V.3.-	Diagramas bidimensionales de dispersión.....	83
V.4.-	Análisis químicos expresados en función de variables no químicas.....	85
V.5.-	Mapas hidrogeoquímicos.....	89
V.6.-	Clasificación geoquímica de las aguas.....	92
VI.-	REQUISITOS DE CALIDAD DEL AGUA PARA DIFERENTES USOS.....	99
VI.1.-	Concepto de calidad del agua.....	99
VI.2.-	Reglamentación de los requisitos de calidad del agua.....	100
VI.3.-	Normas de calidad del agua. Organización Mundial de la Salud (OMS).....	101
VI.4.-	Normas de calidad del agua. Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA), México.....	106
VI.5.-	Comparación de diferentes normas de calidad para agua potable.....	109
VI.6.-	Calidad del agua para riego.....	112
VI.7.-	Calidad del agua para abrevadero.....	116
VI.8.-	Calidad del agua para usos industriales.....	120
VI.9.-	Ejemplo de aplicación.....	121
VI.10.-	Conclusiones generales.....	147
	B I B L I O G R A F I A . . . . .	149



## I.- INTRODUCCION

### I.1.- Origen del Agua y Ciclo Hidrológico.

El agua, elemento indispensable para la vida sobre la tierra, tuvo su origen durante la etapa de enfriamiento que dio lugar a la formación de continentes y mares. Las teorías generalmente aceptadas sobre la formación de la tierra indican que, en un principio, nuestros planetas y el sol formaban en conjunto una enorme nebulosa en proceso de enfriamiento. Durante dicho proceso, se produjeron separaciones de la masa central, dando lugar a la formación de los planetas. Las masas constituyentes de los planetas así formados se encontraban en un estado fluido que distaba mucho de ser homogéneo, debido a que los elementos de mayor densidad se concentraron en el centro de gravedad, seguidos en orden decreciente de densidad.

Con la evolución del proceso de enfriamiento se inició la formación de una costra que encerró a los materiales más densos, actualmente llamada litosfera, dejando en su exterior a los materiales de menor densidad, que posteriormente formaron lo que se conoce como hidrosfera y atmósfera. El agua en su forma actual, aún no existía o, en el mejor de los casos, existía solamente en forma de vapor.

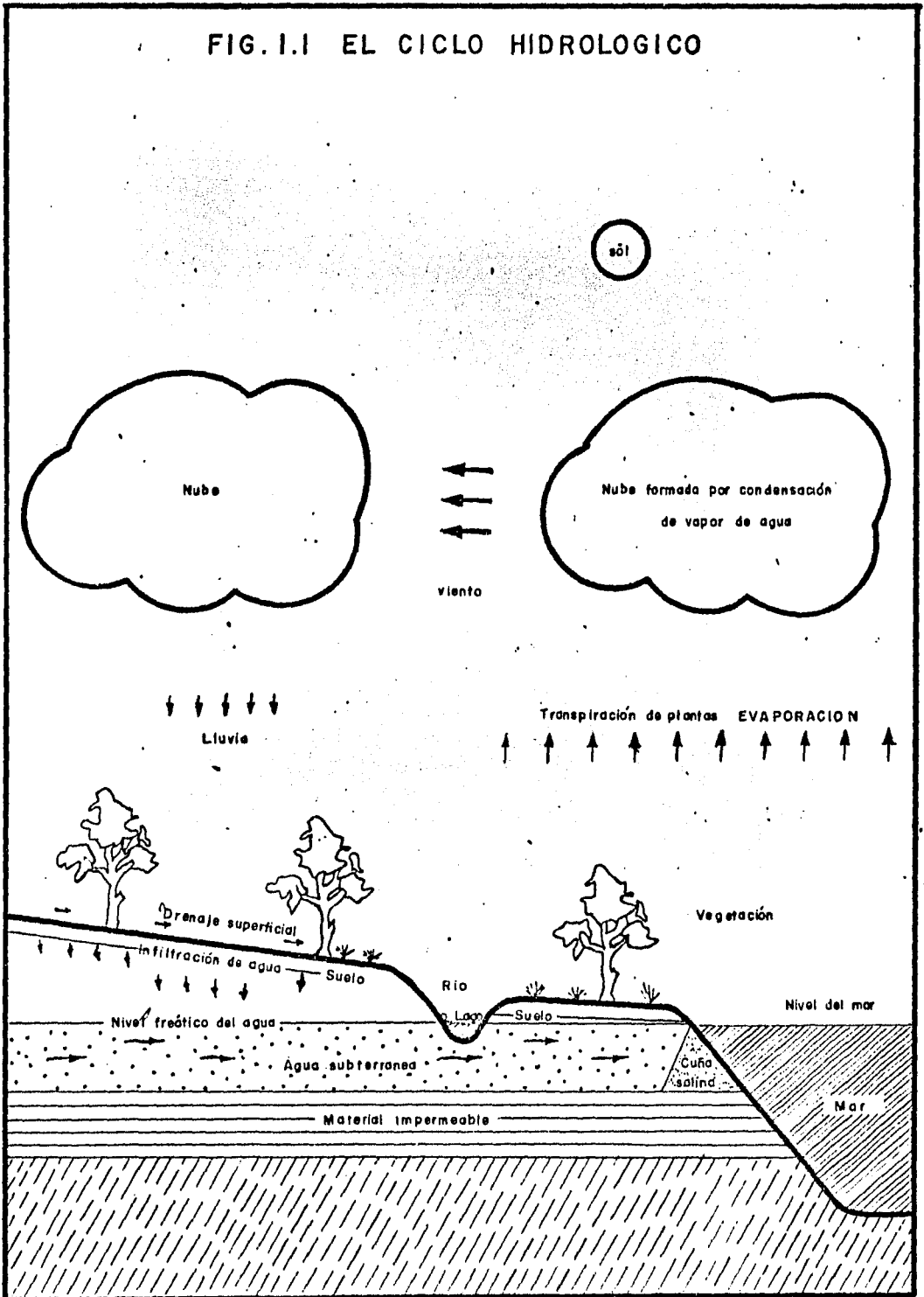
La continua pérdida de calor en forma de energía radiante hacia el espacio exterior redujo la temperatura de la masa

gaseosa que rodeaba a la litosfera, hasta un punto tal que - fue posible la condensación del agua. La lluvia así producida, de proporciones inimaginables, llenó los huecos y cavidades - de la costra recientemente formada, dando lugar a los mares y a las primeras aguas subterráneas que, con toda seguridad, -- circularon por las grietas de enfriamiento de las rocas ígneas. Desde el momento mismo de su condensación, el agua sobre la superficie de la tierra ha estado en continuo movimiento - debido, por una parte, al movimiento de la misma, y principalmente a la energía radiante recibida del sol.

En efecto, la energía solar hace que el agua de los ma-- res se evapore formando nubes que posteriormente, al enfriarse se, provocan lluvias. Estas se evaporan durante su caída o se precipitan sobre los continentes o mares. El agua que cae sobre los continentes se infiltra, escurre o se evapora; las aguas que se infiltran o escurren tienden en todo momento a dirigirse hacia el mar o a volver nuevamente hacia la atmósfera, a menos que queden atrapadas en algún recipiente estanco. El proceso descrito se repite una y otra vez, dando lugar a lo - que se ha definido como Ciclo Hidrológico. Fig. I.1

El hecho de que el agua sea indispensable a los seres vivientes resulta lógico, si se piensa que en algún momento del proceso descrito la agitación del agua en los océanos, la temperatura y demás condiciones ambientales, fueron propicias a la formación de las primeras moléculas de proteína, a las primeras células y posteriormente, por un proceso de evolución - biológica, a todos los seres vivientes que han existido y e--

FIG. 1.1 EL CICLO HIDROLOGICO



xisten sobre la tierra.

La continua acción erosiva que ejerce el agua durante algunas fases de su ciclo hidrológico ha sido, y seguirá siendo, uno de los principales factores del modelado de la superficie terrestre y del cambio operado sobre la misma, desde la primera lluvia hasta nuestros días, dando lugar, conjuntamente con el resto de agentes erosivos, de intemperización y metamorfismo, a la formación de toda la gama de rocas sedimentarias y metamórficas, cuyos poros, grietas y cavidades, sumados a las rocas ígneas, constituyen los espacios por los que circula y en los que se almacena el agua subterránea.

## I.2.- Distribución del agua en nuestro planeta.

El inminente déficit de agua de buena calidad en las regiones más pobladas del planeta, ha promovido la creación de una serie de organizaciones que pretenden hacer el inventario general de la cantidad total de agua disponible sobre y cerca de la superficie de la tierra. En el cuadro 1.1 se muestran los resultados de uno de estos inventarios, en donde podemos ver que, debido al volumen, distribución y calidad, el agua subterránea constituye, generalmente, la mayor fuente de agua potable de más fácil aprovechamiento. En las regiones polares los glaciares representan una alternativa más para la obtención de agua potable, pero el costo de la energía requerida para transportar y fundir el hielo está, generalmente, por encima de las posibilidades económicas de los usuarios. La desalinización del agua de mar, por los diversos métodos hoy - -

en día conocidos, constituye una forma más de obtención de agua potable, cuya importancia crece cada día, sobre todo en regiones costeras de baja precipitación.

### CUADRO 1.1

#### Distribución de Agua en Nuestro Planeta.

(Fuente: U.S. Geological Survey)

	<u>% del agua total</u>
<b>AGUAS SUPERFICIALES</b>	
Lagos de agua dulce	0.009
Lagos salados y mares interiores	0.008
Almacenamiento temporal en ríos y canales	0.0001
<b>AGUAS SUBTERRANEAS</b>	
Aguas vadasas (incluida la humedad del suelo)	0.005
Agua subterránea (hasta 1 km de profundidad) (algunas de estas aguas son saladas)	0.33
Aguas subterráneas más profundas (muy saladas)	0.29
<b>OTRAS AGUAS</b>	
Casquetes polares y glaciares	2.15
Atmósfera	0.001
Océanos	97.20

Referencia No.5

Aproximadamente, 4/5 del agua consumida para cualquier fin (excepto para la producción de energía eléctrica y navegación) proviene de los ríos y lagos. Aun así, la importancia -

económica que supone hoy en día el aprovechamiento del agua - subterránea en el mundo es enorme. Generalmente, el agua subterránea es preferida al agua superficial por las siguientes razones:

- 1) El agua subterránea no posee generalmente organismos patógenos, ni necesita tratamiento para usos industriales y domésticos.
- 2) Su temperatura es aproximadamente constante.
- 3) Generalmente el agua subterránea no posee ni turbidez ni color.
- 4) El agua subterránea se encuentra mejor distribuida sobre la superficie de la tierra.
- 5) El volumen de agua subterránea es considerablemente superior.
- 6) Su disponibilidad está menos afectada por las variaciones en la precipitación.
- 7) Las pérdidas por evaporación son mínimas.

Frecuentemente, la baja permeabilidad en el subsuelo reduce el almacenamiento, eleva los costos y por tanto, impide la explotación intensiva del agua subterránea.

### I.3.- La Búsqueda de Agua Subterránea.

Aunque el agua subterránea ha sido utilizada por el hombre prácticamente desde la aparición de este sobre la faz de la tierra, el empleo de la misma se redujo por mucho tiempo a la utilización de los caudales de agua subterránea que brotaban hacia la superficie espontáneamente en forma de manantiales.

Las referencias más antiguas conocidas sobre la explotación directa del agua subterránea por medio de pozos, galerías de captación, etc., se encuentran probablemente en la Biblia, aunque se desconoce la razón que impulsó al hombre hacia tal búsqueda.

En la actualidad, es perfectamente bien conocido que algunos animales de zonas áridas tienen habilidad natural para detectar la presencia del agua cuando ésta se encuentra cerca de la superficie del terreno, siendo por ello fácilmente alcanzable mediante una excavación que el mismo animal ejecuta. Posiblemente la observación de este hecho por el hombre lo haya decidido a imitar a tales animales, iniciándose de esta forma las captaciones artificiales antes mencionadas.

Como la observación de las plantas es más sencilla que la de los animales y aquellas también necesitan de agua, es posible que a la observación descrita anteriormente haya seguido la observación de plantas indicadoras de la presencia de agua y aún de su calidad.

Hemos visto en párrafos anteriores que, al formarse la tierra apareció simultáneamente el agua, como consecuencia de la serie de fenómenos físico-químicos que antecedieron a la formación del sistema planetario solar, y desde entonces el agua circula indefinidamente, pasando por las diferentes fases del Ciclo Hidrológico.

Para fines prácticos podemos considerar que el volumen total de agua sobre la tierra se ha mantenido constante, pero como consecuencia del aumento de la población y de la creciente industrialización de los pueblos, cada día crecen la demanda de agua potable y el grado de contaminación de las fuentes de aprovechamiento, reduciéndose cada vez el volumen de agua de buena calidad, económicamente aprovechable.

Distribución y calidad serán conceptos que siempre tendremos presentes cuando nos enfrentemos a la búsqueda de agua para abastecimiento humano e industrial. Una mala distribución nos obligará a llevar el agua desde grandes distancias si la fuente es superficial, y desde grandes distancias y/o pozos muy profundos si la fuente es subterránea.

Para garantizar que el agua cumpla con los requisitos de calidad necesarios según su uso, será preciso contar con una serie de parámetros de medición para cuantificar todas aquellas características físicas, químicas y bacteriológicas, que tengan algo que ver con la calidad del agua, así como las formas de interpretación de dichos parámetros. Este será el tema del presente trabajo, enfocado principalmente al estudio del agua subterránea.



## II.- PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS DEL AGUA SUBTERRANEA, COMO FLUIDO.

### II.1.- Densidad.

La densidad de un fluido se define como la masa de fluido contenida en la unidad de volumen; en el sistema absoluto tiene como unidades  $M\bar{L}^3$  y en el sistema gravitacional sus unidades son:  $FT^2\bar{L}^4$

La densidad de un fluido expresada desde el punto de vista matemático, queda definido como:

$$\rho = \frac{\Delta M}{\Delta v \rightarrow 0} \dots\dots\dots(2.1)$$

donde  $\Delta M$  es la masa de fluido contenida en el elemento de volumen  $\Delta v$ .

El volumen (y en consecuencia la densidad) de los fluidos varía con la temperatura. Para el agua, la Tabla II.1 muestra dicha variación.

El agua destilada alcanza el volumen mínimo a  $4^{\circ}C$  y una atmósfera de presión, siendo convencionalmente aceptado que bajo estas condiciones su densidad es de  $1 \text{ gr/cm}^3$ .

Un concepto derivado del anterior es el volumen específico, o volumen ocupado por unidad de masa; esto es, el recíproco de la densidad

$$v_s = \frac{1}{\rho}$$

TABLA II.1

Aumento del volumen del agua en función de la temperatura,  
por encima de los 4°C.

Temperatura °C	Aumento del volumen en %
40	1
60	2
80	3
100	4
120	6
150	9

Referencia No.1

TABLA II.2

Densidad y Volumen del Agua  
en función de las variaciones de temperatura.  
(Según el Livre de l'Eau)

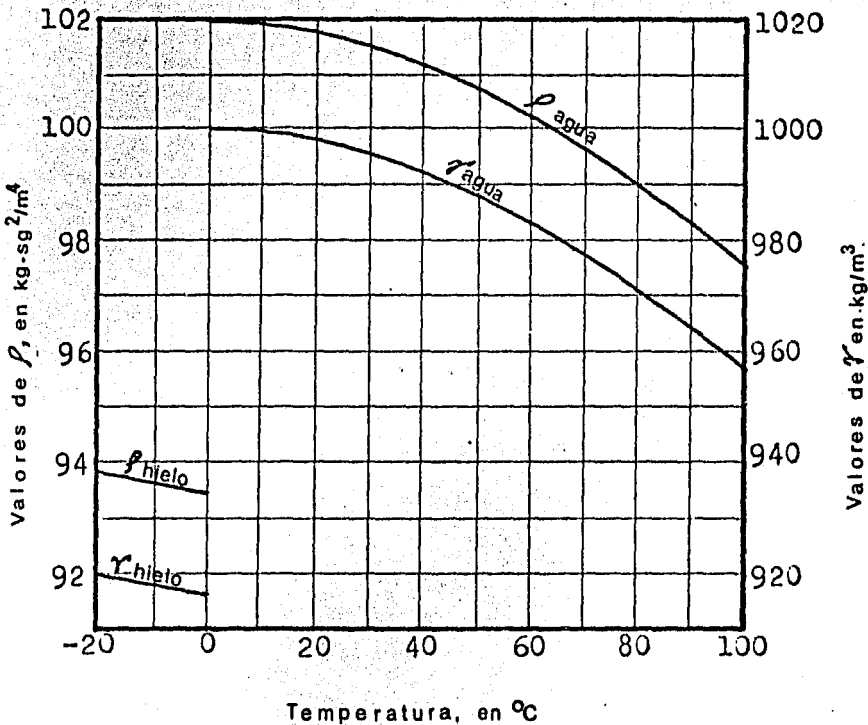
Temp. °C	Densidad	Volumen	Temp. °C	Densidad	Volumen
0	0.99986	1.00013	60	0.98324	1.01705
4	1	1	70	0.99781	1.02270
10	0.99972	1.00027	80	0.97183	1.02899
20	0.99823	1.00177	90	0.96534	1.03590
30	0.99567	1.00434	100	0.95338	1.04343
40	0.99224	1.00782	150	0.91730	1.09020
50	0.98807	1.01207	200	0.86280	1.15900

Referencia No.1

Debe señalarse que las propiedades del agua varían con el contenido de sólidos totales disueltos; lo cual hace necesario que se especifique el tipo de agua, cuando se hable de relaciones entre sus propiedades. Las Tablas II.1, II.2 y la Gráfica II.1 muestran algunas de estas relaciones, para el agua pura.

GRAFICA II.1

Densidad y peso específico del agua para temperaturas comprendidas entre  $-20$  y  $100^{\circ}\text{C}$ , a una atmósfera de presión.



Referencia No.2

## II.2.- Peso específico.

El peso específico representa el peso de fluido por unidad de volumen,

$$\gamma = W/V \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

en donde W y V son el peso y el volumen del fluido respectivamente. Aplicando la segunda Ley de Newton podemos relacionar el peso específico con la densidad,

$$W = \gamma V \quad \text{y} \quad W = mg \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

por igualación,

$$\gamma V = mg \quad \text{ó} \quad \gamma = (m/V)g \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

pero por definición

$$\rho = m/V \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

de donde resulta que:

$$\gamma = \rho g \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

Por convención se acepta que  $\rho = 1 \text{ gr}_m/\text{cm}^3$ ; para el agua a  $4^\circ\text{C}$  y una aceleración de la gravedad  $g = 981 \text{ cm}/\text{seg}^2$ .

Con los valores anteriores y recordando que

$$1 \text{ dina} = (1 \text{ gr}_m \cdot \text{cm})/\text{seg}^2 \quad \text{y}$$

$$1 \text{ gr}_f = 981 \text{ dinas}$$

encontramos que:  $\gamma_{\text{agua}} = 1 \text{ gr}_f/\text{cm}^3$ .

### II.3.- Compresibilidad.

La compresibilidad de un fluido es una medida del cambio de volumen, cuando se le aplica una presión.

El módulo de elasticidad de un fluido está dado por la ecuación

$$E_v = -\frac{dP}{dV/V} \dots\dots\dots(2.6)$$

en donde P y V son la presión y el volumen respectivamente. El significado del módulo de elasticidad de los fluidos es análogo al módulo de elasticidad en los sólidos. El módulo de compresibilidad en los fluidos, o simplemente compresibilidad es el inverso del módulo de elasticidad y generalmente se designa por

$$\beta = -\frac{dV/V}{dP} \dots\dots\dots(2.7)$$

La mayoría de los fluidos poseen un módulo de compresibilidad relativamente bajo y varía ligeramente con la temperatura. Generalmente el agua se considera incompresible, pero existen excepciones, como en el caso de acuíferos confinados - muy profundos. La Gráfica II.2 contiene algunas relaciones de compresibilidad-temperatura para diferentes presiones.

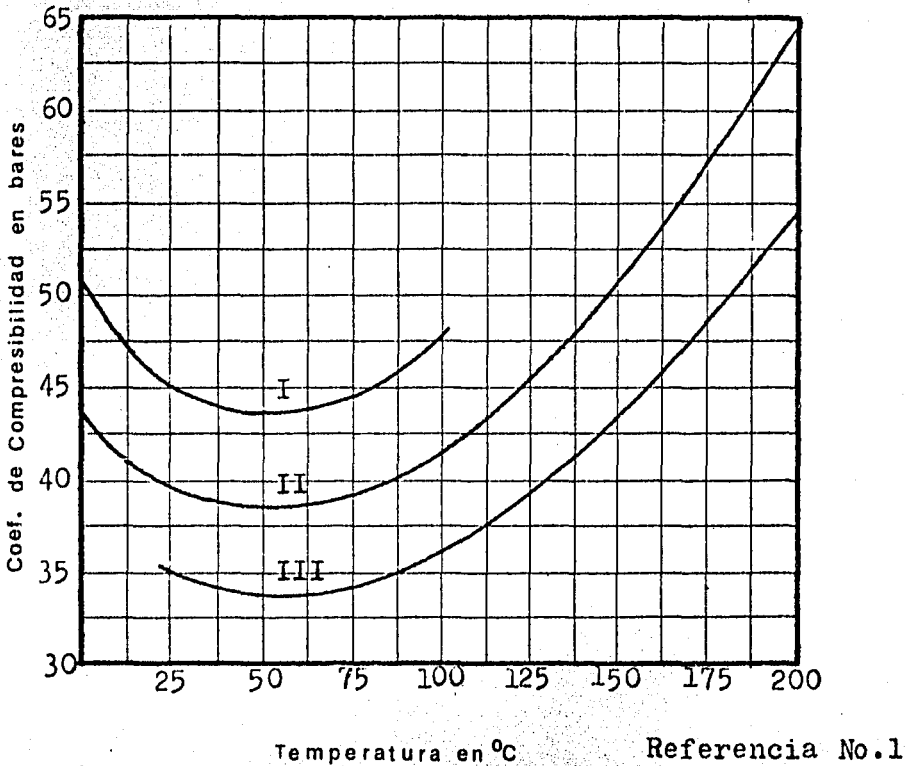
### II.4.- Tensión Superficial:

Las fuerzas moleculares de cohesión se desarrollan alre-

## GRAFICA II.2

Variaciones del coeficiente de compresibilidad del agua en función de la temperatura.

(Según el Livre de l'Eau)



- Referencia No.1
- I) Presión de 1 a 100 bares.
  - II) presión de 400 a 500 bares.
  - III) presión de 500 a 1000 bares.

dedor de las moléculas de un líquido, dejándose sentir en una pequeña capa próxima a la superficie. En las moléculas que se encuentran a mayor profundidad siguen actuando las fuerzas ca pilares, solamente que al estar rodeadas por otras moléculas

idénticas, las fuerzas de atracción se compensan.

Las fuerzas de tensión superficial se desarrollan en la superficie de contacto de un líquido y un gas, de un líquido y un sólido o entre dos líquidos que no se mezclen. La tensión superficial que aparece en la superficie de contacto entre el agua y el aire, disminuye al aumentar la temperatura.

TABLA II.3

Variaciones de la tensión superficial del agua en función de la temperatura.

Temperatura (°C)	Tensión superficial (gr/cm)	Temperatura (°C)	Tensión superficial (gr/cm)
- 8	0.078	40	0.071
0	0.077	60	0.067
10	0.076	80	0.064
20	0.074	100	0.060
30	0.072		

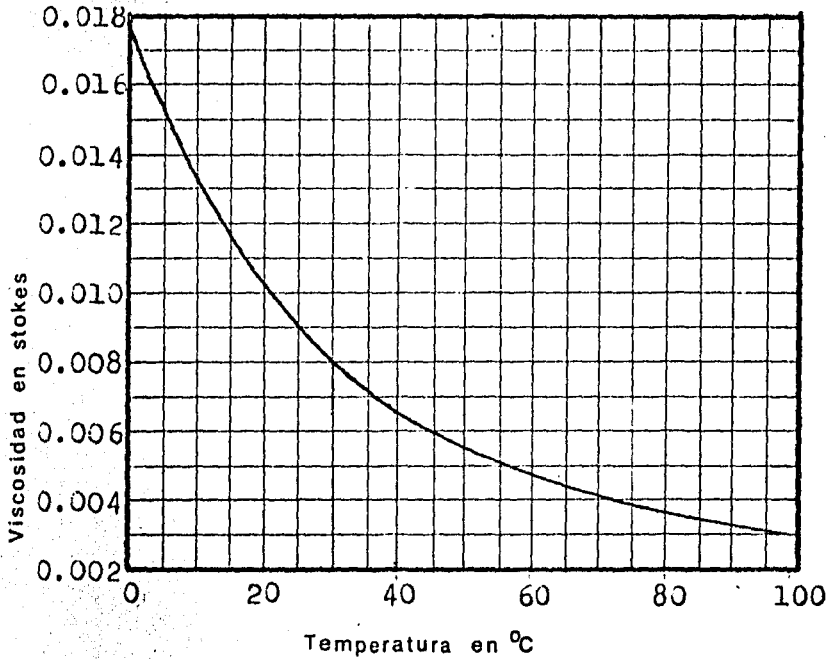
## II.5.- Viscosidad.

La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a fluir y es el resultado de la interacción de las fuerzas intermoleculares. La viscosidad puede expresarse como viscosidad cinemática o como viscosidad dinámica. Generalmente la unidad de la viscosidad dinámica es el poise.

### GRAFICA II.3

Viscosidad cinemática del agua  
a la presión atmosférica del nivel del mar.

(G. Sotelo Avila)



Referencia No.2

1 poise = 1 gr<sub>m</sub>/cm.seg.

Generalmente la viscosidad se maneja como viscosidad cinemática, Gráfica II.3, por simplicidad en las unidades.

La viscosidad cinemática queda definida como:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$



en donde:  $\nu$  es la viscosidad cinemática,  
 $\mu$  es la viscosidad dinámica y  
 $\rho$  es la densidad del agua.

En el sistema CGS la viscosidad cinemática o absoluta se mide en stokes.

$$1 \text{ stoke} = 1 \text{ cm}^2/\text{seg.}$$

La viscosidad de los fluidos decrece rápidamente al aumentar la temperatura. Para el caso del agua, la gráfica II.3 muestra este comportamiento.

### III.- PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS DEL AGUA UTILIZADAS EN PROSPECCION GEOHIDROLOGICA.

En geohidrología, la palabra prospección se utiliza como sinónimo de exploración. La prospección consiste básicamente en la localización de sitios (acuíferos) cuya estructura geológica permita la circulación, almacenamiento y extracción del agua en forma económica. Para lograr una buena prospección se requiere contar con conocimientos técnicos, experiencia en perforación y sentido común. Como parte de los conocimientos técnicos, se encuentra el estudio de algunas propiedades físico-químicas del agua subterránea, tales como temperatura, conductividad y resistividad eléctrica y ph. El estudio sistemático de dichas propiedades, con mediciones tomadas directamente en las fuentes de aprovechamiento o en la capa acuífera nos permite hacer intuiciones sobre el origen, concentración de sales, contenido de sólidos totales disueltos y dirección del flujo del agua subterránea.

#### III.1.- Temperatura.

En la tierra, las dos fuentes principales de calor son el sol y el flujo calorífico (grado geotérmico) que proviene del interior de la tierra. Los conocimientos que hasta ahora se tienen sobre el interior de la tierra son solamente intuitivos; de los 6300km que mide aproximadamente el radio terrestre se ha perforado solo hasta unos 6 km. A medida que -

avanzamos hacia el interior de la tierra, aumentan la presión y la temperatura. La presión aumenta por el peso de las capas superiores, de tal forma que, en los pozos y galerías muy profundos, los pisos y paredes llegan a fluir. Las rocas entre más profundas son más densas y la perforación se hace cada vez más difícil. Según un informe (\*), cuando se abrió el túnel El Simplón en Suiza, de acuerdo a los cálculos se esperaba encontrar, a 7 km de profundidad en el interior del macizo, una temperatura de 36 °C pero ascendió a 46 °C y 500 m después a 53 °C.

Según las teorías, la temperatura aumenta progresivamente con la profundidad, pero últimamente se ha encontrado que la lava que proviene de capas muy profundas nunca rebasa los 1500 °C, lo cual equivale a suponer que a unos 50 km se estabiliza la temperatura, cosa que resulta contradictorio a lo tradicionalmente aceptado.

El agua a lo largo del ciclo hidrológico va cambiando de temperatura, tendiendo siempre al equilibrio térmico con el medio en que se encuentre. Cuando el medio es el subsuelo, éste se divide para su estudio en dos grandes zonas, atendiendo a la fuente de energía que proporcione el calor.

