

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

El estudio de la calidad del agua subterránea proporciona un conocimiento acerca del origen de la misma y ayudan a entender el funcionamiento de su sistema de flujo, algunos constituyentes determinados pueden detectar la presencia de yacimientos minerales escondidos (Werner, 1996). En países como México, Holanda, Israel, Sudáfrica y Estados Unidos se han registrado casos de intrusión salina en los acuíferos locales (Información verbal, Castillo 1997).

La interpretación geoquímica del agua subterránea se utiliza junto con la Geología y Geofísica como auxiliar para conocer y entender en forma más completa, el funcionamiento de los acuíferos y planear la explotación del agua en forma racional (Canales, 1989).

El estudio de la química del agua, en relación con los ambientes geológicos y antropogénicos, tiene que incluir el concepto de la evolución de la calidad química y sus implicaciones sobre usos, distribución y protección de este recurso.

La naturaleza propia de cada cuerpo de agua, su medio físico, la manera de explotación y la ausencia de medios de protección, traen a menudo la consecuencia de su deterioro en calidad y probablemente un aumento en el riesgo de la salud de los consumidores; la caracterización de los cuerpos de agua se logra mediante tres componentes principales, la hidrología, la fisico-química, y la biología; un criterio completo de la calidad del agua sólo se logra si existe un control apropiado de los tres

componentes (Barbarín, inéditos). En la presente tesis se estudiará la evolución de la parte química del acuífero del Valle de Guaymas, ya que esta agua se ha salinizado con el tiempo, lo que obliga a realizar estudios sobre el valle para conocer las diferentes familias de agua que actualmente se presentan y entender mejor el problema de salinidad, con lo que se podrían aportar soluciones al mismo. Los procedimientos relacionados en evaluar la calidad química del agua son complicados y son muchos; éstos han cambiado, de manera que en la actualidad éstas constituyen técnicas sofisticadas de monitoreo, realizando al final una tabla con el resumen, las configuraciones, los diagramas etc.

El agua ha sido siempre uno de los mejores solventes conocidos por el hombre, su grado relativamente lento de percolación, a través de la tierra, proporciona tiempo más que suficiente para que muchos de los minerales que forman la corteza de la tierra se incorporen a la solución. Estos minerales tienen diferentes grados de disolución en el agua, dependiendo de condiciones que pueden variar muy ampliamente, en una región pequeña. Como resultado, puede haber cambios apreciables en la calidad química del agua encontrada en regiones de extensión superficial relativamente limitada (Gibson,1974).

Para que los resultados de la investigación científica sean útiles, consistentes y confiables, deben tener una serie de etapas o tareas.

- 1.- EL PROBLEMA CIENTÍFICO.
- 2.- EL OBJETO DE LA INVESTIGACION.
- 3.- EL OBJETIVO DE LA INVESTIGACION.
- 4.- EL CAMPO DE ACCION.
- 5.- LA HIPÓTESIS.
- 6.- LOS MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA.

En esta tesis son las siguientes:

- 1.- Aumento de las sales en las aguas subterráneas del Valle de Guaymas.
- 2.- El acuífero del Valle de Guaymas.
- 3.- Caracterización de la propiedades químicas de las aguas subterráneas del Valle de Guaymas.
- 4.- Hidrogeoquímica.
- 5.- Si se conoce la evolución de las sales en las aguas subterráneas del Valle de Guaymas, se puede dar mejor uso a estas y planear acciones a futuro para detener la contaminación y si es posible disminuirla.
- 6.- Revisión de trabajos anteriores sobre el área, visitas de campo, tomas de muestras, análisis geoquímico de muestras, tomas de datos en el sitio, proceso de la información con gráficas de isovalores de conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno, solidos totales disueltos, bicarbonatos, sulfatos, sodio, cloro, también con clasificación de agua de acuerdo a Stiff, Piper, Wilcox y la evolución de los parámetros en el tiempo.

CAPITULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

Primero se evaluaron los antecedentes del Valle de Guaymas, donde se comprobó que continúa la contaminación salina. Se revisó también alguna bibliografía sobre el tema, y se estudiaron trabajos y tesis realizadas anteriormente en la región; se hicieron salidas al campo para tomar muestras de agua, utilizando botellas de plástico de un litro de capacidad, analizando en el campo, el pH, las temperaturas y conductividad eléctrica. Se utilizaron un termómetro y un peachimetro digital, se tomaron las coordenadas en X y en Y de cada pozo, utilizando un GPS (ver figura 1); se tomaron niveles estáticos en el paro de equipos de bombeo en 1997, decretado por la Comisión Nacional del Agua, CNA, y en colaboración con la misma; se analizaron los datos de laboratorio de diferentes pozos. Se estudió la Geología de la región, analizando cartas del INEGI, sobre Hidrología Superficial, Hidrología Subterránea y Geológica, en escala 1:250000 H12-11 y G12-2 así como estudios realizados por compañías particulares y centros de investigación de universidades, la hidráulica superficial, la subterránea, la climatología, la geofísica y las fronteras del acuífero también fueron analizadas de esta manera; todo para interpretar el avance de la contaminación y sus efectos actuales en la zona. Se revisaron los datos desde 1975 a 1998 de las concentraciones de Cloro, Sodio, Calcio, Magnesio, y Bicarbonatos. Se usó el "Surfer" para hacer las curvas de diferentes valores, para interpretar las familias de aguas en el Valle de Guaymas; se usaron los paquetes "Plotchem" y "Calidad".

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



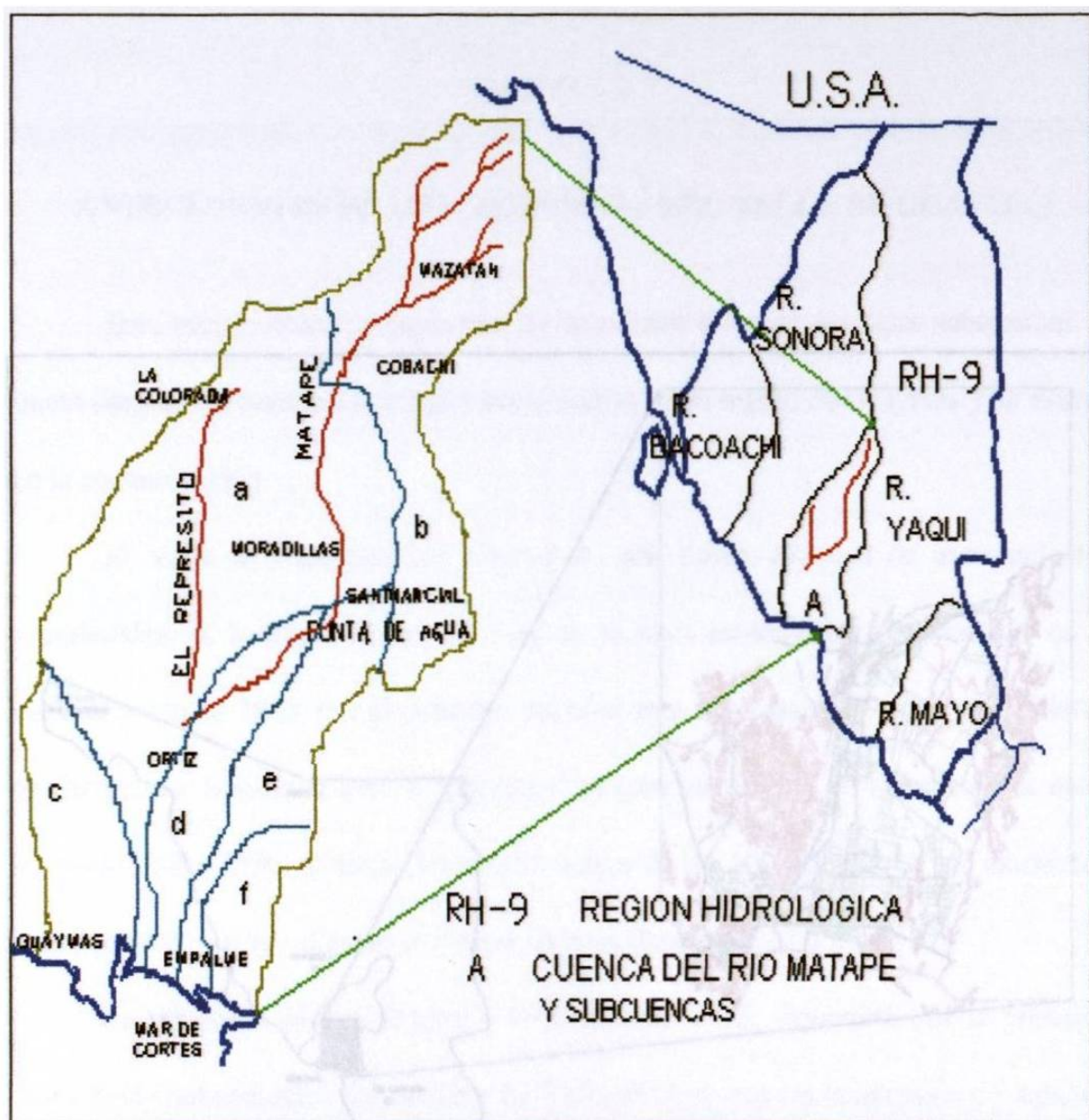
Figura 1.- Parte del equipo usado en el campo

cañales, ríos, riego y barrajes; el acuífero de la zona de Guaymas, se localiza en la parte centro-noroccidental del estado de Sonora y hacia el oeste de la región Hidrológica 9, Sonora sur (INRA, 1993). El Valle de Guaymas presenta límites naturales bien definidos: al norte colinda con la sierra de San Aniceto; al oeste, con la sierra de Santa Ursula y El Pozo; al sur, con el Golfo de California y al este, con la sierra El Bacatete (Arambula/Palocino, 1991). La zona de estudio se encuentra dentro de las coordenadas 27° 52' y 28° 23' de Latitud norte, con 110° 32' y 110° 42' de Longitud oeste (ver figura 3).