#### a).- Zona Heterotérmica.

Se denomina con este nombre a la zona comprendida entre la superficie y unos 25 metros de profundidad. Las variaciones de temperatura en esta zona son debidas a la radiación -

(\*) Boletín informativo No.2, febrero de 1983.  
Dirección General de Geografía, S. P. P.

solar, por lo que la temperatura del agua contenida en esta zona se ve afectada por los cambios atmosféricos, llegando a experimentar variaciones del orden de  $+ 0' - 2^{\circ}\text{C}$ .

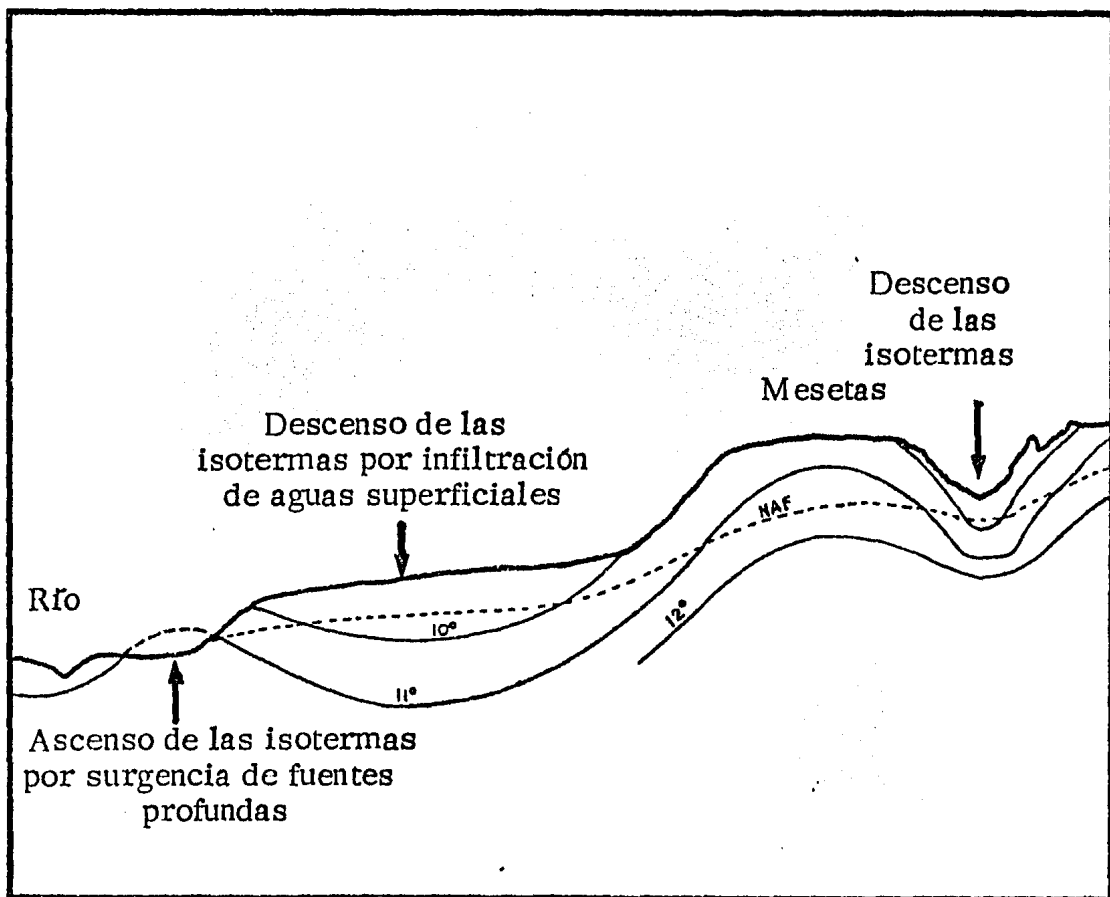
b).- Zona homotérmica.

La zona homotérmica yace a la zona heterotérmica y su temperatura es debida al flujo calorífico, constante en un mismo lugar, que proviene del interior de la tierra. Es más débil, pero más constante que el calor de origen solar. Está relacionado con el gradiente geotérmico que, por definición, es la distancia vertical expresada en metros, que hay que descender para experimentar una variación de  $1^{\circ}\text{C}$  en la temperatura. El valor promedio del grado geotérmico es de 33 y varía con la naturaleza de las rocas, la estructura geológica y la presencia de focos secundarios de calor. Los focos secundarios de calor son debidos a la disolución de sales, reacciones químicas, expansión del agua o a la energía que queda remanente en las rocas como consecuencia de la actividad ígnea.

Para aprovechar la información obtenida del estudio de la temperatura del agua, es conveniente elaborar mapas de isotermas del acuífero en cuestión, en los cuales, comparando la temperatura ambiente con la del agua subterránea, podemos identificar las zonas de mayor recarga. La fig.III.1 muestra un ejemplo en el que la temperatura ambiente es menor que la del subsuelo.

En el perfil de la figura III.1 se presentan las curvas isotermas, que coinciden aproximadamente con el modelado topográfico, sin embargo, el equilibrio térmico está modificado por la circulación de las aguas subterráneas. En los valles, la infiltración de las aguas superficiales más frías, origina un descenso en la temperatura de las aguas subterráneas y en las surgencias hay un aumento en la temperatura, - como consecuencia de la llegada del agua subterránea, más caliente.

Fig. III.1.- Perfil de isotermas en un manto acuífero.



### III.2.- Conductividad y resistividad eléctrica del agua.

La conductividad o conductancia eléctrica, es la habilidad de una sustancia para conducir una corriente eléctrica. Y se le llama conductividad específica cuando se refiere a una sección transversal y longitud unitarias.

La resistividad eléctrica es el inverso de la conductividad y tiene como unidades el ohm.cm. Por ser la conductividad el inverso de la resistividad sus unidades son el mho/cm. Su adecuada interpretación resulta de gran utilidad en los estudios geohidrológicos. Su medición es muy sencilla y si se hace a temperatura constante, se puede correlacionar con el grado de mineralización del agua subterránea.

La conductividad es función de la temperatura, concentración y naturaleza de las sales disueltas, por lo que las medidas de conductividad y temperatura deben hacerse en el momento de tomar las muestras, después, para hacer comparables los reportes es necesario referir los valores de conductividad a una misma temperatura, que generalmente se toma de 18, 20 o 25°C, mediante la expresión:

$$C = 1 - K(T_0 - T) \dots \dots \dots (3.1)$$

en donde: C - factor de corrección

K - constante; K = 0.021 a 0.022

T<sub>0</sub>- temperatura estándar de 18, 20 o 25°C.

Al multiplicar C por el valor de la conductividad medida obtenemos la conductividad referida a la temperatura estándar considerada. Si en lugar de conductividad medimos resistivi-

dad, el factor de corrección será el inverso de C, que algunos autores designan con A. Los valores de C, que aparecen en la siguiente tabla, fueron obtenidos a partir de la expresión (3.1).

TABLA III.1

Referencia No.1

Valores de C para una temperatura estándar de 18°C.

T °C	Décimas de grado									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	0.701	0.703	0.706	0.708	0.710	0.713	0.715	0.717	0.719	0.722
6	0.721	0.726	0.729	0.731	0.733	0.735	0.738	0.740	0.742	0.745
7	0.747	0.749	0.752	0.754	0.756	0.759	0.761	0.763	0.765	0.768
8	0.770	0.772	0.775	0.777	0.779	0.781	0.784	0.785	0.788	0.790
9	0.793	0.796	0.798	0.800	0.802	0.805	0.807	0.809	0.812	0.814
10	0.816	0.818	0.820	0.822	0.825	0.827	0.830	0.832	0.834	0.837
11	0.839	0.841	0.843	0.845	0.848	0.850	0.853	0.855	0.858	0.860
12	0.862	0.864	0.867	0.869	0.871	0.873	0.876	0.878	0.880	0.883
13	0.885	0.887	0.890	0.892	0.895	0.896	0.899	0.902	0.904	0.906
14	0.908	0.911	0.913	0.915	0.917	0.919	0.922	0.924	0.926	0.928
15	0.931	0.934	0.936	0.938	0.941	0.943	0.945	0.948	0.950	0.952
16	0.954	0.957	0.959	0.962	0.963	0.965	0.968	0.970	0.973	0.975
17	0.977	0.979	0.981	0.984	0.986	0.988	0.991	0.993	0.996	0.998
18	1.000	1.002	1.004	1.007	1.009	1.011	1.013	1.016	1.018	1.020
19	1.022	1.024	1.027	1.036	1.032	1.034	1.036	1.038	1.042	1.044
20	1.046	1.048	1.051	1.053	1.055	1.057	1.059	1.062	1.064	1.066
21	1.069	1.071	1.073	1.075	1.078	1.080	1.082	1.084	1.087	1.089
22	1.092	1.094	1.097	1.099	1.101	1.104	1.106	1.109	1.111	1.112
23	1.115	1.117	1.120	1.121	1.124	1.121	1.129	1.130	1.133	1.135
24	1.138	1.140	1.142	1.144	1.147	1.149	1.152	1.153	1.156	1.159
25	1.161	1.164	1.166	1.168	1.171	1.174	1.176	1.178	1.181	1.182
26	1.184	1.187	1.189	1.192	1.194	1.196	1.198	1.201	1.203	1.205
27	1.208	1.210	1.212	1.214	1.217	1.219	1.221	1.224	1.226	1.228
28	1.231	1.233	1.235	1.237	1.240	1.242	1.245	1.247	1.249	1.252
29	1.254	1.256	1.258	1.261	1.263	1.266	1.268	1.270	1.273	1.276
30	1.277	1.280	1.283	1.285	1.288	1.290	1.292	1.295	1.297	1.300
31	1.302	1.304	1.307	1.309	1.312	1.314	1.316	1.319	1.321	1.323
32	1.326	1.328	1.330	1.333	1.335	1.338	1.340	1.343	1.345	1.347
33	1.350	1.352	1.354	1.357	1.359	1.362	1.364	1.366	1.369	1.371
34	1.373	1.376	1.378	1.381	1.383	1.385	1.388	1.390	1.392	1.395
35	1.397	1.400	1.402	1.404	1.407	1.409	1.411	1.414	1.416	1.418
36	1.421	1.423	1.426	1.428	1.430	1.433	1.435	1.438	1.440	1.442
37	1.445	1.448	1.450	1.453	1.456	1.458	1.460	1.463	1.465	1.468
38	1.470	1.473	1.475	1.478	1.480	1.483	1.485	1.487	1.490	1.492
39	1.495	1.497	1.500	1.502	1.505	1.507	1.510	1.512	1.514	1.517
40	1.519	1.521	1.524	1.526	1.529	1.531	1.534	1.536	1.538	1.541
41	1.543	1.546	1.548	1.551	1.553	1.556	1.558	1.561	1.563	1.565
42	1.568	1.570	1.573	1.575	1.578	1.580	1.582	1.585	1.587	1.590
43	1.592	1.595	1.597	1.600	1.602	1.605	1.607	1.610	1.612	1.614
44	1.617	1.619	1.622	1.624	1.627	1.629	1.632	1.634	1.636	1.639
45	1.641	1.643	1.646	1.648	1.651	1.653	1.656	1.658	1.661	1.663
46	1.665	1.668	1.670	1.673	1.675	1.678	1.680	1.682	1.685	1.687
47	1.690	1.692	1.695	1.697	1.700	1.702	1.704	1.707	1.709	1.712
48	1.714	1.717	1.719	1.722	1.724	1.727	1.729	1.732	1.734	1.737
49	1.739	1.741	1.743	1.746	1.749	1.751	1.756	1.756	1.758	1.761
50	1.763									

La conductividad eléctrica del agua depende de la concentración y naturaleza de las sales disueltas. Las Tablas III.2 y III.3 muestran los valores de conductividad y resistividad eléctrica para diferentes tipos de agua.

TABLA III.2

Valores de conductividad eléctrica para diferentes tipos de agua.

Tipo de agua	Conductividad ( mhos/cm)
Agua pura	0.05
Agua destilada	0.05 a 5
Agua de lluvia	5 a 30
Agua subterránea	30 a 5,000
Agua de mar	45,000 a 55,000
Salmueras	100,000

Referencia No.1

TABLA III.3

Valores de resistividad eléctrica para diferentes tipos de agua.

Tipo de agua	Resistividad ( Ohm.cm )
Agua pura	Superior a 20,000
Agua poco mineralizada	5,000 a 10,000
Agua medianamente mineralizada	2,000 a 4,000
Agua muy mineralizada	400 a 1,000

Referencia No.4



Existen algunas expresiones que permiten relacionar la conductividad eléctrica del agua con los sólidos totales disueltos en ella. Por ejemplo:

$$1 \text{ meq/l} = 1.56 \times 10^6 \text{ micromhos/cm, o}$$

$$\text{Conductividad} \times C = \text{Sólidos totales disueltos.}$$

en donde la conductividad estará expresada en micromhos/cm, medida a 25°C, y los sólidos totales disueltos en ppm. El valor de C será (ref. 4) del orden de 0.55 cuando predominen los bicarbonatos o cloruros y próximo a 0.75 para aguas altamente sulfatadas y silicadas.

La variación de la conductividad eléctrica en la misma capa acuífera, es función de la concentración y naturaleza de las sales disueltas, y como estas provienen principalmente de los minerales de la roca almacén, resulta que la mineralización del agua subterránea está ligada a su velocidad y las propiedades de la roca almacén (permeabilidad y composición química). Una conductividad baja denota alta permeabilidad y viceversa. En los acuíferos costeros la conductividad elevada puede ser consecuencia de intrusión salina.

### III.3.- Definición del pH.

El pH (pondus hydrogenii) representa el logaritmo, en ba

se 10, del inverso de la actividad iónica del ion hidrógeno.

La actividad iónica de un elemento se define como el producto del coeficiente de actividad iónica del elemento por la concentración de dicho ión, expresada en moles/litro. Por ejemplo: la actividad iónica del hidrógeno se expresa como

$$H = \gamma M$$

en donde:

H - actividad iónica del hidrógeno

$\gamma$  - coeficiente de actividad iónica del hidrógeno

M - concentración de hidrogeniones en la solución, expresados en moles/litro.

$$\text{moles/litro} = \frac{\text{mg/l}}{\text{peso atómico del elemento}}$$

El coeficiente de actividad iónica  $\gamma$  se obtiene de la expresión

$$-\log \gamma = \frac{AZ^2 I}{1 + Ba I}$$

en donde:

$\gamma$  - coeficiente de actividad iónica

A y B - constantes que dependen del solvente y de la temperatura; para el agua a 25°C, A = 0.5085 y  
B = 0.3281

Z - carga eléctrica del ión.

a - constante relacionada con el diámetro del ion en estudio, Tabla III.4

I - fuerza iónica,  $I = MZ/2$  en donde M y Z tienen el mismo significado.

TABLA III.4

Valores de 'a' para la ecuación de Debye-Hückel

a	ion
11.....	$\text{Th}^{+4}, \text{Sn}^{+4}$
9.....	$\text{Al}^{+3}, \text{Fe}^{+3}, \text{Cr}^{+3}, \text{H}^{+}$
8.....	$\text{Mg}^{+2}, \text{Be}^{+2}$
6.....	$\text{Ca}^{+2}, \text{Cu}^{+2}, \text{Zn}^{+2}, \text{Sn}^{+2}, \text{Mn}^{+2}, \text{Fe}^{+2}, \text{Ni}^{+2}, \text{Co}^{+2},$ $\text{Li}^{+}$
5.....	$\text{Fe}(\text{CN})_6^{-4}, \text{Sr}^{+2}, \text{Ba}^{+2}, \text{Cd}^{+2}, \text{Hg}^{+2}, \text{S}^{-2}, \text{Pb}^{+2}, \text{CO}_3^{-2},$ $\text{SO}_3^{-2}, \text{MoO}_4^{-2}$
4.....	$\text{PO}_4^{-3}, \text{Fe}(\text{CN})_6^{-3}, \text{Hg}_2^{+2}, \text{SO}_4^{-2}, \text{SeO}_4^{-2}, \text{CrO}_4^{-2}, \text{HPO}_4^{-2},$ $\text{Na}^{+}, \text{HCO}_3^{-}, \text{H}_2\text{PO}_4^{-}$
3.....	$\text{OH}^{-}, \text{F}^{-}, \text{CNS}^{-}, \text{CNO}^{-}, \text{HS}^{-}, \text{ClO}_4^{-}, \text{K}^{+}, \text{Cl}^{-}, \text{Br}^{-}, \text{I}^{-},$ $\text{CN}^{-}, \text{NO}_2^{-}, \text{NO}_3^{-}, \text{Rb}^{+}, \text{Cs}^{+}, \text{NH}_4^{+}, \text{Ag}^{+}$

Referencia No. 6

Existen gráficas que relacionan el coeficiente de actividad iónica con la fuerza iónica (referencia No.6, p.21), las cuales simplifican el cálculo de dicho coeficiente.

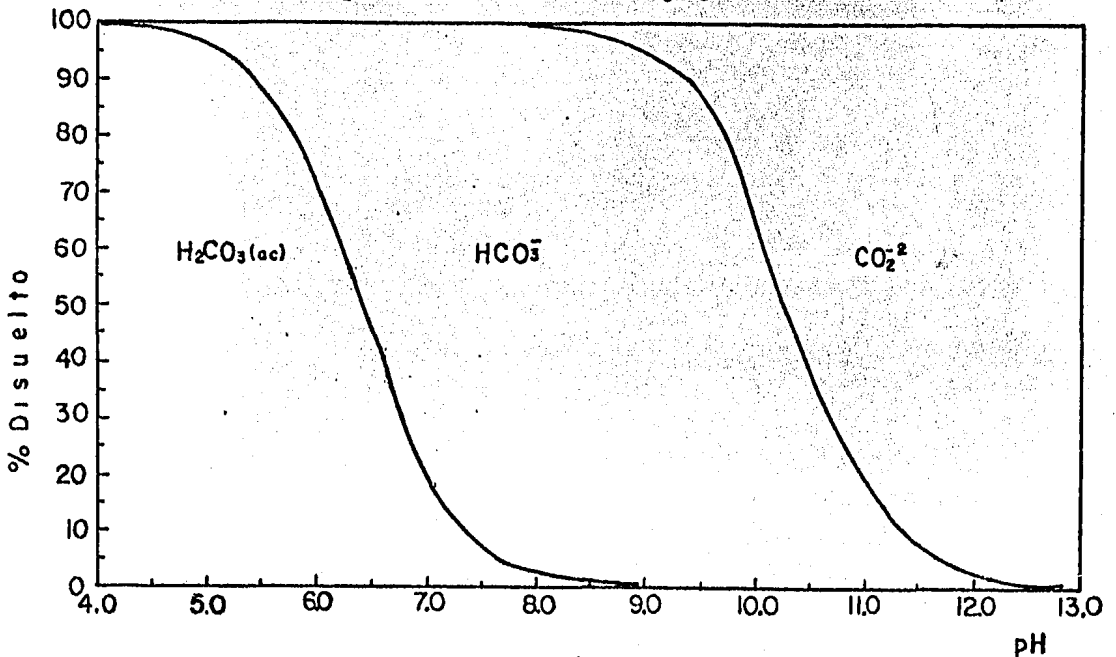
Para el agua pura a  $25^{\circ}\text{C}$ , la actividad iónica del hidrógeno es de  $10^{-7}$  moles/litro y de acuerdo a la definición

$$\text{pH} = \log 1/10^{-7} = 7$$

Las mediciones de pH se deben efectuar inmediatamente - después de tomar la muestra, ya que el pH del agua está controlado, en la mayoría de los casos, por el sistema  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_2^{-2}$  y dado que la solubilidad del  $\text{CO}_2$  depende de la - presión y de la temperatura, el pH también cambiará al variar estos factores. La Gráfica III.1 muestra el porcentaje de solubilidad de los carbonatos y bicarbonatos en función del pH del agua a  $25^\circ\text{C}$  de temperatura y una atmósfera de presión.

GRAFICA III.1

Porcentajes de  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_2^{-2}$  disueltos en el agua en función del pH. Para  $T = 25^\circ\text{C}$  y  $p = 1$  atmósfera.



Referencia No.6

Cuando algún soluto se disuelve en el agua, generalmente el pH cambia, debido a que algunos iones se combinan con los  $H^+$  o  $OH^-$  del agua, alterándose el equilibrio químico.

Cuando en una solución tienden a disminuir los iones  $H^+$  se trata de una solución básica y si disminuyen los  $OH^-$  la solución se llama ácida. Existen algunas soluciones que tienen a mantener su pH constante cuando se les añaden pequeñas cantidades de ácido o álcali, a estas soluciones se les conoce con el nombre de soluciones amortiguadoras o tampón; tal es el caso del agua que contiene  $CO_2$  y  $CaCO_3$  disueltos. La presencia de dióxido de carbono y bicarbonatos disueltos en el agua, origina que el pH varíe en un intervalo comprendido entre 1.8 y 11 (para manantiales ácidos y alcalinos respectivamente). Los valores extremos de dicho intervalo son raros, generalmente el pH de las aguas subterráneas queda comprendido entre 5 y 8 (referencia No.5).

El pH del agua subterránea nos da una idea de su composición química. Por ejemplo: un pH por encima de 8.5 normalmente está asociado con aguas sódico-carbonato-bicarbonatadas. Los valores de pH comprendidos entre 7 y 8.5 se relacionan con aguas bicarbonatadas. Un pH entre 4 y 7 se puede asociar a pequeñas cantidades de ácidos inorgánicos procedentes de sulfuros o a ácidos orgánicos producidos por la acumulación de materia orgánica en putrefacción. Los valores de pH inferiores a 4 generalmente denotan la presencia de ácidos libres derivados de sulfuros minerales oxidantes (pirita) o de agua en contacto con gases volcánicos que contienen ácidos sulfhídrico y clorhídrico.

## IV.- HIDROGEOQUIMICA.

### IV.1.- Introducción.

La geoquímica se puede definir como la ciencia que estudia el comportamiento de los diferentes elementos químicos, su distribución, combinaciones entre sí y sus migraciones en el ámbito de la corteza terrestre.

La hidrogeoquímica se limita al estudio de los aspectos geoquímicos del agua en sí y al de las relaciones existentes entre esta y las rocas de la corteza terrestre.

La interpretación geoquímica del agua subterránea, se utiliza junto con la geología, hidrología y geofísica, como un auxiliar para conocer y entender, en forma más completa, el funcionamiento de los acuíferos y la planeación de una mejor y más racional explotación.

Para efectuar la interpretación geoquímica, se toma en cuenta que, el agua contenida en los acuíferos, proviene principalmente de la lluvia, donde parte de esta, al precipitarse sobre las formaciones geológicas, se infiltra y corre a través de ellas. Al circular por el subsuelo entra en contacto con diversas rocas, disolviendo las sales minerales que las forman y produciendo cambios en su composición. La química del agua subterránea dependerá de la solubilidad y composición de las rocas por las que circula y de los factores que a

fecten dicha solubilidad, como son: la temperatura, el área - de contacto del agua con las formaciones, la velocidad de circulación, la longitud del recorrido, la previa composición - química del agua, entre otros factores.

La estrecha relación que existe entre la composición química del agua y el funcionamiento general del acuífero nos -- permite conocer, con buena aproximación, la dirección del movimiento del agua subterránea, la localización de las zonas de recarga del acuífero, los tipos de roca a través de los cuales circula, la calidad del agua, así como algunas características físicas del acuífero.

#### IV.2.- Muestreo.

La calidad del agua se conoce a través de los análisis que se practican a un pequeño volumen de agua que representa al total de donde fue tomada.

A este volumen se le llama muestra y dada su finalidad debe ser lo más parecida posible al agua de donde proviene. Para que lo anterior se cumpla, el muestreo tiene que hacerlo una persona especializada, puesto que de ello depende el grado de veracidad de los resultados que arroje el laboratorio - para hacerlos extensivos a la fuente que representan.

Esto implica también el cuidado en el manejo de las muestras hasta que lleguen al laboratorio.

Las muestras aisladas, ya sea que se tomen en diferentes sitios o en el mismo pero a diferentes tiempos y se analicen por separado, constituyen lo que se denomina una muestra simple.

Al conjunto formado por varias muestras simple se le llama muestra compuesta.

Otro factor importante en el muestreo es la selección de las fuentes donde se deben tomar las muestras; tomando en consideración su distribución espacial, que dependerá de las circunstancias y del tipo de aprovechamiento, ya sea pozo, noria manantial, galería, etc. ya que suelen darse casos de aprovechamientos relativamente próximos que corresponden a acuíferos diferentes.

Los principales factores a considerar en un programa de muestreo de agua para análisis químico, exceptuando limitaciones de carácter administrativo, son los siguientes:

- 1) Importancia y calidad del estudio.
- 2) Complejidad hidrogeológica del área.
- 3) Extensión superficial.
- 4) Calidad y cantidad de la información disponible.
- 5) Zonas en las cuales se conoce la existencia de agua de mala calidad o en las que se considera probable que así ocurra.
- 6) Número probable de acuíferos de acuerdo con los cortes litológicos de los aprovechamientos con que se cuente.
- 7) Número de pozos disponibles con características construc-



tivas y de operación conocidas.

- 8) Resultado de las medidas de resistividad obtenidas en el campo durante el levantamiento del censo de aprovechamientos subterráneos.
- 9) Cantidad de trabajo de laboratorio.
- 10) Condiciones locales de la zona.
- 11) Tipo y distribución de los aprovechamientos.
- 12) Interrelación entre aguas superficiales y subterráneas.
- 13) Distribución de los volúmenes de bombeo.

Con respecto a cada muestra individual es necesario cuidar los siguientes aspectos:

- a) El recipiente donde se colectará la muestra, deberá ser de vidrio o polietileno.
- b) El volumen de la muestra deberá ser suficiente para un análisis químico completo, entre 1 y 2 litros.
- c) El frasco deberá enjuagarse con agua de la fuente a muestrear, dos o tres veces antes de proceder al muestreo.
- d) La botella deberá llenarse completamente para evitar la gasificación que puede alterar la composición química de la muestra.
- e) Cuando la fuente a muestrear sea un pozo de bombeo equipado, es necesario que el tiempo transcurrido entre la toma de la muestra y el inicio del bombeo sea por lo menos de dos horas.
- f) Las fuentes de muestreo deberán numerarse en el campo y localizarse en el plano.
- g) Deben de tomarse en el campo las medidas correspondientes

al pH, temperatura y resistividad del agua.

h) A cada muestra deberá adherirse una etiqueta como la que se muestra en la figura 4.1 o 4.2, en la que será preciso indicar:

- 1) Nombre del lugar.
- 2) Localización exacta.
- 3) Diámetro, longitud, entubado y posición de las zonas filtrantes del pozo.
- 4) Modo de toma de muestra.
- 5) Profundidad de toma de muestra.
- 6) Breve descripción del acuífero.
- 7) Nivel del agua.
- 8) Características del bombeo.
- 9) Temperatura del agua.
- 10) Fecha y hora.
- 11) Nombre del tomador de muestras.
- 12) Aspecto del Agua.
- 13) En el espacio reservado para observaciones se deben - incluir todas aquellas notas que ayuden en la interpretación de los análisis.

FIGURA 4.1

ZONA: _____					
ESTADO:	_____	APROVECHAMIENTO No. _____			
MUNICIPIO:	_____	FUENTE: _____			
POBLACION:	_____	PROFUNDIDAD: _____			
PREDIO:	_____	NIVEL DEL AGUA: _____			
PROFUNDIDAD DE TOMA DE MUESTRA: _____					
PROCEDIMIENTO EMPLEADO: _____					
CONDUCTIVIDAD: _____ micromhos/cm					
TEMPERATURA: _____ °C      pH: _____					
TURBIA	SI _____	NO _____	COLOR	SI _____	NO _____
OLOR	SI _____	NO _____	SABOR	SI _____	NO _____
OBSERVACIONES: _____					
_____					

Quando la fuente de muestreo carece de bombeo, es necesario utilizar equipo de precisión para la toma de las muestras, como el que se muestra en la figura 4.3, el cual una vez colocado a la profundidad deseada, se optura un dispositivo que permite que el agua penetre al envase, una vez lleno, se cierra y se extrae el aparato.

Los resultados del muestreo de los diferentes aprovechamientos, deberán ser interpretados en base al conocimiento - disponible de las características del aprovechamiento. Si el pozo está construido para admitir agua de los materiales per-

Indice de clasificación del pozo

Toponimia .....

Propietario .....

Fecha ..... Hora ..... Botella .....

Nivel agua ..... m Profundidad pozo ..... m

Profundidad de toma de muestra ..... m Broca: .....

Muestra tomada por .....

Aspecto de la superficie del agua .....

Procedimiento empleado .....

Observaciones: .....

.....

.....

C.A.P.O.

C.A.P.O.