CAPITULO 3

LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de Guaymas se encuentra en la cuenca del Río Mátape, que a su vez pertenece a la región Hidrológica 9, Sonora Sur. Esta región Hidrológica se ubica en las porciones noreste, este y sur de Sonora; tiene una superficie en territorio mexicano (Sonora y Chihuahua) de 137 504 km², la cuenca del Río Mátape se encuentra en la porción central de la entidad y al oeste de lo que la SARH denominó la región Hidrológica 9; comprende un área de 9 043 km², localizada íntegramente dentro del estado de Sonora (ver figura 2), el distrito de riego 84, el Valle de Guaymas representa la unidad con mayor superficie agrícola dentro de la cuenca, ocupando cerca del 35% de la misma, se localiza en la planicie de la cuenca y perteneciente a los municipios de Guaymas y Empalme, sus cultivos principales son: trigo, cártamo, hortalizas, algodón, cítricos, vid, nogal y forrajes; el acuífero de la zona de Guaymas, se localiza en la parte centro-meridional del estado de Sonora y hacia el oeste de la región Hidrológica 9, Sonora sur (INEGI, 1993). El Valle de Guaymas presenta límites naturales bien definidos: al norte colinda con la sierra de San Antonio; al oeste, con la sierra de Santa Úrsula y El Pozo; al sur, con el Golfo de California y al este, con la sierra El Bacatete (Arambula/Palomino, 1991). La zona de estudio se encuentra dentro de las coordenadas 27° 52' y 28° 23' de Latitud norte, con 110° 32' y 110° 48' de Longitud oeste (ver figura 3).



Subcuencas:

a.- R. Empalme-Mátape
c.- A. Guaymas
e.- A. Chicuroso

b.- R. Mátape-Presa Punta de Agua
d.- Guaymas
f.- A. Tetaciate

Figura 2.- Región Hidrológica 9 y cuenca del Río Mátape (Universidad de Sonora)

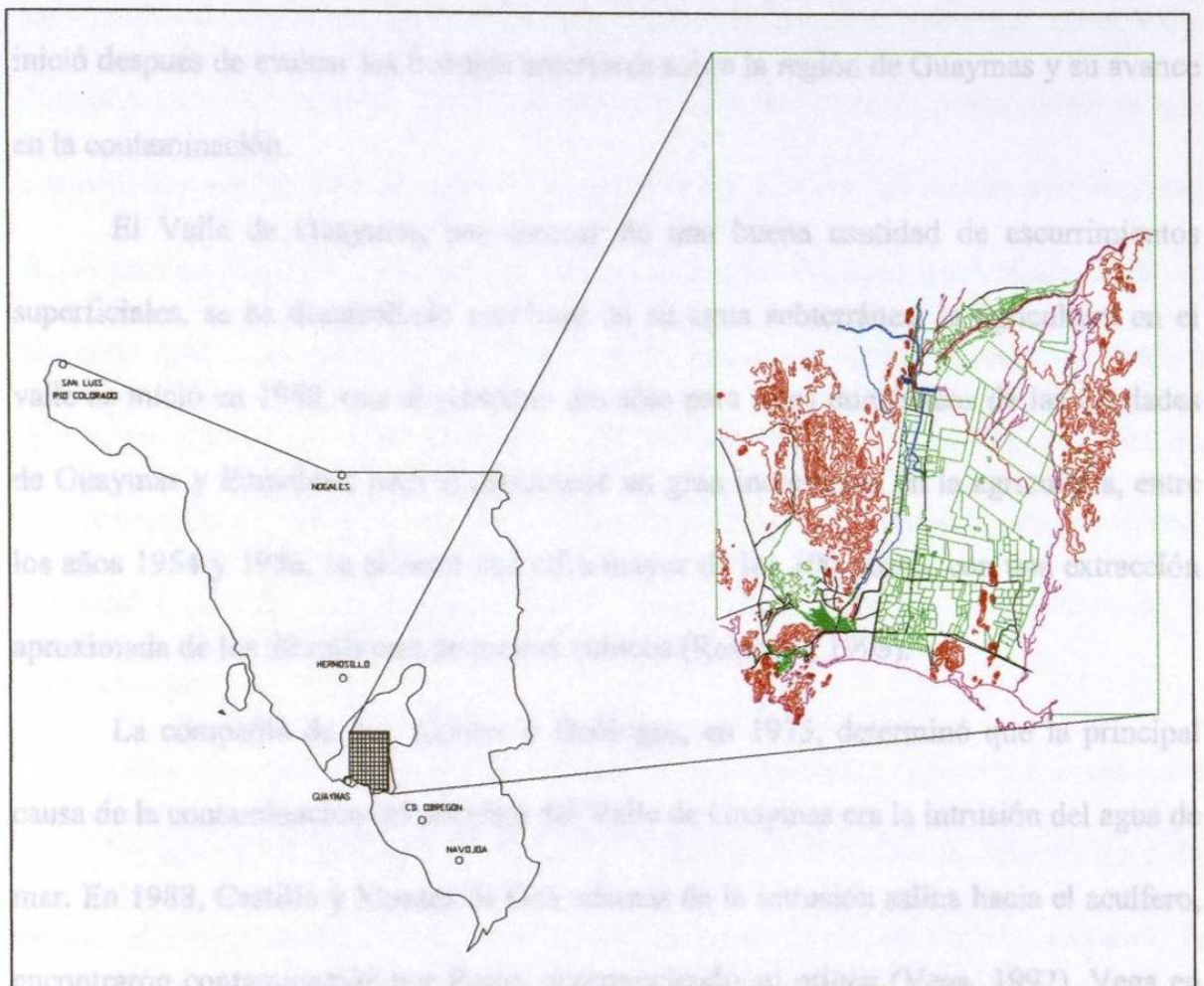


Figura 3.- Ubicación de la Cuenca del Río Mátape y Valle de Guaymas en el estado de Sonora (Universidad de Sonora)

CAPITULO 4

ANTECEDENTES DE LOS PROBLEMAS DEL VALLE DE GUAYMAS

Este trabajo sobre la evolución de la calidad química del agua subterránea se inició después de evaluar los trabajos anteriores sobre la región de Guaymas y su avance en la contaminación.

El Valle de Guaymas, por carecer de una buena cantidad de escurrimientos superficiales, se ha desarrollado con base en su agua subterránea, la agricultura en el valle se inició en 1940, que al principio era sólo para fines domésticos de las Ciudades de Guaymas y Empalme; pero al registrarse un gran incremento en la agricultura, entre los años 1954 y 1956, se alcanzó una cifra mayor de los 100 pozos, con una extracción aproximada de los 80 millones de metros cúbicos (Restrepo, 1995).

La compañía de Ing. Civiles y Geólogos, en 1975, determinó que la principal causa de la contaminación del acuífero del Valle de Guaymas era la intrusión del agua de mar. En 1988, Castillo y Montes de Oca además de la intrusión salina hacia el acuífero, encontraron contaminación por Bario, desconociendo su origen (Vega, 1992). Vega en 1992 determina que el Bario proviene de una ocurrencia natural aportada probablemente por los estratos paleozoicos con Barita sedimentaria, que en partes afloran y otros lugares subyacen en los valles de la cuenca. En el presente trabajo no se estudiará el problema del Bario.

Los suelos afectados por salinidad, según datos del INEGI de 1983, cubrían más de 100000 ha en la cuenca del Río Mátape, y prácticamente todo el Valle de Guaymas;

sin embargo, el distrito de riego 084-Guaymas, en 1992, muestra áreas menores de 10000 ha, aunque no se pueden comparar ambos reportes, ya que se realizaron en tiempos diferentes y con diferentes métodos (ICGA 1975). Pero muestran la salinidad del Valle, inducida principalmente por aguas de riego con alto contenido de sales. El agua de lluvia acarrea, por infiltración, estas sales a las aguas subterráneas. En el Valle de Guaymas no se recomienda perforar pozos de mas de 300 m de profundidad, ya que aumenta la posibilidad de encontrar mantos salados y localizar las nuevas perforaciones de los pozos lejos de la costa, para garantizar una vida útil mayor para el año 2010, se estimaba que la salinidad habria avanzado 20 km de la costa. Se están realizando diferentes estudios que continuarán los próximos años, sobre el Valle de Guaymas; ya que este acuífero es uno de los más importantes en el estado de Sonora, tanto por su uso, por estar localizado en una región cálida, como por su extensión y el avance de la contaminación.

El agua se extrae por pozos profundos, para desarrollar agricultura extensiva y para abastecer a las ciudades de Guaymas, Empalme y San Carlos, importante zona comercial y turística del Estado. Aquí la sobreexplotación del acuífero ha acelerado la invasión salina hacia el continente, dejando inutilizados algunos pozos (Vega, 1992). La zona de Guaymas es una zona de veda, desde el 20 de Diciembre de 1956; el distrito de riego Valle de Guaymas es zona de veda desde el 5 de Julio de 1967 (Información verbal, Castillo 1997).

CAPITULO 5

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL:

5.1 Geología del Valle de Guaymas

Esfuerzos tectónicos de tipo este-oeste provocaron la separación del basamento granítico en bloques orientados norte-sur, y limitados por grandes fallas posteriores a la separación, a través de las fracturas se emplazaron derrames andesíticos y basálticos cubiertos luego por sedimentos fluviales marítimos y lacustres, formando valles (ver figura 4). Los sedimentos del Valle de Guaymas descansan sobre una depresión rectangular de aproximadamente 15 X 45 km, a lo largo de la sección norte-sur; estos esfuerzos tectónicos de tipo tensional originaron los grabens y horst en la Sierra "El Bacatete". Herrera y otros concluyen en 1985 que:

a) la estructura tectónica regional ha dado lugar a profundidades mayores de los 200 m, a cuencas y canales aislados semejantes a los que se observan en la superficie; hacia el sureste se tiene una cuenca de 600-900 m de profundidad, separada por un canal este-oeste; de otra cuenca al norte, de más de 1000 m de profundidad.

b) sobre el basamento granítico se hallan capas intemperizadas del mismo. En los lugares con granito o con sedimentos se tiene buena permeabilidad, pero por su estructura no se hallan comunicados.

c) sobre las rocas anteriores se tiene un paquete con 160 m de sedimentos fluviales, lacustres y marinos, que constituyen el acuífero superior, que en ciertas zonas

descansa sobre arcilla, de 40-200 m de espesor, y en otros lugares el sedimento que lo subyace es arcilloso (ver figuras 5 y 6).

Los afloramientos (ver figura 7) que tenemos en el Valle de Guaymas son:

Precámbrico: No aflora.

Paleozoico: No aflora.

Mesozoico:

GRANODIORITA K(Gd)

Aflora sólo en una sección muy pequeña, relacionado con el afloramiento basalto del cenozoico Q(B), al sur del Ejido Úrsulo Galván y al oeste del Heriberto Jara.

GRANITO K(Gr)

Tiene pequeños afloramientos en los Ejidos Mariano Escobedo y Lomas El Sobadero, en el resto del valle no aflora, sólo en la parte oeste de la Sierra Santa Úrsula y en la parte este del valle, en proporción mucho menor.