### Propiedades determinadas in situ

Conductividad \_\_\_\_\_ p. mohs/cm

pH \_\_\_\_\_ Temperatura \_\_\_\_\_ °C

Dureza total \_\_\_\_\_ p.p.p.m.

Dureza carbonatada \_\_\_\_\_ p.p.p.m.

Es turbia 

si	no
----	----

Tiene olor 

si	no
----	----

Tiene sabor 

si	no
----	----

Tiene color 

si	no
----	----

Cl ..... p.p.p.m.

Na ..... p.p.p.m.

Mg ..... p.p.p.m.

Ca ..... p.p.p.m.

K ..... p.p.p.m.

FIG. 4.2 IDENTIFICACION DE LA MUESTRA

meables penetrados bajo el nivel freático, el agua de este - nos representará solo un promedio grueso de la calidad de la misma, disponible a través del espesor de penetración; luego un estudio hidrogéocquímico detallado, requiere el conocimiento de las características constructivas de los aprovechamientos existentes.

Debido a que las masas de agua generalmente se encuentran en movimiento, las muestras colectadas en un punto fijo se encuentran sujetas a diferencias, resultando que aguas de composición diferente circulan por un mismo punto muestreado; puesto que el movimiento de la aguas subterráneas es relativamente lento, los cambios también lo serán y en consecuencia pueden ser usualmente seguidos satisfactoriamente con programas de muestreos estacionales o anuales.



FIG.4.3.- MUESTREADOR DE PRECISION .

#### IV.3.- Análisis que se practican al agua subterránea.

Una vez obtenidas las muestras, se remiten al laboratorio en donde se les practican los análisis químicos, físicos y bacteriológicos, según lo requiera el caso.

Mediante el análisis químico se determinan las sustancias disueltas en el agua, generalmente ionizadas, y básicamente comprenden:

Cationes:

Calcio( $\text{Ca}^{++}$ ), Magnesio( $\text{Mg}^{++}$ ), Sodio( $\text{Na}^+$ ) y Potasio( $\text{K}^+$ ).

Aniones:

Sulfatos( $\text{SO}_4^{--}$ ), Cloruros( $\text{Cl}^-$ ), Carbonatos( $\text{CO}_3^{--}$ ), Bicarbonatos( $\text{HCO}_3^-$ ) y Nitratos( $\text{NO}_3^-$ ).

Los gases disueltos en el agua, tales como bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), se encuentran generalmente en muy bajas concentraciones en el agua subterránea, razón por la cual rara vez se determinan y cuando se considera necesario su cuantificación se reportan por separado de los iones principales.

Los análisis físicos son los más sencillos de realizar; la mayoría de las mediciones son de tipo cualitativo y los parámetros determinados son, entre otros: la temperatura, el color, la turbiedad, el olor y el sabor.

Por su parte, los análisis bacteriológicos del agua sub-

terránea generalmente no son necesarios. Afortunadamente los organismos patógenos rara vez se encuentran en el agua subterránea. Muchos de los casos de contaminación bacteriológica son causados por mala construcción de los pozos o están relacionados con acuíferos en rocas fracturadas, en los cuales las grandes oquedades conectan directamente la superficie del terreno con el agua subterránea.

Los tipos de materia orgánica que puede existir en el agua subterránea son muy variados, pero rara vez la suma de ellos sobrepasa de unas 15 ppm, por lo que los análisis bacteriológicos se practican básicamente por requisitos de seguridad y se concretan a la realización de las pruebas necesarias para determinar la presencia o ausencia de bacterias del grupo coliforme, bacterias que a pesar de no ser patógenas se consideran como base para la interpretación de la contaminación bacteriana del agua.

#### IV.4.- Laboratorios.

Los laboratorios se pueden agrupar en tres categorías: a) fijos, b) móviles y c) portátiles.

a) Laboratorios fijos. Un laboratorio fijo es un local en donde se cuenta con toda clase de aparatos para realizar las pruebas requeridas a fin de conocer la calidad del agua.

b) Laboratorios móviles. Cuando por razones de tiempo ya no conviene hacer el envío de muestras a un laboratorio fijo, se

requerirá de montar laboratorios cercanos a la región de muestreo; estos laboratorios se llaman móviles porque se instalan en la parte más conveniente, utilizando los aparatos mínimos necesarios para realizar los análisis y pruebas; en algunas ocasiones se emplean camiones o camionetas adaptados.

El laboratorio móvil es bastante cómodo debido a las ventajas que representa, pero a la vez es más costoso que un laboratorio fijo, porque requiere de mayor mantenimiento y conservación.

c) Laboratorios portátiles. Los laboratorios portátiles están constituidos por los aparatos, sustancias, etc. que pueden ser transportados directamente por el muestreador y que sirven para realizar pruebas en el lugar de toma de la muestra, ya sea para determinaciones rápidas o para formarse una idea de la concentración y estado general de la fuente.

#### IV.5.- Formas de expresión de los análisis químicos.

Los resultados de los análisis químicos practicados a las muestras de agua son reportados en las siguientes unidades.

a) partes por millón (ppm)

Una parte por millón equivale a una parte, en peso, de materia disuelta en un millón de partes, en peso, de agua. Es



ta unidad relaciona peso con peso y por tanto es independiente del sistema de unidades empleado.

b) Miligramos por litro (mg/l).

Esta unidad es la más utilizada en el laboratorio, ya que las muestras de agua se miden en fracciones de litro y los sólidos disueltos en miligramos. Los mg/l relacionan peso con volumen; como su nombre lo indica, representa el peso de materia disuelta, expresado en mg, por cada litro de agua. Para la mayoría de las aguas subterráneas, ppm y mg/l son numéricamente iguales, ya que la concentración de sólidos disueltos generalmente es baja y en consecuencia el peso específico del agua es aproximadamente igual a uno.

$$\text{partes por millón} = \frac{\text{miligramos por litro}}{\text{peso específico del agua}}$$

c) Equivalentes por litro.

Para la obtención de las unidades mencionadas en los incisos anteriores la cantidad de materia disuelta se manejó en unidades de peso, por lo cual no hay equivalencia entre iones de diferentes elementos, o sea que no se pueden mezclar debido a que tienen diferente peso molecular y diferente carga eléctrica. La equivalencia entre iones se logra a través del concepto de peso equivalente, que se define como:

$$\text{Peso equivalente} = \frac{\text{masa atómica}}{\text{valencia.}}$$

Partiendo del concepto de peso equivalente podemos definir la unidad de concentración de sólidos disueltos conocida como equivalentes por litro, que es el número de equivalentes contenidos en el peso de los iones disueltos en un litro de agua. El peso de los iones expresado en gramos. En vista de que la mayoría de las aguas subterráneas poseen un contenido total de sólidos disueltos considerablemente inferior al 1% del peso total de la muestra, en la práctica se utilizan las milésimas, es decir, el miliequivalente por litro (meq/l) el cual se obtiene dividiendo el peso del elemento en solución, expresado en mg/l, entre su equivalente químico.

$$\text{miliequivalente por litro} = \frac{\text{Peso de elemento en solución}}{\text{peso equivalente}}$$

en donde el peso del elemento en solución está expresado en miligramos por litro (mg/l).

#### d) Equivalentes por millón.

Cuando la concentración de sólidos disueltos está expresada en ppm, la unidad de equivalencia entre iones que se obtiene es el equivalente por millón eqm, y se obtiene dividiendo la concentración de un ión, expresado en ppm, entre su peso equivalente.

equivalentes por millón =  $\frac{\text{concentración del ión considerado}}{\text{peso equivalente.}}$

en donde la concentración del ión estará expresada en ppm.

Cuando los resultados de los análisis químicos son expresados en equivalentes por millón (epm) o en miliequivalentes por litro (meq/l), es posible verificar la exactitud de dichos análisis; para lo cual se calculan los eqm o meq/l de cada ión analizado. A las cantidades obtenidas se les denomina cantidades de reacción (r). Si el análisis es completo y bien realizado, la suma de las unidades de reacción en los aniones debe ser aproximadamente igual a la de los cationes.

A la suma de unidades de reacción (cationes + aniones) se le conoce como concentración salina (CS).

La verificación de los análisis se puede hacer comparando directamente la cantidad de unidades de reacción (epm o meq/l) de aniones contra cationes, o calculando el % de cada elemento analizado con respecto a la CS.

$$r\% = \frac{r}{CS} \times 100$$

y sumando los porcentajes de aniones y cationes por separado, en este caso la diferencia de dichas sumas debe ser inferior al 6% de la suma mayor, para que el análisis pueda ser utilizado en el estudio (referencia No. 4).

El agua contiene además de iones en solución, algunos - otros materiales en suspensión que no están ionizados, como - sílice y algunos compuestos orgánicos; los cuales no pueden - ser expresados en equivalentes por millón.

#### IV.6.- Principales constituyentes químicos del agua subterránea.

El número de constituyentes mayores disueltos en el agua subterránea es sumamente limitado, y por otra parte, las varia ciones naturales de la composición química de las aguas subte- rráneas no son tan grandes como cabría esperarse del estudio de los complejos minerales y de la materia orgánica a través de los cuales circula el agua. La tabla IV.1 muestra una lis- ta de los constituyentes más importantes de las aguas pota -- bles, junto con una indicación acerca de sus fluctuaciones na turales.

A continuación se describen los principales constituyen tes del agua subterránea con algunas de sus características principales.

##### a) La sílice.

Después del oxígeno, el silicio es el elemento más abun- dante en la corteza terrestre. Pese a ello en la mayor parte de las aguas subterráneas, el silicio ocupa solamente el --- cuarto o quinto lugar entre los elementos más abundantes del agua subterránea. Lo más frecuente es que las aguas subterrá\_\_

TABLA IV.1

Sólidos disueltos en las aguas subterráneas.

Referencia No.5

Constituyentes principales (de 1.0 a 1 000.0 ppm)

Sodio	Bicarbonatos
Calcio	Sulfatos
Magnesio	Cloruros
Sílice	

Constituyentes secundarios (de 0.01 a 10.0 ppm)

Hierro	Carbonatos
Estroncio	Nitratos
Potacio	Fluoruros
Boro	

Constituyentes menores (de 0.000 1 a 0.1 ppm)

Antimonio	Plomo
Aluminio	Litio
Arsénico	Manganeso
Bario	Molibdeno
Bromo	Níquel
Cadmio	Fosfatos
Cromo	Rubidio
Cobalto	Selenio
Cobre	Titanio
Germanio	Uranio
Yodo	Vanadio
	Zinc

Constituyentes traza (generalmente en cantidades inferiores a 0.001 ppm)

Berilio	Rutenio
Bismuto	Escandio
Cerio	Plata
Cesio	Talio
Galio	Torio
Oro	Estaño
Indio	Tungsteno
Lantano	Yterbio
Niobio	Ytrio
Platino	Zirconio
Radio	

neas contengan entre 5 y 40 ppm de sílice, generalmente en forma de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Las principales rocas transportadoras de sílice al agua subterránea son: la arcilla y los feldespatos, entre otras, siendo estas muy poco solubles.

El pH del agua subterránea tiene normalmente muy poca influencia sobre su poder disolvente frente a los silicatos. Sin embargo por encima de un pH de 9.0 la solubilidad de los silicatos aumenta rápidamente.

b) El hierro.

Entre los minerales y grupos mineralógicos que pueden contener grandes cantidades de hierro están: la magnetita, la pirita, la biotita, los piroxenos, los anfíboles y los granates. La descomposición de estos minerales por la acción de los agentes meteóricos libera grandes cantidades de óxidos de hierro relativamente estables e insolubles, por lo que la concentración de iones ferrosos en el agua varía de 1 a 10 ppm para un pH comprendido entre 6 y 8.

c) El calcio.

El agua del subsuelo en contacto con las rocas sedimentarias de origen marino obtienen la mayor parte de su contenido de calcio a partir de la disolución de la calcita, aragonita, dolomita, anhidrita y del yeso. En las rocas ígneas y metamórficas la descomposición meteórica también libera calcio de

los minerales tales como el apatito, wollastonita, la fluorita y otros minerales del grupo de los feldespatos, anfíboles y piroxenos. El calcio debido a su abundancia en la corteza terrestre y a su elevada movilidad en la hidrosfera resulta - uno de los iones más frecuentes en las aguas subterráneas.

La concentración de calcio en el agua subterránea, normalmente fluctúa entre 10 y 100 ppm. Los efectos que producen estas concentraciones sobre la salud del hombre y de los animales son insignificantes, puesto que se sabe que incluso una concentración de 1000 ppm de calcio puede ser totalmente inocua para la salud. La idea generalizada de que la presencia - de calcio en el agua produce arteriosclerosis, cálculos renales y molestias hepáticas, no tienen por el momento justificación científica.

El efecto más evidente que produce la presencia de calcio en el agua es su tendencia a reaccionar con el jabón, dando un precipitado llamado JABON CORTADO. A este efecto se le conoce como DUREZA del agua. Los iones de magnesio, hierro, - manganeso, cobre y zinc se comportan de manera similar, pero por ser el magnesio y el calcio los más abundantes en el agua se acostumbra considerar a la dureza como efecto de estos dos iones exclusivamente.

d) El magnesio.

Las fuentes de magnesio en la hidrosfera son muy variadas, entre las más comunes se encuentran: la dolomita en las rocas sedimentarias, el olivino, la biotita, la hornblenda y la augita en las rocas ígneas y la serpentina, el talco, el diópsido y la tremolita en las rocas metamórficas.

La mayor parte de las calcitas contienen también algo de magnesio.

La geoquímica del magnesio es muy parecida a la del calcio. Los carbonatos de calcio y de magnesio están controlados por la presencia del  $\text{CO}_2$ .

Tanto el sulfato como el cloruro de magnesio son muy solubles, por lo que varios miles de ppm de magnesio pueden mantenerse en equilibrio con el cloruro y el sulfato.

A pesar de la mayor solubilidad de sus compuestos, generalmente, el magnesio se encuentra en las aguas subterráneas en menor concentración que el calcio. Esta diferencia se debe probablemente, a la lenta solubilidad de la dolomía y a la mayor abundancia de calcio sobre la corteza terrestre. El agua de mar, debido a la asimilación de calcio por plantas y animales, contiene aproximadamente cinco veces más magnesio que calcio.



La concentración de magnesio en el agua subterránea varía normalmente entre 1 y 40 ppm.

e) El sodio.

El origen primordial de la mayor parte del sodio de las aguas continentales se debe a la liberación de productos solubles que tienen lugar durante la descomposición meteórica de los feldespatos del grupo de las plagioclasas. Bajo ciertas condiciones algunos minerales de las arcillas, rocas ígneas y metamórficas pueden liberar cantidades considerables de sodio pero en cantidades mucho menores que las anteriores.

Debido al alto grado de solubilidad de sus compuestos, el sodio se concentra por efecto de la evaporación en el mar y en las cuencas endorreicas de las zonas desérticas.

Toda agua que se encuentre en estado natural contiene cantidades apreciables de sodio, las concentraciones varían dentro de una amplia gama de valores, que van desde 0.2 ppm en el agua de lluvia hasta 100,000 ppm en las salmueras.

f) El potasio.

Las fuentes más comunes de potasio en el agua suelen ser los productos que se forman en la descomposición meteórica de las ortoclasas, microlinas, biotitas, leucitas y nefelinas de las rocas ígneas y metamórficas. El agua contenida en acuíferos

ros de rocas evaporitas puede llegar a contener grandes cantidades de potasio como resultado de la disolución de la silvina y del nitrato de potasio.

Aunque la cantidad de potasio que se encuentra en la corteza terrestre es del mismo orden que el sodio, el potasio -- contenido en las aguas continentales es aproximadamente diez veces menor que el sodio.

La mayor parte de las aguas subterráneas contienen menos de 10 ppm de potasio, oscilando por lo general entre 1 y 5 ppm.

#### g) Carbonatos y bicarbonatos.

Químicamente es común considerar ácidos a los compuestos cuyo pH sea menor que 7 y alcalinos a los compuestos que tengan un pH mayor que dicho valor.

En los análisis hidrogeoquímicos se considera como punto de equilibrio el pH de 4.5, ya que la alcalinidad del agua subterránea es debida casi exclusivamente a la presencia de iones carbonatos y bicarbonatos y es precisamente a partir de un pH de 4.5 cuando el ácido carbónico se empieza a disociar en iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{H}^+$  (Gráfica III.1) hasta llegar al 100% de -- disociación para un pH de 8.5 aproximadamente. A partir de este punto los  $\text{HCO}_3^-$  se empiezan a disociar en  $\text{CO}_3^{=}$  y  $\text{H}^+$ , pero para valores de pH mayores que 9, la alcalinidad puede deberse también a los hidróxidos, hierro y silicatos. Pero como son --

muy raros los pH mayores que 9, resulta que la alcalinidad es un buen indicador del contenido de iones carbonatos y bicarbonatos.

La mayoría de estos iones deben su existencia al  $\text{CO}_2$  procedente de la atmósfera, del suelo y de la disolución de rocas carbonatadas. Algunas de las aguas subterráneas, sobre todo en los campos petroleros, obtienen su bicarbonato a partir del dióxido de carbono generado por la descomposición de compuestos orgánicos.

Las aguas subterráneas normalmente contienen más de 10 y menos de 800 ppm de bicarbonatos. Las concentraciones más frecuentes suelen andar entre 50 y 400 ppm.

Muy rara vez tienen valores de pH inferiores a 4.5; esto provocaría la transformación de los bicarbonatos en ácido carbónico. Un pH superior a 8.5 produce cambio de bicarbonatos a carbonatos, pero estos casos son igualmente raros.

#### h) Los sulfatos.

En los primeros tiempos de la historia de la hidrosfera, la mayoría de los sulfatos se originaron, probablemente, a partir de la oxidación de los sulfuros procedentes de las rocas ígneas y de las emanaciones volcánicas.

Actualmente las fuentes principales de sulfatos pueden ser:

- La disolución de sulfatos presentes en las rocas sedimentarias, principalmente arcillas (marcasita y pirita).
- La descomposición de materia orgánica.
- Las emanaciones volcánicas.
- La reducción de materia orgánica en los pantanos.
- La combustión de carbón y petróleo.

Uno de los procesos naturales más eficientes en la movilización del sulfato de las soluciones de agua parece ser la reducción de los sulfatos por la acción de las bacterias. Existen ciertas bacterias conocidas como sulfobacterias, que utilizan los sulfuros y los sulfatos en su ciclo biológico, estas bacterias producen energía gracias a la oxidación de los compuestos orgánicos; merced a este proceso obtienen su oxígeno a partir de los iones sulfatos contenidos en el agua del subsuelo. La mayor parte del sulfuro de hidrógeno producido en este proceso permanece en el agua subterránea, el cual puede alcanzar varios cientos de ppm.

En la naturaleza pueden encontrarse aguas con concentraciones de sulfatos muy variables. El agua de lluvia puede tener aproximadamente 0.2 ppm, mientras que las salmueras pueden llegar a tener hasta 100 000 ppm.

Los sulfatos de las aguas subterráneas de los acuíferos en rocas ígneas y metamórficas, varían de 1 a 100 ppm, cuando las sulfobacterias permanecen activas en el interior de los suelos a través de los cuales se infiltra el agua.

i) Los cloruros.

La mayor parte de los cloruros que se encuentran en las aguas subterráneas suelen proceder de alguna de las cuatro fuentes siguientes:

- Del agua marina atrapada en las rocas sedimentarias.
- De la disolución de los cloruros de sodio y de los minerales afines que existen en las formaciones de evaporitas.
- De la concentración, por evaporación, de los cloruros existentes en las aguas de lluvia y nieve.
- De la disolución de las partículas de material sólido existentes en la atmósfera, especialmente en las regiones áridas.

Quantitativamente hablando, el origen de los cloruros que se encuentran en las aguas del subsuelo parece que corresponden al cloruro emanado de la corteza terrestre a la atmósfera y devuelto posteriormente a la tierra a través de la lluvia y

nieve.

La concentración de cloruros en los diferentes tipos de agua puede tener los siguientes valores:

TABLA IV.2

Tipo de agua	Concentración de cloruros (en ppm)
Agua de nieve de las regiones polares.	0.1
Agua de lluvia y nieve en los continentes.	1.0 a 3.0
Aguas subterráneas poco profundas en regiones lluviosas.	menos de 30
Aguas subterráneas de regiones áridas.	1000 o más.
Salmueras	150 000.0

Referencia No. 5

j) Los nitratos.

Aunque las rocas ígneas contienen pequeñas cantidades de nitrato soluble, o de amoníaco, la mayor parte del ión nitrato presente en el agua tiene origen orgánico o procede de elementos químicos de origen agrícola (fertilizantes y estiércol)

o industrial. Los óxidos nítricos producidos en la atmósfera por la descargas eléctricas, constituyen también una fuente - de nitratos , aunque de menor importancia.

Los nitratos son tan solubles, que únicamente pueden ser movilizadas del agua a través de la actividad orgánica o mediante los procesos de evaporación.

Las concentraciones más frecuentes de nitratos oscilan entre 0.1 y 0.3 ppm en el caso de aguas de lluvia, hasta unas 600 ppm en el caso de aguas subterráneas que han atravesado - suelos donde se utilizan en abundancia fertilizantes nitrogenados o existen concentraciones de estiércol u otros desechos orgánicos. Las aguas subterráneas normales contienen una cantidad de nitratos que puede oscilar entre 0.1 y 10.0 ppm.

#### k) Otros elementos.

Además de los iones de los elementos antes analizados, - existen otros llamados constituyentes menores del agua subterránea, tales como bromuros, yoduros, fluoruros, boro, manganeso, aluminio, estroncio, litio, etc. (ver tabla IV.1), que a pesar de no haber sido estudiados muy a fondo, se sabe que su concentración en el agua es muy baja, no obstante deberían incluirse en los análisis geoquímicos, considerando que:

- La presencia anómala de grandes cantidades de ciertos metales puede constituir un procedimiento prospección de minerales.

- Muchos de estos elementos tienen una importancia potencial para el conocimiento de la historia geológica de las aguas.
- Algunos de estos constituyentes menores son radioactivos, como el uranio, el potasio 40, el radio y el radón. Y aunque los trastornos fisiológicos producidos por pequeñas cantidades de radiación no se manifiestan inmediatamente, en general se opina que pueden aumentar la probabilidad de padecer cataratas, leucemia, tumores y en general, un acortamiento de la vida.



#### IV.7.- Problemas resueltos.

1.- Explique la diferencia entre la geoquímica y la hidrogeoquímica.

La geoquímica se define como la ciencia que estudia la distribución, combinación y migración de los elementos químicos en el ámbito de la corteza terrestre.

Por su parte la hidrogeoquímica se limita al estudio de los aspectos geoquímicos del agua en sí y al de las relaciones existentes entre esta y las rocas que la contienen o a través de las cuales circula.

2.- Mencione y explique las partes básicas en que se puede dividir un estudio hidrogeoquímico.

Un estudio hidrogeoquímico se puede dividir en: a) Muestreo, b) análisis químicos e c) interpretación de análisis.

a) El programa de muestreo comienza con la selección de las fuentes a muestrear y la determinación del número de muestras necesarias para el estudio, para lo cual es necesario haber considerado previamente los factores enlistados en el apartado IV.2.

Una vez conocidos estos dos aspectos se procede a tomar las muestras, tomando sus debidas precauciones.

b) Rigurosamente al agua subterránea destinada al consumo humano, se le deberían realizar análisis físicos, químicos y bacteriológicos, pero dadas las condiciones propias de los acuíferos, generalmente con los análisis químicos es suficiente.

c) Existen varias formas de interpretación de los análisis químicos pero todas se pueden resumir en tres, que son:

- Clasificación del agua en familias.
- Configuraciones de igual concentración o relación iónica.
- Configuraciones de perfiles y secciones hidrogeoquímicas.

En el capítulo siguiente se explicarán ampliamente.

3.- De qué manera nos puede ayudar la hidrogeoquímica a conocer el funcionamiento de un acuífero?

La hidrogeoquímica, a través de la interpretación de los análisis químicos nos permite conocer:

- Calidad y distribución del agua.
- Direcciones generales de flujo.
- Zonas de recarga.
- Cambios de permeabilidad.
- Origen del agua.
- Fenómenos de intrusión salina.
- Y probable tipo de las rocas a través de las cuales circula.

Con esta información, aún cuando sea de tipo cualitativo, podemos formarnos una idea muy aproximada del funcionamiento general del acuífero. Y algo muy importante; nos permite detectar en qué aspectos es necesario profundizar en el estudio. En el ejemplo del inciso VI.9 se muestra claramente lo anterior.

4.- ¿Por qué es importante conocer las características constructivas del pozo, del cual se obtuvo la muestra de agua, antes de interpretar el análisis químico?

Para fines de interpretación de los análisis químicos, de las características constructivas del pozo lo más importante es saber si el ademe permite la penetración del agua en todo el espesor del acuífero o solo por la parte inferior. Cuando sucede lo primero, los resultados del análisis nos representarán solo en promedio aproximado de la calidad de todo el manto acuífero, no así en el segundo caso.

5.- Convertir 63 ppm de  $Mg^{++}$  a eom.

Peso atómico del Mg = 24.32

valencia = 2

$$\text{peso equivalente} = \frac{24.32}{2} = 12.16$$

$$\text{por lo tanto: } 63 \text{ ppm de } Mg^{++} = \frac{63}{12.16} = 5.19 \text{ epm}$$

6.- Convertir 2.5 ppm de  $PO_4^{=}$  a epm.

peso atómico de P = 30.97

peso atómico de O = 16.00

valencia = 3

$$\text{peso equivalente} = \frac{30.97 + 4(16)}{3} = 31.66$$

$$\text{por tanto: } 2.5 \text{ ppm de } PO_4^{=} = \frac{2.5}{31.66} = 0.079 \text{ epm.}$$

7.- Verificar el siguiente análisis.

Ion	ppm	Peso molecular	Valencia	Peso equivalente	epm cationes	epm aniones
Ca <sup>++</sup>	42	40.1	2	20.05	2.09	---
Mg <sup>++</sup>	27	24.3	2	12.15	2.22	---
CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>	196	61.0	1	61.00	----	3.21
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	15	96.1	2	48.05	----	0.31
Cl <sup>-</sup>	72	35.5	1	35.50	----	2.03
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5	62.0	1	62.00	----	0.08
				TOTAL	4.31	5.63

Diferencia de cationes y aniones:

$$5.63 - 4.32 = 1.31$$

$$\text{porcentaje de la suma mayor} = \frac{1.31}{5.63} = 23.3\%$$

Puesto que 23.3% es mayor que 6% (tolerancia, inciso IV.5.d), el análisis es incompleto y/o erróneo. La deficiencia de cationes refleja, probablemente, que en la muestra no se cuantificaron el Na<sup>+</sup> y el K<sup>+</sup>.

## V.- INTERPRETACION DE LOS ANALISIS HIDROGEOQUIMICOS.

La interpretación de los análisis hidrog geoquímicos se efectúa a través de alguna de las formas siguientes:

- 1) Representación gráfica de las características químicas del agua.
- 2) Fórmula iónica.
- 3) Diagramas bidimensionales de dispersión.
- 4) Análisis químicos representados en función de variables no químicas.
- 5) Mapas hidrog geoquímicos.
- 6) Clasificación geoquímica de las aguas.

En el presente capítulo se pretende describir cada una de estas formas de expresión, así como mencionar sus ventajas y desventajas.

## V.1.- Representación gráfica de las características químicas del agua.

El manejo y estudio de los análisis químicos puede simplificarse con el manejo de gráficos y diagramas, en especial cuando se trata de hacer comparaciones entre varios análisis de aguas de un mismo lugar en épocas diferentes o en diferentes lugares. Estas gráficas y diagramas pueden poner de relieve variaciones temporales, variaciones espaciales o bien resaltar relaciones entre los iones de una misma muestra. Las representaciones que tienen por objeto resaltar la composición iónica de un agua para permitir compararla con otras aguas son los diagramas en sus diferentes variantes.

Los diagramas más utilizados son:

### a) Diagramas columnares. -Diagrama de Collins-

Los diagramas columnares consisten en dos columnas adosadas, en las cuales se grafica a partir de una base común, los aniones y cationes, guardando entre sí el siguiente orden:

Cationes:  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ .

Aniones :  $\text{CO}_3^- + \text{CO}_3\text{H}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ .

A veces se agrega una tercera columna que contiene a la sílice o alguna otra característica particular. Cuando la concentración es expresada en meq/l (diagrama de Collins) o en epm las alturas de las columnas resultan iguales (casi igua--

les en la práctica) pudiéndose utilizar, como ya se dijo, para verificar la exactitud y confiabilidad del análisis.

Figura V.1

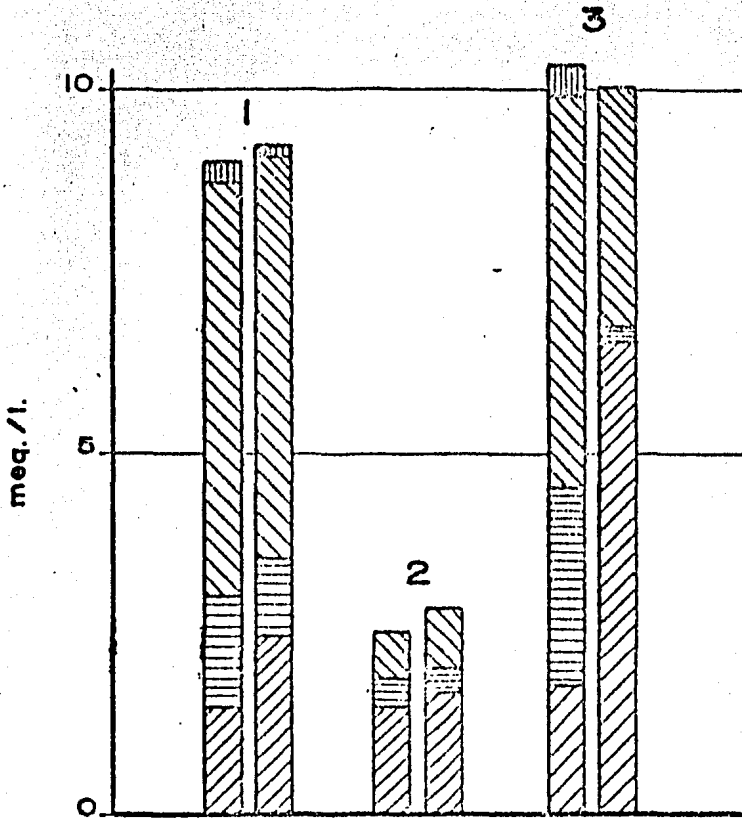


FIG. V.1 DIAGRAMAS DE COLLINS

CLAVE

K			NO <sub>3</sub>
Na			Cl
Mg			SO <sub>4</sub>
Ca			CO <sub>3</sub> H

- 1.- Agua clorurada sódica
- 2.- Agua bicarbonatada cálcica
- 3.- Agua bicarbonatada sódica

Otra variedad del diagrama de Collins es colocando las - columnas no adosadas, sino que se disponen los cationes a partir de una base y hacia arriba, los aniones a partir de la misma base, y como prolaongación, hacia abajo. Suele usarse - el orden marcado anteriormente.

Para la construcción de digramas columnares pueden usarse valores de concentración en ppm, pero resulta de menor utilidad.

b) Diagramas triangulares. -Diagrama de Piper-.

Por su construcción, los diagramas triangulares son los - ideales cuando se requiere representar alguna característica del agua, que esté definida por tres componentes. En un trián- gulo equilátero se acomodan los tres componentes, figura V.2, cada uno de los lados del triángulo contiene a un componente puro o la combinación de dos, expresados en porciento, tal co- mo se muestra en la figura. En la fig.V.2, el punto J repre- senta una mezcla binaria, cuya concentración de sólidos di- - sueltos estará compuesta en un 45% del componente A y en un - 55% del componente B.

Un punto ubicado en la parte central del triángulo, tal como M, representa una mezcla ternaria; como el vértice más cercano es el A y más lejano el B, el contenido de sus compo- nentes será en el siguiente orden:  $A > C > B$ .



Para conocer el porcentaje que ocupa alguno de los componentes de la muestra, basta trazar, por el punto representativo de la muestra, una paralela al lado opuesto al vértice que representa al 100% de ese componente, la intersección de dicha paralela con el lado que representa al elemento en cuestión nos dará el porcentaje buscado. Así, si queremos saber el porcentaje del componente B en la mezcla M, trazamos por M una paralela al lado AC hasta cortar el lado BC, en el cual leemos,  $B = 10\%$ , procediendo de igual manera para los componentes A y C encontramos,  $A = 60\%$  y  $C = 30\%$ .

Los componentes de la mezcla que representa el punto N son:  $A = 46\%$ ,  $B = 39\%$  y  $C = 15\%$ .

La representación de análisis de agua en diagramas triangulares exige que la concentración de cada ion analizado se exprese en % y solo permite representar tres cationes o aniones por triángulo. A cada vértice corresponde el 100% de un ion (en algunos casos la suma de dos iones, por ejemplo:  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$  y  $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$ ). Generalmente los constituyentes se expresan en meq/l.

La representación de los análisis de agua en diagramas triangulares puede ser de dos tipos:

b.1) Utilizando un solo triángulo.

En un solo triángulo se localizan independientemente los

puntos representativos de los cationes y de los aniones respectivamente y se unen dichos puntos con un segmento orientado, con origen en el punto de los aniones. Fig.V.3.

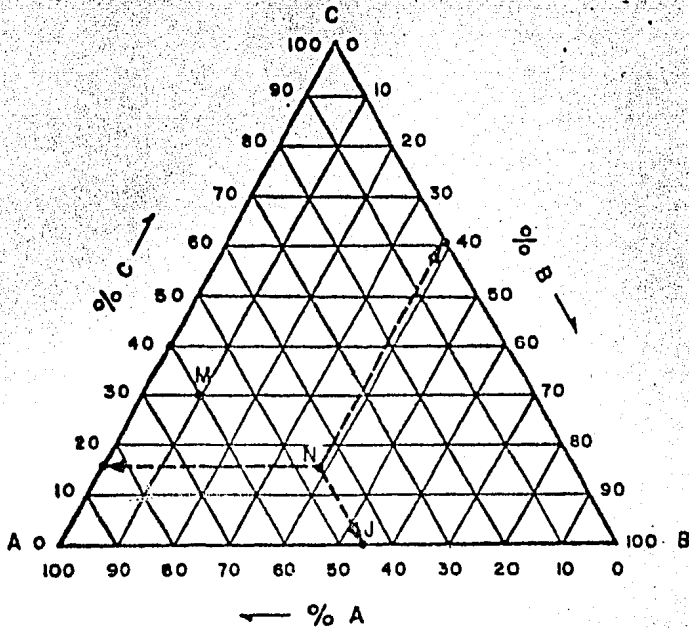


Fig. V.2 DIAGRAMA TRIANGULAR PARA MEZCLAS TERNARIAS

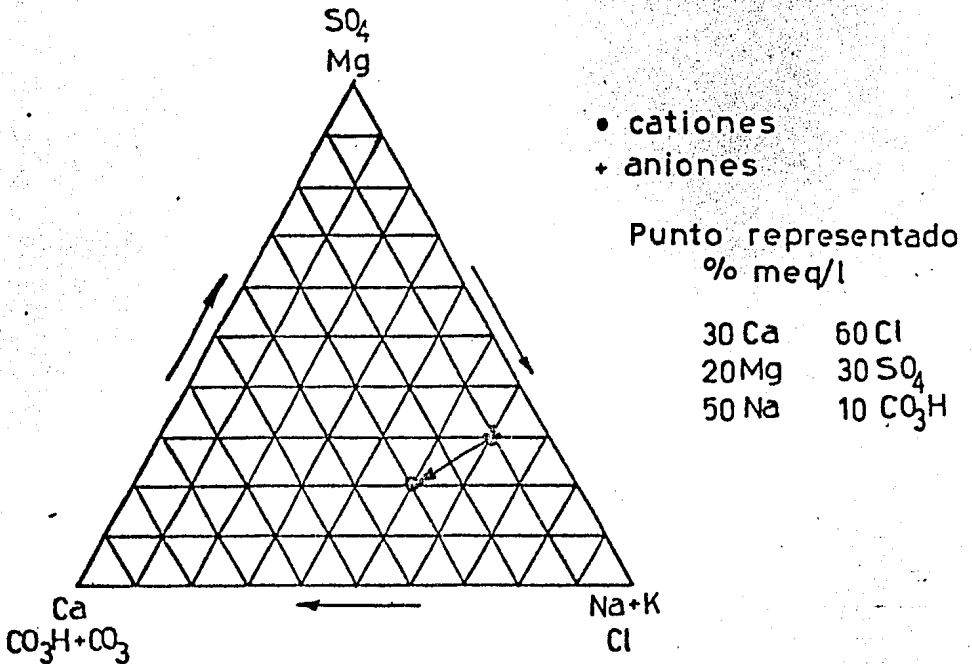


Fig.V3 DIAGRAMA TRIANGULAR SIMPLE

b.2) Utilizando dos triángulos.

Utilizando dos triángulos adosados, apoyados sobre una misma base, uno contiene aniones y el otro cationes. Siguiendo los mismos principios de localización descritos anteriormente se ubican los puntos representativos de la mezcla, para aniones y cationes respectivamente. Se trazan dos rectas paralelas a los lados exteriores de los triángulos, que pasen por los puntos representativos; la intersección de dichas rectas nos da el punto representativo de la muestra, dentro del rombo superior del diagrama. Fig. V.4.

FIG. V.4 DIAGRAMA TRIANGULAR PARA REPRESENTACION GRAFICA DE ANALISIS DE AGUA

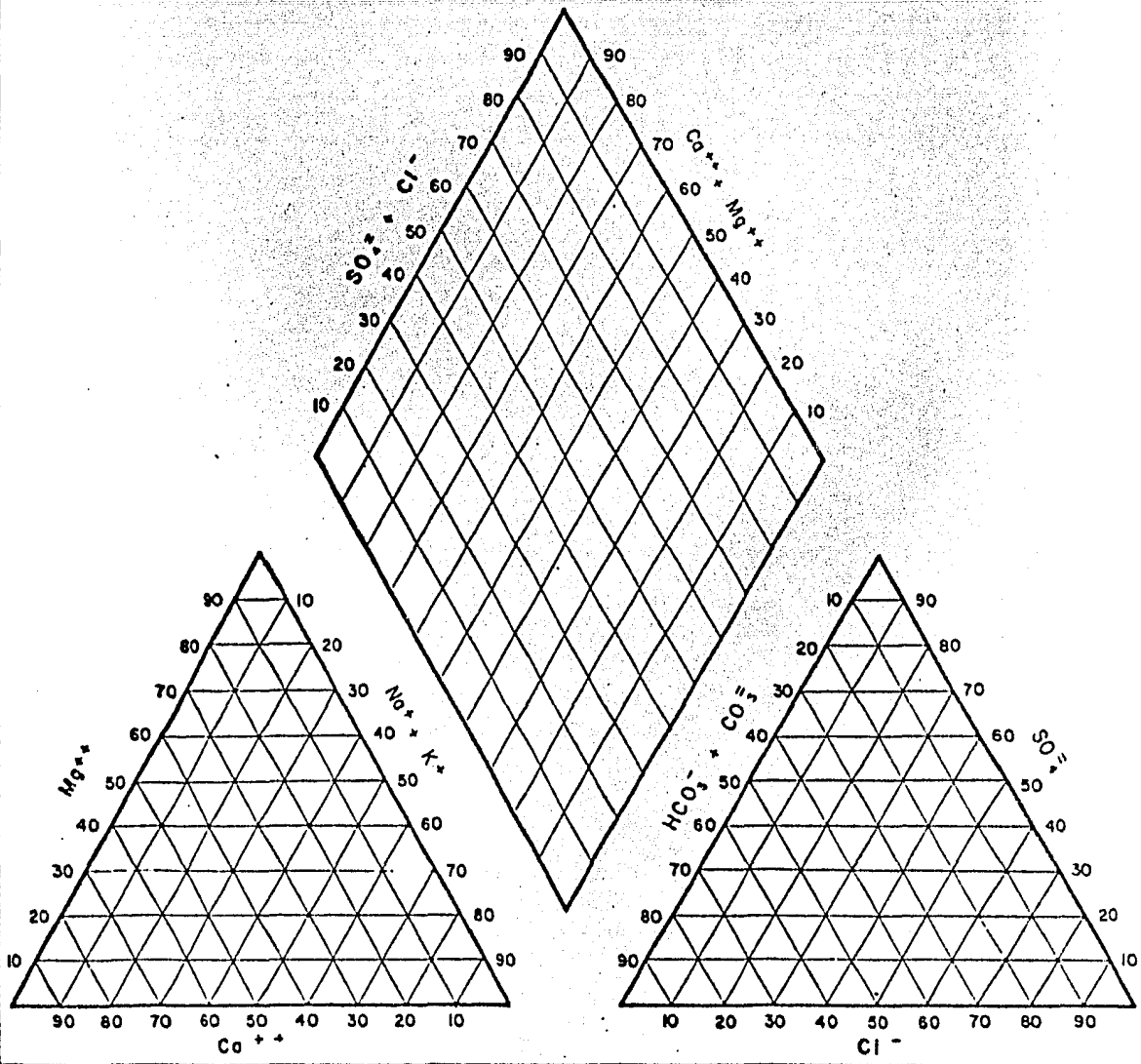


DIAGRAMA DE PALMER-PIPER

En general, los diagramas triangulares no dan idea de las concentraciones absolutas, por estar expresados en porcentajes, por lo cual a veces se agrega en el punto representativo de la mezcla una cifra indicativa, un círculo de radio proporcional al residuo seco o algún listado adjunto. En cambio, tiene la gran ventaja de que permite representar y comparar los resultados de los análisis de varias muestras en un mismo diagrama.

Por otro lado, las mezclas de aguas, precipitaciones, disoluciones, modificaciones, etc., quedan fácilmente reflejadas. Sea un diagrama de Piper, fig. V.5. Si el análisis C representa la mezcla simple de las aguas representadas en A y B, el punto C se debe encontrar sobre el segmento AB. La consideración contraria, es decir, si el análisis C se encontrara representado sobre el segmento AB, representa una mezcla de las aguas A y B no es necesariamente cierta ya que no se tienen en cuenta valores absolutos; el punto C puede estar entre A y B, siendo el total de meq/l de C mayor o menor que el total de meq/l de A más B.

Si 'a' es la concentración total del análisis A y 'b' la del análisis B, y se sospecha que el análisis C es la mezcla de A y B en la proporción volumétrica x de A y (1 - x) de B, debe cumplirse que:

$$C.l = A.x + B.(1-x)$$

y en el diagrama:



$$\frac{x}{1-x} = \frac{\overline{BC} \cdot b}{\overline{AC} \cdot a}$$

en donde  $\overline{BC}$  y  $\overline{AC}$  indican las longitudes de los segmentos indicados en el diagrama. Si se obtienen valores de  $x$  mayores que 1 o menores que 0, quiere decir que no es posible que se haya producido la mezcla.

mediante la aplicación anterior es posible seguir algunas evoluciones simples del agua. Por ejemplo, fig. V.5, un cambio de bases, Ca - Mg, no altera el porcentaje de sodio y los puntos representativos de la evolución del agua están sobre una recta paralela al lado del triángulo que contiene al Mg. El cambio de Ca por Mg viene representado en la fig. V.5 por la trayectoria AD en el triángulo de los cationes. La mezcla representada por el punto A está formada por: Ca = 35%, Mg = 35% y Na = 30%, al pasar al punto D el Ca aumenta a 50% y el Mg se reduce a 20%, conservase el mismo valor de sodio Na = 30%.

Una reducción de sulfatos equivale en principio a un cambio de  $\text{SO}_4$  por  $\text{CO}_3\text{H}$  y los puntos representativos de la evolución (A y E en el triángulo de los aniones) se sitúan sobre una recta paralela al lado  $\text{CO}_3\text{H}$  del triángulo. La mezcla representada por el punto A contiene  $\text{SO}_4 = 20\%$ ,  $\text{CO}_3\text{H} = 50\%$  y  $\text{Cl} = 30\%$ . En el punto E el  $\text{SO}_4$  se reduce a 5%, y el  $\text{CO}_3\text{H}$  aumenta a 65%, manteniendo el cloro su mismo valor.

Si se produce una disolución, por ejemplo de Ca, no varían las proporciones relativas de Mg y Na y el punto repre -

representativo de la evolución está sobre la recta que une el punto A (punto representativo de la muestra inicial) con el vértice que representa el 100% de Ca. En el caso de precipitación de Ca sucede lo mismo, solo que el punto representativo de la muestra se mueve en sentido contrario (se aleja del vértice que representa al 100% de Ca). Ejemplo: La trayectoria AF en el triángulo de los cationes representa la precipitación del Ca. La composición de la muestra A es:

Ca = 35 %

Mg = 35 %

Na = 30 %

la proporción relativa  $Mg/Na = 1.166$

Al precipitar el calcio, la mezcla queda representada por el punto F, con los siguientes componentes:

Ca = 15 %

Mg = 45.76 %

Na = 39.25 %

la proporción relativa sigue siendo  $Mg/Na = 1.166$



c) Diagramas circulares.

Se dibuja un círculo proporcional al residuo seco o al total de meq/l disueltos. Este círculo se divide en sectores proporcionales a los porcentajes de los diversos componentes. Si los componentes están expresados en meq/l, la mitad del círculo es para los cationes y la otra mitad para los aniones. Se pueden hacer diagramas circulares para aniones o cationes por separado. Figura V.6.

La principal ventaja de los diagramas circulares es la objetividad, que permite distinguir fácilmente los iones principales de la muestra; pero debido a que solo se puede representar una muestra por cada diagrama, resulta más conveniente usarlos como complemento en mapas hidrogeoquímicos, para resaltar la composición de algunos aprovechamientos.

d) Diagramas poligonales. Diagrama de Stiff modificado.

Sobre semirectas radiales o paralelas (diagramas radiales o paralelos respectivamente) se toman segmentos proporcionales a la concentración de cada ion. Se unen sus extremos, dando así, un polígono. Sobre cada semirecta se toma un solo ion o bien, un catión y un anión respectivamente. La forma del polígono permite visualizar el tipo de agua.

Los diagramas poligonales son muy útiles cuando se desea

FIG.V.6 DIAGRAMAS CIRCULARES, SUBDIVIDIDOS EN % DE epm

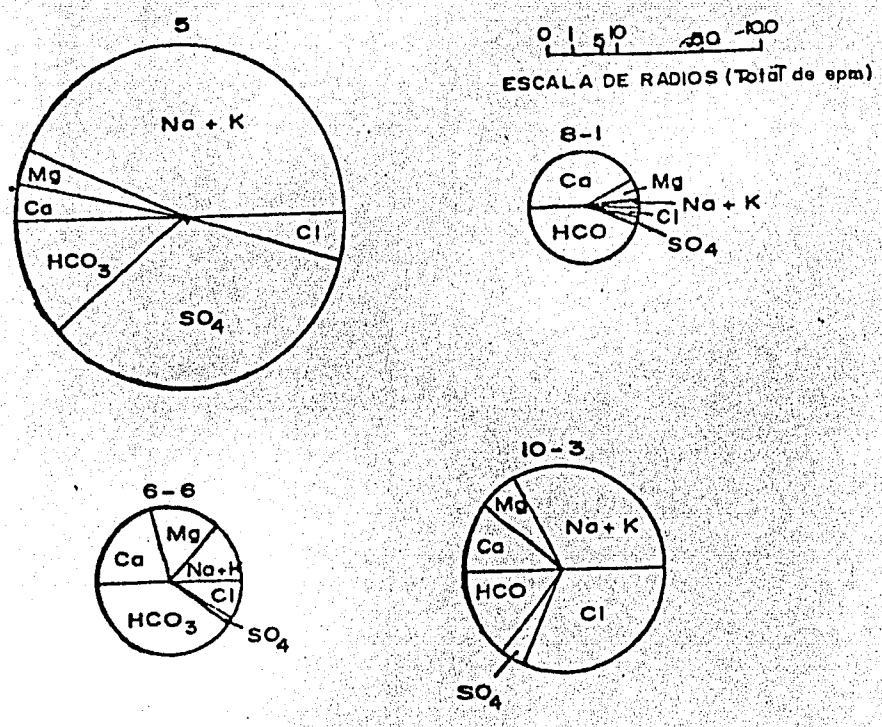
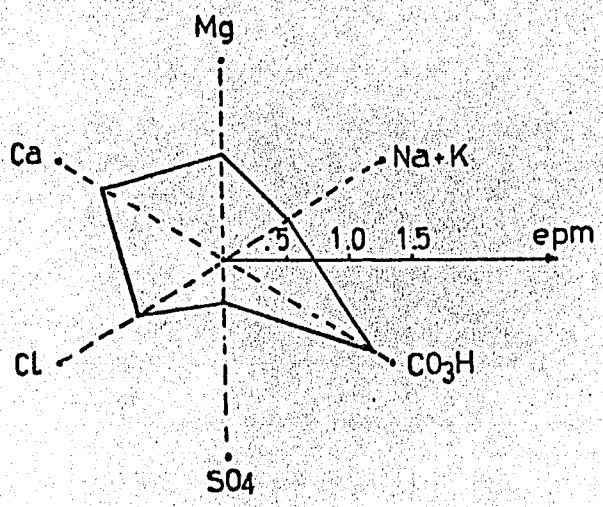


FIG.V.7a DIAGRAMA RADIAL



hacer una rápida comparación cualitativa de muchos análisis - y se prestan para ser utilizados en mapas hidrogeoquímicos.

Los diagramas radiales se forman sobre 4, 6 o 12 semirectas concurrentes, uniformemente espaciadas, en las cuales se colocan proporcionalmente los valores de cada ión, expresados en meq/l o en porcentajes de meq/l, se unen los puntos formando un polígono estelar. Fig.V.7a.

De los diagramas paralelos el más conocido es el de --- Stiff. Está formado por cuatro rectas paralelas igualmente espaciadas, cortadas por una normal, a la izquierda de la cual se colocan los cationes y a la derecha los aniones. Sobre cada recta se toma un segmento proporcional a los meq/l del ión correspondiente y se unen los extremos dando un polígono representativo. Stiff propuso la siguiente disposición de iones para aguas de yacimientos petroleros, colocandolos de arriba hacia abajo en el siguiente orden:

cationes: Na+K, Ca, Mg, Fe.

aniones: Cl, CO<sub>3</sub>H, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>.

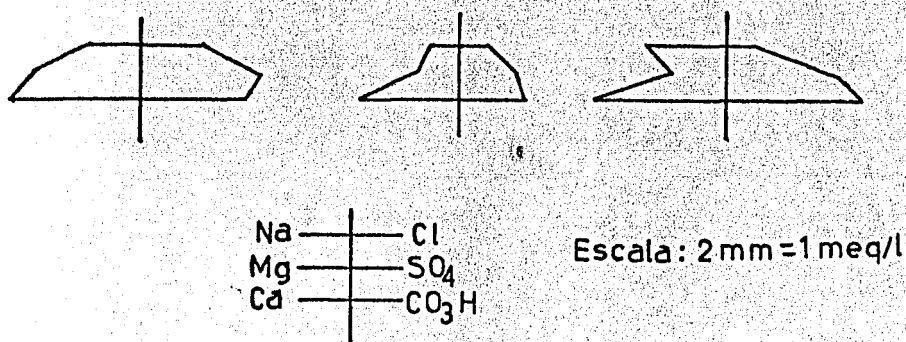
algunos autores proponen la siguiente disposición:

cationes: Na+K, Mg, Ca.

aniones: Cl+NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>H+CO<sub>3</sub>

Otra opción en cuanto a disposición de los iones, es el mismo orden del diagrama de Collins, solo que en lugar de utilizar columnas se utilizan ejes paralelos; esta manera parece más apta para la representación de los análisis de aguas subterráneas normales. Fig. V.7b.

FIG. V.7b DIAGRAMA DE STIFF MODIFICADO



e) Diagramas de escalas verticales. -Diagrama de Schoeller-.

Consiste en disponer de varias rectas verticales, con una separación constante entre ellas; a cada una se le asocia un ión que será expresado en meq/l o en ppm. En general, el origen de todas las escalas se encuentra a la misma altura.

Después de representar cada ión en su correspondiente escala, se unen todos los puntos obteniéndose una línea quebrada, que representa al agua de la muestra analizada. Este método permite comparar varios análisis al mismo tiempo, sobre un mismo diagrama. Las escalas pueden ser aritméticas o logarítmicas.

Cuando la escala es aritmética, la concentración debe estar expresada en porcentaje, ya que con concentraciones absolutas es muy difícil representar aguas diluidas junto con aguas de elevada concentración.

Los diagramas de escalas aritméticas son de utilidad solo para aguas de características muy similares.

Los diagramas de escalas verticales logarítmicas, son más conocidos como diagrama de Schoeller-Berkaloff. Fig. V.8. Para este diagrama, las dos columnas exteriores contienen concentraciones absolutas en meq/l, los ciclos logarítmicos de estas columnas coinciden horizontalmente. Para facilitar la representación, las columnas interiores se expresan en ppm acomodándolas de tal forma que coincidan horizontalmente la concentración expresada en meq/l en las columnas exteriores.

Fig. V.8a

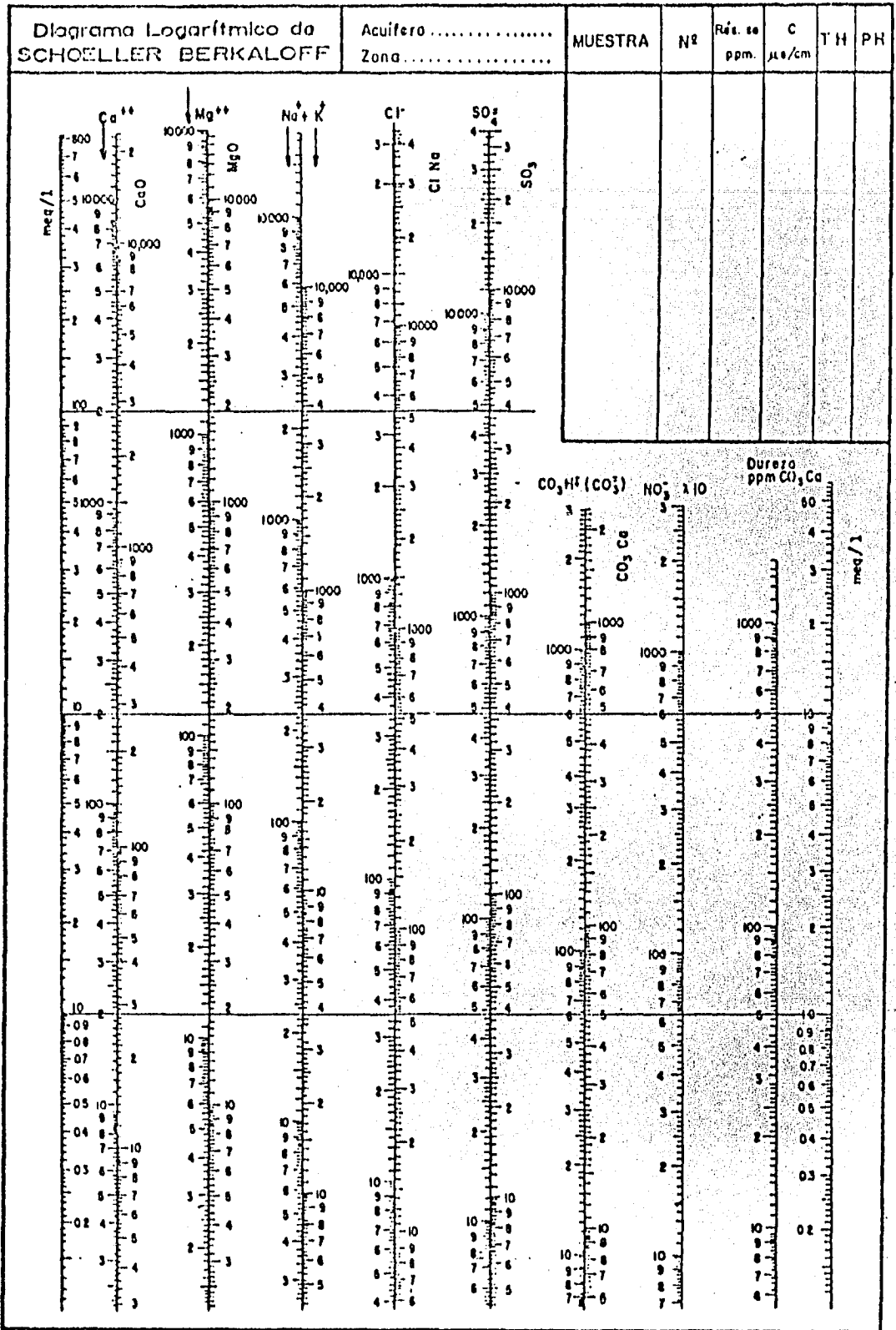
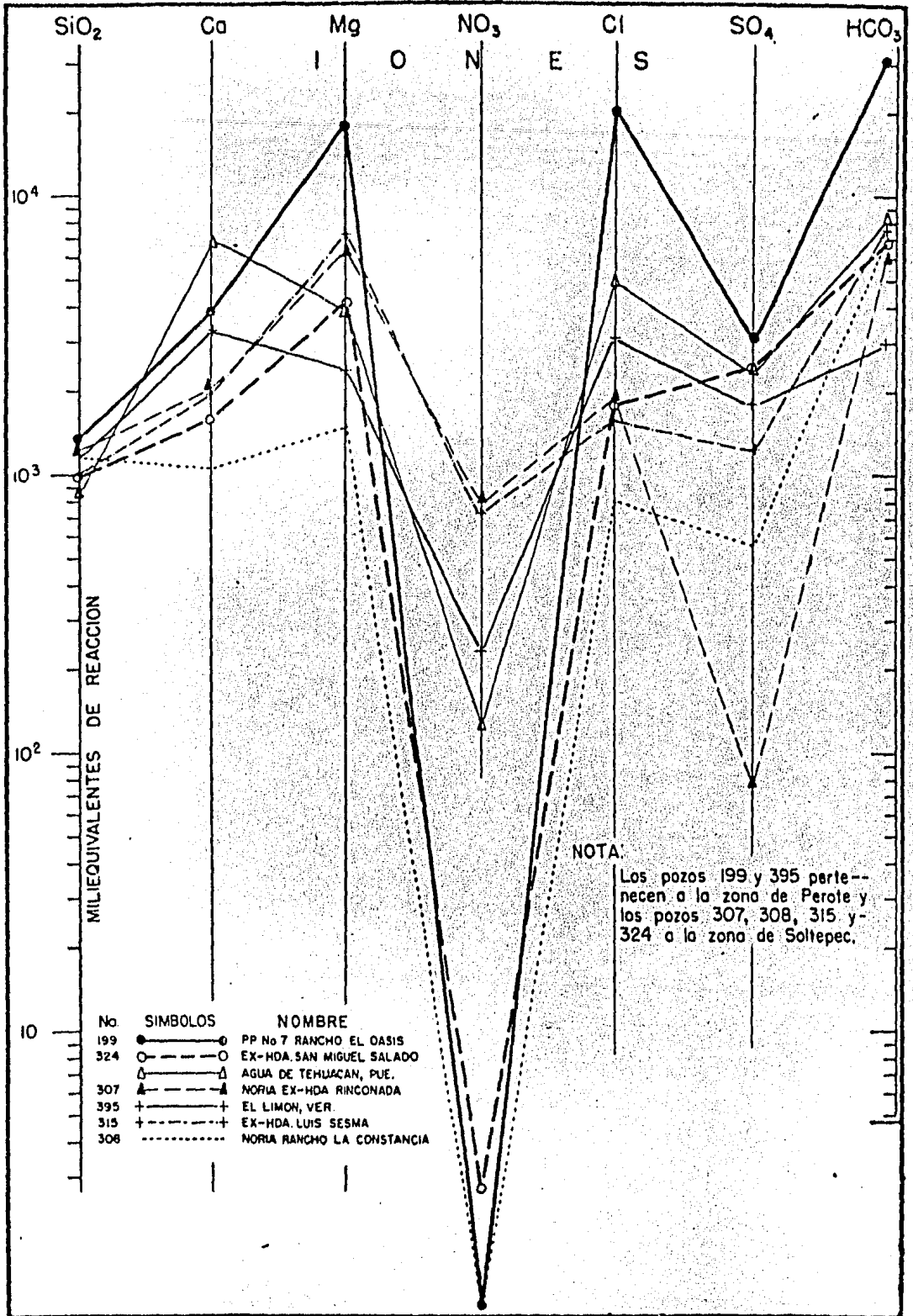


FIG. V.8b



y su equivalente en ppm en la columna interior correspondiente al ion en estudio. Así, sin tener que hacer el cambio de unidades, se puede representar indistintamente análisis expresados en meq/l o en ppm. Fig. V.8a. Si no se dispone de papel impreso adecuado, se puede emplear papel semilogarítmico normal, pero se tendrían que tomar todas las medidas en meq/l

Se pueden representar aguas diluidas como concentradas - en un mismo diagrama. La escala logarítmica tiene la pequeña-desventaja de que gráficamente las concentraciones se asen-túan o se atenuan dependiendo de su valor. Las fig. V.8a y - V.8b muestran dos formas de diagrama logarítmico.