Cenozoico:

CONGLOMERADO T(Cg)

Aflora en una gran parte del centro al norte del valle, iniciando en el sur, desde el Ejido Francisco Márquez, hasta el inicio de la Sierra de San Antonio, en el norte

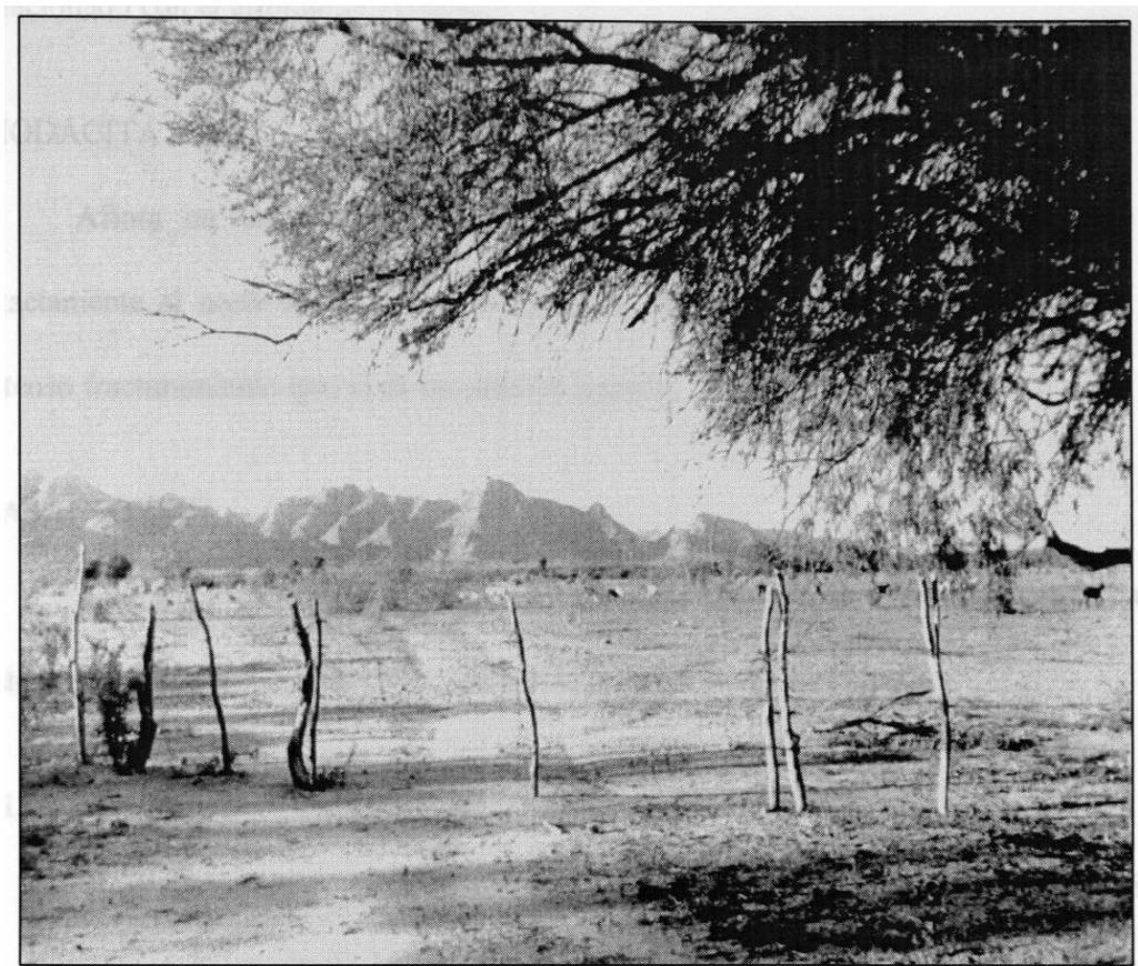


Figura 4.- Sierra y valle en el Valle de Guaymas

RIOLITA-TOBA ACIDA T(R-Ta)

Aflora en secciones pequeñas al centro sur del valle, generalmente está relacionado con el afloramiento Q(B).

RIODACITA Ti(Rd)

Aflora en una pequeña parte, colindando con la parte este, del valle y exactamente al norte del poblado de Empalme, su color es rojo claro y presenta un intenso fracturamiento que le da un carácter lajeado.

BASALTO Q(B)

Aflora distribuido en secciones, al centro-sur del valle, también limita en la parte este y oeste del mismo valle; es de color negro, que intemperiza a café.

ALUVIAL Q(al)

Es el afloramiento mayor del valle, prácticamente cubriéndolo todo, a excepción de la parte norte, donde predomina el conglomerado del terciario; se comprende de materiales derivados de rocas ígneas, con restos limo-arcillosos; en algunas áreas tienen, además, aportes de rocas sedimentarias.

LACUSTRE Q(la)

Sólo aflora en la parte sur del valle, exactamente en la parte de la costa, está compuesto por materiales areno-arcilloso y cantidades considerables de evaporitas, como la sal.

EÓLICO Q(eo)

Se encuentra sólo en el sur del valle, en lo que es la parte de la costa, son depósitos de arena de cuarzo y feldespato, provenientes de las acumulaciones litorales y son transportadas por el viento, formando dunas de poca extensión en la playa.

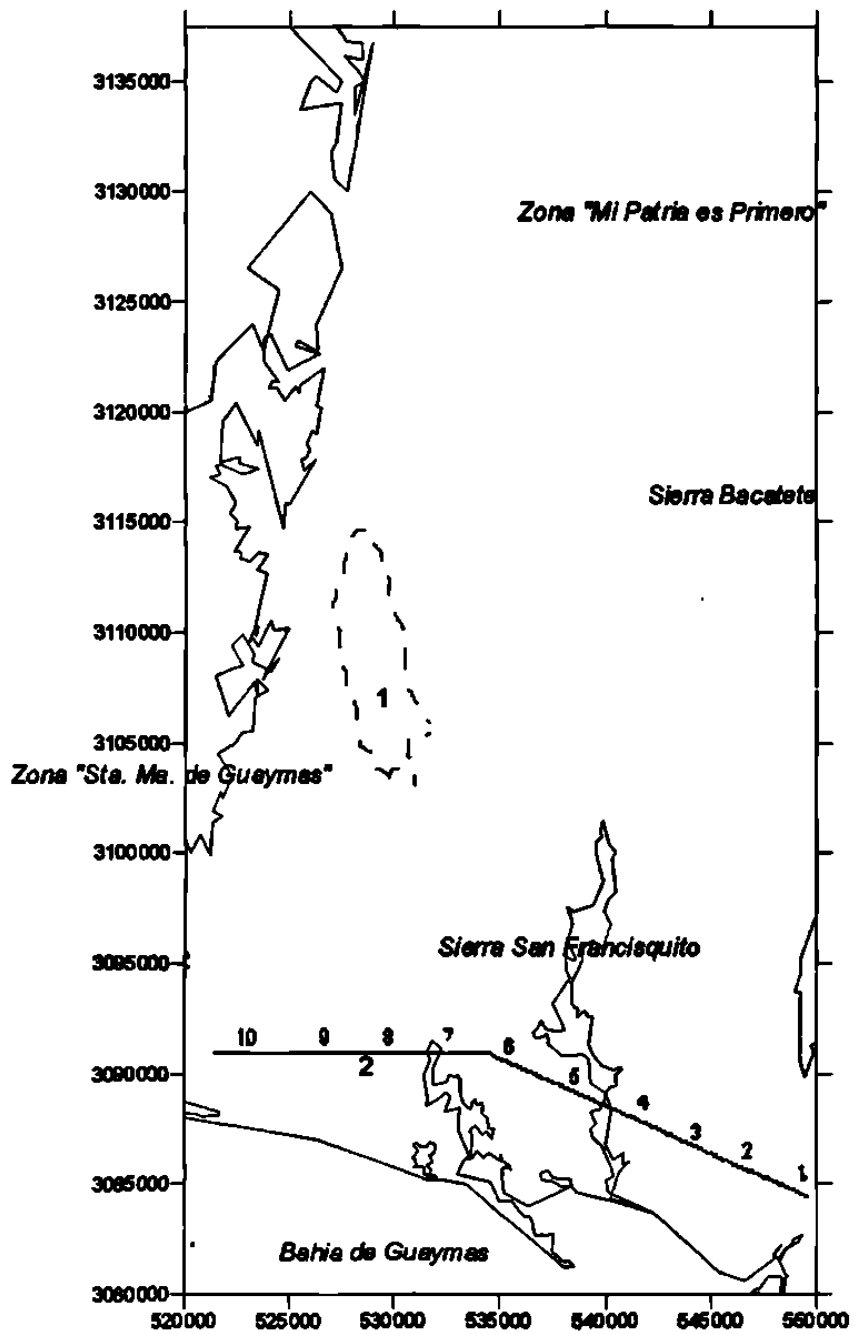


Figura 5

- 1.- Zona anómala
- 2.- Sondeo paralelo a la línea de la costa y a la carretera Guaymas- Obregón

**SONDEO PARALELO A LA LINEA DE LA COSTA Y A LA CARRETERA
GUAYMAS OBREGON**

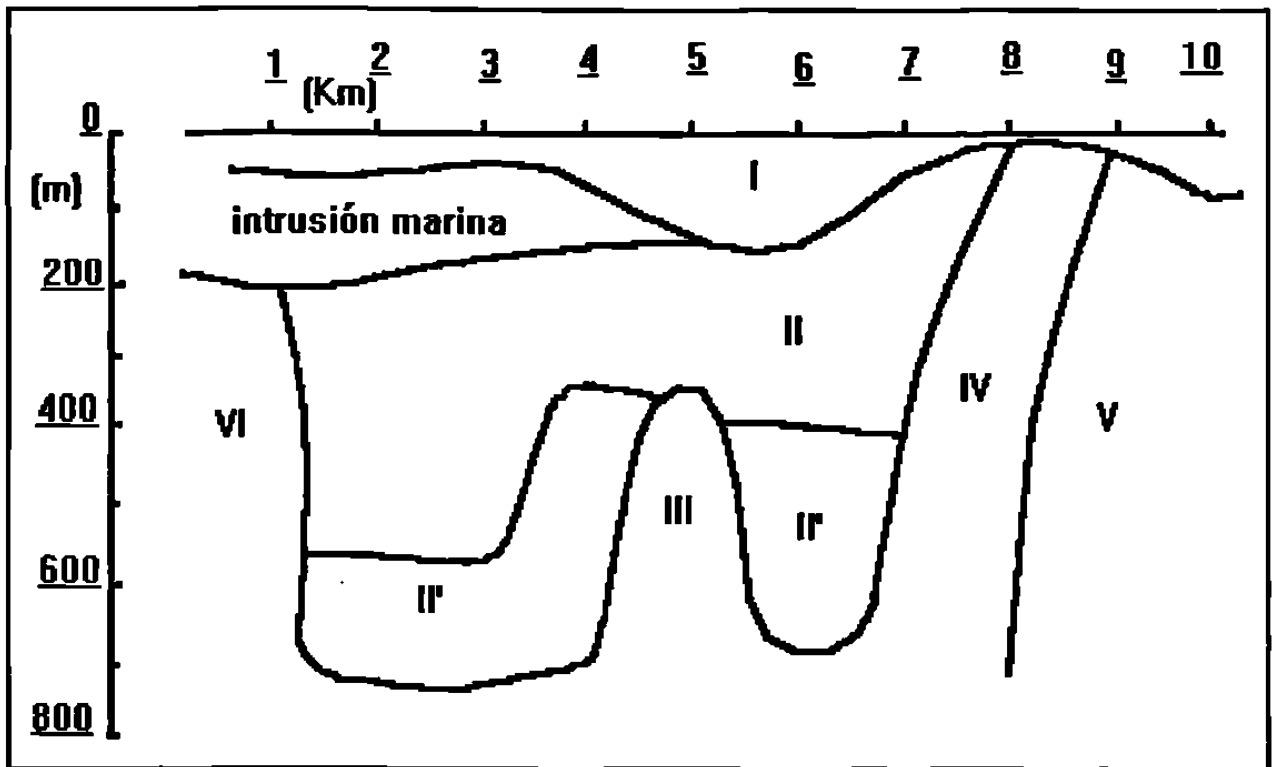


Figura 6

(Campos/Ortega/Medina)