Los diagramas logarítmicos se adaptan bien al estudio de zonas reducidas con aguas poco diversificadas.

## V.2.- Fórmula iónica.

La fórmula iónica indica el contenido relativo de los di-ferentes iones contenidos en el agua, permitiendo identificar las aguas de un mismo origen, así como la comparación de la - composición química del agua con las características físico-químicas de la roca de que proviene.

Si un terreno petroquímicamente uniforme recibe agua des-tilada, puede obtenerse agua con relación iónica muy similar a la relación iónica de los componentes de la roca. En la rea-lidad sucede que no todos los componentes de una roca son i - gualmente solubles, el grado de solubilidad varía en un rango



muy amplio, además de las reacciones que puede haber entre -- los diferentes iones puestos en solución. Pero aun así, el agua obtenida tendrá caracteres bien definidos y relacionables con la composición de la roca.

La fórmula iónica consiste en clasificar de izquierda a derecha en orden decreciente las cantidades de reacción agrupadas en aniones y cationes:



Tiene como característica el ser igual para cualquier -- punto de una capa acuífera, ser representativa del agua subterránea que contiene y estar relacionada con las características fisicoquímicas de la roca almacenante.

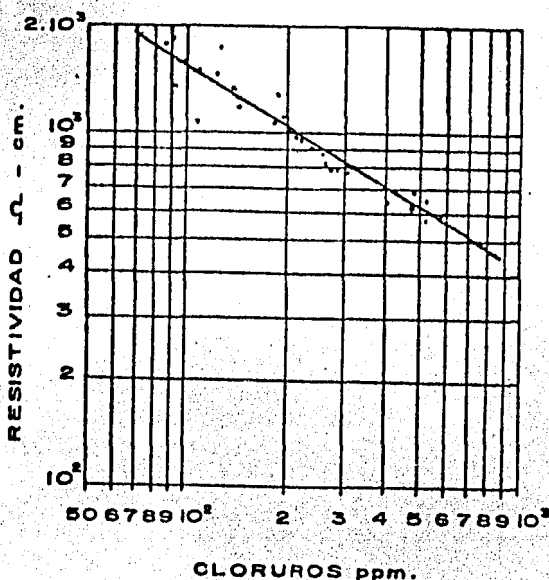
La comparación de las aguas subterráneas entre sí por medio de la fórmula iónica, solo es posible para concentraciones de  $\text{CO}_3$  que no excedan de 10 meq/l (300 mg/l) ya que después de este límite los iones  $\text{CO}_3$  y Ca pasan a ser función de la concentración.

### V.3.- Diagramas bidimensionales de dispersión.

En estos diagramas se utilizan las partes positivas de -- los ejes de un sistema coordinado cartesiano. Tienen interés -- en el estudio de análisis repetidos de un mismo punto y de aguas semejantes de una misma zona y sirven para poner de relieve relaciones entre iones.

Así por ejemplo, si se tienen  $n$  análisis del agua de un acuífero, puede representarse en las abscisas la conductividad y en las ordenadas el contenido de cloruros. Si los puntos -- tienden a una recta o a una curva sencilla se pueden ajustar aproximadamente o por algún método de correlación. Con la -- curva obtenida se puede conocer fácilmente el contenido de cloruros a partir de la conductividad . Figura V.9. El método da buenos resultados para aguas de río, ya que la variación en las concentraciones son grandes; para aguas subterráneas -- en la mayoría de los casos se obtiene solo una nebulosa de -- puntos, debido a las pequeñas variaciones temporales y espaciales de las características del agua subterránea.

FIG. V.9 RELACION ENTRE EL CONTENIDO EN CLORUROS Y LA RESISTIVIDAD A 18°C PARA EL AGUA DEL RIO USUMACINTA REFERENCIA No.7



#### V.4.- Análisis químicos expresados en función de variables no químicas.

##### a) Hidrogramas.

Son gráficas que muestran la variación de una cierta característica con el tiempo. Es la forma más clara de visualizar las fluctuaciones con el tiempo. Figura V.10.

Para aguas de ríos es interesante dibujar además de las características químicas, las variaciones de gasto. Para aguas de pozos conviene registrar los niveles piezométricos.

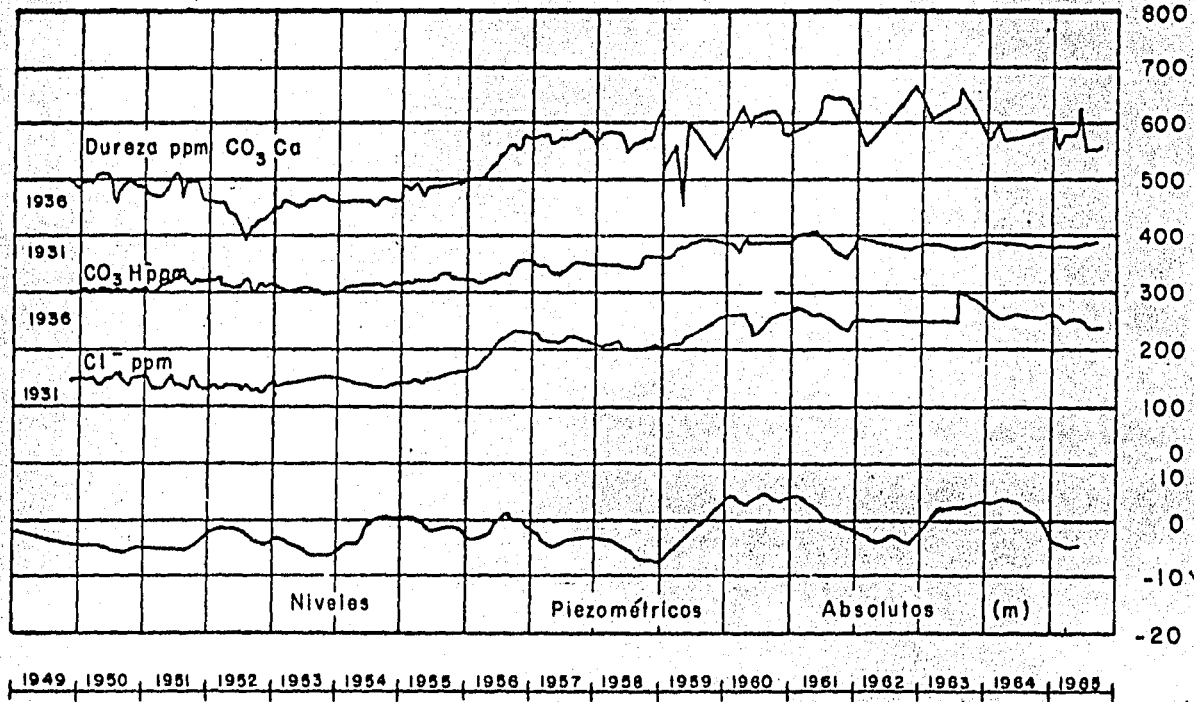
Del análisis cuidadoso de un hidrograma se pueden deducir tendencias, oscilaciones y variaciones estacionales.

Las aguas de los pozos muestran características bastante constantes; si se presentan variaciones rápidas hay que buscar causas locales en o cerca del pozo. Por ejemplo, un pozo que bombea agua dulce de un acuífero cautivo y el acuífero libre es salado, muestra que el agua que sale es inicialmente dulce, pero rápidamente se vuelve salada y después lentamente decrece la salinidad hasta alcanzar un valor constante, cabe pensar que el tubo está roto en la zona de agua salada o que existe infiltración de agua salada por el exterior del tubo.

##### b) Perfiles geoquímicos.

Si se toman muestras de agua a lo largo de una línea y -

# Figura No. V.10 HIDROGRAMAS



Referencia No. 8

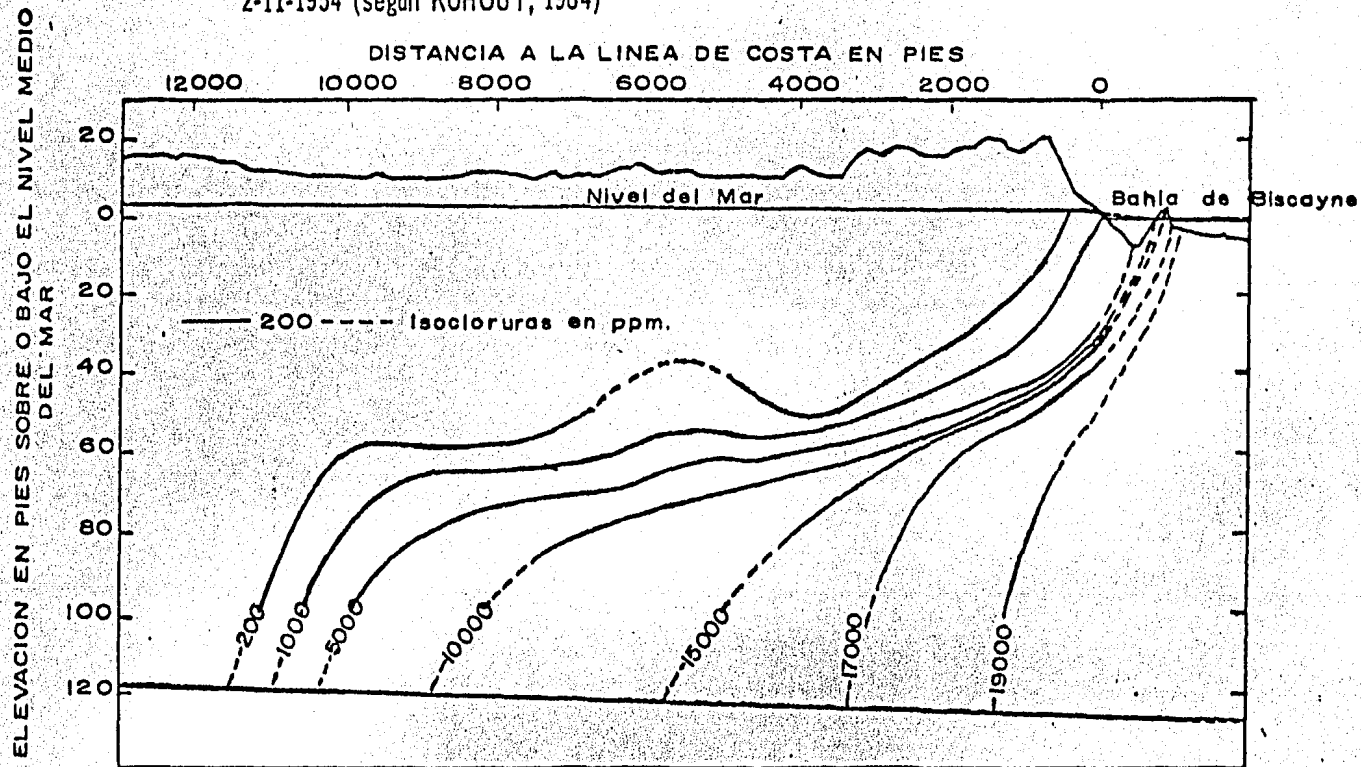
se representan los valores de las características químicas en función de la distancia, se obtiene un perfil geoquímico.

Estos perfiles en general son de dos tipos: horizontales y verticales.

Los más usuales son los verticales, que permiten estudiar en pozos totalmente ranurados si hay estratificación de aguas de diferente calidad. Hay que tener presente que el perfil de un pozo solo es válido para la zona perforada y además se exige que no existan corrientes verticales dentro de él. Son muy utilizados para seguir la evolución del contacto agua dulce-agua salada en acuíferos costeros. Figura V.11.

Los perfiles horizontales se emplean mucho para determinar variaciones laterales de calidad del agua a lo ancho de un río o a lo ancho del manto freático con él ligado. Menos frecuente es su uso para determinar la evolución de la calidad del agua a lo largo de un mismo manto acuífero.

FIG.11 SECCION NORMAL A LA COSTA EN EL AREA DE SIVER BLUFF, CERCA DE MIAMI, MOSTRANDO EL CONTENIDO DE LAS AGUAS EN CLORUROS EN PROFUNDIDAD, EN 2-11-1954 (según KOHOUT, 1964)



## V.5.- Mapas hidrogeoquímicos.

Los mapas hidrogeoquímicos tienen como finalidad representar objetivamente (en planta) la distribución espacial aproximada de las propiedades físico-químicas del agua de un acuífero determinado. Generalmente se efectúan configuraciones tanto de los principales iones como de las relaciones existentes entre algunos de ellos, así como de otras características tales como la resistividad, sólidos totales disueltos, dureza y temperatura.

Para facilitar la lectura y comprensión de la información contenida en el plano, se puede asociar a cada punto analizado un diagrama, siendo los más convenientes, el de Collins, el de Stiff y los circulares. Muchas veces es conveniente indicar también la cota del manto acuífero.

El plano sobre el cual se realizan las configuraciones debe contener la localización de los aprovechamientos muestreados, barreras, corrientes superficiales, obras de almacenamiento, cambios geológicos y cualquier información adicional que pueda tener influencia en la calidad del agua.

En la Dirección General de Geografía de la S.P.P. se elaboran cartas geohidrológicas de la República Mexicana a escala 1:250 000. Para la elaboración de esta carta se utiliza como base la carta topográfica a la misma escala. La carta geohidrológica de la DGG contiene además de la información gráfica un informe impreso en la parte posterior que contiene:

- a) Descripción de generalidades (localización, extensión, clima, estratigrafía, litología, geohidrología y zonas de veda) y delimitación de unidades geohidrológicas.
- b) Presentación de los resultados numéricos de los análisis químicos realizados sobre aprovechamientos subterráneos.
- c) Y por último se presentan los diagramas de Palmer-Piper para dichos análisis.

La principal aplicación de la serie de cartas geohidrológicas a Esc. 1:250 000 de la DGG está en el área de planeación debido a las limitaciones propias de la escala; ojalá se elaborara a Esc. 1: 50 000 que sería de mayor utilidad.

La configuración de un plano geohidrológico consiste en vaciar sobre el plano el valor de la concentración o relación iónica correspondiente a cada uno de los aprovechamientos muestreados y uniendo con una curva continua los puntos de igual valor (interpolando entre los valores conocidos) obteniéndose de esta manera una serie de curvas que constituyen la configuración; la equidistancia entre curvas es función de los contenidos de sales disueltas y de la densidad de los análisis.

Antes de intentar configurar es necesario asegurarse de que se trata de un mismo acuífero y tener conocimiento de la geología regional para estar en condición de elegir los iones cuya concentración se debe configurar; en esta elección influirá también el uso al que pretenda destinarse el agua.



Del análisis individual y de conjunto de estos planos se pueden detectar las zonas de mayor concentración de sales, - que generalmente indican los destinos de las corrientes subterráneas, ya que entre mayor sea el recorrido del agua, estará más tiempo en contacto con las rocas del acuífero y en consecuencia, la concentración de sales en el agua aumentará en el sentido de la corriente.

Como ya se mencionó al hablar de la temperatura, con ayuda de mapas y perfiles de isoterma podemos localizar aproximadamente las zonas de recarga y descarga.

La permeabilidad es inversamente proporcional a la concentración de sales. La permeabilidad baja aumenta el tiempo de contacto del agua con la roca almacén, lo cual favorece la incorporación de más iones al agua.

Cuando la geología del lugar no es muy complicada, podemos correlacionar la calidad del agua (en base a sus constituyentes) con los tipos de formación por los cuales hubiera podido atravesar. Y cuando en los acuíferos costeros aparecen focos de concentraciones muy altas, seguramente se deben a problemas de intrusión salina.

La confiabilidad de estas y otras deducciones que puedan hacerse a partir de las diferentes formas de interpretación de los análisis hidrogeoquímicos, dependerá en gran medida de los conocimientos de geología, hidrología y piezometría que tengamos del acuífero.

## V.6.- Clasificación geoquímica de las aguas.

El objeto principal de clasificar las aguas subterráneas es el de proporcionar información acerca de su composición química o del origen de algunas de sus propiedades. Existen muchas formas de clasificar el agua, con grados de complejidad muy variados. La clasificación puede hacerse atendiendo a su uso (doméstico, agrícola, ganadero, industrial o municipal) o a la medida de algunas otras propiedades, tales como el residuo seco, sólidos totales disueltos, dureza, etc.

En general, las clasificaciones que aportan mayor información son las más complicadas, sin que ello signifique que sean las mejores; para cada caso se buscará la clasificación que más convenga.

En las páginas siguientes se detallan algunas de las clasificaciones más utilizadas, con algunos comentarios sobre el uso de cada una.

a) Clasificación por el contenido de sólidos totales disueltos y el residuo seco.

CLASIFICACION	CONCENTRACION DE STD en ppm.	RESIDUO SECO en ppm.
Agua dulce	0 a 1000	0 a 3000
Agua salobre	1000 a 10 000	3000 a 10 000
Agua salada	10 000 a 100 000	10 000 a 100 000
Salmuera	más de 100 000	más de 100 000

Referencia No. 5

Esta clasificación es poco precisa pero muy difundida y práctica.

b) Clasificación por la dureza.

CLASIFICACION	CONTENIDO DE $\text{CO}_3\text{Ca}$ en ppm.
Agua blanda	0 a 60
Agua algo dura	60 a 120
Agua dura	120 a 250
Agua muy dura	250 hasta la saturación.

Referencia No. 8

c) Por los iones dominantes.

Se nombra el agua por el anión o el catión que se sobrepasa el 50% de sus sumas respectivas; si ninguno sobrepasa al...

50% se nombran los dos más abundantes. Si conviene, se puede añadir el nombre de algún ion menor de interés y que esté en concentración anormalmente alta.

Para simplificar la expresión, a cada posible ordenación de aniones y cationes se les asigna un número y una letra respectivamente, que sirven para denominar al agua. Cuando interese también resaltar la mineralización total, se puede añadir una clasificación basada en la conductividad, como la clasificación para fines agrícolas que se muestra a continuación.

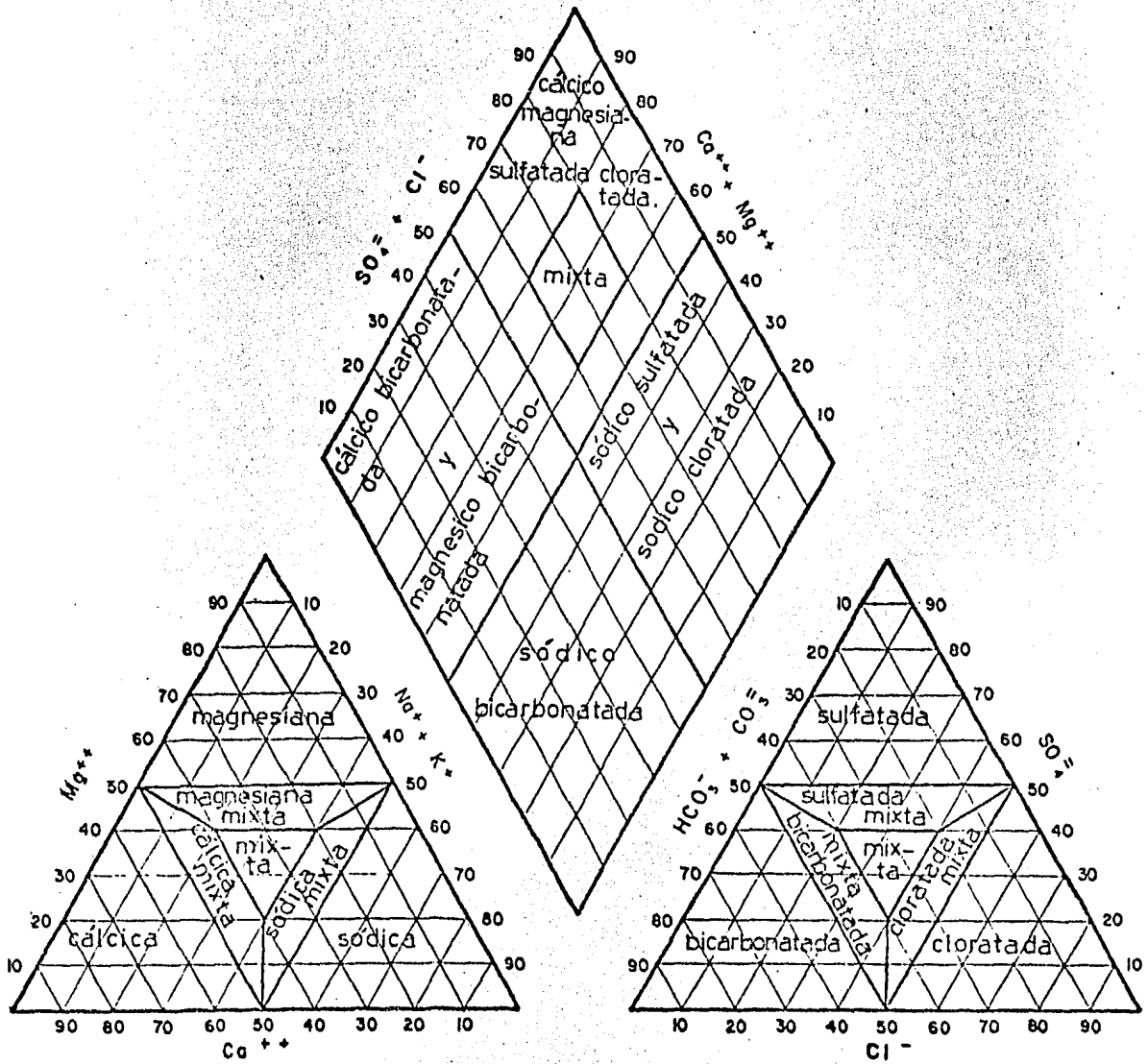
Referencia No.8

Aniones (meq/l)	Cationes (meq/l)
Cl > SO <sub>4</sub> > CO <sub>3</sub> H ....(1)	Na > Mg > Ca .....(a)
Cl > CO <sub>3</sub> H > SO <sub>4</sub> ....(2)	Na > Ca > Mg .....(b)
SO <sub>4</sub> > Cl > CO <sub>3</sub> H ....(3)	Mg > Na > Ca .....(c)
SO <sub>4</sub> > CO <sub>3</sub> H > Cl ....(4)	Mg > Ca > Na .....(d)
CO <sub>3</sub> H > Cl > SO <sub>4</sub> ....(5)	Ca > Na > Mg .....(e)
CO <sub>3</sub> H > SO <sub>4</sub> > Cl ....(6)	Ca > Mg > Na .....(d)
Grupo	Conductividad a 25°C en mhos/cm
C1	0 a 250
C2	250 a 750
C3	750 a 2250
C4	mayor que 2250

La simplicidad de estas clasificaciones no permite, en general buenas deducciones en cuanto a relaciones entre aguas pero se adapta muy bien a los planos geohidrológicos y a los

diagramas triangulares. Figura V.12.

FIG. V.12 TIPOS DE AGUAS DEDUCIDAS DE UN DIAGRAMA DE PIPER.



d) Clasificación de Shoeller.

Esta clasificación, propuesta en 1955, tiene en cuenta los valores absolutos de las concentraciones de cada ion, expresadas en meq/l, pero conduce a una denominación complicada.

En esta clasificación se distinguen:

- UN GRUPO, expresado con un número de tres cifras, que representan a los cloruros, sulfatos y bicarbonatos respectivamente.
- UN TIPO, determinado por el valor que tenga el índice de cambio de base (icb).

$$icb = \frac{Cl - (Na + K)}{Cl}$$

Tipo 1 ..... icb < 0

Tipo 2 ..... icb = 0

Tipo 3 ..... icb > 0

A cada tipo va asociado un subtipo. Ver Tabla V.1

- UNA CLASE, obtenida con la clasificación por iones dominantes (V.7c), sin la parte referente a la conductividad.

Existen otras clasificaciones, tales como la de Souline, Chase Palmer, Shchkarev entre otras; que son más completas pero a la vez más complicadas, lo cual las hace menos prácticas.

TABLA V.1

Clasificación de Schoeller para aguas subterráneas.

Grupo de cloruros	Denominación	Cl (meq/l)	Observaciones.
1	Hiperclorurado	700	hasta saturación. agua de mar 560.
2	Clorotalásico	700 a 420	
3	Clorurado fuerte	420 a 140	
4	Clorurado medio	140 a 40	
5	Oligoclorurado	40 a 15	
6	Clorurado normal	10	
Grupo de sulfatos	Denominación	SO <sub>4</sub> (meq/l)	Observaciones.
1	Hipersulfatado	58	agua de mar 58
2	Sulfatado	58 a 24	
3	Oligosulfatado	24 a 6	
4	Sulfatado normal	10	
Grupo de bicarbonatos	Denominación	CO <sub>3</sub> H (meq/l)	
1	Hiperbicarbonatado	7	
2	Bicarbonatado normal	7 a 2	
3	Hipobicarbonatado	2	

Referencia No. 8

TABLA V.1

Clasificación de Schoeller para aguas subterráneas.  
(continuación)

Tipo	Caracter meq/l	Subtipo	Caracter meq/l	Parcial	Caracter meq/l
1	Cl > Na icb(+)	a	Ca > CO <sub>3</sub> H	$\left\{ \begin{array}{l} x \\ xy \\ y \end{array} \right.$	Ca > SO <sub>4</sub> + CO <sub>3</sub> H
		ab	Ca = CO <sub>3</sub> H		Ca = SO <sub>4</sub> + CO <sub>3</sub> H
		b	Ca < CO <sub>3</sub> H		Ca < SO <sub>4</sub> + CO <sub>3</sub> H
2	Cl = Na icb=0	a	Ca > CO <sub>3</sub> H		
		ab	Ca = CO <sub>3</sub> H		
		b	Ca < CO <sub>3</sub> H		
3	Cl < Na icb(-)	a	Ca CO <sub>3</sub> H	$\left\{ \begin{array}{l} x \\ xy \\ y \end{array} \right.$	$\begin{array}{l} \text{CO}_3 < \text{Mg} + \text{Ca} \\ \text{CO}_3 = \text{Mg} + \text{Ca} \\ \text{CO}_3 > \text{Mg} + \text{Ca} \end{array}$
		ab	Ca CO <sub>3</sub> H		
		b	Ca CO <sub>3</sub> H		

Referencia No. 8



## VI.- REQUISITOS DE CALIDAD DEL AGUA PARA DIFERENTES USOS.

### VI.1.- Concepto de calidad del agua.

Entre los líquidos más comunes el agua es el disolvente más universal, por lo cual es imposible encontrar este líquido químicamente puro en la naturaleza. El tipo y cantidad de materia disuelta dependerá de la etapa en que se encuentre - el agua dentro del ciclo hidrológico y de las características propias del lugar. Los sólidos totales disueltos varían a lo largo de este recorrido; aumentando en algunas etapas y disminuyendo en otras.

La capacidad del agua para disolver sustancias depende de:

- la superficie de contacto agua-soluto,
- la velocidad de circulación del agua,
- la presión y temperatura.

Estos factores contribuyen a que, por lo general, la concentración salina sea mayor en las aguas subterráneas que en las superficiales, en cambio la materia orgánica y los microorganismos disminuyen rápidamente con la profundidad, al grado que en terrenos granulares y finos bastan dos o tres metros para su eliminación.

La calidad del agua es un concepto relativo, el calificativo de buena o mala se dará en función del uso al que se destine. Su composición y el conocimiento de los efectos que

pueda causar cada uno de sus componentes, permitirá establecer su posible utilización.

## VI.2.- Reglamentación de los requisitos de calidad del agua.

Las aguas subterráneas y superficiales que son utilizadas para consumo humano, agrícola ganadero o industrial, necesitan cumplir con ciertos requisitos respecto a su contenido de elementos químicos en solución, propiedades físicas y a la presencia de materia orgánica.

En cuanto a normas de calidad se refiere, la Organización Mundial de la Salud (OMS) es la máxima autoridad, pero también la mayoría de los países tienen sus propias normas, generalmente muy similares a las de la OMS.

Se dice que un agua es potable cuando puede ser bebida por el hombre sin peligro alguno para su salud. El criterio para considerar potable o no potable un agua ha ido cambiando con el tiempo, debido a la modificación de hábitos de vida de las personas y a los avances logrados en la rama de la ingeniería sanitaria, de ahí que la aparición y evolución de normas que reglamentan la potabilidad del agua han seguido los pasos que la investigación ha ido desarrollando, de modo que en la actualidad se norman no solo los efectos que pueden producir los diferentes elementos en el organismo humano, sino también los procedimientos analíticos que permitan su determinación precisa e inequívoca.

### VI.3.- Normas de potabilidad del agua de la OMS.

Para conocer la calidad de cierta agua destinada al consumo humano, se comparan los resultados de los análisis químicos con los límites que permitan las normas que hayamos adoptado como patrón.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) en sus 'International Standars for Drinking Water' (1963), adopta el criterio de dividir en cuatro grupos las características que afectan la calidad del agua, estas son:

- a) Características químicas y físicas.
  - aa. Sustancias químicas que afectan a la potabilidad del agua.
  - ab. Sustancias químicas que pueden afectar a la salud.
  - ac. Sustancias tóxicas.
  - ad. Indicadores químicos de contaminación.
- b) Características bacteriológicas.
- c) Características biológicas.
- d) Características radioactivas.
- a) Características químicas y físicas.

A continuación se relacionan las sustancias que al sobrepasar la concentración permitida, implicarían la impotabilidad del agua.

aa. Sustancias químicas que afectan a la potabilidad del agua.

TABLA VI.1  
(Referencia No.8)

Sustancia	Concentración máxima aceptable	Concentración máxima permitida
Sólidos totales	500	1500
Color(ppm de la escala de platino-cobalto)	5	50
Turbidez en SiO <sub>2</sub> (dióx. de Silicio).	5	25
Gusto	No detectable	----
Olor	No detectable	----
Hierro (Fe)	0.3	1
Manganeso (Mn)	0.1	0.5
Cobre (Cu)	1	1.5
Zinc (Zn)	5	15
Calcio (Ca)	75	200
Magnesio (Mg)	50	150
Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	200	400
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	200	600
pH	7 a 8.5	6.5 a 9.2
Sulfato magnésico-sódico	500	1 000
Sustancias fenólicas	0.001	0.002
Contaminantes orgánicos (carbo- no extraído con cloroformo)	0.2	0.5
Tensoactivos (detergentes)		
ABS (Alkilbencil-sulfonato)	0.5	1

(Valores expresados en mg/l a excepción del pH)

ab. Sustancias químicas específicas que pueden afectar a la salud.

Fluoruros. Se admite una concentración en el agua de bebida

entre 0.5 y 1 mg/l con un límite máximo permitido de 1.5 mg/l. La ausencia de fluor tiene también un efecto pernicioso en la conservación de los dientes, por lo que en algunas partes se añade a las aguas de abastecimiento municipal, si estas son hipocloruradas.

Nitratos. Se fija como límite máximo permitido el de 45 mg/l en  $\text{NO}_3$ , pues cantidades superiores pueden llegar a producir, principalmente en los niños, la denominada enfermedad azul (metahemoglobinemia) a causa de efectos sobre la sangre.

ac. Sustancias tóxicas.

TABLA VI.2

Sustancia	Concentración máxima permisible (mg/l)
Plomo	0.05
Arsénico	0.05
Selenio	0.01
Cromo (hexavalente)	0.05
Cianuro	0.20
Cadmio	0.01
Bario	1.00
Plata	0.05

Referencia No.8

ad) Indicadores de contaminación.

TABLA VI.3

Indicador	Límite máximo para considerar que hay contaminación (mg/l).
Demanda química de oxígeno (DQO)	10
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	6
Nitrógeno total (excluido $\text{NO}_3$ )	
$\text{NH}_3$	0.5
Carbono (extraído al cloroformo)	0.5
Grasas	1

b) Características bacteriológicas.

Los criterios de calidad bacteriológica del agua se basan en la determinación de aquellos indicadores de contaminación que manifiestan la presencia de microorganismos que pueden afectar directamente la salud humana.

Para evitar la enorme complicación y dificultad que supone la realización de determinaciones exhaustivas, se adoptan índices de calidad, fijándose para ellos los límites que se consideren adecuados. Así, en las normas de la OMS se utiliza la determinación de las bacterias del grupo coliforme - como indicador bacteriológico de la contaminación por heces fecales, fijándose los límites de tolerancia en función de los métodos de laboratorio que se sigan en el estudio.

c) Características biológicas.

Su particular interés reside en la rápida detección de la contaminación en el examen biológico, llamado también microscópico. Estos análisis suponen una determinación cualitativa de los tipos de organismos y una estimación cuantitativa de su número. Se detectan partículas sólidas orgánicas e inorgánicas, incluyendo diversos organismos vivientes bajo el nombre de plankton.

Los resultados pueden expresarse en mg/l, tomando el valor de 1 como peso específico de cada organismo. Actualmente se tiende a expresarlos en unidades de área o de volumen, adoptando como unidad estándar un cuadrado o un cubo de 20 micras de lado. Al parecer, la existencia de unas 300 unidades área-estándar por ml o más, puede desarrollar malos olores y gustos. No obstante esta cifra, algunos otros organismos presentes pueden alterar sus efectos.

d) Características radioactivas.

Para las aguas de abastecimiento municipal se han fijado unos valores límites por debajo de los cuales se admiten para el uso público, y que en caso de que alguno de ellos sea excedido, deberán realizarse análisis radioquímicos para determinar su naturaleza antes de dictaminar acerca de su posible utilización.

Las desintegraciones nucleares producen radiaciones alfa, beta y gama, de las cuales la máxima peligrosidad corresponde a los emisores alfa, debido a su bajo poder de penetración, - por lo que en teoría deberían estar ausentes en el agua subterránea destinada al uso doméstico. La cantidad máxima permisible que tolera la OMS, para cada uno de los isótopos de radiaciones alfa es:

TABLA VI.4

Radioisótopo	Concentración máxima permisible (pc/cc)
Uranio natural ( $U^{238}$ )	0.2
Torio natural ( $Th^{232}$ )	0.05
Radio-226 ( $Ra^{226}$ )	0.01
Plutonio-239 ( $Pu^{239}$ )	5.0
Para cualquier mezcla de emisores alfa, excepto Plutonio-239 y Actinio-227.	0.01

VI.4.- Normas de potabilidad del agua. Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA), México.

En México, la institución encargada de normar los requisitos de calidad que debe cumplir el agua, de acuerdo a su uso, es la SSA. Dichas normas fueron publicadas en el diario oficial el 2 de julio de 1953, pero como la SSA no las ha actualizado, la SEDUE (antes SAHOP) en 1982 hizo una revisión de las mismas y como resultado, ese mismo año publicó sus pro



NORMAS DE CALIDAD DEL AGUA POTABLE

S. S. A.

TABLA VI.5

Características físicas	Límite máximo permisible.	Observaciones
Turbiedad	10 (Esc. de Sílice)	De no cumplir con estos requisitos, se admitirán aquellos que sean tolerables para los usuarios.
Color	20 (Esc. Platino-Cobalto)	
Sabor	Insípida	
Olor	inodora	
Características químicas.	Límite máximo permisible (ppm)	
Nitrógeno amoniacal (N)	0.50	
Nitrógeno proteico (N)	0.10	
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	5.00	
Potencial hidrógeno (pH unidimensional)	8.00	
Oxígeno consumido(O)	3.00	
Sólidos totales disueltos (STD)	1 000.00	
Alcalinidad total (CaCO <sub>3</sub> )	400.00	
Dureza Total (CaCO <sub>3</sub> )	300.00	
Cloruros (Cl)	250.00	
Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	250.00	
Magnesio (Mg)	125.00	
Zinc (Zn)	15.00	
Cobre (Cu)	3.00	
Fluoruros (F)	1.50	
Hierro y Manganeso (Fe y Mn)	0.30	
Arsénico (As)	0.05	
Selenio (Se)	0.05	
Cromo (Cr)	0.05	
Compuestos fenólicos (fenol)	0.001	
Plomo (Pb)	0.10	
Cloro libre en aguas cloradas más de	0.20	

TABLA VI.5  
(continuación)

Características biológicas	Número máximo permisible
Organismos de los grupos coli y coliformes	20
Colonias bacterianas por centímetro cúbico de muestra	200

pias normas, conjuntando los criterios de la SSA y la OMS.

Desafortunadamente en nuestro país no siempre es posible cumplir con los requisitos que marcan las normas, sobre todo en el medio rural por lo difícil que resulta abastecer de agua potable a la población dispersa, lo cual trae como consecuencia que se tenga que consumir el agua de bordos, jagüeyes o ríos sin previo tratamiento; en este tipo de aprovechamientos es común encontrar contenidos de S.T.D. por encima de las 1000 ppm. En estos casos el límite de aceptación lo fijará la propia tolerancia del consumidor.

Ingerir agua con más de 1000 ppm, normalmente no causa problemas a la salud, siempre y cuando no se encuentren en exceso algunos elementos críticos, como los que a continuación se mencionan:

Arcénico, Selenio y Cromo.- No es común encontrarlos en el agua subterránea, pero por ser muy tóxicos, su concentración en el agua potable no debe ser mayor de 0.05 ppm.

Cobre, Zinc, Hierro y manganeso.- El cuerpo puede llegar a tolerar cantidades un poco mayores a las establecidas como requisito. No es común encontrarlos en el agua.

Los nitratos y flururos ocasionan los efectos mencionados en el apartado ab, del inciso VI.3.

Sulfatos.- Concentraciones altas de este compuesto, actúan como laxantes. En combinación con otros elementos, produce sabor desagradable.

El sodio, cloro, magnesio, calcio, carbonatos y bicarbonatos en concentraciones relativamente altas, no representan gran peligro, ya que pueden ser eliminadas por el organismo.

#### VI.5.- Comparación de diferentes normas de calidad para agua potable.

En la tabla VI.6 aparecen las normas de calidad para agua potable de la OMS, México, Estados Unidos de Norteamérica, Francia y España; en las cuales, antes de hacer la comparación, cabe observar que:

- a) En USA las normas cambian para diferentes cuencas.
- b) Es probable que a la aparición de este trabajo, las normas vigentes en algunos países hayan cambiado, - debido a la revisión y corrección de que son objeto, sobre todo en los países desarrollados.

TABLA VI.6 Características comparativas en reglamentaciones de aguas potables (valores en ppm)

Caracteres	O.M.S. (1)		MEXICO (2)	FRANCIA (3)	U.S.A. (4)		ESPAÑA (5)	
	Conveniente	Admisible	Máximo permisible	Máximo permisible	Conveniente	Admisible	Conveniente	Admisible
Arsénico (As)	----	0.20	0.05	0.05	0.01	0.05	----	0.20
Bario (Ba)	----	1.00	----	----	----	1.00	----	----
Cadmio (Cd)	----	0.01	----	----	----	0.01	----	----
Carbono extraído con cloroformo (CCE)	0.20	0.50	----	----	0.20	----	----	----
Cianuro (CN)	----	0.01	----	No detectable	0.01	0.20	----	0.01
Cloruros (Cl)	200.0	600.00	250.00	250.00	250.00	----	250.00	350.00
Cobre (Cu)	1.00	1.50	3.00	1.00	1.00	----	----	1.50
Color (Pt-Co)	5	50	20	20	15	----	5	15
Cromo hexavalente (Cr)	----	0.05	0.05	No detectable	----	----	----	0.05
Detergentes (ABS)	0.50	1.00	----	----	0.50	----	----	No detectable
DQO (O <sub>2</sub> )	----	----	3	----	----	----	3	3
Dureza (CO <sub>3</sub> Ca)	----	----	300	300	85 - 200	----	----	----
Fenoles (Fenol)	0.001	0.002	0.001	Ausencia	0.001	----	----	0.001
Fluoruro (F)	0.5 a 1.0	1.50	1.50	1.00	0.8 - 1.7	1.6 - 3.4	1.00	1.50
Hierro (Fe)	0.30	1.00	0.3(Fe+Mn)	0.20	0.30	----	0.2(Fe+Mn)	0.3(Fe+Mn)
Magnesio (Mg)	50.00	150.00	125.00	125.00	----	----	50.00	100.00
Manganeso (Mn)	0.10	0.50	----	0.10	0.05	----	----	----
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	----	45.00	----	44.00	45.00	----	30.00	30.00
Olor	Aceptable	----	Aceptable	Aceptable	Aceptable	----	Inodora	Inodora
pH a 18°C	7 - 8.5	6.5 - 9.2	8.00	----	----	----	7 - 8.5	6.5 - 9.2
Plata (Ag)	----	----	----	----	----	0.05	----	----
Plomo (Pb)	----	0.10	0.10	0.10	----	0.05	----	0.10
Residuo seco	500	1 500	----	2 000	500	----	750	1 500
Sabor	Aceptable	----	Aceptable	Aceptable	Aceptable	----	Insípida	Insípida
Selenio (Se)	----	0.05	0.05	0.05	----	0.01	----	0.05
Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	200.00	400.00	250.00	250.00	250.00	----	200.00	400.00
Turbidez (SiO <sub>2</sub> )	5	25	10	2.50	5.00	----	5.00	10.00
Zinc (Zn)	5.0	15.00	15.00	5.00	5.00	----	----	1.50

En USA, para los fluoruros el límite decrece al aumentar la temperatura.

- (1) O.M.S., International Standards for drink-water. Ginebra 1963.
- (2) Secretaría de Salubridad y Asistencia. México, 2/VII/1963.
- (3) Code de la Santé Publique (I.O. 26/VIII/1961).
- (4) U.S. Public Health Service. Drinking-water standards, 1962.
- (5) Código Alimentario Español. 1967.

En la Tabla VI.6 podemos observar que, no obstante el aumento de pesticidas en las últimas décadas, ninguna de las normas analizadas considera su cuantificación. Además, México y Francia tampoco consideran los detergentes ABS, siendo que estos contaminantes son cada vez más comunes en el agua, sobre todo en la superficial.

En España y en Estados Unidos de Norteamérica se ha seguido en, general, el mismo criterio que la O.M.S., fijandose dos límites: límite conveniente y límite admisible, con la diferencia de que en USA el límite admisible solo se especifica para sustancias tóxicas.

México y Francia definen como límite único el límite máximo permisible, quedando este en general, entre los dos límites definidos por la O.M.S.

Las normas de la S.S.A. se mantienen siempre dentro de los límites fijados por la O.M.S., excepto para el cobre, para el cual se acepta el doble, solo que, como ya se dijo anteriormente, en muchas regiones del país, sobre todo en el medio rural, no es posible acatar dichas normas.

De las normas francesas cabe destacar que el límite máximo permisible para el residuo seco lo fija en 2000 mg/l, frente a los 1500 mg/l de la O.M.S. y los 250 mg/l de cloruros ante los 600 mg/l que admite la O.M.S.

Las normas españolas se mantienen dentro de los límites

fijados por la O.M.S., incluso con límites más conservadores para algunas sustancias, como el cloro, magnesio, nitratos, zinc, color y turbidez.

En las normas de USA se observa una marcada preocupación por las sustancias tóxicas y definen los límites de fluoruros en función de la temperatura y al magnesio en función de los sulfatos.

#### VI.6.- Calidad del agua para riego.

Para conocer la calidad del agua para riego, se ha optado por utilizar la clasificación de Wilcox (1948), en la cual por medio de la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS), se obtiene la clasificación del agua para riego.

La conductividad eléctrica es directamente proporcional a la concentración de sólidos totales disueltos. Normalmente expresada en micromhos-cm.

La relación de adsorción de sodio se obtiene por medio de la fórmula:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

en donde las concentraciones de Na, Ca y Mg están dadas en  $\text{mg/l}$ . Con esta relación se obtiene el peligro que entraña el uso del agua para riego, el cual, como puede apreciarse en la fórmula, queda supeditado a las concentraciones de los principales cationes.

Los valores de CE y RAS, son graficados en el nomograma de clasificación (Fig.VI.1), obteniéndose de esta manera, la clase de agua para riego, la cual está definida por los parámetros C y S y sus respectivos subíndices.

El significado de las diferentes clases de agua, así como algunas recomendaciones para el uso en riego, se comentan a continuación:

#### C1 SALINIDAD BAJA.

Puede usarse para riego en la mayoría de los suelos y para casi todas las plantas, con pocas probabilidades de que aumente la salinidad.

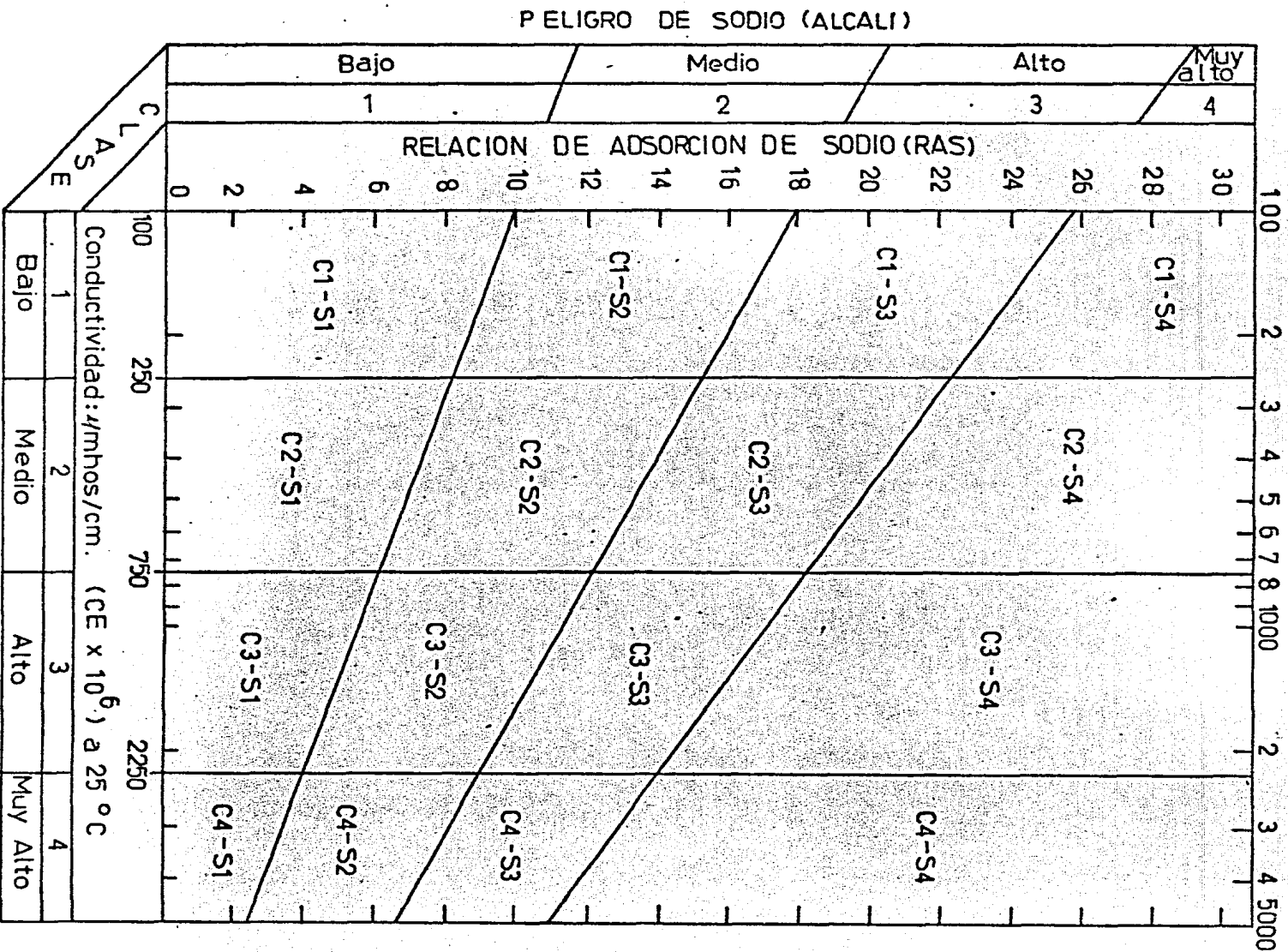
#### C2 SALINIDAD MEDIA.

Puede usarse, si se hacen lavados moderados. Procurando cultivar plantas moderadamente tolerantes a las sales, puede usarse sin excesivo control de la salinidad.

#### C3 ALTAMENTE SALINA.

No puede usarse en suelos de drenaje deficiente. Aun con drenaje adecuado, se requiere un manejo especial para el control de la salinidad, además de seleccionar plantas que sean bastante tolerantes a las sales.

FIG. VI.1 CLASIFICACION DE AGUAS PARA RIEGO





#### C4 MUY ALTAMENTE SALINA.

No es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias, aunque ocasionalmente puede usarse bajo circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables y con drenaje adecuado y el agua para riego debe de aplicarse en exceso con el fin de llevar a cabo un lavado fuerte. Las plantas que se cultiven deberán ser muy tolerantes a las sales.

#### S1 CON POCO SODIO.

Puede usarse para riego en casi todo tipo de suelos, con poco peligro de que el sodio intercambiable llegue a niveles perjudiciales. Sin embargo, las plantas sensitivas al sodio, como algunos frutales (fruto con hueso) y aguacate, pueden llegar a niveles de concentración dañinos.

#### S2 CON CONTENIDO MEDIO DE SODIO.

Representa peligro en suelos de textura fina y en aquellos que contengan una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavados leves, a menos que haya yeso en el suelo. Este tipo de agua puede usarse en suelos orgánicos o de textura gruesa con buena permeabilidad.

#### S3 CON ALTO CONTENIDO DE SODIO.

Conducirá a altos contenidos de sodio intercambiable en la mayoría de los suelos, por lo cual se requerirá de un manejo especial, lavados fuertes, buen drenaje y adiciones de materia orgánica. Los suelos yesíferos no desarrollarán niveles perjudiciales de sodio intercambiable. Los mejoradores químicos deberán usarse, para el reemplazo de sodio intercambiable, excepto en el caso de que no sea factible el uso de -

mejoradores en aguas de muy alta salinidad.

#### S4 MUY ALTO CONTENIDO DE SODIO.

Generalmente no es apropiada para el riego, excepto en ca sos de baja y quizá media salinidad, en donde la solución del calcio del suelo o el empleo de yeso u otros mejoradores, ha gan factible el uso de esta agua.

La conductividad eléctrica puede tomarse como un índice en la selección de cultivos, en la tabla VI.7 se presenta la tolerancia relativa de diferentes plantas a las sales.

El boro en pequeñas concentraciones es esencial para el desarrollo normal de las plantas y la falta de este elemento o su presencia en concentraciones altas, afecta su crecimiento.

La tabla VI.8 muestra la clasificación de algunos cultivos, a la vez que dentro de cada grupo disminuye su tolerancia en orden descendiente.

#### VI.7.- Calidad del agua para abrevadero.

El agua usada en granjas y ranchos ganaderos, normalmente debe cumplir con los mismos requisitos que el agua potable, ya que se utiliza también para usos domésticos. Pero, en nuestro país, la ganadería en pequeña escala es práctica común, -

TABLA VI.7

Tolerancia relativa de diferentes cultivos a las sales.  
(Referencia No.9)

FRUTALES		
Muy tolerantes	Medianamente tolerantes	Poco tolerantes
Palma datilera	Granada Higuera Olivo Vid Melón	Peral Manzano Naranja Toronja Ciruela Almendro Chabacano Durazno Fresa Limonero Aguacate
HORTALIZAS		
Muy tolerantes	Medianamente tolerantes	Poco tolerantes
Betabel Bretón (col rosada) Espárragos Espinacas	Jitomate Brócoli Col Chile dulce Coliflor Lechuga Maíz dulce Papas Zanahoria Cebolla Chicharos Calabaza Pepinos	Rábano Apio Ejotes

TABLA VI.7  
(continuación)

PLANTAS FORRAJERAS		
Muy tolerantes	Medianamente tolerantes	Poco tolerantes
Zacate alcalino de coquito. Zacate bermuda Zacate Rhodés Cebada (para heno) Trifolium (pata de pájaro)	Trébol blanco Trébol amarillo. Zacate inglés perenne. Zacate Sudán Trébol Huban Alfalfa (California común) Trigo (para heno) Avena (para heno) Grama azul Bromo suave Veza lechosa cicer	Trébol blanco holandés.
CULTIVOS COMUNES		
Muy tolerantes	Medianamente tolerantes	Poco tolerantes
Cebada (grano) Remolacha azucarera Colza Algodón	Centeno (grano) Trigo (grano) Arroz Sorgo (grano) Linaza Girasol Higuerilla	Alubias

TABLA VI.8

Clasificación de cultivos en base a su tolerancia al boro.  
(referencia No.9)

Sensibles (hasta 0.67 ppm)	Semitolerantes (0.67 a 1.00 ppm)	Tolerantes (1.00 a 3.75 ppm)
Nuez encarcelada	Girasol (nativo)	Espárragos
Nogal negro	Papa	Palma datilera
Nogal persa	Algodón	Remolacha azucarera
Ciruelo	Jitomate	Alfalfa
Peral	Rábano	Gladiola
Manzano	Chícharo	Haba
Vid	Rosa Ragged	Cebolla
Higo Kadota	Olivo	Nabo
Níspero	Cebada	Col
Cereza	Trigo	Lechuga
Chabacano	Maíz	Zanahoria
Durazno	Sorgo	
Naranja	Avena	
Aguacate	Calabacita	
Toronja	Pimiento bell	
Limonero	Camote	
	Frijol lima	

Nota: Los cultivos aparecen en orden descendiente,  
de más a menos tolerante.

en cuyo caso, difícilmente se cuenta con todas las instalaciones adecuadas y generalmente, los abrevaderos son simplemente ríos o estanques, cuya agua rara vez cumple con los requisitos de potabilidad.

La tabla siguiente muestra los límites máximos de sales disueltas tolerados por algunos animales, según McKee y Wolf (1963).