- I.-Sedimentos no consolidados
- II.- Arcilla
- II'.-Arcilla Granular
- III.-Paquete granular poco permeable, probablemente arcilla lenticular
- IV.-Zona de alteración de V
- V.-Continuación de la Sierra San Francisquito en el subsuelo, cuerpo intrusivo
- VI.-Basamentos

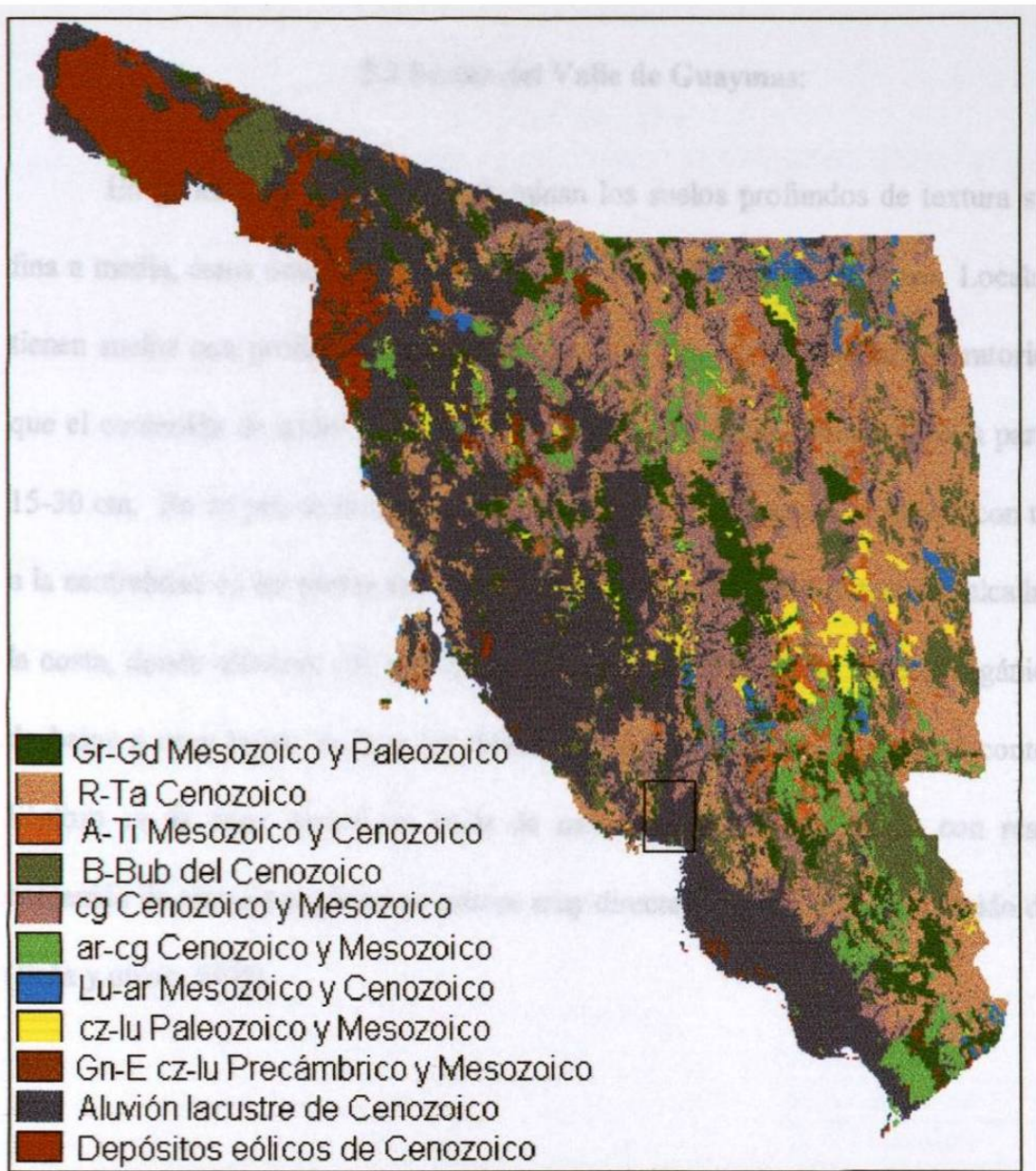


Figura 7

Geología en el Estado de Sonora

(CIDESON, Internet)

5.2 Suelos del Valle de Guaymas:

En general, se observa que dominan los suelos profundos de textura superficial fina a media, éstos ocupan más del 60% del área del Valle de Guaymas. Localmente, se tienen suelos con profundidad menor de los 100 cm, los análisis de laboratorio indican que el contenido de sodio es poco alto a poca profundidad, detectándose a partir de los 15-30 cm. En su pH, se consideran, en general, moderadamente alcalinos, con tendencia a la neutralidad en las partes altas. En contraste, tienden a ser fuertemente alcalinos hacia la costa, donde alcanzan pH mayores de 8.5. Los contenidos de materia orgánica varían de bajos a muy bajos; aunque localmente pueden tener valores altos, el contenido de Fósforo en la capa superficial varía de medio a alto y su relación con respecto al contenido de materia orgánica no parece muy directa y tienen un alto contenido de calcio. (Peña y otros, 1995).

CAPITULO 6

HIDRÁULICA

6.1 Superficial

La zona estudiada se encuentra localizada en la provincia fisiográfica: Zona Desértica de Sonora (Cartas INEGI, 1983).

TABLA I

DIVISIONES DE LA CUENCA DEL RÍO MÁTAPE

REGIÓN	CUENCA	SUBCUENCA
RH-9 Sonora Sur	C) Río Mátape	a) R. Empalme - Mátape
		b) R.Mátape- Presa Punta de Agua
		c) A.Guaymas
		d) Guaymas
		e) A.Chicuroso
		f) A.Tetacbiate

Cartas de Hidrología Superficial, INEGI 1983.

El Valle de Guaymas comprende la subcuenca a, en su mitad noroeste, la mayor parte de la subcuenca d parte de la subcuenca e, en el este del valle y en la parte inferior derecha del valle, una pequeña parte de la subcuenca f (ver figura 2).

6.1.1 Climatología

El clima es el promedio de los estados del tiempo de un área determinada, calculada sobre observaciones hechas durante un período muy largo. Los elementos que entran en la determinación del clima son también elementos de tiempo: temperatura,

presión, viento, humedad y precipitaciones (López, 1993). El clima predominante en la región es de tipo semidesértico, seco muy cálido, del tipo BW (h') w (c) con lluvias deficientes todo el año (ver figura 8). La temperatura media anual es de 23 °C, en las zonas montañosas es de 18.3 °C; en la zona intermedia es de 22.5 °C y en las zonas bajas es de 25.1°C, con una humedad relativa media registrada en Guaymas de 55% (SARH,1988). La temperatura mínima registrada en la zona es de -6.5 °C y la máxima es de 50 °C decreciendo entre dos y cuatro grados en las partes altas.

TABLA II

TEMPERATURAS EN LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DE LA CUENCA DEL RÍO MÁTAPE (1967-1995)

Estación	Máxima	Mínima	Municipio	Latitud	Longitud
Punta de agua	49.0	-6.5	Guaymas	28°25'59"	110°23'34"
La Misa	50.0	3.0	Guaymas	28°22'37"	110°31'51"
San Francisco	47.0	-1.0	Guaymas	28°09'00"	110°41'12"
Fco. Márquez	46.0	-2.0	Guaymas	28°03'18"	110°36'42"
ETA	48.0	1.0	Empalme	28°03'18"	110°45'30"
Guaymas	43.0	1.0	Guaymas	27°55'36"	110°56'30"
San Ignacio			Empalme	27°57'42"	110°43'30"

(CNA Datos Técnicos)

La precipitación media anual es de 320 mm, mientras que la evaporación potencial media anual es de 2600 mm (ver tabla III), la cual es aproximadamente 8 veces más que la precipitación.

El escurrimiento superficial se presenta sólo en épocas de lluvia, que es entre los meses de Julio a Septiembre, efectuándose a través del cauce del Río Mátape. Durante el

mes de agosto es cuando se presenta la mayor cantidad de lluvias, con una precipitación media de 80.4 mm en la planicie registrada en la Estación Guaymas y de 121.6 mm en la zona montañosa de la Estación Punta de Agua.