TABLA VI.9

Espece Animal	Concentración Máxima en ppm
Aves	2 860
Cerdos	4 290
Caballos	6 430
Ganado lechero	7 150
Ganado para carne	10 100
Borregos	12 900

Referencia No.9

#### VI.8.- Calidad del agua para usos industriales.

La diversidad de usos que tiene el agua en la industria, supone así mismo necesidades de calidad muy diferentes. De manera general, la agresividad y el poder incrustante son las dos características del agua que afectan a la mayoría de las industrias.

Algunos microorganismos contenidos en el agua producen corrosión.

El  $H_2CO_3$  se une fácilmente a los metales cuprosos o ferrosos, resultando unas capas permeables no protectoras. No ocurre así con el plomo.

El poder incrustante del agua se debe a la presencia de algunos iones, como los de calcio, magnesio y fierro. Las sales de calcio y magnesio (sulfatos, cloruros y nitratos) son indeseables en la mayoría de los procesos en los que pueda haber corrosión o incrustación.

La sílice forma una capa muy dura en la superficie de las calderas y cambiadores de calor; su eliminación es muy difícil.

#### VI.9.- Ejemplo de aplicación.

Con la finalidad de reforzar los conceptos hasta aquí expuestos y en vista de que hacer un estudio geohidrológico completo queda fuera del alcance del presente trabajo, se presenta en este inciso un resumen del estudio geohidrológico del valle de Río Verde, S. L. P. haciendo énfasis en lo referente a hidrogequímica por ser el tema central de esta tesis.

##### a) Descripción de la zona.

El valle de Río Verde cubre una superficie aproximada de 10 000 Km<sup>2</sup>, localizada en la porción sur-central del estado de San Luis Potosí. Las poblaciones principales de esta zona son: Río Verde, Cárdenas, Cerritos, Cd. Maíz y San Ciro, --  
Fig. VI.2.

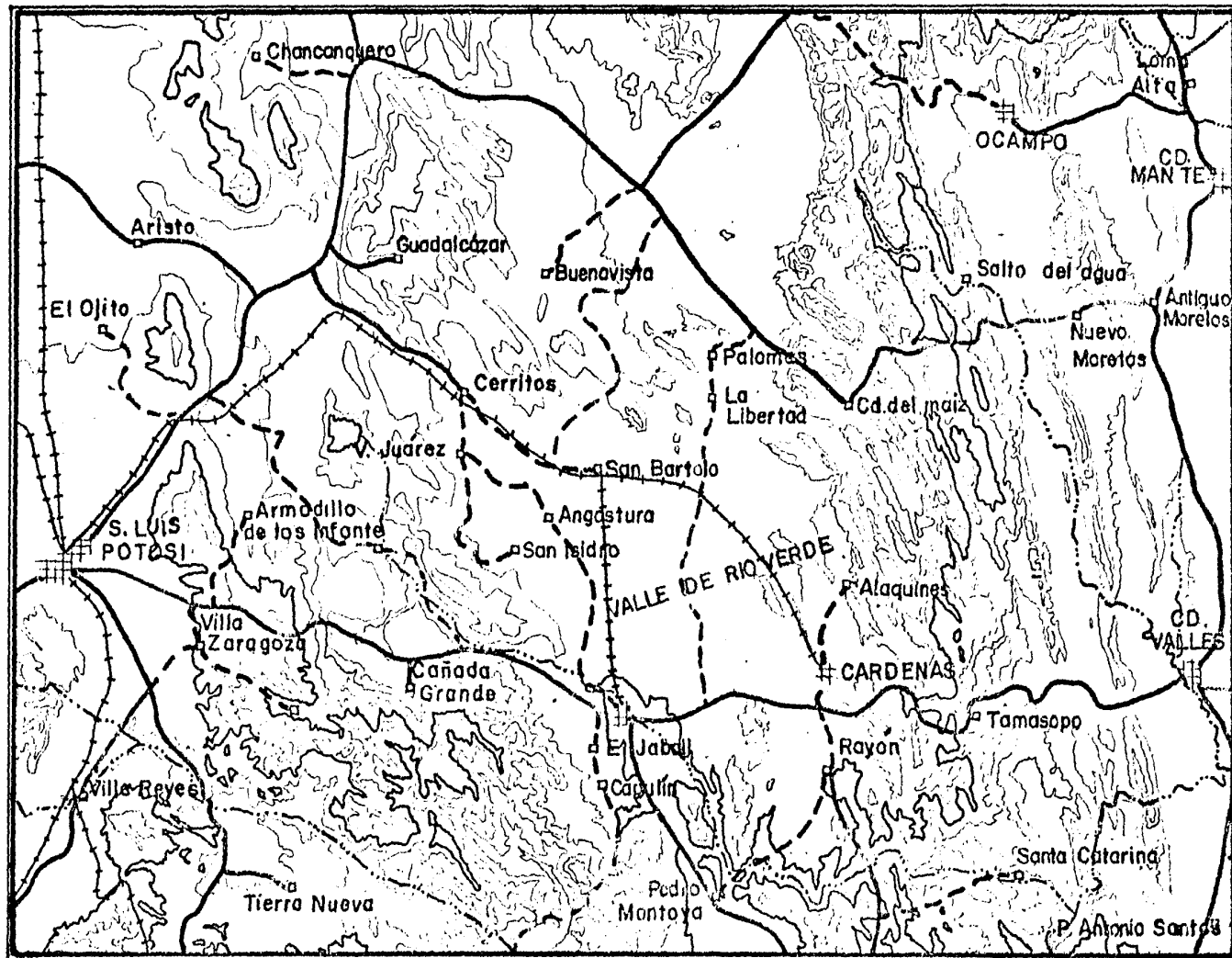


Fig. VI.2 Croquis de ubicación del Valle de Río Verde, S.L.P.



La economía de la región depende básicamente de la agricultura y en menor escala del comercio y de la industria. El maíz ocupa el primer lugar dentro de los productos agrícolas de región, siguiéndole en orden de importancia el frijol, la alfalfa, el algodón, el jitomate y el chile. El área se encuentra bien comunicada por carretera, ferrocarril y caminos vecinales (brechas y terracerías).

El estudio geohidrológico realizado por la Subdirección de Geohidrología y Zonas Áridas de la SARH y la empresa PROYESCO, S. A. comprendió una superficie de aproximadamente - 3 000 km<sup>2</sup>, localizados entre las coordenadas geográficas 21° 05' a 22° 30' de latitud norte y 99° 45' a 100° 15' de longitud oeste. Para fines de este ejemplo se consideró solamente el área circundante a la cd. de Río Verde, de aproximadamente 1270 km<sup>2</sup>, como se muestra en los Planos VI.1 a VI.6, por ser en esta zona donde se encuentra el mayor número de pozos así como la mayor actividad económica.

#### b) Aprovechamientos hidráulicos subterráneos.

La Tabla VI.10 muestra la clasificación y uso de los 597 aprovechamientos hidráulicos subterráneos registrados en el - Valle de Río Verde, con lo cual confirmamos lo dicho anteriormente, el 69% de los aprovechamientos se destinan a la agricultura.

En total el volumen de extracción de agua subterránea en la zona, Exceptuando los manantiales de la media luna, asciende a 74 millones de metros cúbicos al año.

TABLA VI.10

Clasificación y uso de los aprovechamientos subterráneos.

Clasificación U s o	POZO	NORIA	MANAN- TIAL	GALER. FILTR.	OBRA NO CLASIF.	TOTAL	%
Agricultura	313	89	11	1		414	69
Ganadero	2	10	2			14	2
Agrícola y Doméstico	8	26	11			45	8
Doméstico	18	42				60	10
Municipal		1				1	-
Industrial		4				4	1
Indeterminado	31	23	1	1	3	59	10
T o t a l	372	195	25	2	3	597	100
%	62	33	4	1	1	100	

c) Hidrología superficial.

El Río Verde queda comprendido dentro de la cuenca del Río Pánuco y en extensión es el segundo de sus afluentes. Nace a 35 km al oriente de San Luis Potosí, a una elevación aproximada de 2600 msnm. Es el único río de consideración en el Valle y recibe una importante aportación de los manantiales calizos, principalmente del de la Media Luna.

d) Unidades hidrogeológicas.

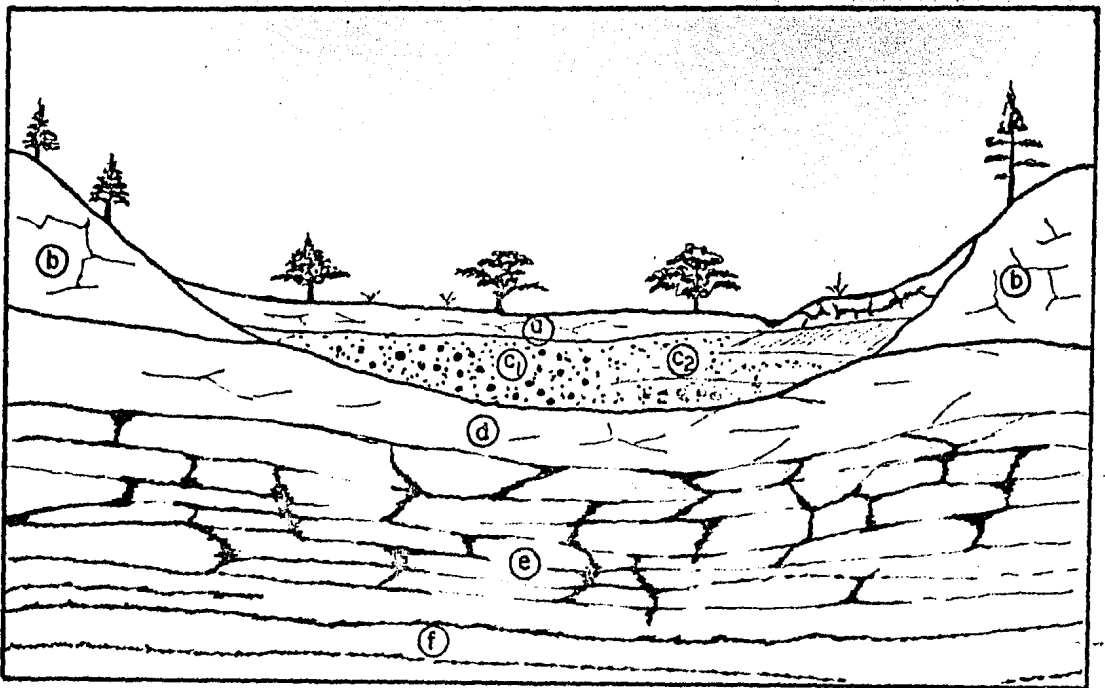
Para poder definir en forma cualitativa las caracterís-

ticas de las formaciones acuíferas del Valle de Río Verde, se procede a hacer la separación de unidades hidrogeológicas, de acuerdo al grado de permeabilidad.

Basados en los resultados de los 26 sondeos geofísicos y en las perforaciones exploratorias llevadas a cabo en la zona de estudio, se puede construir de manera muy general un perfil estratigráfico del centro del Valle de Río Verde, Fig.VI.3

FIG. VI.3.

Croquis del perfil estratigráfico del centro del Valle de Río Verde, S.L.P.



(a) Cobertura Calichosa.

(c2) Sedimentos de origen fluvial.

(b) Rocas ígneas extrusivas.

(d) Formaciones Méndez y Cárdenas.

(c) Sedimentos de origen lacustre.

(e) Formación El Doctor.

(f) Formación Guaxcama.

#### d.1) Sedimentos continentales.

Los sedimentos continentales se localizan en una amplia zona del valle, distribuidos de diferente manera en las margines del Río Verde. En la margin izquierda, están formados por tobas sílicas porosas, arcillas, calizas y caliche en la parte central y en la parte occidental por yesos y conglomerados de baja cementación.

Los estudios realizados hacen suponer que en esta región de la cuenca, los materiales granulares son predominantemente finos por lo cual se les considera de baja permeabilidad.

Los sedimentos continentales de la margin derecha están acomodados en capas alternadas de arcilla, arenas y gravas - con una cobertura de tobas areno-arcillosas con evidencias de calcificación, conglomerados, tobas pumíticas y derrames de lava basáltica. El predominio de arenas y gravas, así como - los derrames de lava basáltica proporcionan buena permeabilidad a esta formación.

#### d.2) Terciario Volcánico.

Esta unidad geológica , formada por emisiones ígneas (basaltos, riolitas y depósitos tobásicos) comprende una reducida extensión horizontal. Los afloramientos de riolitas se encuentran en la zona suereste de la cuenca, cubriendo a las rocas calizas de la formación el Doctor.

Los basaltos se distribuyen en la región noreste y sur -

del valle, en la subcuenca de San Ciro. En la parte norte -- también existen algunos afloramientos aislados.

En general esta unidad se considera impermeable o con permeabilidad secundaria por fracturación, a excepción de las afloraciones de la subcuenca de San Ciro, las cuales se consideraran permeables.

#### d.3) Formaciones Cárdenas y Méndez.

Estas dos formaciones están constituidas básicamente por lutitas; solo en la formación Cárdenas se encuentran intercalaciones de margas y areniscas. Forman un paquete superyacente a la formación el Doctor. Sus afloramientos se localizan en la sierra de San Francisco, al oriente.

Esta unidad hidrogeológica funciona como confinante de la formación el Doctor y como frontera lateral de los rellenos de la cuenca.

#### d.4) Formación el Doctor.

La formación el Doctor se encuentra ampliamente distribuida en el valle; está compuesta de calizas de color blanco, gris perla, café crema y gris oscuro. Se presenta en capas de estratificación de medianas a gruesas, con zonas locales dolomitizadas y huellas de disolución.

Esta formación aflora al suereste de Cd. Maíz, al norte de la Libertad, Palomas, Granjenal y Cerritos, al occidente confor-

ma la Sierra de Villa Juárez, Progreso, Diego Ruiz y Gallinas.

En general, esta unidad es de comportamiento permeable, debido a los conductos de disolución en las calizas. Las zonas de recarga se encuentran en las partes altas de la formación. Los manantiales más caudalosos de la región, como el de La Media Luna, provienen de esta unidad.

#### d.5) Formación Guaxcama.

Son los sedimentos más antiguos que afloran en el valle, esta unidad subyace a la formación El Doctor y a pesar de estar compuesta de calizas y yesos se le considera impermeable, lo cual se explica si consideramos que la enorme presión litostática generada por la columna estratigráfica suprayacente disminuye la solubilidad de los yesos.

#### e) Curvas de igual profundidad y elevación del nivel estático.

La configuración de profundidades al nivel estático indica que este varía de 4 a 40 m., Plano VI.1, encontrándose las menores profundidades cerca del poblado la Muralla, al norte, y en el manantial de la Media Luna, al sur. Los análisis químicos muestran mayor concentración de sales en estos lugares que en donde el nivel estático es profundo, esto seguramente se debe a la evaporación generada por la proximidad del nivel freático.



De las curvas de igual elevación del nivel estático, Plano VI.1, se deduce que el flujo subterráneo horizontal proviene de las sierras que limitan el valle, de donde se encauza hacia las partes topográficamente más bajas, ubicadas generalmente en la parte central del valle, para después confluir y descargar subterráneamente al sureste de la Cd. de Río Verde, donde el río funciona como dren natural del acuífero.

f) Interpretación de los análisis hidrogeoquímicos.

Para la revisión de este estudio contamos con los resultados de los análisis químicos de 58 aprovechamientos, de los cuales 38 son pozos, 17 norias y 3 manantiales; todos ellos localizados en un área de aproximadamente 1270 km<sup>2</sup> ubicada en las inmediaciones de la Cd. de Río Verde. El muestreo y los trabajos de laboratorio fueron realizados por la empresa PRO-YESCO, S. A. en el periodo comprendido entre el 5 de septiembre de 1979 y el 20 de septiembre de 1980. Revisando los resultados de los análisis de acuerdo a lo establecido en el inciso IV.5d, resulta que de las 58 muestras analizadas solo 21 cumplen con la tolerancia permitida, esto es, que el valor absoluto de la diferencia de la suma de los aniones menos la suma de los cationes, ambas sumas expresadas en eqm, no sea mayor del 6% del valor de la suma mayor. Los resultados de los análisis aceptables aparecen en las Tablas VI.11a y VI.11b.

Desgraciadamente después de la depuración, la información se nos reduce drásticamente, resultando insuficiente para trazar las curvas de isovalores, por lo que dichas curvas se --



**TABLA VI.IIa**  
**Relación de aprovechamientos cuyos análisis**  
**químicos son aceptables.**

NUMERO DEL POZO EN EL CENSO	NUMERO DEL POZO EN LA TESIS	POZO, NORIA O MANANT.	FECHA DE MUESTREO	SOLIDOS TOTALES (ppm)	CONDUCT. ELECTRICA Mmhos/cm	DUREZA TOTAL (ppm)	pH	ANIONES			CATIONES		
								SO <sub>4</sub> (ppm)	Cl (ppm)	HCO <sub>3</sub> (ppm)	Na (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)
703	3	P	8-X-79	320	500	270	7.0	67.25	70.00	122.00	1.00	68.13	24.31
379	4	P	24-X-79	345	540	200	7.0	67.25	35.40	97.30	1.10	60.12	12.15
632	5	P	2-X-79	486	760	380	7.0	115.27	58.49	244.04	0.45	84.16	41.34
21	18	P	5-IX-79	290	580	371	7.0	34.48	13.29	317.25	2.95	96.19	12.16
145	23	P	12-XI-79	896	1,400	700	7.0	115.29	209.55	305.00	1.35	200.40	48.62
709	24	P	22-X-79	1,152	1,800	550	7.0	211.38	67.36	305.00	4.35	148.30	43.76
363	25	P	10-X-79	1,088	1,700	480	7.0	240.20	106.30	103.30	0.50	136.27	34.03
711	27	P	22-X-79	3,840	6,000	1,300	7.0	576.48	319.05	457.50	11.00	280.56	145.86
714	28	P	23-X-79	1,920	3,000	1,200	7.0	115.30	283.60	854.00	10.40	320.64	97.24
934	30	P	15-I-80	1,920	3,000	1,200	7.0	768.64	177.50	262.50	3.10	320.60	97.24
396	33	P	16-I-80	1,920	3,000	1,000	7.0	624.50	177.20	183.00	1.50	320.60	48.62
927	35	P	15-I-80	2,048	3,200	1,200	7.0	595.69	167.50	305.00	0.90	360.70	72.93
399	36	N	6-II-80	3,072	4,800	2,000	6.0	941.58	354.50	805.00	11.00	577.12	136.13
388	37	N	11-I-80	2,496	3,900	1,200	7.0	490.00	304.80	305.00	0.40	320.00	97.24
332	42	N	8-I-80	2,560	4,000	1,340	6.5	768.60	275.70	176.00	0.30	420.80	70.40
312	51	N	9-I-80	2,560	4,000	1,230	6.5	576.40	319.00	274.50	0.90	408.81	51.05
795	53	N	9-I-80	3,200	5,000	1,520	6.5	931.90	319.00	244.00	0.60	400.80	126.41
796	54	N	9-I-80	2,624	4,100	1,200	6.5	576.40	319.00	244.00	0.50	400.80	48.62
385	55	N	7-II-80	3,072	4,800	2,100	6.0	941.58	347.40	793.00	8.50	561.12	170.17
8	57	M	7-II-80	2,048	3,200	1,700	6.0	528.44	283.60	1,037.0	15.00	601.20	48.62
254	64	P	26-XI-79	2,496	3,900	1,690	6.0	624.52	53.50	388.20	1.10	376.75	182.32

**TABLA VI.IIb**  
**Resultados de análisis químicos, en epm, y**  
**% de diferencia entre aniones y cationes.**

NUMERO DE POZO	A N I O N E S			C A T I O N E S			%
	SO <sub>4</sub> (epm)	Cl (epm)	HCO <sub>3</sub> (epm)	Na (epm)	Ca (epm)	Mg (epm)	
3	1.400	1.997	2.000	0.043	3.398	2.000	1.0
4	1.400	0.997	1.595	0.047	2.998	1.000	1.0
5	2.400	1.650	4.000	0.019	4.197	3.402	5.0
18	0.718	0.374	5.200	0.128	4.797	1.000	6.0
23	2.400	5.903	5.000	0.059	9.995	4.002	5.0
24	4.400	1.897	5.000	0.189	7.406	3.602	1.0
25	5.000	2.994	1.693	0.021	6.796	2.800	1.0
28	2.400	7.989	14.000	0.452	15.972	8.003	0.2
30	15.997	5.000	4.303	0.134	17.985	8.003	3.0
33	12.997	4.992	3.000	0.065	15.990	4.001	4.0
35	12.397	4.718	5.000	0.039	15.995	6.002	0.4
36	19.596	9.986	13.196	0.478	28.784	11.204	5.0
37	10.198	8.586	5.000	0.017	15.960	8.003	1.0
42	15.996	7.766	2.885	0.013	20.987	5.794	0.5
51	11.996	8.986	4.500	0.039	20.389	4.201	3.0
53	19.394	8.986	4.000	0.026	19.990	10.404	6.0
54	11.996	8.986	4.000	0.021	19.009	4.001	4.0
55	19.596	9.786	13.000	0.369	27.986	14.005	0.1
57	10.998	7.898	17.000	0.652	29.985	4.001	4.0
64	12.997	14.972	6.200	0.047	18.790	15.005	1.0

transcriben tal como las trazó PROYESCO, S. A., observación - que se debe considerar para su utilización.

f.1) Curvas de igual concentración de S. T. D.

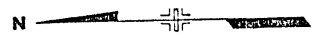
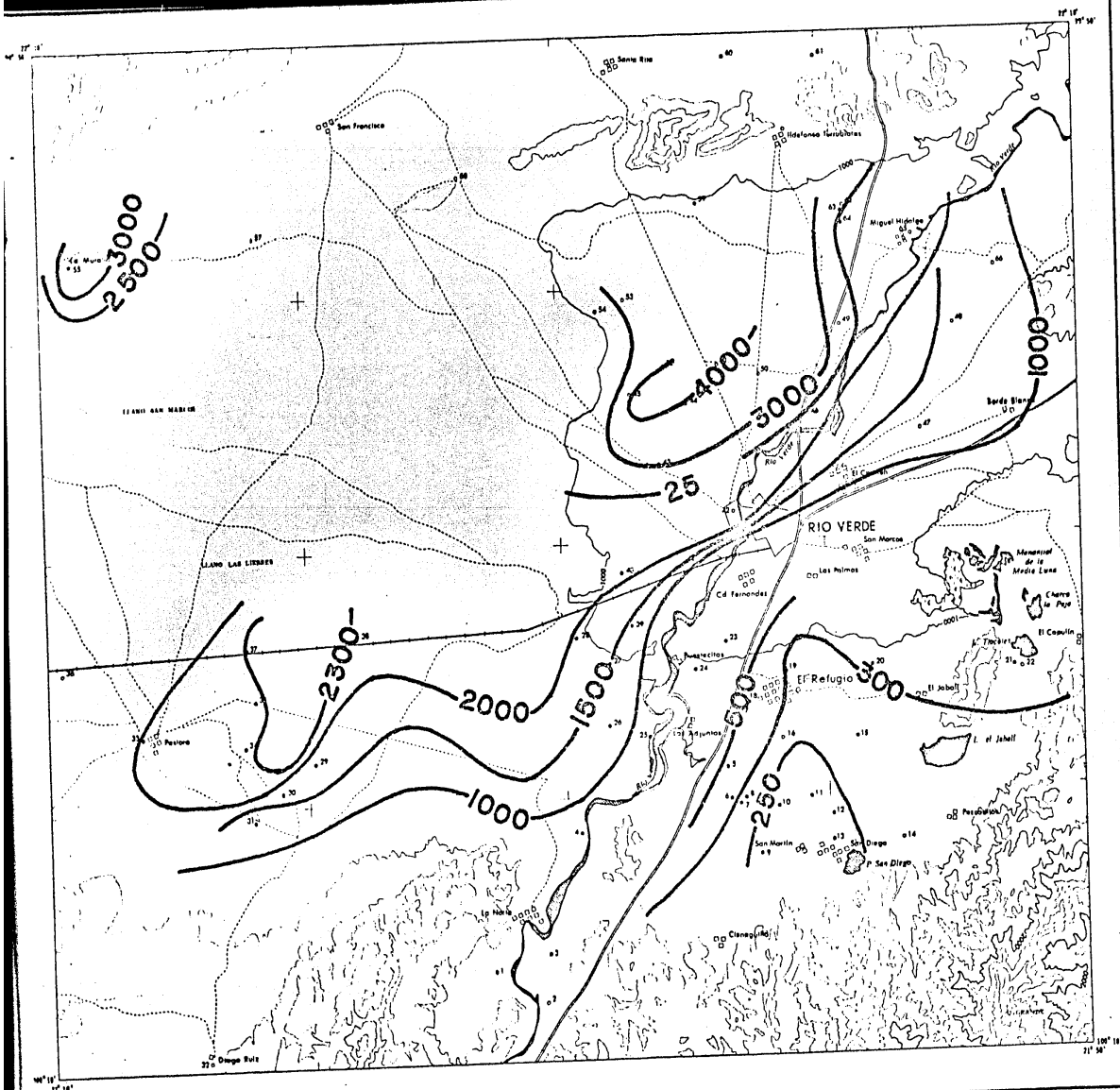
En el Plano VI.2 se puede observar que las concentraciones de sólidos totales disueltos varía de 250 a 400 ppm, siendo el agua de mejor calidad la que se encuentra en las sierritas del suroeste del valle, en donde la presencia de rocas ígneas seguramente originan esta situación, por su bajo contenido de Na y Mg.

En las inmediaciones de la Cd. de Río Verde se aprecia un rápido incremento de sales disueltas en dirección W-E, situación atribuible a la dirección del flujo subterráneo y a la disolución de posibles estratos evaporíticos. Al norte del valle, cerca del poblado de la Muralla, se presenta una situación similar a la descrita anteriormente.

f.2) Curvas de igual contenido iónico.

Los Planos VI.3, VI.4 y VI.5 muestran las configuraciones de concentración de los diferentes iones disueltos en el agua subterránea del valle y en la Tabla VI.12 se presenta una síntesis de dichas planos.

Como comentario general, resultante de la información analizada, encontramos que en los casos en que el agua ha estado en contacto con formaciones calizas, alcanza contenidos de

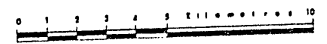


**SIMBOLOGIA**

- POBLACION PRINCIPAL
- POBLACION
- CARRETERA
- TERRACERIA
- BRECHA
- FERROCARRIL
- RIO
- CURVA DE NIVEL
- LAGUNA
- PANTANO
- MANANTIAL
- POZO
- NORIA
- Curva de igual concentración - de S.T.D.

Equidistancia entre curvas de nivel 100 m

**ESCALA**

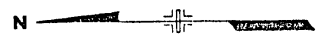
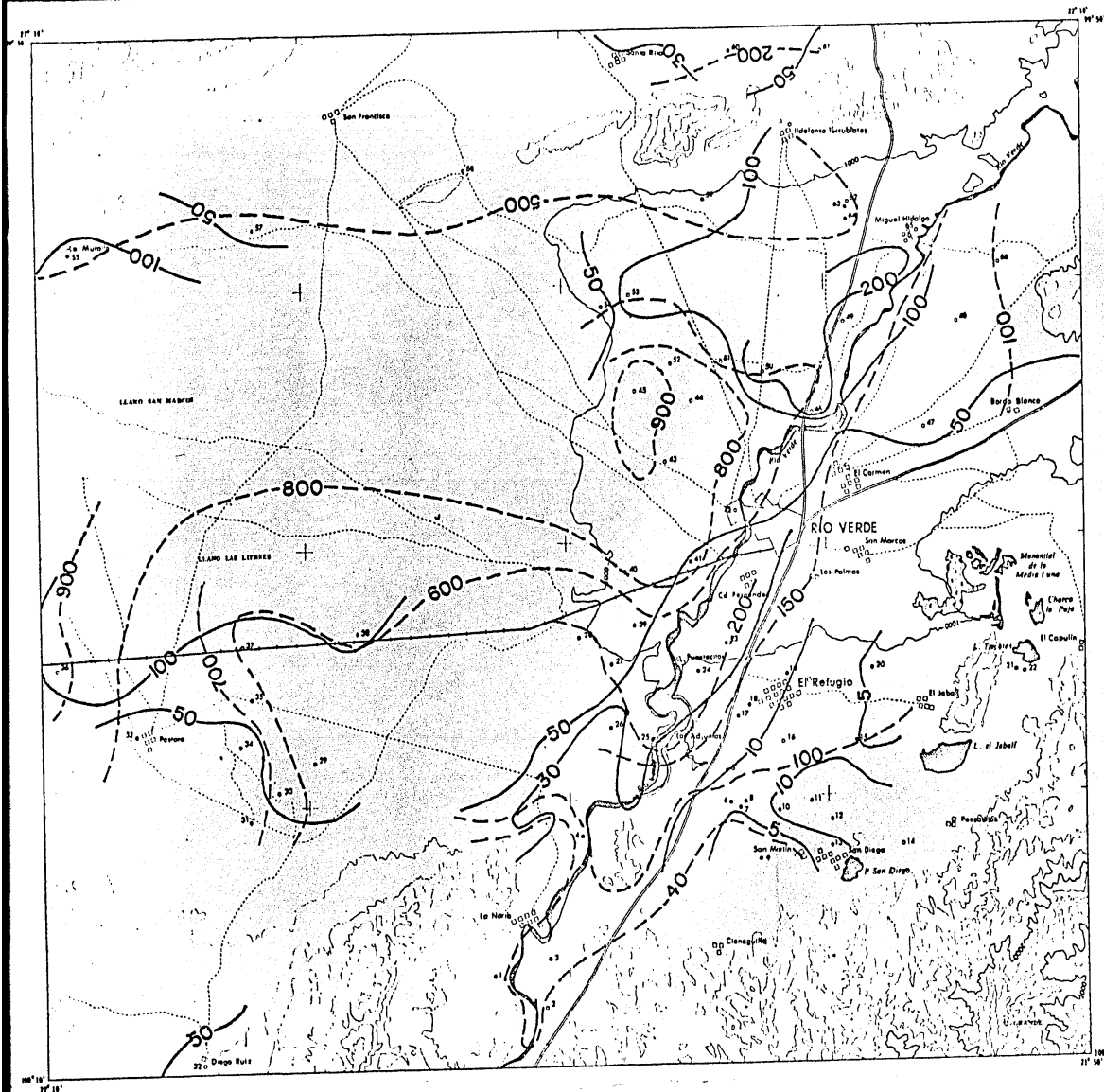


FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM

Estudio hidroquímico de la zona de Rio Verde S.L.P.

PLANO VI.2

TESIS PROFESIONAL  
 MIGUEL ALVAREZ CUEVA  
 FEBRERO DE 1954

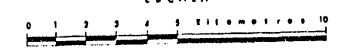


**SIMBOLOGIA**

- POBLACION PRINCIPAL
- POBLACION
- CARRETERA
- TERRACERIA
- BRECHA
- FERROCARRIL
- RIO
- CURVA DE NIVEL
- LAGUNA
- PANTANO
- MANANTIAL
- POZO
- NORIA
- Curvas de igual concentración de mg
- Curvas de igual concentración de SO<sub>4</sub>

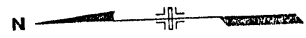
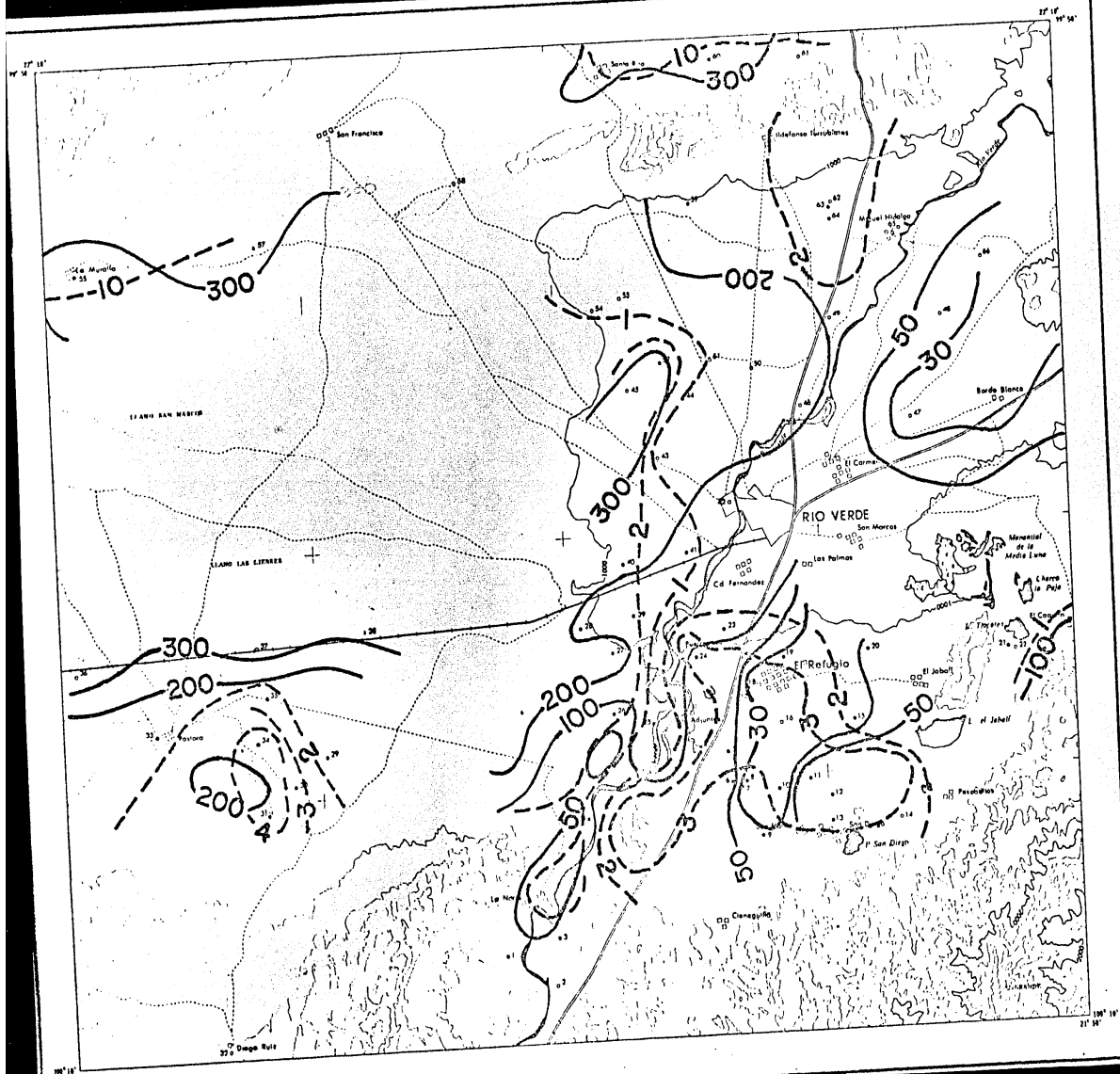
Equidistancia entre curvas de nivel 100 m.

**ESCALA**


















FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM

Estudio hidrogequímico de la zona de Rio Verde S L P <b>PLANO V.1.3</b>	<b>TESIS PROFESIONAL.</b> MIGUEL ALVARO CUEVAS TRES FEBRERO DE 1964
--	---

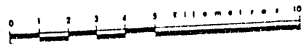


**SIMBOLOGIA**

- POBLACION PRINCIPAL 
- POBLACION  (RR)
- CARRETERA 
- TERRACERIA 
- BRECHA 
- FERROCARRIL 
- RIO 
- CURVA DE NIVEL 
- LAGUNA 
- PANTANO 
- MANANTIAL 
- POZO 
- NORIA 
- Curvas de igual concentracion de C1 
- Curvas de igual concentracion de NA 

Espaciacion entre curvas de nivel 100 m.

**ESCALA**

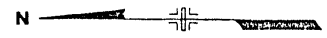
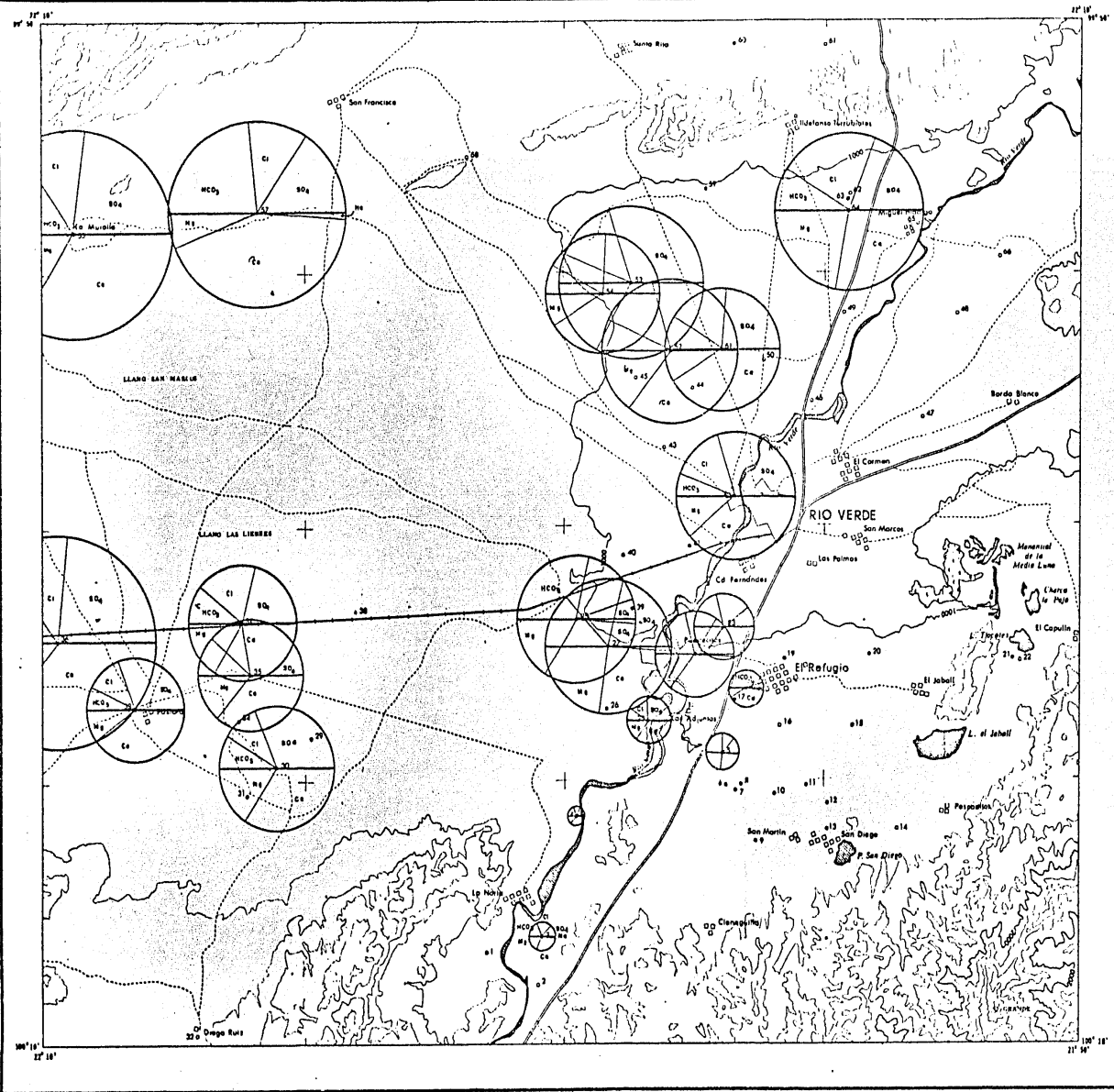


FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM
















Estudio hidroquimico de la zona de Rio Verde S.L.P.  
PLANO VI.4

TESIS PROFESIONAL  
MIGUEL ALVAREZ DOMESTICO  
FEBRERO DE 1984



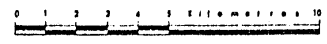


**SINBOLOGIA**

- POBLACION PRINCIPAL 
- POBLACION 
- CARRETERA 
- TERRACERIA 
- BRECHIA 
- FERROCARRIL 
- RIO 
- CURVA DE NIVEL 
- LAGUNA 
- FANTANO 
- MANANTIAL 
- POZO 
- NORIA 
- DIAGRAMAS CIRCULARES, SUBDIVIDIDOS EN % DE spm 
- ESCALA DE RADIOS, S.T.D. EN ppm 

Equidistancia entre curvas de nivel 100 m

**ESCALA**



<b>FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM</b>	
Estudio hidroquímico de la zona de Rio Verde S. L. P. <b>PLANO VI.6</b>	<b>TESIS PROFESIONAL</b> MIGUEL ALVAREZ CERRANTOS FEBRERO DE 1966



TABLA V4.12

Síntesis de la interpretación de los planos de curvas de isovalores,  
Valle de Río Verde, S.L.P.

ION	CONCENTRACION MENOR		CONCENTRACION MAYOR		ORIGEN	OBSERVACIONES
	ppm	LOCALIZACION	ppm	LOCALIZACION		
Cloro ( CL )	30	Al poniente, cerca del refugio. Al sur en el poblado Bordo Blanco	300	Al norte, en la muralla En el centro, al norte de Cd. Rfo Verde	Disolución de horizontes evaporíticos	Distribución espacial similar a la de S.T.D.
Sulfatos ( SO <sub>4</sub> )	40	Al oriente, en San Martín y La Noria. Al norte, en la Pastora.	1,000	Al noroeste de Río Verde en el aprovechamiento - No. 45 .	Disolución de yesos	Distribución espacial similar a la de S.T.D.
Bicarbonatos ( HCO <sub>3</sub> )	50	Al sureste, cerca de el Jabalí, San Martín, y el Refugio.	1,400	Al este de Río Verde, en los aprovechamientos 50 y 49.	Disolución de rocas calcáreas y fenómenos de evaporación.	Los resultados de los pozos 50 y 49 son muy dudosos.
Sodio ( Na )	1	Cerca de la Ciudad de Río Verde.	10	Al norte, en la muralla. Al oriente, en Santa Rita.		Son realmente insignificantes los contenidos de sodio.
Calcio ( Ca )	50	Al sureste, cerca del Jabalí y el Refugio.	600	Al norte, en el pozo No. 36.	Disolución de rocas calcáreas.	Distribución espacial similar a la de S.T.D.
Magnesio ( Mg )	5	Al sureste, entre el Jabalí y el Refugio, cerca de San Martín.	200	Al oriente de Ciudad Río Verde.	Disolución de rocas evaporíticas y fenómenos de evaporación.	Distribución espacial similar a la de S.T.D.

sólidos totales disueltos superiores a los 1000 mg/l, incrementándose ese valor a medida que circula el agua por el valle, cuando existen evidencias de la presencia de estratos de yesos y horizontes afectados por la evaporación.

Igualmente se observa que en donde las formaciones son de origen ígneo las sales disueltas son notablemente menores, lo cual se ve claramente al poniente de la ciudad de Río Verde entre los poblados de el Capulín y la Noria. De manera menos clara se observa también en los alrededores de Santa Rita.

#### f.3) Diagramas triangulares de Palmer-Piper.

De la representación triangular de los resultados de los análisis químicos verificados, Figs. VI.4 y VI.5, encontramos que en general las aguas son cálcico-sulfatadas y cálcico-sulfato-cloradas, Tabla VI.13, lo cual indica que el acuífero en explotación se encuentra en la formación calcárea. El predominio de sulfatos confirma la influencia de los materiales yesíferos y evaporíticos.

#### f.4) Diagramas circulares.

A manera de ratificación de lo dicho anteriormente se presenta el plano VI.6, que contiene la representación circular de los resultados de los análisis químicos que cumplen con la tolerancia especificada; en ellos vemos nuevamente que el tipo de agua predominante es el cálcico-sulfatada y que, efectivamente, los menores contenidos de S.T.D. se encuentran

FIG. VI.4  
 DIAGRAMA TRIANGULAR PARA REPRESENTACION  
 GRAFICA DE ANALISIS DE AGUA

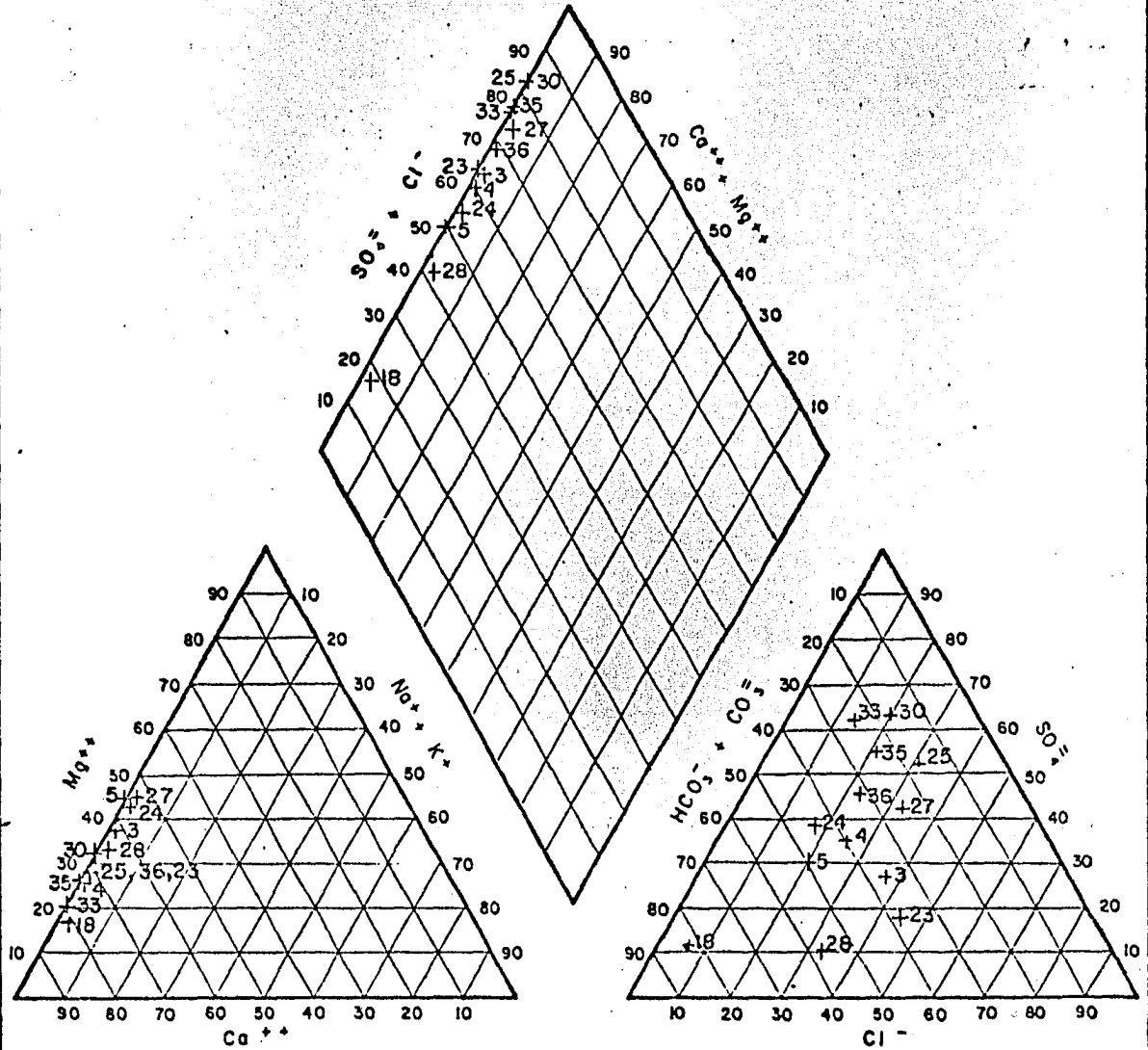


DIAGRAMA DE PALMER-PIPER



TABLA VI.13

Clasificación iónica de las aguas del Valle de Río Verde.

No. de Aprovech.	Tipo de Aprovechamiento	Denominación del agua
25	pozo	Cálcico-sulfatada.
30	pozo	" " "
33	pozo	" " "
35	pozo	" " "
42	noria	" " "
52	pozo	" " "
53	noria	" " "
3	pozo	Cálcico-sulfato-cloradas.
27	pozo	" " "
37	noria	" " "
51	noria	" " "
54	noria	" " "
36	noria	Cálcico-sulfato-bicarbonatadas.
55	noria	" " "
4	pozo	Cálcico-bicarbonato-sulfatadas.
24	pozo	" " "
57	manantial	" " "
5	pozo	Cálcico-clorada-magnésica.
23	pozo	Cálcico-clorada-bicarbonatada.
28	pozo	Cálcico-bicarbonatada.
64	pozo	Cálcico-clorada-sulfatada.

en las proximidades de las sierras del poniente del valle.

g) Clasificación del agua para riego, según Wilcox (1948).

La Tabla VI.13 muestra la clasificación de las aguas del valle de Río Verde, según Wilcox.

TABLA VI.13

No. de Aprovechamiento	C. E. (Micromhos/cm)	RAS	Clasificación
3	500	0.03	C2-S1
4	540	0.03	C2-S1
5	760	0.01	C3-S1
18	580	0.08	C2-S1
23	1,400	0.02	C2-S1
24	1,800	0.08	C2-S1
25	1,700	0.01	C3-S1
27	6,000	0.03	C4-S1
28	3,000	0.13	C4-S1
30	3,000	0.04	C4-S1
33	3,000	0.02	C4-S1
35	3,200	0.01	C4-S1
36	4,800	0.11	C4-S1
37	3,900	0.00	C4
42	4,000	0.01	C4-S1
51	4,000	0.01	C4-S1
52	4,500	0.03	C4-S1
53	5,000	0.01	C4-S1
54	4,100	0.01	C4-S1
55	4,800	0.08	C4-S1
57	3,200	0.16	C4-S1
64	3,900	0.02	C4-S1

## Descripción:

C2-Sl.- Salinidad media con poco sodio.

Puede usarse para riego de plantas moderadamente tolerantes a las sales. Se recomienda hacer lavados periódicos.

C3-Sl.- Altamente salina con poco sodio.

Se puede usar para riego solo en suelos con muy buen drenaje. Se deben seleccionar plantas bastante tolerantes a las sales.

C4-Sl.- Muy altamente salina con poco sodio.

No es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias. Las plantas que se cultiven deberán ser muy tolerantes a las sales.

h) Conclusiones y recomendaciones para el valle de Río Verde, S.L. P.

Del análisis de los intervalos geológicos que constituyen la secuencia estratigráfica y del estudio de los resultados de los análisis químicos, se puede concluir lo siguiente:

La unidad hidrogeológica más importante de la columna estratigráfica como formadora de acuífero lo son las calizas de la formación el Doctor, que en el centro del valle puede mani

festarse en el subsuelo a profundidades entre 100 a 200 m.

Otra unidad menos importante la constituyen los sedimentos de características granulares de tipo continental, la que por sus distintos componentes geológicos suele contener agua mineralizada.

De menor posibilidad por su reducida extensión en el subsuelo, lo son las rocas basálticas y riolíticas que subyacen a los depósitos de relleno dentro del valle.

La verificación de los análisis químicos del agua nos redujo drásticamente la información disponible, por lo que es urgente llevar a cabo nuevamente el programa de muestreo.

Los aprovechamientos que cumplen con la tolerancia establecida, en general, muestran contenidos de S.T.D. altos -- (1922 ppm en promedio), manifestandose cambios regionales en las concentraciones y diferencias en calidad del agua atribuibles a las diferentes formaciones de donde proviene, siendo notablemente mejor el agua que proviene de formaciones ígneas que la que circula por rocas calizas.

Las variaciones iónicas del agua manifiestan fuertes incrementos en pequeñas distancias de circulación, condición -- provocada por efectos evaporíticos que se conocen en la zona.

Según la clasificación de agua para riego de Wilcox, el 80% de las muestras queda clasificada como C4-S1 (muy altamente salina con poco sodio), situación que resulta preocupante



si consideramos que los principales cultivos de la región (maíz, frijol, alfalfa, algodón, jitomate y chile) están considerados como moderadamente tolerantes a las sales.

De las observaciones anteriores resultan las siguientes:

#### RECOMENDACIONES.

- 1) Implementar un programa de muestreo periódico para detectar la posible evolución de la salinidad del agua en el valle. Los análisis de laboratorio deben incluir verificación de resultados para garantizar su confiabilidad.
- 2) Se requiere aumentar el número de sondeos geofísicos y las perforaciones exploratorias para definir la estratigrafía del valle y poder valorar el potencial del acuífero.
- 3) Respecto a la calidad del agua para riego. Si después de llevar a cabo las actividades anteriores comprobamos que la salinidad es alta, se debe vigilar el comportamiento de los cultivos tradicionales ante el problema de la sal para poder tomar las decisiones adecuadas.
- 4) Aunque aparentemente el nivel estático en el valle no muestra evolución, se debe tener en observación, ya que este dato y la evolución de la salinidad ayudaran a definir la política de perforación de nuevos aprovechamientos.

## VI.10.- Conclusiones generales.

De manera general se han presentado en este trabajo los aspectos más importantes que deben considerarse en un estudio de calidad del agua subterránea; profundizando en aquellos temas que así lo requerían, sin desviarse demasiado, cosa que a veces resultó difícil por tratarse de un tema altamente interdisciplinario. Tal es el caso del capítulo dedicado a hidrogeología química; fue tanto el espacio dedicado a este tema que aparentemente nos apartamos del título original, pero era preciso hacerlo así, para no perder claridad en la exposición.

En el capítulo VI se trata lo referente a normas de calidad; ya se hicieron algunos comentarios en el cuerpo del mismo capítulo, pero en este momento considero conveniente recalcar que, si bien es cierto que las normas de calidad del agua de la S.S.A requieren actualización, no es ese el principal problema; lo grave es que en muchos casos nuestras normas no se pueden aplicar, porque para aplicarlas se requiere que exista primero una fuente de abastecimiento de agua POTABLE y en México todavía existen muchos miles de personas que carecen de este servicio. Pero vamos progresando, son muchos los ejemplos que muestran el gran esfuerzo que se está haciendo para que cada día sean más los mexicanos que cuenten con este servicio en calidad y cantidad suficientes. Por citar algunos: el sistema Cutzamala en el D. F., la perforación de baterías de pozos profundos en Monterrey N. L. y todos los pozos que se han perforado y los manantiales que se han entuba-

do para abastecer de agua potable a pequeñas comunidades. Indudablemente que todo este esfuerzo redundará en una mejoría en la calidad y cantidad del agua que consumimos.

El tema de esta tesis es sumamente teórico, razón por la cual se incluyó al final el resumen de un estudio geohidrológico, cuyo objetivo principal fue comprender la aplicación de los conceptos expuestos a lo largo de este trabajo. Son muchos los aspectos a considerar en un estudio de esta naturaleza y pretender abarcar todo en un simple resumen resulta casi imposible, no obstante estas limitantes se procuró hacerlo de la mejor manera, esperando haya cumplido, al menos en parte, su objetivo.

Por último, mi mayor satisfacción será que este trabajo sirva no solo para obtener mi título de ingeniero civil, sino que sea de utilidad para las nuevas generaciones de la Facultad de Ingeniería y para todos aquellos que estén interesados en el tema.

## B I B L I O G R A F I A

### No. de referencia.

- 1.- Castany G.  
Prospección y Explotación de Aguas Subterráneas.  
Ed. Omega, Barcelona, España. 1971.
- 2.- Sotelo Avila Gilberto.  
Hidráulica General, Vol.1  
Ed. Limusa, México. 1979.
- 3.- Dirección General de Geografía, S.P.P.  
Tamaño y Peso de la Tierra.  
Boletín Informativo No.2. Febrero de 1983.
- 4.- Tinajero González Jaime A.  
Apuntes de Geohidrología.  
Facultad de ingeniería, U.N.A.M.
- 5.- Stanley N. Davis y J. M. Wiest Roger.  
Hidrogeología.  
Ed. Ariel. Barcelona, España. 1971.
- 6.- Hem John D.  
Stady and Interpretation of the Chemical  
Characteristics of Natural Water.
- 7.- Correu Toledo Guillermo y Andrade Vargas Javier.  
Manual para el Alumbramiento de Aguas Subterráneas.  
FIRA, Banco de México, S. A. 1974.
- 8.- Custodio G. Emilio y Llamas M. R.  
Hidrología Subterránea. Vols. I y II.  
Ed. Omega. Barcelona, España.
- 9.- Lesser Juan Manuel  
Apuntes de Hidrogeoquímica.  
Facultad de Ingeniería, U. N. A. M.

- 10.- Murguía Vaca Ernesto.  
Apuntes de Contaminación de Aguas.  
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.
- 11.- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE).  
Normas para Agua Potable, 1982.
- 12.- Pulido José Luis.  
Hidrología Práctica.  
Ed. Urno, S.A. Bilbao, España. 1978.
- 13.- Gilluly James, Waters A. C. y Woodford A. O.  
Principios de Geología.  
Ed. Aguilar, S.A. Bilbao, España. 1964.
- 14.- Krinini Dimitri  
Geología para Ingenieros.  
Ed. Omega, Barcelona, España.
- 15.- Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M.  
Mecanismos de Contaminación de Aguas Subterráneas.  
Subsecretaría de Planeación, S.A.R.H. 1974.
- 16.- Walton Williams Clarence.  
Ground Water Resource Evaluation  
McGraw-Hill. New York, 1970.