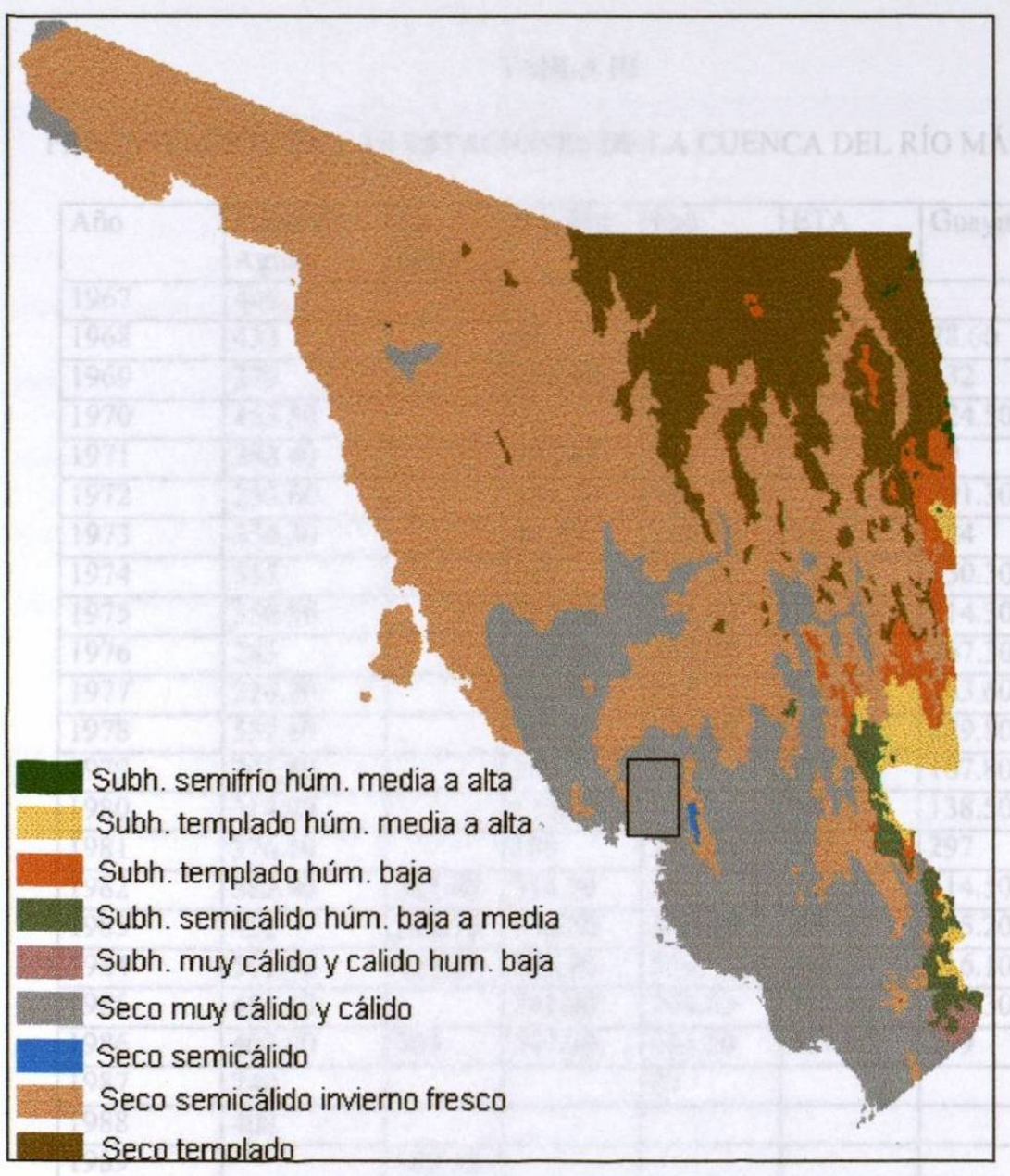


Figura 8.- Climas en el estado de Sonora

(CIDESON, Internet)

TABLA III

PRECIPITACIÓN EN LAS ESTACIONES DE LA CUENCA DEL RÍO MÁTAPE

Año	Punta de Agua	La Misa	San Fco.	Fco. Márquez	ETA	Guaymas
1967	448					
1968	433		88	80		28.60
1969	379		281.50	226		132
1970	453.50		241	163.50		224.50
1971	388.40		197.40	165		69
1972	293.60		184.50	158		291.30
1973	354.30		49.50	142.50	28	124
1974	555		285	294.50	235.20	150.30
1975	350.90		250.50	222.40	147.40	214.30
1976	285		144.50	140.50	150.40	267.30
1977	226.20		153.50	111	140.80	163.60
1978	537.60		279.30	357.40	233.50	229.80
1979	241.80		280	288	221.40	107.80
1980	314.90		133.60	255	98.30	138.50
1981	376.10		180	254.60	127	297
1982	382.90	323.40	514.20	565	362.60	414.50
1983	452	308.50	550.50	536.90	458.60	515.20
1984	591.40	414.60	531.70	550	483.30	516.10
1985	451.10		391.90	244.60	332.10	194.30
1986	407.80	369	347.30	466.50	357.90	399
1987	240			87		
1988	408					
1989		189.10				
1990	585.20	344.30		611.50		
1991		483		455.50		
1992	631.90	451.90	661.30	510.50	214.30	
1993	429.40	438.50	235	416.50		
1994	542	472				
1995	447.80	328				
Promedio de Estación	415.06	374.7	284.7	304.26	239.38	235.6

(CNA Datos Técnicos).

6.1.2 Aprovechamientos

La pendiente general en la Cuenca del Río Mátape oscila entre media y baja. El dren principal de la cuenca es el Río Mátape, el cual tiene su nacimiento al norte de la localidad de Mátape, desde donde inicia su trayectoria de 82 km hasta descargar sus aguas en el vaso de la Presa Ignacio L. Alatorre, para que posteriormente su cauce se aproveche en la zona agrícola del Valle de Guaymas. Durante este recorrido, el Río Mátape observa una pendiente media de 0.38% y dirección general noreste - suroeste.

Las presas Ignacio L. Alatorre y La Haciendita, ambas sobre el Río Mátape, representan las obras de almacenamiento de mayor importancia en el área. El aprovechamiento del agua superficial se destina a las actividades agrícolas, domésticas y pecuarias.

La disponibilidad del agua en la superficie de la Cuenca Río Mátape es del orden de los 120.62 millones de m³ anuales, derivados a partir de un volumen medio anual precipitado de 3092.7 millones de m³ y un coeficiente de escurrimiento abtenido de 3.9% (INEGI,1993). En el Valle de Guaymas, por ser un área agrícola, se tiene una buena cantidad de canales y arroyos, como: San Marcial, El Seco, Santa Cruz, Mautal, El Cochino, La Crucecita, El Salpullido y el Río Mátape, en la parte norte. Huichori, San Alejandro, La Tinaja, La Palma y San Marcial, en la parte central; El Carrizo y Guapari en el sur del valle (INEGI).

6.2 Subterránea

6.2.1 Censo de Pozos

En el Valle de Guaymas se tiene un número aproximado de 167 aprovechamientos conocidos, entre los que se encuentran pozos con papalote, norias y pozos con bombas eléctricas, siendo estas últimas las que predominan. El diámetro de descarga predominante en el valle es de 10 plg. Se debe tomar en cuenta que las reubicaciones de algunos aprovechamientos, así como el cierre de otros, es casi constante, por lo que el número varía constantemente.

6.2.2 Estudios geofísicos del Valle de Guaymas

En 1975, la compañía de Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados practicó pozos de exploración de hasta 200 m de profundidad. Se encontraron lentes de arcilla que hicieron pensar en tres acuíferos, los dos primeros separados por arcilla café, y el tercero separado por el segundo, por una formación arcillosa compacta del terciario, llamada arcilla azul. A la arcilla que separa al acuífero superior del intermedio se le asignaron espesores variables de alrededor de 15 m; al acuífero superior un espesor variable, saturado desde 8 m hasta 38 m, el espesor del acuífero intermedio también se detectó variable, desde 10 m hasta 55 m. Se debe tomar en cuenta que estos estudios no cubrieron totalmente lo que representa todo el valle, dejando sin información la parte norte del mismo.

En 1984 se llegó a conclusiones completamente distintas a lo que se pensaba en los años anteriores a esa fecha. En este trabajo, realizado por Campos y otros, se presentó un modelo geoestructural evidenciando un control tectónico no sólo en las

estructuras relacionadas con el basamento, sino en el paquete sedimentario suprayacente. Este paquete se compuso de depósitos granulares y de un paquete arcilloso que comprende la arcilla azul. Esta formación resultó no ser tan continua ni con la geometría que se suponía antes de 1984, concluyendo entonces que se podía hablar de un acuífero superior, con un espesor promedio de 150 m y con transmisibilidades que van desde $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{seg.}$ a $7.1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{seg.}$ constituido por depósitos aluviales representados por capas de boleos, gravas, arenas y arcillas, dispuestas en forma errática, y una serie de formaciones acuíferas semiconfinadas y/o colgadas, con espesor promedio de 160 m y transmisibilidad media de $2 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{seg.}$ Este estudio determinó lo siguiente: en dirección este-oeste, paralelos a la costa y a un costado de la carretera Guaymas - Obregón se tienen sedimentos no consolidados, con profundidades desde cero hasta 200 m (ver figuras 5 y 6). La recarga media anual es del orden de los 100 millones de m^3 , de los cuales 40 son generados por los retornos de riego; 30 ingresan por la parte norte, por la alimentación subterránea, 20 aporta el acuífero inferior y los 10 restantes corresponden a la infiltración vertical de la lluvia, que se suscita principalmente en la parte alta del valle. Se estima que la recarga natural del acuífero inferior es de 10 millones de m^3 anuales. El flujo regional del agua subterránea es de norte a sur, mientras que el flujo local presenta un comportamiento radial, hacia el oeste de la zona.

En general, prácticamente todo el Valle de Guaymas se considera con posibilidades altas de formar acuíferos, excepto en pequeñas partes en el sur del valle, donde se considera como material consolidado con posibilidades bajas. (INEGI, 1993), (Herrera, 1984)

6.2.3 Fronteras

Las fronteras en el Valle de Guaymas son, en su parte sur, el Mar de Cortés y la Sierra San Francisquito; en la parte este, la Sierra El Bacatete; el valle limita, en la parte oeste, con la Sierra Santa Úrsula. Las mismas fronteras del Valle de Guaymas, en sus partes sur, este y oeste, son también las fronteras de su acuífero. En el norte, la frontera se considera la recarga constante de su infiltración del agua de lluvia.

La permeabilidad de los materiales que se encuentran en el área tiene características bien definidas, que puede clasificarse de alta a baja. Las sierras compuestas por rocas ígneas principalmente y por pequeños afloramientos de sedimentarias, se han considerado como impermeables, debido a su origen, composición, y al poco fracturamiento que presentan. También se consideró de permeabilidad baja a la superficie del suelo lacustre aledaño a la costa, en el noroeste.

Las serranías compuestas de rocas basálticas recientes, que se encuentran intensamente fracturadas, se consideran permeables, así como a los materiales que forman el valle, con suelos de origen aluvial y composición arenosa (Beltrán, 1983) (Córdova/Salomón, 1997) (INEGI, 1993).

6.2.4 Evolución de la Piezometría

La evolución de la piezometría ha sufrido un gran descenso, desde que se inició la extracción, hacia 1940. Esto ha sido ocasionado por el incremento de la demanda en la agricultura y en la población, además de que esto mismo está ocasionando la intrusión salina del agua de mar; que avanza, desde los pozos de la playa, hacia los que están más

en el centro del valle. Se tiene también la recuperación de varios pozos, pero ésta es en gran parte por la intrusión del agua del mar en el acuífero, por ejemplo:

	1990	1991	1992
Pozos recuperados	28	30	46
Pozos Abatidos	70	31	27
			CNA, Datos Técnicos

En el período comprendido de 1967 a 1988, se registraron abatimientos que van desde 10 m hasta 40 m, lo que sitúa al nivel estático a profundidades que fluctúan entre los 26 m, en el sur de la zona y los 119 m, en la porción noreste (INEGI, 1993).

Se tienen registros de la piezometría de la mayoría de los pozos, pero prácticamente uno solo de los pozos, el 26 es el que cuenta con medición de todos los años, desde 1967.

Este pozo se encuentra en el Ejido Cruz de Piedra, en el sur del Valle de Guaymas.

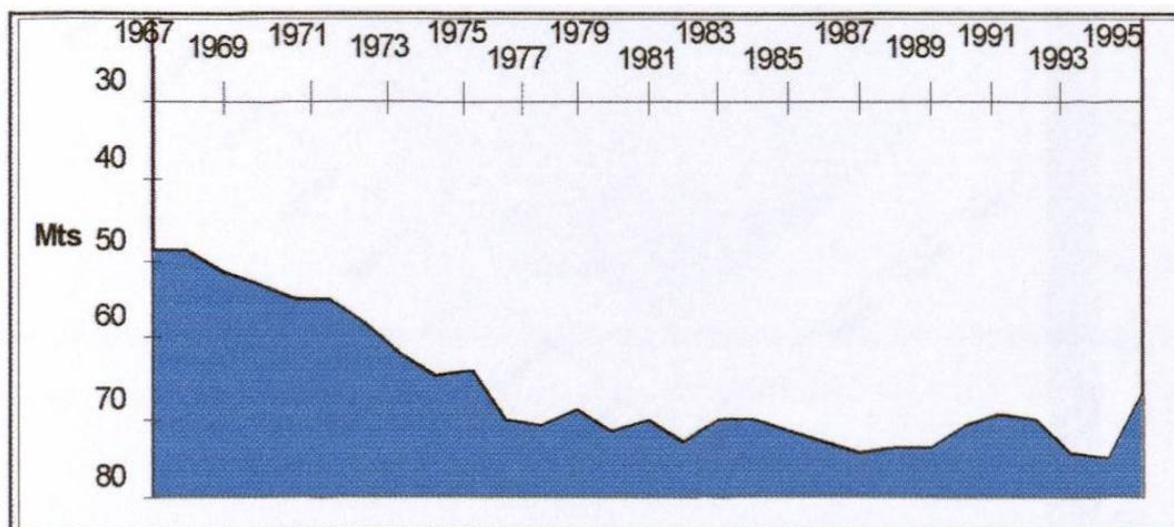


Figura 9.- Evolución de la piezometría del pozo 26 del Valle de Guaymas.

Los problemas en el Valle de Guaymas y Empalme se han incrementado con el tiempo; en la actualidad, se ha llegado a la necesidad de implantar un plan correctivo, por la reducción de los mantos acuíferos en un 15% en los últimos dos años, según datos de la CNA, en Empalme.

El valle de Guaymas se encuentra en un 50% de su capacidad productora. Esto se debe no sólo a los problemas anteriormente expuestos, o por el acuerdo de reducción de las extracciones, iniciado en 1983, sino también a la crisis económica que ha enfrentado el productor agrícola. (Córdova / Salmón,1997)

En las figuras 10 y 11 se ve la evolución de la piezometría del Valle de Guaymas.

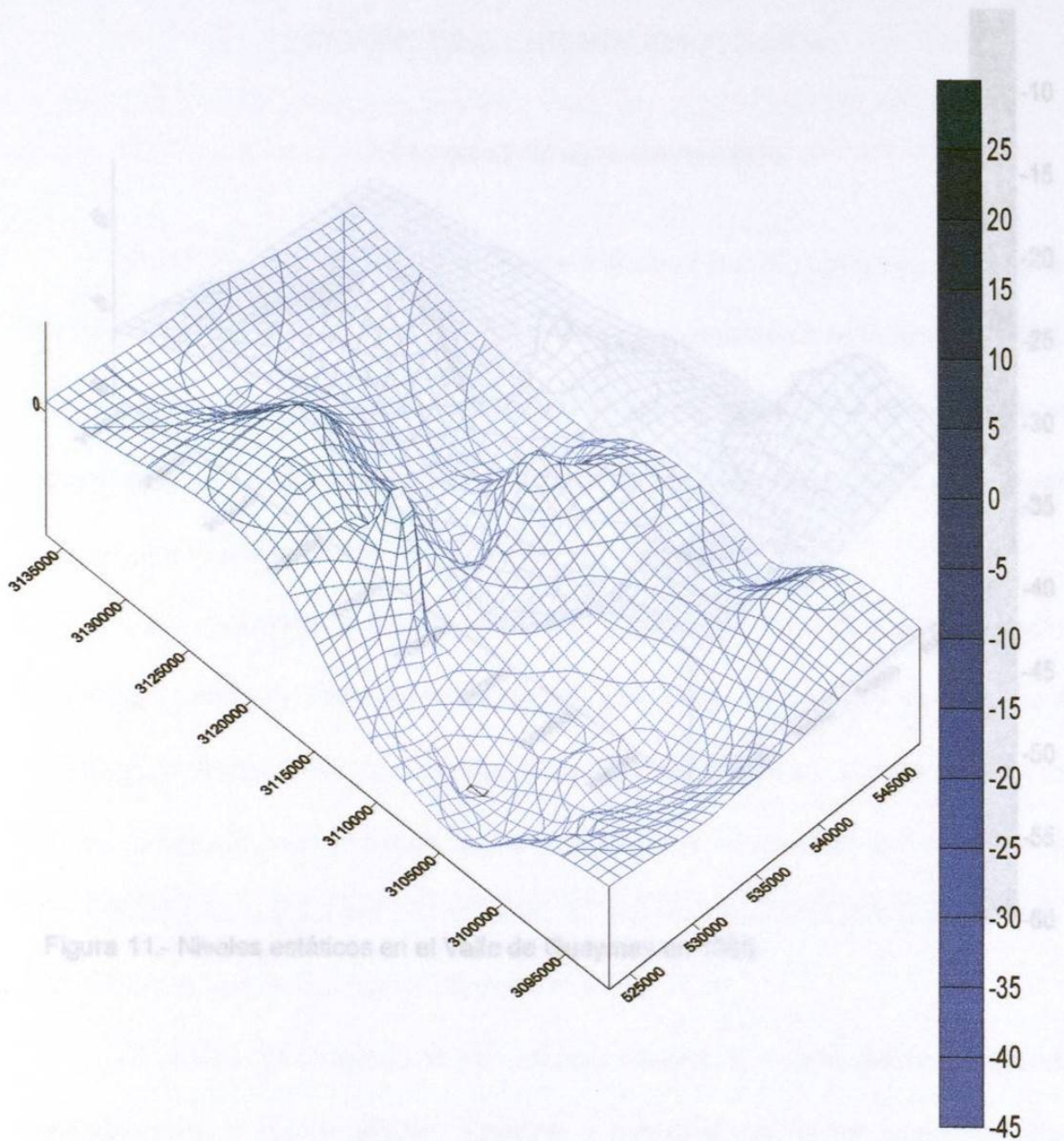


Figura 11.- Niveles estáticos en el Valle de Guaymas

Figura 10.- Niveles estáticos en el Valle de Guaymas en 1975

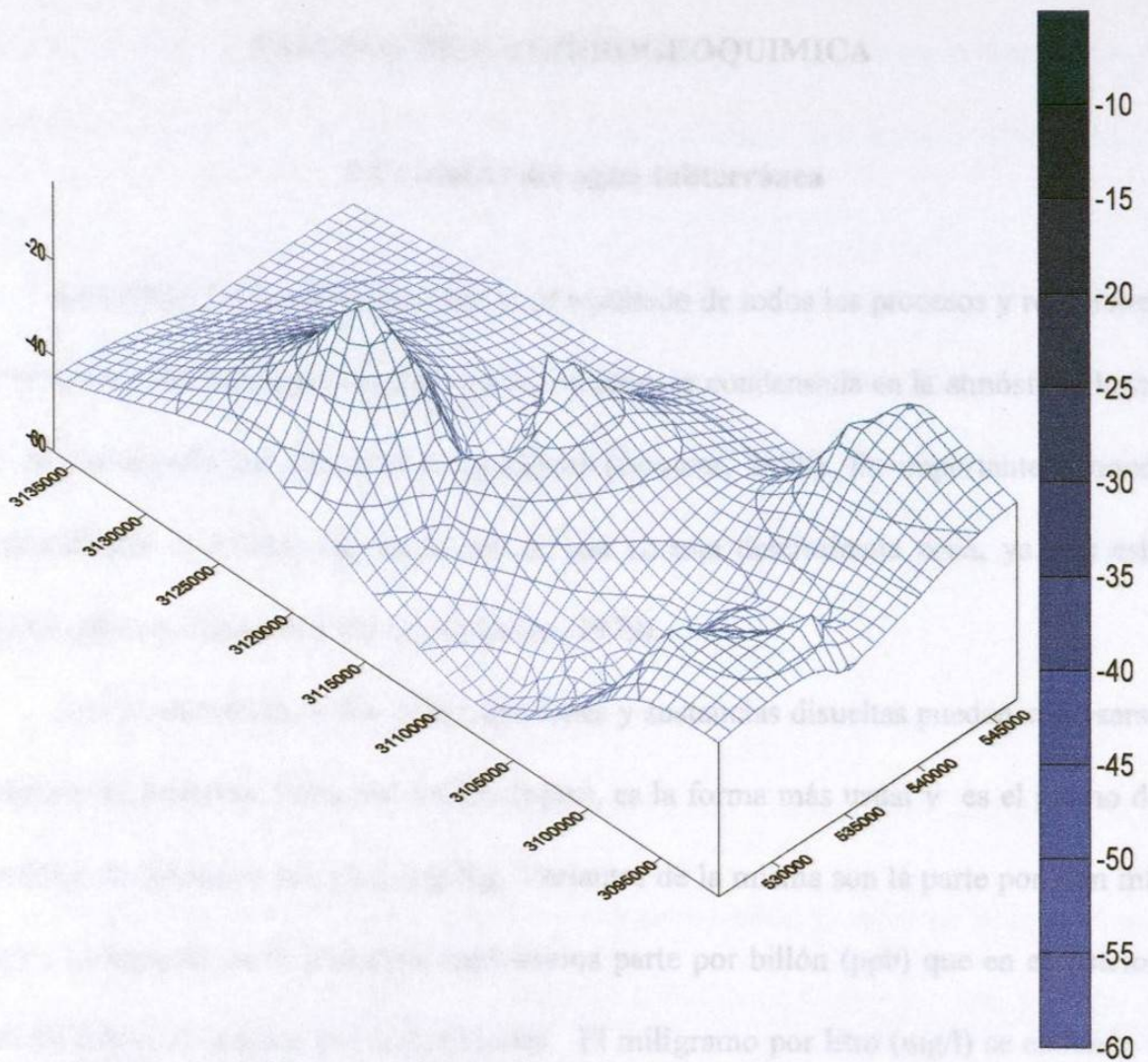


Figura 11.- Niveles estáticos en el Valle de Guaymas en 1995

El uso del agua en el valle de Guaymas es principalmente agrícola, con un uso menor para el turismo e industrial, en menor proporción. Para el uso del agua en el valle de Guaymas se debe tomar en cuenta que el agua que se usa en el valle de Guaymas es agua de lluvia, como parte de ésta el agua de lluvia que se infiltra y corre a través de ellas.

El uso del agua en el valle de Guaymas, el agua de lluvia muestra diferentes características de infiltración en la atmósfera y que en menor medida,

CAPITULO 7

ESTUDIO DE LA HIDROGEOQUIMICA

7.1 Calidad del agua subterránea

La calidad del agua subterránea es el resultado de todos los procesos y reacciones que tienen acción desde el momento en que el agua es condensada en la atmósfera, hasta que es descargada por un pozo o manantial (Bouwer, 1978). Es importante conocer continuamente la calidad del agua que se usa en una determinada zona, ya que esta calidad está condicionada a ese uso (Chavez, 1979).

La concentración de los diferentes iones y sustancias disueltas pueden expresarse de diferentes maneras. Parte por millón (ppm), es la forma más usual y es el gramo de un millón de gramos o sea es el mg/Kg. Variantes de la misma son la parte por cien mil (ppc) y la llamada en la literatura anglosajona parte por billón (ppb) que en el sistema numeral latino es la parte por mil millones. El miligramo por litro (mg/l) se entiende 1 miligramo por litro de disolución. (Custodio/Llamas, 1976).

En el Valle de Guaymas, el uso del agua subterránea es principalmente agrícola, también existe el uso doméstico, ganadero e industrial, en menor proporción. Para efectuar una interpretación hidrogeoquímica se debe tomar en cuenta que el agua que forma los acuíferos proviene en parte, del agua de lluvia, donde parte de ésta al precipitarse sobre las formaciones geológicas se infiltra y corre a través de ellas.

Al precipitarse hacia la corteza terrestre, el agua de lluvia arrastra diferentes materiales finos, que se encuentran en suspensión en la atmósfera y que en muchos casos

son transportados por el viento (Chavez, 1979). El contenido de sales del agua de lluvia depende de la distancia a la costa y de la proximidad a ciudades. También depende de la estación del año, de los vientos dominantes, de la intensidad y hora de la lluvia. Es más fuerte el contenido de Cl⁻ al principio de la lluvia y después desciende a valores mucho menores.

TABLA IV
VALORES MÁS FRECUENTES DEL AGUA DE LLUVIA EN PPM

ION	EN LA COSTA		A 50 Km DE LA COSTA		A 100 Km DE LA COSTA	
	MEDIA	MÁXIMA	MEDIA	MÁXIMA	MEDIA	MÁXIMA
Cl ⁻	10-40	100	1-5	20	0.5	1
SO ₄		15	1-3	30		
HCO ₃			20			
NO ₃		2	2.7	12		
NH ₃			28			
rMg/rCa ₂		0.3		0.2		

(Chavez, 1979)

En general, el agua de lluvia aporta muy pocas sales, excepto en la costa donde puede aportar cantidades notables de cloruro de sodio, Na Cl. Aunque debe tomarse en cuenta que el agua de lluvia es incapaz de la aportación total (Correu y Andrade, 1974).

Las aguas subterráneas son soluciones de composición compleja y de mineralización diferente, la cual oscila dentro de los límites de unidades de miligramo y hasta centenares de gramos por litro. En las mismas se han descubierto iones, moléculas, incluso gases, pero sólo algunas de ellas están presentes en cantidades considerables; por consiguiente, los principales iones que determinan la mineralización y el tipo químico del agua son: cloro Cl⁻, sulfato SO₄⁻, bicarbonatos HCO₃, carbonatos CO₃, sodio Na⁺, calcio Ca²⁺, magnesio Mg²⁺ y potasio K, conocidos con el nombre de

macrocomponentes. A éstos también pertenecen los compuestos de nitrógeno y los elementos tungsteno W, silicio Si, fierro Fe, aluminio Al, fosforo P. Los macrocomponentes constituyen la parte principal de la composición mineral de las aguas subterráneas. En las aguas dulces más del 90 % y en las fuertemente mineralizadas, más del 99%. A todos los demás elementos que se encuentran en estado disperso se les denomina microcomponentes; éstos no determinan el tipo químico del agua pero influyen considerablemente en la formación de las particularidades específicas de las aguas subterráneas. A éstos pertenecen los elementos: litio Li, boro B, titanio Ti, cromo Cr, manganeso Mn, cobalto Co, níquel Ni, cobre Cu, zinc Zn, arsénico As, bromo Br, estroncio Sr, molibdeno Mo, itrio Y, bario Ba, plomo Pb, etc. (Mijailov, 1989).

Todas las aguas subterráneas suelen contener una proporción de sales disueltas relativamente elevada. Generalmente, se encuentran mayores proporciones de sales disueltas en las aguas subterráneas que en las superficiales, ya que aquéllas han estado expuestas durante su curso entre los materiales de los acuíferos, a una mayor disolución de las materias químicas existentes en las rocas que componen éstos. También pueden las aguas subterráneas absorber gases de origen geológico que contribuyen a la disolución de los productos minerales de las rocas que las rodean (Benítez,1972) (Clarke, 1980).

La química del agua dependerá de la solubilidad y composición de las rocas y suelos por los que circula y de los factores que afectan la solubilidad, como son principalmente: las temperaturas del agua y de las rocas, el área de contacto del agua con las formaciones, la velocidad de circulación, la longitud del recorrido, la previa composición química del agua, la concentración de sustancias ya disueltas (Chávez

1979). En el suelo se tienen multitud de fenómenos que favorecen el ataque químico y la disponibilidad de sales solubles. Es en el suelo donde el agua adquiere una parte de su carácter químico, después sólo sufrirá pequeñas modificaciones si su permanencia en los acuíferos no es muy grande.

La materia viviente de los suelos esponja éstos y permite el paso del aire y del oxígeno del aire. La mayoría de estos organismos, en su respiración producen bióxido de carbono CO_2 y así se tiene una atmósfera en el suelo rica en CO_2 . En climas cálidos y secos, como es el caso del Valle de Guaymas y Empalme, sólo las lluvias muy intensas llegan al acuífero, y entonces pueden llegar muy cargadas en sales, pues no sólo han disuelto una gran cantidad de sales que lluvias anteriores evaporadas precipitaron en el suelo, sino que además han sufrido una notable concentración por evaporación. Pero se debe tomar en cuenta que el agua que se infiltra por el suelo y el agua de lluvia tienen concentraciones diferentes de sales, el agua retenida en el suelo es muy rica en sales, mientras que el agua que se infiltra es el resultado de una dilución que será menor cuanto más árido sea el clima. Los niveles freáticos en el Valle de Guaymas no se consideran dentro de los someros, dando así lugar a una filtración menor, pero de mayor cantidad de elementos químicos (Correau/Andrade, 1974). Además, en los últimos años no se registran precipitaciones muy fuertes en el valle, se debe considerar que de cada 40 ciclones que se registran en el Océano Pacífico de México, sólo uno entra a Sonora, lo que da como promedio un ciclón cada 3 años, que desfavorece aún más la infiltración (información verbal Castillo, 1997). Los cationes más comúnmente presentes en las aguas subterráneas son el cloro y el calcio, los aniones correspondientes son bicarbonato, carbonato y sulfato, generalmente los cloruros provienen de contaminación de aguas

residuales o por intrusión de agua de mar, caso que se presenta en el Valle de Guaymas (Benites1972) (Correau/Andrade, 1974). En el agua para riego se utiliza la clasificación de Wilcox (ver figura 12), a partir de la cual y por medio de las concentraciones de sodio, magnesio, calcio y la conductividad eléctrica, se conoce la clase de agua para riego a que pertenece cada muestra analizada, así como las recomendaciones relativas al tipo de suelo en que debe usarse, las prácticas del control de la salinidad y los tipos de cultivo más adecuados.

Las especificaciones de las clases de agua, en cuanto a salinidad (C_1, C_2, C_3, C_4) y en cuanto a Sodicidad (S_1, S_2, S_3, S_4) en sus diferentes valores y relaciones dará origen a las siguientes clasificaciones:

C₁: Agua de baja salinidad, puede usarse para el riego en la mayoría de los cultivos y casi en cualquier tipo de suelo, con muy poca posibilidad de que se desarrolle salinidad. Se necesita algún lavado, pero ésta se desarrolla y se logra en condiciones normales de riego, excepto en los suelos de baja permeabilidad.

C₂: Agua de salinidad media, debe usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lavado. En casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de salinidad, se pueden producir las plantas moderadamente tolerantes a sales.

C₃: Agua altamente salina, no debe usarse en suelo cuyo drenaje sea deficiente. Aún con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales de control de salinidad debiendo, por lo tanto, seleccionar únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a sales.

C₄: Agua muy altamente salina, no es propia para riego, en condiciones ordinarias, pero puede usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los

suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado, debiendo aplicarse un exceso de agua para lograr un buen lavado. En estos casos se deben seleccionar cultivos altamente tolerantes a sales.

S1: Agua baja en sodio, puede usarse para el riego de la mayoría de los suelos; no obstante, los cultivos sensibles como algunos frutales y aguacate, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

S2: Agua media en sodio, en suelos de textura fina, el sodio representa un peligro considerable, más aún si dichos suelos poseen una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso. Esta agua sólo debe usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.

S3: Agua alta en sodio, puede producir niveles tóxicos de sodio en la mayoría de los suelos, por lo que éstos necesitan prácticas especiales de manejo, buen drenaje, fácil lavado y adiciones de materia orgánica. Los suelos yesíferos pueden impedir se desarrollen niveles perjudiciales de sodio, cuando se riega este tipo de agua. Puede requerirse el uso de mejoradores químicos para sustituir el sodio intercambiable, sin embargo, no serán económicos si se usan aguas de alta salinidad.

S4: Agua muy alta en sodio, es inadecuada para riego, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo y la aplicación del yeso y otros mejoradores no hacen antieconómico el empleo de esta clase de agua (Chávez, 1979).

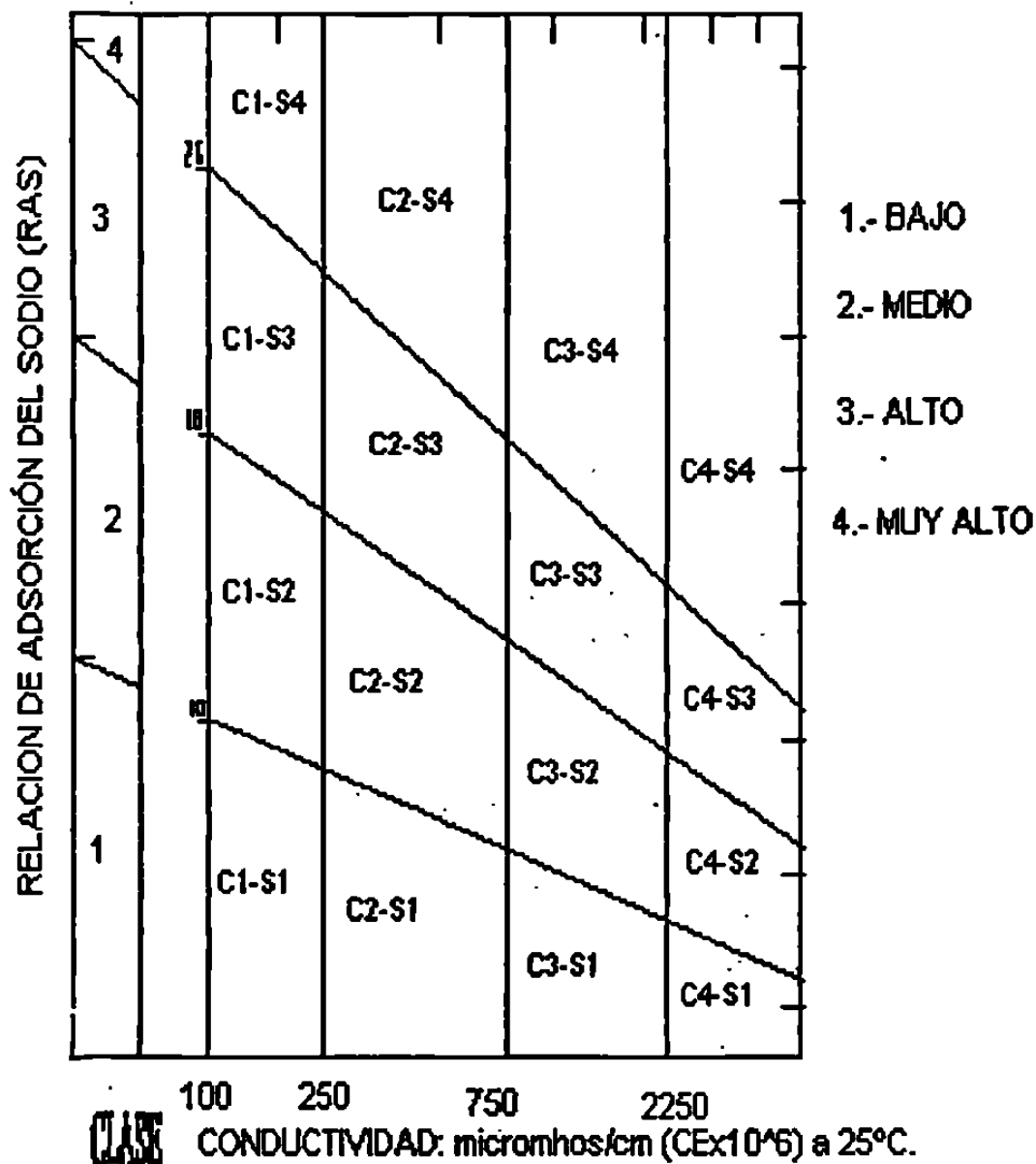


Figura 12.- Diagrama de Wilcox para aguas de riego

7.2 Constituyentes químicos estudiados en el Valle de Guaymas

Para el presente trabajo, se analizaron los constituyentes químicos más representativos, que son los aniones: bicarbonatos (HCO_3), sulfatos (SO_4), cloruros (Cl) y los cationes: sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), conductividad eléctrica, el potencial de hidrógeno (pH), STD, y en algunos pozos la temperatura del agua. Los bicarbonatos (HCO_3) y carbonatos (CO_3), producen alcalinidad. Los bicarbonatos de calcio y magnesio se descomponen en aguas calientes, facilitando la incrustación. En combinación con calcio y magnesio es causa de la dureza. La dureza es la propiedad del agua que se demuestra mejor por la facilidad con la cual disuelve jabón para producir espumas. No se producen éstas en un agua dura hasta que los minerales que causan la dureza se han eliminado, mientras más alta la dureza, más jabón se requerirá para producir espuma (Gibson,1974).

Las aguas con elevado contenido de sulfatos no quitan la sed y tienen sabor poco agradable y amargo puede comunicar propiedades laxantes. El ion sulfato procede de lavados de terrenos formados en condiciones de gran aridez o en ambiente marino. De oxidación de sulfuros de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias. De la concentración en el suelo del agua de lluvia (Custodio/Llamas,1976).

Los cloruros en grandes concentraciones aumentan el poder corrosivo del agua, y en combinación con sodio, da un sabor salado. Proviene de la disolución de rocas y suelos (Canales, 1989).

La clasificación de las aguas subterráneas por la sal común o ion cloruro es la siguiente:

Agua dulce	0	a 1,000 mg/l Cl
Agua salobre	1000	a 10,000 mg/l Cl
Agua salada	10000	a 100,000 mg/l Cl
Salmueras	> 100,000	mg/l Cl

El sodio en su estado natural en el agua subterránea puede contribuir a la alta presión sanguínea, proviene de la disolución de la mayoría de rocas y suelos. El potasio en grandes concentraciones, en combinación con cloro produce también un sabor salado. Proviene de la disolución de la mayoría de las rocas y suelos. El magnesio y el calcio, son los principales responsables de la dureza y del agua incrustante. Proviene de la disolución de la mayoría de los suelos y rocas.

La conductividad eléctrica es la capacidad del agua para conducir electricidad, la resistividad eléctrica es el inverso de la conductividad. Es más recomendable el uso de la conductividad ya que crece paralelamente a la salinidad. La conductividad crece con la temperatura y con el contenido de sólidos disueltos. Las unidades de conductividad son 1 microsiemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$) o micromhos/cm ($\mu\text{mhos}/\text{cm}$) (Custodio/Llamas,1976).

El pH indica la neutralidad del agua si su valor es 7, valores mayores indican alcalinidad y menores acidez. La determinación del valor del pH es importante en el control de la corrosión que es un proceso que destruye los metales, generalmente aumenta al disminuir el pH. La incrustación, a diferencia de la corrosión, no destruye el metal, pero provoca el depósito de minerales sobre él y en la capa acuífera que circunda el pozo. Las aguas incrustantes son, generalmente alcalinas, lo opuesto a las aguas

corrosivas, las cuales son ácidas (Werner,1996). En general los ácidos y el bióxido de carbono, bajan el valor del pH. Carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos, fosfatos, silicatos y boratos, aumentan el valor del pH (Canales, 1989).

La temperatura del agua subterránea es un parámetro muy útil, ya que puede utilizarse como auxiliar de datos geoquímicos en la clasificación de diferentes tipos de agua. Algunos trabajos han reconocido la relación directa entre la dirección, profundidad (Mifflin,1968) y salinidad (Edmus,1984) del agua subterránea y su incremento de temperatura, de tal manera que las aguas más calientes y en ocasiones las más concentradas generalmente tienen una profundidad de circulación considerable. Sin embargo, la temperatura que alcanzan en la zona más profunda generalmente no corresponde con la descarga registrada en la superficie. A medida que el agua desciende, se calienta paulatinamente por efecto del gradiente geotérmico local, además de reaccionar con la roca encajonante (Cardona/ Carrillo, 1991). La mineralización de las aguas subterráneas generalmente aumenta con su temperatura. Las temperaturas de las aguas subterráneas están influenciadas por la temperatura del aire en la superficie de la tierra, lo que quiere decir, por los factores climáticos o por la energía del sol. Las aguas subterráneas se diferencian en sus temperaturas en:

a) Aguas frías, que son las aguas de los sistemas de flujo someros, con temperaturas parecidas a las del aire de la región, que pueden alcanzar aproximadamente los 30 °C en zonas calientes, estas aguas son casi exclusivamente afectadas por el factor climático.

b) Las aguas termales son las de los sistemas de flujo profundos, son casi exclusivamente afectadas por el factor geotérmico (Werner,1996).

Podemos considerar los pozos con anomalías térmicas en el Valle de Guaymas como pertenecientes a acuíferos termales secundarios producto del calentamiento a través de procesos de conducción de calor, cuya fuente son los acuíferos termales profundos almacenados en rocas de origen marino. Se considera al patrón tectónico del Golfo de California (Falla de San Andres), como fuente de calor de los acuíferos termales profundos. Influye en el Valle de Guaymas la cercanía a la fuente de calor y que cuenta con poca dispersión térmica, debido al gran sello formado por los sedimentos aluviales terciarios y recientes (Herrera y otros, 1985).

El RAS que es la concentración relativa de sodio, con respecto al calcio y magnesio, es usado junto con la conductividad eléctrica para determinar la calidad del agua para riego. Se calcula usando la concentración de los iones que se indican en miliequivalentes por litro (Chávez, 1979) (CFE, 1983).

La resistividad es una medida indirecta de los sólidos totales disueltos (STD, TSD o SDT, consistente en el residuo seco después de evaporación a 110°C. No es igual al total de las sustancias disueltas en la muestra) que contiene el agua, ya que sus valores son inversamente proporcionales a éstos últimos. Por lo tanto, debería esperarse que un agua con alto contenido de sólidos totales disueltos presente los problemas de sabor, la formación de escamas, dureza, efectos laxantes, y otros asociados con cada uno de los minerales. Tales aguas son, usualmente, corrosivas para las rejillas del pozo y otras partes de su estructura. Tomando en cuenta esta característica, se pueden calcular resistividades a partir de sólidos totales disueltos, o viceversa (Chávez, 1979) (CFE, 1983) (Gibson, 1974).